

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

"Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων σχεδιασμού υπόγειων ανατινάξεων"

Διπλωματική Εργασία

Χειμωνίδου Σ. Αικατερίνη



Εξεταστική Επιτροπή: Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (Επιβλέπων) Μιχαήλ Γαλετάκης, Επίκουρος καθηγητής Δρ, Κων/νος Κακλής

Χανιά, Σεπτέμβριος 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη των τεχνικών εκσκαφής υπογείων έργων τα τελευταία χρόνια είναι εντυπωσιακή. Ο κύριος στόχος στις υπόγειες ανατινάξεις, είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής προχώρησης ανά ανατίναξη και ταυτόχρονα η συγκράτηση του κόστους σε λογικά όρια. Για το λόγο αυτό εκτός των άλλων, κατά το σχεδιασμό πρέπει να γίνεται προσεκτικά η επιλογή του είδους της αρχικής κοπής (παράλληλη/υπό γωνία), αλλά και της χρήσης ελεγχόμενων μεθόδων ανατίναξης, ούτως ώστε να ληφθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία αναλυτική διερεύνηση των μεθόδων προεκσκαφής (αρχικής κοπής) για τη διάνοιξη υπογείων ανοιγμάτων και μια προσπάθεια σύγκρισης των μεθόδων αυτών αναφορικά με την αποτελεσματικότητά τους, αλλά και με κριτήριο το οικονομικό κόστος, αλλά και το κόστος του χρόνου εκτέλεσης.

Επίσης γίνεται αναλυτική αναφορά στις μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης και μια προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων που επιτυγχάνονται με την εφαρμογή τους σε υπόγειες εξορύξεις, σε σχέση με αυτά που λαμβάνονται από τη χρήση συμβατικών ανατινάξεων. Η σύγκριση γίνεται κυρίως αναφορικά με το βαθμό της υπέρθραυσης, αλλά και της ρωγμάτωσης του παραμένοντος πετρώματος.

Τέλος, στην εργασία αυτή γίνεται παράλληλα εκτενής αναφορά στις αρχές των υπογείων ανατινάξεων για τη διάνοιξη στοών και φρεάτων. Συγκεκριμένα αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα τις ανατίναξης, καθώς επίσης και τα στοιχεία σχεδιασμού μιας τέτοιας επιχείρησης.

Τελικά, συμπεραίνεται ότι οι παράλληλες κοπές υπερέχουν αυτών που η όρυξη των διατρημάτων είναι υπό γωνία, όμως η επιλογή της αρχικής κοπής αλλά και της χρήσης ή μη ελεγχόμενων μεθόδων ανατίναξης, εξαρτάται από τις επιτόπου συνθήκες και τις απαιτήσεις του ιδιοκτήτη του έργου αναφορικά με το συνολικό κόστος και την ποιότητα του αποτελέσματος της ανατίναξης.

'Blasting for underground construction purposes is a cutting tool, not a bombing operation'

Svanholm et al (1977)

προλογος

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η σύγκριση των διαφόρων αρχικών κοπών που χρησιμοποιούνται κατά την εκσκαφή υπογείων έργων με τη μέθοδο της διάτρησης και ανατίναξης. Επίσης παρουσιάζεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μιας συμβατικής ανατίναξης με αυτά των ελεγχόμενων ανατινάξεων που χρησιμοποιούνται στις υπόγειες εκσκαφές.

Με την ευκαιρία της συγγραφής της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη και τις θερμές ευχαριστίες μου στους γονείς μου Σταύρο και Μαριάννα και στην αδερφή μου Ελένη για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια της πολυετούς θητείας μου σε όλες της βαθμίδες της εκπαίδευσης. Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες και την αγάπη μου στους θείους μου Κώστα Γκαβαϊσέ, Πολιτικό Μηχανικό και Εύη Γκαβαϊσέ- Μπλάνα, Πολιτικό Μηχανικό, για τη βοήθεια και τη στήριξή τους.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Δρ, Ζαχαρία Αγιουτάντη, Καθηγητή και επιβλέποντα, για την επιλογή του θέματος, την άριστη συνεργασία που είχαμε, καθώς επίσης και για τη συμπαράσταση που μου παρείχε με τις συμβουλές του, αλλά και για τη διόρθωση της εργασίας αυτής. Ευχαριστώ επίσης τους Δρ, Μιχαήλ Γαλετάκη και Κων/νο Κακλή για το χρόνο που διέθεσαν για την διόρθωση και εξέταση της παρούσας εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω ακόμη σε φίλους και αγαπημένα πρόσωπα για τη συμπαράστασή τους και τις όμορφες στιγμές που περάσαμε όλα αυτά τα χρόνια: Στον Άρη (που έζησε τα ζόρια από κοντά και άντεξε), στην Έυα, στους Κώστα και Κώστα, στο Μάνο, στο Δημήτρη, στη Σουζάνα και (τελευταία και καλύτερη) στην Ελένη που έκανε τη ζωή μας πιο γλυκιά με τα «Όνειρα Γλυκά» της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΑΡΧΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΩΝ	6
2.1 ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	6
2.2 ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΙΣ ΓΙΑ ΟΡΥΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ/ΣΤΟΩΝ	
2.3 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΩΝ	
2.4 Δημιούργια ελευθερής επιφανείας	
2.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ	
2.5.1 Ιδιότητες πετρώματος	
2.5.2 Μέγεθος σήραγγας/στοάς	
2.5.3 Βάθος στοάς	
2.5.4 Παρέκκλιση διατρήματος	
2.6 Απόδοση υπογείας ανατινάξης	27
2.6.1 Προχώρηση	
2.6.2 Συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού – συντελεστής διάτρησης	
2.6.3 Διαταραχές στη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος	
2.6.4 Μετατόπιση, προφίλ σωρού απόθεσης και θραύση	
2.7 Σχεδιάσμος ανατινάξης	
2.7.1 Διάμετρος διατρημάτων	40
2.7.2 Μήκος διατρημάτων	
2.7.3 Αριθμός διατρημάτων	
2.7.4 Φορτίο και Απόσταση μεταζύ των διατρημάτων	
2./.5 Χρησιμοποιουμενη εκρηκτικη υλη	
2./.0 $2ειρα πυροοοτησης$	
2.8 ANATINAZEIS TIA OPYZH Φ PEA I Ω N	
2.8.1 Μεθοδος προσρολής κατά το ημισυ για διαμορφωση ραθμιδάς	49
$2.8.2 \Delta \pi \epsilon i \rho \epsilon i o \eta \varsigma \mu \epsilon \sigma 0 o 0 \varsigma$	
2.8.5 Μεσοοος προσρολης ολοκληρης της οιατομης	
3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΚΟΠΩΝ	
3.1 Еіхагогн	59
3.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ	60
3.2.1 Κωνοειδής ή σφηνοειδής τύπος	61
3.2.2 Σφυροειδής διάταξη	
3.2.3 Πυραμιδοειδής διάταζη	68
3.2.4 Ριπιδοειδής διάταζη	
3.3 ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΕΚΣΚΑΦΗΣ	75
3.3.1 Κυλινδρικές διατάζεις	
3.3.2 Διατάζεις πυκνής διάτρησης	
4. ΚΥΡΙΑ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	
4.1. Екагогн	95
4.2 Διατρηματα κυρίας εκσκαφής	97
4.3 Διατρηματά δαπέδου	101

4.4 ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΑ ΠΛΕΥΡΩΝ ΚΑΙ ΟΡΟΦΗΣ	
4.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ ΣΤΙΣ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΙΣ	
4.5.1 Μέθοδος πρότμησης	
4.5.2 Μέθοδος πυκνής διάτρησης	112
4.5.3 Μέθοδος λείων τοιγωμάτων	114
4.6 ΈΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΝΑΤ	ΊΝΑΞΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	119
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	129
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	

Αφιερώνεται,

Στους Γονείς μου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των υπόγειων ανοιγμάτων, τόσο στη μετάλλευση όσο και σε τεχνικά έργα, απαιτεί, σε μεγαλύτερο αριθμό κάθε μέρα, τη χρήση στοών, σηράγγων και φρεάτων. Τα τελευταία χρόνια η μηχανική εκσκαφή με τη χρήση συγκροτημάτων διάνοιξης σηράγγων και στοών έχει προοδεύσει σημαντικά, εξορύσσοντας πετρώματα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη πάνω από 250 MPa. Σε σκληρά πετρώματα τα συγκροτήματα διάνοιξης σηράγγων έχουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής και προσφέρουν σημαντικά οφέλη (υπό την προϋπόθεση ότι είναι χαμηλά σε φθοροποιά χαρακτηριστικά όπως η ύπαρξη χαλαζία) όπως: η διάτρηση χωρίς να θιγούν τα περιβάλλοντα πετρώματα, η ομαλή επιφάνεια κοπής που μειώνει την ανάγκη υποστήριξης και/ή την επένδυση με σκυρόδεμα, ο μικρότερος αριθμός προσωπικού, κ.λπ.

Ωστόσο, η εκσκαφή με τη χρήση εκρηκτικών είναι ακόμη ευρέως χρησιμοποιούμενη καθώς η προαναφερθείσα μέθοδος έχει κάποιες δυσκολίες (Jimeno et al., 1995):

1. Δύσκαμπτο σύστημα εργασίας καθώς οι τομείς πρέπει να είναι κυκλικοί.

 Το προς εκσκαφή έδαφος δεν πρέπει να παρουσιάζει σημαντικές παρεκκλίσεις ή γεωλογικές διαταραχές.

3. Οι καμπύλες πρέπει να είναι ακτίνας άνω των 300 m

4. Η αρχική εκσκαφή είναι δαπανηρή, και

5. Το προσωπικό πρέπει να είναι εξαιρετικά εξειδικευμένο.

Η θραύση πετρωμάτων με τη συμβατική μέθοδο (διάτρηση και ανατίναξη) δίνει λύση στα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα, διότι ακόμα και σε μεγάλες διατομές, η εκσκαφή μπορεί να γίνει σταδιακά. Είναι γεγονός ότι η εξέλιξη των τεχνικών στις υπόγειες ανατινάξεις είναι εντυπωσιακή τα τελευταία χρόνια. Η εμφάνιση εκρηκτικών όπως τα γαλακτώματα υψηλής ταχύτητας (τα οποία έχουν αντικαταστήσει αποτελεσματικά αυτά που βασίζονται στη νιτρογλυκερίνη) και των υψηλής απόδοσης διατρητικών εξοπλισμών, έχουν βοηθήσει δραστικά στην βελτίωση του ρυθμού προχώρησης και την ακρίβεια, με συνέπεια η αποδοτικότητα στην κατασκευή σηράγγων να έχει βελτιωθεί και σε όρους οικονομικούς και σε χρονικούς. Παράλληλα, το εναπομείναν πέτρωμα μπορεί να μείνει σε καλή κατάσταση χρησιμοποιώντας περιφερειακά διατρήματα, με χρήση ελεγχόμενων ανατινάξεων ή

1

τεχνικών πρότμησης, οι οποίες προσαρμόζονται καλύτερα στις λιθολογικές εναλλαγές του εδάφους, και απαιτούν λιγότερο χρόνο στη χρήση του μηχανολογικού εξοπλισμού, ο οποίος μπορεί να απασχοληθεί σε άλλες εργασίες (Sharma 2005, Jimeno et al. 1995).

Η χρήση της συμβατικής μεθόδου όρυξης είναι προτιμότερη για έργα σε ασταθείς συνθήκες εδάφους ή για έργα μεταβλητής διατομής. Συγκεκριμένα, η συμβατική μέθοδος διευκολύνει (ITA, 2009):

1. Τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα στο σχήμα της εκσκαφής

2. Την καλύτερη γνώση του εδάφους με τη χρήση συστηματικών δοκιμαστικών γεωτρήσεων στο τμήμα της σήραγγας/στοάς μπροστά από το μέτωπο

3. Τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην επιλογή της μεθόδου εκσκαφής, ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους

 Τη βελτιστοποίηση της αρχικής υποστήριξης με τη χρήση μεθόδων παρατήρησης σε ειδικές περιπτώσεις

5. Τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην επιλογή μεθόδων βοηθητικών κατασκευών, ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες

Η συμβατική μέθοδος είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη για (ΙΤΑ, 2009):

- 1. Δύσκολα εδάφη με ασταθείς εδαφικές συνθήκες
- 2. Έργα με εξαιρετικά μεταβλητό σχήμα διατομής
- 3. Έργα με μεγαλύτερο κίνδυνο εισροής υδάτων κάτω από υψηλή πίεση
- 4. Έργα με δύσκολη πρόσβαση
- 5. Μικρού μήκους σήραγγες/στοές

Επιπλέον, στις υπόγειες ανατινάξεις απαιτείται καλύτερη θραύση του πετρώματος σε σύγκριση με τις υπαίθριες, λόγω του περιορισμένου μεγέθους του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε αυτές τις περιπτώσεις και λόγω της δύσκολης προσβασιμότητας (Sharma, 2005). Επομένως, η απόλυτη πρόκληση για έναν μηχανικό ανατινάξεων είναι να παρέχει τον επιθυμητό θρυμματισμό με επαρκή προχώρηση και ταυτόχρονα να διατηρεί τις εδαφικές δονήσεις σε επίπεδο εντός των ορίων που επιτρέπει η νομοθεσία. Είναι ευθύνη των έμπειρων μηχανικών λοιπόν, να κάνουν τις κατάλληλες επιλογές σύμφωνα με την επιστήμη τους και την προσωπική τους εμπειρία, για μια ασφαλή και οικονομική κατασκευή σήραγγας ή στοάς.

Σε κάθε περίπτωση, ο βασικός κύκλος εργασιών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, αποτελείται από τις παρακάτω εργασίες (Jimeno et al., 1995):

- 1. Διάτρηση
- 2. Γόμωση
- 3. Ανατίναξη
- 4. Αερισμός
- 5. Απομάκρυνση χαλαρών σχηματισμών (αν χρειάζεται)
- 6. Φόρτωση και μεταφορά, και
- 7. Ετοιμασία επόμενου κύκλου



Σχήμα 1.1: Κύκλος εργασιών υπόγειας εκσκαφής με τη μέθοδο της διάτρησηςανατίναξης (Πηγή: Tamrock Corp.)

Σίγουρα στις υπόγειες εξορύξεις μια καλή ανατίναξη είναι το ίδιο σημαντική με την επιλογή της σωστής μορφής εκσκαφής που να προσαρμόζεται στο in situ εντατικό πεδίο, ή με το σχεδιασμό ενός σωστού συστήματος υποστήριξης της βραχόμαζας. Είναι λοιπόν αναγκαίο να τονιστούν οι συντελεστές που επηρεάζουν την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης με την τεχνική της διάτρησης και ανατίναξης.

Δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τις υπόγειες εξορύξεις είναι (Hoek and Brown, 1990) :

i. Η έκρηξη θα πρέπει να θραύσει το πέτρωμα αποτελεσματικά και οικονομικά και θα πρέπει να παραγάγει ένα καλά τεμαχισμένο σωρό πετρώματος ο οποίος θα μεταφέρεται, αποθηκεύεται και επεξεργάζεται εύκολα.

ii. Η βραχόμαζα που απομένει θα πρέπει να υποστεί τη μικρότερη δυνατή βλάβη,
ώστε να μειωθεί η ανάγκη ξεσκαρώματος (απομάκρυνσης χαλαρών σχηματισμών) και
υποστήριξης στο ελάχιστο.

Προφανώς αυτές οι δύο συγκρουόμενες απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν μόνο με προσεκτικά σχεδιασμένες συμβιβαστικές λύσεις κατά το σχεδιασμό μιας ανατίναξης.

Κατά συνέπεια, πριν από την όρυξη υπογείων έργων, πρέπει να καθορίζεται από το υπεύθυνο μηχανικό η μέθοδος, αφού πρώτα έχει καταρτιστεί ένα τεχνικό πρόγραμμα εργασιών στο οποίο θα έχουν ληφθεί υπόψη οι φυσικές ιδιότητες του πετρώματος, το απαιτούμενο μέγεθος της διατομής, ο διατρητικός εξοπλισμός και ο τύπος της εκρηκτικής ύλης, καθώς και οι κίνδυνοι από τις εδαφικές δονήσεις της ανατίναξης (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Στα Σχήματα 1.2 και 1.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας κακής και μιας καλής εφαρμογής της μεθόδου της διάτρησης και ανατίναξης για την εκσκαφή στοάς.



Σχήμα 1.2: Αποτέλεσμα κακής ανατίναξης: Μη λεία τοιχώματα και υπέρβαση της εξόρυξης (Hoek, 2006)



Σχήμα 1.3: Αποτέλεσμα καλής ανατίναξης: Λεία τοιχώματα, μη υπέρβαση της εξόρυξης. (Hoek, 2006)

2. ΑΡΧΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΩΝ

2.1 Βασική μηχανική εκρηκτικής θραύσης πετρώματος

Αναμφίβολα, οι ανατινάξεις πρέπει να γίνονται κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες και με τον κατάλληλο σχεδιασμό, η απόδοσή τους να είναι η μεγαλύτερη δυνατή. Για αυτό το λόγο, είναι σημαντική προϋπόθεση η γνώση του μηχανισμού με τον οποίο θραύεται ένα πέτρωμα υπό την επίδραση εκρηκτικών υλών.

Η αντοχή των πετρωμάτων σε θλίψη είναι μεγαλύτερη από την αντοχή τους σε κάμψη. Συνεπώς, ο πιο εύκολος τρόπος για να θραυστεί ένα πέτρωμα είναι να τεθεί σε καμπτική πίεση μεγαλύτερη από την τελική αντοχή του σε κάμψη (Sharma, 2005). Όταν το εκρηκτικό που περιέχεται σε διάτρημα πυροκροτείται, τα αέρια υψηλής πίεσης που παράγονται από την έκρηξη προσκρούουν στα τοιχώματα του διατρήματος και παράγεται ένα έντονο θλιπτικό κύμα που κινείται προς τα έξω στο πέτρωμα. Στα αμέσως πλησιέστερα τοιχώματα του διατρήματος οι τάσεις μπορεί να υπερβαίνουν την αντοχή του πετρώματος και να επιτυγχάνεται έτσι ο θρυμματισμός και η σύνθλιψή του. Εφόσον η ένταση των πιέσεων που προκαλούνται κατά την έκρηξη μειώνεται με μεγάλη ταχύτητα καθώς η απόσταση από το διάτρημα μεγαλώνει, η συμπεριφορά του πετρώματος κυμαίνεται από πλαστική παραμόρφωση σε ελαστική θραύση, και το κοκκομετρικό μέγεθος αυξάνεται με την απόσταση από τα τοιχώματα του διατρήματος (Hoek and Brown, 1990).

Έξω από τη ζώνη όπου υπερβαίνεται η αντοχή σε θλίψη του πετρώματος, θα σχηματιστεί μια ζώνη ακτινικών ρωγματώσεων εξαιτίας των συνισταμένων εφελκυστικών τάσεων του εντατικού πεδίου που προκαλείται από την έκρηξη.



Σχήμα 2.1: Εξιδανικευμένη εικόνα θραύσης από εκτόνωση εκρηκτικού σε διάτρημα (Πηγή: Hoek and Brown, 1990)

Αυτές οι ακτινικές ρωγματώσεις θα συνεχίσουν να επεκτείνονται ακτινικά, όσο οι εφαπτόμενες στις άκρες των ρωγμών εφελκυστικές τάσεις, υπερβαίνουν την αντοχή του πετρώματος. Στην ειδική περίπτωση όπου το φυσικό εντατικό πεδίο γύρω από ένα διάτρημα δεν είναι το ίδιο, η ανάπτυξη των ακτινικών ρωγμών δεν είναι συμμετρική. Οι ρωγμές που βρίσκονται στην κατεύθυνση της μεγαλύτερης κύριας τάσης τείνουν να αναπτυχθούν παράλληλα προς αυτή και έχουν πάντοτε μεγαλύτερο μήκος. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η εκλεκτική αυτή ανάπτυξη των ακτινικών ρωγμών σε μια ανατίναξη προς την διεύθυνση ενέργειας της μεγαλύτερης κύριας τάσης σ₁. Συνεπώς η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης στον χώρο της ανατίναξης επηρεάζει την γεωμετρία των ακτινικών ρωγμών γύρω από το διάτρημα. Οι Kutter και Fairhurst (1971) έχουν εκθέσει θεωρητικές και πειραματικές μελέτες σχετικά με το μήκος των ρωγμών σε ομοιογενή πετρώματα. Σε πραγματικές βραχόμαζες αυτές οι ρωγματώσεις θα επηρεαστούν από την ανισοτροπία του πετρώματος, από προϋπάρχουσες σχισμές καθώς και από την in situ κατάσταση του πετρώματος σε σχέση με τις πιέσεις (Hoek and Brown, 1990).

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η ρωγμάτωση γύρω από διάτρημα διαμέτρου 38 mm σε γρανίτη, γομωμένο με πλαστικό σωλήνα διαμέτρου 22 mm που περιέχει εκρηκτικό γαλάκτωμα (Kimulux 42). Η μεγαλύτερη σε μήκος ρωγμή είναι 45 cm.



Σχήμα 2.2: Ρωγμάτωση γύρω από διάτρημα διαμέτρου 38 mm σε γρανίτη (Persson et al., 1994)

Όταν το διάτρημα βρίσκεται κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί είτε από προηγούμενη ανατίναξη είτε από την ύπαρξη κενού (μη γομωμένου) διατρήματος, το σχήμα της θραύσης γύρω από την οπή επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την παρουσία αυτής της ελεύθερης επιφάνειας. Αυτό γιατί το κύμα της ακτινικής θλιπτικής πίεσης που κινείται προς τα έξω από το διάτρημα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, μετατρέπεται σε κύμα ανακλώμενης εφελκυστικής τάσης όταν συναντήσει ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό το κύμα εφελκυστικής τάσης κινείται από την ελεύθερη επιφάνεια προς τα πίσω στο διάτρημα και εκτός από την πρόκληση θρυμματισμού στην ελεύθερη επιφάνεια, μπορεί να μεταβάλλει το εντατικό πεδίο γύρω από το διάτρημα και να αλλάξει το σχήμα των ρωγματώσεων. Μια ανατίναξη πρέπει πάντοτε να πραγματοποιείται σε ελεύθερη επιφάνεια έτσι ώστε να επιτρέπει την διόγκωση του πετρώματος και να αποτρέπει το «πνίξιμο» ή «πάγωμα» της ανατίναξης (Hoek and Brown, 1990).



Σχήμα 2.3: Κύμα θλιπτικής πίεσης σε διάτρημα κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια (Olofsson, 1990)

Εκτός από της συνέπειες των δυναμικών τάσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, η πίεση των αερίων που παράγονται από την έκρηξη παίζει έναν επίσης σημαντικό ρόλο στη δημιουργία των ρωγματώσεων και στην περαιτέρω εξάπλωση των ρωγμών. Η πίεση των αερίων της έκρηξης είναι ζωτικής σημασίας σε τεχνικές όπως η πρότμηση (presplitting) και η εξομαλυμένη ανατίναξη (smooth blasting) όπου η ανάπτυξη των ρωγμών ενισχύεται προς συγκεκριμένη διεύθυνση. Επιπλέον η πίεση των αερίων ευθύνεται για την μετατόπιση του πετρώματος ώστε να παρέχεται επαρκής όγκος εκτόνωσης για τις επόμενες ανατινάξεις (Hoek and Brown, 1990). Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η αλληλουχία των σταδίων της θραύσης του πετρώματος εξαιτίας της ανατίναξης.



Σχήμα 2.4: Στάδια κατά την έκρηξη γομωμένου διατρήματος (Πηγή: Tatiya, 2004)

Ο Hagan (1977) έχει συμπεράνει ότι για ένα καλό αποτέλεσμα όσον αφορά τη θραύση του πετρώματος με εκρηκτικά, η κονιορτοποίηση του πετρώματος πρέπει να εξαλειφθεί και η έντονη ακτινική ρωγμάτωση να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση γομώσεων κατάλληλης γεωμετρίας και μεθόδους έναυσης που επιλέγονται βάσει των ιδιαίτερων δυναμικών τάσεων θραύσης του πετρώματος. Ένα σημαντικό ποσό ενέργειας (και λειτουργικής δαπάνης) μπορεί να ξοδευτεί όταν γομώσεις πυκνών και υψηλής ταχύτητας εκρηκτικών χρησιμοποιούνται σε αδύναμους και/ή σχετικά πορώδεις τύπους πετρώματος. Για να αυξηθεί η αποδοτικότητα των εκρήξεων μέσω βελτιώσεων στην αποτελεσματική θραύση, είναι απαραίτητο να προωθηθεί η γνώση :

1. Των κύριων μηχανισμών θραύσης του πετρώματος, και

 Των επιδράσεων των ιδιοτήτων των εκρηκτικών, των ιδιοτήτων του πετρώματος, της γεωμετρίας της ανατίναξης, της αλληλουχίας της έναυσης και των χρόνων καθυστέρησης σε τέτοιες διαδικασίες.

2.2 Ανατινάξεις για όρυξη σηράγγων/στοών

Υπάρχουν δύο λόγοι για να ορυχθεί υπόγεια μια σήραγγα ή στοά: η χρήση του ορυχθέντος χώρου για αποθήκευση ή μεταφορά, ή η χρήση του εξορυχθέντος υλικού. Και στις δύο περιπτώσεις η κατασκευή σηράγγων ή στοών αποτελεί σημαντικό κομμάτι της όλης επιχείρησης. Στις υπόγειες κατασκευές είναι απαραίτητο να αποκτηθεί πρόσβαση στην τοποθεσία του έργου με την όρυξη σηράγγων, όμως μία

σήραγγα μπορεί να έχει το δικό της σκοπό ως αγωγός για δρόμους, σιδηρόδρομους, δίκτυα αποχέτευσης και άλλες κοινωφελείς υπηρεσίες. Στα ορυχεία οι στοές χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για προπαρασκευαστικές εργασίες, καθώς επίσης και για εσωτερική επικοινωνία. Οι στοές μπορεί να είναι οριζόντιες ή παραοριζόντιες, όμως μπορεί να είναι και κεκλιμένου άξονα, εκτεινόμενες ανοδικά ή καθοδικά. Ο σωστός συνδυασμός σύγχρονου διατρητικού εξοπλισμού με εκρηκτικά τελευταίας τεχνολογίας μπορεί να αποφέρει μια υψηλής ποιότητας εκσκαφή, συνοδευμένη από χαμηλό συνολικό κόστος (Olofsson, 1990).

Είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί ότι ο διαχωρισμός μεταξύ σήραγγας και στοάς δεν είναι σαφής. Κατά τον Πολυχρονόπουλο (1979) στοά χαρακτηρίζεται (παρα)οριζόντιο άνοιγμα με διατομή έως 5m², ενώ σήραγγα χαρακτηρίζεται για μεγαλύτερες από αυτή διατομές. Σε άλλες περιπτώσεις η σήραγγα αναφέρεται ως κύριο (παρα)οριζόντιο υπόγειο άνοιγμα που συνδέεται με την επιφάνεια και με τα δύο άκρα, ενώ η στοά ως κύριο υπόγειο άνοιγμα που συνδέει την επιφάνεια με τα υπόγεια (Εξαδάκτυλος, 2006). Διεθνώς πάντως επικρατεί να χαρακτηρίζεται ως σήραγγα οριζόντια ή παραοριζόντια προσπέλαση κατασκευαστικού έργου ανεξαρτήτως μεγέθους, ενώ ως στοά χαρακτηρίζεται αποκλειστικά σε μεταλλευτικά έργα και πιο σπάνια σε κατασκευαστικά (Τσουτρέλης, 2001).

Οι τεχνικές εξόρυξης σηράγγων με τη μέθοδο της διάτρησης-ανατίναξης διακρίνονται στις παρακάτω μεθόδους ανάλογα με τη διατομή της εκσκαφής (Sharma, 2005):

Η προσβολή του πετρώματος ταυτόχρονα σε όλη τη διατομή της σήραγγας (full face method)

 Η προσβολή πρώτα του άνω τμήματος της σήραγγας και έπειτα του κάτω όπως στη μέθοδο των βαθμίδων με οριζόντια ή κάθετα διατρήματα (top heading and bench blasting)

3. Σε μεγάλης διατομής εκσκαφές, η προσβολή με πιλοτική στοά στο άνω μέρος της σήραγγας, και η διεύρυνσή της στη συνέχεια δεξιά και αριστερά, με την εξόρυξη του κάτω τμήματος με μέθοδο των βαθμίδων να ακολουθεί.

Για σήραγγες διατομής μικρότερης από 60 – 70 m², η προσβολή ταυτόχρονα σε όλη τη διατομή της σήραγγας δίνει μέγιστη αποδοτικότητα και οικονομία. Η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη σε σκληρά πετρώματα χωρίς πολλές ασυνέχειες, ενώ με καλές συνθήκες οροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μεγαλύτερες διατομές (Sharma, 2005).

Για μεσαίες διατομές πάνω από 70 m² υιοθετείται συνήθως η μέθοδος με προσβολή πρώτα του άνω τμήματος της σήραγγας και έπειτα του κάτω, με τη μέθοδο των βαθμίδων. Στη μέθοδο αυτή ορύσσεται το άνω τμήμα επί του συνολικού πλάτους, που αποτελεί το ένα τρίτο έως το μισό της τελικής διατομής της σήραγγας. Το κάτω τμήμα αφαιρείται αργότερα ως βαθμίδα (benching). Γενικά το πάνω τμήμα ορύσσεται σε όλο το μήκος της σήραγγας πριν ξεκινήσει η όρυξη του κάτω μέρους, κάτι που βοηθάει στον καλύτερο αερισμό του χώρου εργασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις το κάτω μέρος ορύσσεται ταυτόχρονα με το πάνω, αλλά σε διαφορετική θέση μέσα στη σήραγγα (Sharma, 2005).

Για την εκσκαφή σηράγγων πολύ μεγάλων διατομών απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός σταδίων. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές της μεθόδου, όπως η διάνοιξη πιλοτικής στοάς στο κέντρο που ακολουθείται από τη διάνοιξη δύο πλευρικών στοών, και μετά όρυξη με βαθμίδες σε ένα, δύο ή τρία στάδια (Sharma, 2005).

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται οι μέθοδοι εξόρυξης ανάλογα με τη διατομή της σήραγγας ή της στοάς, όπως περιγράφονται παραπάνω.



Σχήμα 2.5: Διαδοχή των σταδίων εκσκαφής σήραγγας ή στοάς, ανάλογα με τη διάμετρο της διατομής της (Πηγή: Sharma, 2005)

Εξάλλου, ένας τεχνικός παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής μιας σήραγγας είναι η ευστάθεια του μετώπου. Όταν οι τάσεις στο πέτρωμα που περιβάλλει τη σήραγγα υπερβαίνουν την αντοχή του πετρώματος, μια ζώνη διαταραχής ή μια «πλαστική» ζώνη σχηματίζεται γύρω από τη σήραγγα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6, όταν η ακτίνα της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα υπερβαίνει στο διπλάσιο την ακτίνα της σήραγγας, η ζώνη διαταραχής γύρω από τη σήραγγα αλληλεπιδρά με το διαταραγμένο πέτρωμα μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, σχηματίζοντας μια ενιαία ημι-ελλειψοειδούς σχήματος πλαστική ζώνη. Αυτή η τρισδιάστατη πλαστική ζώνη σταθεροποιείται δυσκολότερα όσο ο λόγος των τάσεων και της αντοχής του πετρώματος αυξάνεται. Η σταθεροποίηση της πλαστικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής επιτυγχάνεται γενικά με την τοποθέτηση αγκυρίων τύπου fiberglass παράλληλα στον άξονα της σήραγγας (Σχήμα 2.7). Ο λόγος που χρησιμοποιούνται τέτοια αγκύρια είναι ότι μπορούν να κοπούν καθώς η σήραγγα απορχωράει, και δεν καταστρέφουν τους ιμάντες μεταφοράς στο σύστημα διάθεσης απορριμμάτων (Hoek et al, 2008).



Σχήμα 2.6: α) Πλαστική ζώνη διαταραχής με μέγιστη ακτίνα μικρότερη από το διπλάσιο της ακτίνας της στοάς. Η ζώνη διαταραχής στα τοιχώματα δεν αλληλεπιδρά με αυτή του μετώπου, β) Πλαστική ζώνη διαταραχής με μέγιστη ακτίνα μεγαλύτερη από το διπλάσιο της ακτίνας της στοάς. Η ζώνη διαταραχής στα τοιχώματα αλληλεπιδρά με αυτή του μετώπου (Hoek et al, 2008)



Σχήμα 2.7: Εκσκαφή άνω τμήματος σήραγγας με τη μέθοδο των δύο φάσεων. Το μέτωπο υποστηρίζεται με τη χρήση αγκυρίων τύπου fiberglass (Hoek, 2000)

Επίσης, πρακτικοί παράγοντες που έχουν να κάνουν με το μέγεθος της σήραγγας, τη διαθεσιμότητα εξειδικευμένου εξοπλισμού που απαιτείται για την εγκατάσταση της προ-ενίσχυσης, την εμπειρία του κατασκευαστή και την προτίμηση του ιδιοκτήτη, παίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην επιλογή της μεθόδου εκσκαφής.

Τα τελευταία χρόνια κατά τη διάνοιξη σηράγγων με την τεχνική της διάτρησης και ανατίναξης άρχισε να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο πώς επιδρούν στο περιβάλλον του χώρου εξόρυξης πέτρωμα οι περιμετρικές ανατινάξεις, ώστε να αποφευχθούν οι ρωγματώσεις (Τσουτρέλης, 2001). Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με ειδικές τεχνικές ανατίναξης στις οποίες γίνεται πιο εκτενής αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

2.3 Ονοματολογία και διάταξη διατρημάτων

Τα διατρήματα που ορύσσονται κατά την κατασκευή μιας σήραγγας ή στοάς με διάτρηση και ανατίναξη τοποθετούνται σε συγκεκριμένη διάταξη. Συνήθως χρειάζονται 1,5 με 2,5 διατρήματα ανά 1,0 m² διατομής σήραγγας ή στοάς (Σχήμα 2.8). Ο αριθμός αυτός μπορεί να διπλασιαστεί για πολύ σκληρά πετρώματα ή για μικρές διατομές. Το πλήθος των διατρημάτων, καθώς επίσης και το βάθος, η διάμετρος και η απόσταση μεταξύ τους, είναι ανάλογα με τη γόμωση του πυθμένα (Πολυχρονόπουλος, 1979).



Σχήμα 2.8: Ο αριθμός των διατρημάτων συναρτήσει της διατομής της σήραγγας ή στοάς, για διάφορες διαμέτρους διατρημάτων (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Η διάταξη των διατρημάτων μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις ομάδες (Σχήμα 2.9):

Διατρήματα προεκσκαφής ή αρχικής κοπής (cut holes): Αυτά είναι τα πρώτα που ορύσσονται, έτσι ώστε να ελαττωθεί η τάση του πετρώματος. Είναι επίσης και τα πρώτα που πυροδοτούνται, με σκοπό τη δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας για την έναυση της επόμενης ομάδας διατρημάτων. Καθώς τα διατρήματα της αρχικής κοπής

είναι αυτά που δημιουργούν το πρώτο άνοιγμα στο μέτωπο, είναι κυρίως υπεύθυνα για το βάθος της προχώρησης. Ο Πολυχρονόπουλος (1979) και οι Jimeno et al., (1995) ξεχωρίζουν εδώ μια υποομάδα, αυτή των βοηθητικών διατρημάτων (cut spreader) τα οποία βοηθούν στην διεύρυνση της προεκσκαφής.

Διατρήματα κύριας εκσκαφής (stoping holes/enlarger holes/easers): Τα διατρήματα της ομάδας αυτής τοποθετούνται γύρω από αυτά της αρχικής κοπής σε δύο ή και περισσότερους δακτυλίους, ανάλογα με το μέγεθος της διατομής της σήραγγας ή της στοάς (Σχήμα 2.10). Εκρήγνυνται διαδοχικά, έτσι ώστε να μεγαλώνει σταδιακά το μέγεθος της εξορυγμένης διατομής. Κατά τους Jimeno et al. (1995) και τον Πολυχρονόπουλο (1979) μπορούν να συγκριθούν γεωμετρικά με τη διάταξη που χρησιμοποιείται για την εξόρυξη κατά βαθμίδες. Η διαφορά είναι ότι ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού είναι 4 με 10 φορές μεγαλύτερος.



Σχήμα 2.9: Ομάδες διατρημάτων στη διατομή σήραγγας ή στοάς, με διαφορετικές συνθήκες ανατίναξής και διαφορετικούς χρόνους έναυσης (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

Διατρήματα περιμετρικά ή λειάνσεως (trimmers/contour holes/perimeter holes): Τα περιμετρικά διατρήματα τοποθετούνται γύρω από αυτά της κύριας εκσκαφής, σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και με διεύθυνση προς το εσωτερικό της βραχόμαζας και κλίση προς τα έξω (look out angle), έτσι ώστε να δημιουργείται χώρος για το κοπτικό άκρο του διατρητικού εξοπλισμού (Σχήμα 2.11). Κατά τον Πολυχρονόπουλο (1979) ονομάζονται και διατρήματα διαμορφώσεως της διατομής της σήραγγας, αφού είναι αυτά που καθορίζουν το τελικό σχήμα της σήραγγας ή της στοάς. Διακρίνονται σε τρεις υποομάδες: τα διατρήματα οροφής (roof holes), τα πλευρικά διατρήματα (wall holes) ή διατρήματα παρειών όπως τα αναφέρει ο Τσουτρέλης (2001) και τέλος τα διατρήματα δαπέδου (lifters/floor holes) που συνήθως εκρήγνυνται τελευταία.



Σχήμα 2.10: Διάταξη διατρημάτων κύριας εκσκαφής (Πολυχρονόπουλος, 1979)



Σχήμα 2.11: Περιμετρικά διατρήματα υπό κλίση (Atlas Copco, 2003)

2.4 Δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας

Σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις όπου εφαρμόζεται ανατίναξη βαθμίδων, μια ελεύθερη επιφάνεια (τουλάχιστον) είναι συνήθως διαθέσιμη, αφού η έκρηξη ξεκινά από τα διατρήματα που βρίσκονται πλησιέστερα στην επιφάνεια που δημιουργήθηκε από την προηγούμενη ανατίναξη. Σε μια τέτοια ανατίναξη προσεκτικά σχεδιασμένη, κάθε σειρά διατρημάτων μετατοπίζει μακριά το πέτρωμα, δημιουργώντας μια καινούρια ελεύθερη επιφάνεια για την νέα σειρά διατρημάτων που θα εκραγεί.

Σε μια επιχείρηση ανατίναξης για την όρυξη υπόγειας διόδου (στοά, σήραγγα, φρέαρ) δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια παράλληλη στον άξονα των διατρημάτων, αφού αυτά ορύσσονται παράλληλα στον άξονα της διόδου. Ως εκ τούτου ένα βασικό πρώτο βήμα σε μια τέτοια ανατίναξη είναι η δημιουργία αρχικής κοπής (Hoek and Brown, 1990). Η αρχική κοπή, που πυροδοτείται πρώτη όπως έχει αναφερθεί παραπάνω για να δημιουργηθεί ελεύθερη επιφάνεια, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους οι οποίοι θα εξεταστούν λεπτομερώς σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ανατίναξης

Οι παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ανατίναξης για την όρυξη σήραγγας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω ομάδες (Singh and Goel, 2006):

1. Μη ελεγχόμενες: Ιδιότητες πετρώματος

Ημι-ελεγχόμενες: (α) Γεωμετρία σήραγγας

(β) Συντελεστές λειτουργίας

 Ελεγχόμενες: Παράμετροι του σχεδίου ανατίναξης συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων εκρηκτικών.

Στο Σχήμα 2.12 δίνονται συνοπτικά τα προβλήματα που συναντώνται πιο συχνά κατά τη θραύση με εκρηκτικά και παράγοντες που μπορούν να ρυθμιστούν.



Σχήμα 2.12: Σύνοψη των συχνότερα εμφανιζόμενων προβλημάτων κατά τη θραύση με ανατίναξη και μεταβλητοί παράγοντες (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

2.5.1 Ιδιότητες πετρώματος

Ένα πέτρωμα αποτελείται από ετερογενές υλικό, γεγονός που σπάνια λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας ανατίναξης. Στην πραγματικότητα όμως, το αποτέλεσμα της ανατίναξης σε ένα πέτρωμα επηρεάζεται περισσότερο από τις ιδιότητες του πετρώματος παρά από άλλες μεταβλητές (Hagan, 1995). Τα περισσότερα πετρώματα περιέχουν μια ποικιλία ασυνεχειών και ρωγμών. Οι ασυνέχειες είναι οι πιο αδύναμοι σύνδεσμοι μέσα σε μια βραχόμαζα. Για την ελαχιστοποίηση των βλαβών στο πέτρωμα εξαιτίας της ανατίναξης, είναι σημαντικό να εξεταστεί ο ρόλος που παίζουν οι ιδιότητες της βραχόμαζας στην παραγωγή των βλαβών αυτών στην περίμετρο μιας εκσκαφής (Singh and Xavier, 2005).

Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος που επιδρούν στην ανατίναξη είναι (Singh and Goel, 2006):

- 1. Η αντοχή του πετρώματος
- 2. Η ελαστικότητα
- 3. Το πορώδες
- 4. Η κοκκομετρία και η ορυκτολογική σύνθεση
- 5. Οι τεκτονικές ασυνέχειες
- Οι γεωλογικές εναλλαγές
- 7. Το εντατικό πεδίο του περιβάλλοντος χώρου

Καθώς τα διαστήματα ανάμεσα στις στρωματώσεις, τις λιθοκλάσεις (ρωγμές) και τις λοιπές τεκτονικές ασυνέχειες μειώνονται, η σημασία της αντοχής του υλικού από το οποίο αποτελείται το πέτρωμα μειώνεται επίσης, ενώ αυξάνεται αυτή της ολικής αντοχής της βραχόμαζας. Οι εκρήξεις χρειάζεται να δημιουργήσουν πολλές νέες ρωγματώσεις στη μάζα ενός πετρώματος με αραιή εμφάνιση ασυνεχειών. Από την άλλη μεριά, σε ένα πιο πυκνών ασυνεχειών πέτρωμα δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία νέων ρωγμών και ο θρυμματισμός επιτυγχάνεται από την πίεση των αερίων της έκρηξης η οποία «ανοίγει» τις ασυνέχειες, μετασχηματίζοντας μια ενιαία βραχόμαζα σε ξεχωριστά χαλαρά τεμάχια (Singh and Goel, 2006).

Ένας άλλος παράγοντας σε σχέση με τις ασυνέχειες σε ένα πέτρωμα είναι ο προσανατολισμός τους. Η κλίση τους έχει σημαντική επίδραση στην περίμετρο της εκσκαφής, καθώς επηρεάζει την εξασθένηση του παραγόμενου θλιπτικού κύματος. Η εξασθένηση του κύματος που μεταδίδεται μέσα από τις ασυνέχειες, εξαρτάται από τη γωνία προσπτώσεώς του στην επιφάνειά τους. Η εξασθένηση είναι ελάχιστη όταν η γωνία προσπτώσεως είναι παράλληλη ή κάθετη στο μέτωπο εκσκαφής, και αυξάνεται στο μέγιστο όταν η γωνία είναι ανάμεσα στις 15° με 45°. Αυτό οδηγεί στην εισήγηση ότι η ρωγμή προχωρά με ελάχιστη εξασθένηση, όταν η σχετική γωνία των ασυνεχειών σε σχέση με την περίμετρο της εκσκαφής είναι παράλληλη, σχεδόν παράλληλη ή κάθετη. Για διαφορετικές κλίσεις η εξασθένηση του κύματος αυξάνεται σημαντικά και ως εκ τούτου ο έλεγχος της περιμέτρου είναι πιο δύσκολος (Singh and Xavier, 2004).

Κατά τη διάρκεια μικρής κλίμακας πειραματικών ανατινάξεων, προσομοιώθηκαν ασυνέχειες διαφόρων κλίσεων ανάμεσα στα διατρήματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13 η μεγαλύτερη υπέρθραυση (overbreak) παρατηρήθηκε στην περίπτωση δειγμάτων με κλίση ασυνεχειών 45°.



Σχήμα 2.13: Το ποσοστό της υπέρθραυσης για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (Πηγή: Singh and Xavier, 2004)

Οι Worsey et al. (1981) έχουν συμπεράνει από παρόμοια πειράματα και παρατηρήσεις, ότι η παρουσία ασυνεχειών σε γωνία μικρότερη των 60° με την επιθυμητή περίμετρο της εκσκαφής έχει αντίθετο αποτέλεσμα στην έκβαση ελεγχόμενων ανατινάξεων. Αν η κλίση των ασυνεχειών είναι μικρότερη από 15°, η χρήση ελεγχόμενης ανατίναξης δεν επιφέρει καμία βελτίωση σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο (Singh and Xavier, 2004). Μια ακόμη σημαντική παράμετρος είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες. Η ύπαρξη υδάτων στο πέτρωμα έχει τις παρακάτω επιδράσεις στη βραχόμαζα (Singh and Xavier, 2004):

Μείωση των αντοχών σε θλίψη και εφελκυσμό του πετρώματος, καθώς η τριβή μεταξύ των κόκκων είναι χαμηλότερη.

Μείωση της εξασθένησης του κρουστικού κύματος και συνεπώς, αύξηση του βαθμού της θραύσης του πετρώματος.

Ελάττωση της μοριακής έλξης καθώς και της τριβής μεταξύ των ασυνεχειών.

Ασυνέχειες που έχουν πληρωθεί με νερό επιτρέπουν τη διέλευση των κρουστικών κυμάτων χωρίς να υπάρχει θρυμματισμός. Όταν όμως επιδρούν τάσεις στη βραχόμαζα, το νερό κινητοποιείται και συμπεριφέρεται ως σφήνα, κάτι που μπορεί να προκαλέσει υπέρθραυση.

Επιπλέον, η παρουσία νερού μέσα στα διατρήματα καταλαμβάνει τον αέρα που λειτουργεί ως αποσυνδετικός παράγοντας με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα επίπεδα των εδαφικών δονήσεων (Singh and Xavier, 2004).

Οι Johansen και Mathiesen (2000) αναφέρουν και την σεισμική ταχύτητα (ακουστική ταχύτητα), ως ένα ακόμη χαρακτηριστικό του πετρώματος που επηρεάζει το αποτέλεσμα της ανατίναξης. Η ταχύτητα διάδοσης του κρουστικού παλμού στα διάφορα είδη πετρωμάτων ποικίλει από 1500 έως 6000 m/s. Σκληρά πετρώματα με υψηλή σεισμική ταχύτητα είναι πιο εύκολο να ανατιναχθούν, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται εκρηκτικά υψηλής ταχύτητας έκρηξης. Σύμφωνα με τον Αγιουτάντη (2007) η βιομηχανία σήμερα χρησιμοποιεί εκρηκτικά που η ταχύτητα έκρηξής τους ξεκινά από 1500 m/s και φτάνει και τα 7600 m/s. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η πυκνότητα και σεισμική ταχύτητα για διάφορα είδη πετρωμάτων.

Η αποτελεσματικότητα της ανατίναξης επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από άλλες ιδιότητες του πετρώματος όπως οι εσωτερικές τριβές, το πορώδες και η κοκκομετρία. Οι Jorgenson και Chung (1987) και ο Singh (1991) είναι της γνώμης ότι τα αποτελέσματα της έκρηξης επηρεάζονται άμεσα από την ολική αντοχή του πετρώματος. Οι Chakraborty et al. (1998b) εισηγούνται η κατάταξη της αντοχής που βασίζεται σε αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη, να συσχετίζεται με την ειδική κατανάλωση εκρηκτικού. Ενδιαφέρον είναι το γεγονός, ότι ο βαθμός που η αντοχή επηρεάζει την ειδική κατανάλωση εκρηκτικού είναι σχετικώς χαμηλότερος σε υψηλές τιμές αντοχών (Singh and Goel, 2006).

22

Τύπος πετρώματος	Πυκνότητα	Σεισμική ταχύτητα
	(kg/dm ³)	(m/s)
Γρανίτης	2,7-2,8	4500-6000
Γνεύσιος	2,5-2,6	4000-6000
Ασβεστόλιθος	2,4-2,7	3000-4500
Δολομίτης	2,5-2,6	4500-5000
Ψαμμίτης	1,8-2,0	1500-2000
Πηλίτης	2,5-2,7	4000-5000
Μάρμαρο	2,8-3,0	6000-7000
Διαβάσης	2,8-3,1	4000-5000

Πίνακας 2.1: Σεισμική ταχύτητα διαφόρων τύπων πετρώματος (Πηγή: Johansen and Mathiesen, 2000)

2.5.2 Μέγεθος σήραγγας/στοάς

Η ειδική γόμωση και η ειδική διάτρηση σε μια ανατίναξη σήραγγας είναι αντιστρόφως ανάλογα της διατομής της (Σχήμα 2.14 και 2.15). Είναι φανερό από τα διαγράμματα, ότι ο ρυθμός μείωσης στα αποτελέσματα αυτά είναι απότομος για μικρές σήραγγες έως 10 m² και εντελώς ήπιος για μεγάλα ανοίγματα που ξεπερνούν σε μέγεθος διατομής τα 35 m². Με βάση τους συντελεστές κατανάλωσης και διάτρησης, οι σήραγγες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη διατομή τους, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.2, όπου δίνονται στην πρώτη στήλη οι διατομές, στη δεύτερη ο τύπος της σήραγγας ή της στοάς σε σχέση με το μέγεθός της και στην τρίτη στήλη οι προβλεπόμενοι συντελεστές διάτρησης και κατανάλωσης εκρηκτικού (Singh and Goel, 2006).



Σχήμα 2.14: Ο συντελεστής γόμωσης συναρτήσει της διατομής της στοάς, όπου d η διάμετρος του διατρήματος (Πηγή: Olofsson, 1988)



Σχήμα 2.15: Ο συντελεστής διάτρησης συναρτήσει της διατομής της στοάς, όπου d η διάμετρος του διατρήματος (Πηγή: Olofsson, 1988)

A/A	Διατομή (m²)	Τύπος	Προβλεπόμενοι συντελεστές
			κατανάλωσης και διάτρησης
1	<15	Μικρή	Υψηλοί
2	15-35	Μέση	Μέτριοι
3	>35	Μεγάλη	Χαμηλοί

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση κατά μέγεθος σηράγγων /στοών (Πηγή: Singh and Goel, 2006)

2.5.3 Βάθος στοάς

Άλλη μία παράμετρος που επηρεάζει το αποτέλεσμα της ανατίναξης είναι και το βάθος στο οποίο πραγματοποιείται η εξόρυξη της στοάς, σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους.

Αυτό συμβαίνει γιατί οι βραχόμαζες σε μεγάλα βάθη βρίσκονται υπό την επίδραση μεγάλων πιέσεων. Κάτι που πρέπει να ξεπεραστεί με την αύξηση της ενέργειας της έκρηξης, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική θραύση. Οι Calder και Bauer (1983) μελέτησαν την in situ πίεση για το σχεδιασμό της διάταξης των διατρημάτων στη μέθοδο της πρότμησης (pre-splitting), ενώ ο Chakraborty (2002) παρατήρησε στα ορυχεία τού Tandsi στη Ινδία ότι οι απόδοση των ανατινάξεων δεν έδειχνε καμιά σημαντική διαφοροποίηση με την αύξηση της επιβάρυνσης μέχρι ένα μέσο βάθος 236 m (Singh and Goel, 2006).

2.5.4 Παρέκκλιση διατρήματος

Ο Kihlstrom (1973) αναφέρει ότι η αποδοτικότητα μιας ανατίναξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων μπορεί να μειωθεί κατά 50-75%, εξαιτίας των αποκλίσεων των διατρημάτων που οδηγούν σε μικρότερη προχώρηση της εκσκαφής.

Η παρέκκλιση ενός διατρήματος από τον ιδανικό άξονα διάτρησης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις ομάδες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.16 (Jimeno et al., 1995) :

Η πρώτη μορφή παρέκκλισης προκαλείται από δομικές ιδιότητες του πετρώματος, όπως είναι η σχιστότητα, οι ρωγματώσεις, μεγάλες ασυνέχειες γεμισμένες με μαλακά υλικά, οι λιθολογικές εναλλαγές, κλπ. Αυτού του είδους οι παρεκκλίσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές όταν η διεύθυνση της διάτρησης είναι πλάγια σε αυτές τις εμφανίσεις.

Η δεύτερη μορφή που είναι και η πιο συνηθισμένη έχει να κάνει με λάθη στο σημείο έναρξης της διάτρησης και την ευθυγράμμιση. Όταν είναι λάθος το σημείο έναρξης της διάτρησης είναι συχνές οι αποκλίσεις πάνω από 10 cm ή συνήθως περίπου όσο η διάμετρος του διατρήματος. Λάθη ευθυγράμμισης προκαλούνται συνήθως από ακατάλληλη ρύθμιση του μηχανισμού προώθησης.

Η τρίτη μορφή παρατηρείται όταν η διάμετρος του κοπτικού άκρου είναι μεγαλύτερη από το διατρητικό στέλεχος και συμβαίνει εξαιτίας της έλλειψης αντίστασης στην κάμψη της διατρητικής στήλης και της πρόωρης φθοράς της.



Σχήμα 2.16: Παρέκκλιση διατρήματος και λάθη κατά τη διάτρηση (Jimeno et al., 1995)

Κατά τους Singh και Goel (2006) οι παράμετροι που οδηγούν σε απόκλιση του διατρήματος από τον βέλτιστο άξονα διάτρησης είναι:

1. Παράμετροι διατρημάτων: α) η διάμετρος, β) το μήκος, γ) η κλίση

26

 Διατρητικός εξοπλισμός: α) η κατάσταση και ο τύπος του διατρητικού μηχανήματος, β) η κατάσταση του διατρητικού στελέχους και των ενώσεων και γ) η κατάσταση, ο τύπος και το σχήμα του κοπτικού άκρου

 Λειτουργικοί παράμετροι της διάτρησης: α) η προωστική ισχύς και ροπή στρέψης, β) ο ρυθμός διείσδυσης, γ) η ταχύτητα περιστροφής, και δ) το μέσο ψύξης και αποκομιδής των θρυμμάτων

4. Χαρακτηριστικά πετρώματος: οι μεταβολές σε δομή και αντοχή

 Ικανότητες χειριστή: α) εκπαίδευση, β) εμπειρία, γ) επιδεξιότητα και δ) προσοχή

Η απόκλιση των διατρημάτων είναι εξαιρετικά επιζήμια στην απόδοση της ανατίναξης, ιδιαιτέρως για μικρές σήραγγες/στοές. Οι Chakraborty et al. (1998b) θεώρησαν την απόκλιση ως συνάρτηση του μήκους του διατρήματος για την πρόβλεψη του συντελεστή κατανάλωσης του εκρηκτικού και του συντελεστή διάτρησης σε μικρές στοές, με χρήση αρχικής κοπής παράλληλης διάταξης, καθώς και διάταξης υπό γωνία.

2.6 Απόδοση υπόγειας ανατίναξης

Η απόδοση μιας υπόγειας ανατίναξης εκτιμάται γενικά με τη βοήθεια μίας ή περισσοτέρων από τις παρακάτω παραμέτρους (Singh and Goel, 2006) :

Προχώρηση (pull out), εκφρασμένη σε ποσοστό επί του βάθους διάτρησης.

Συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού (kg εκρηκτικού/m³ εξορυχθέντος πετρώματος ή kg εκρηκτικού/tons εξορυχθέντος πετρώματος).

Ειδική διάτρηση (m διάτρησης/m³ εξορυχθέντος πετρώματος ή m διάτρησης/tons εξορυχθέντος πετρώματος) ή συντελεστής διάτρησης ή συντελεστής καψυλλίων (αριθμός διατρημάτων/ m³ ή αριθμός διατρημάτων/tons εξορυχθέντος πετρώματος).

Διαταραχές στη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος εξαιτίας της έκρηξης (λήψη δοκιμίων, τομογραφία) και η υπέρθραυση/υπόθραυση του (το πηλίκο της διατομής του έργου που εξορύχθηκε προς την συμβατική προβλεπόμενη διατομή του).

Όπως δείχνει και το Σχήμα 2.17, κατά την όρυξη των περιμετρικών διατρημάτων πρέπει πάντα να προκαλείται υπέρθραυση μικρής κλίμακας, έτσι ώστε να δημιουργείται χώρος για τον διατρητικό εξοπλισμό (Τσουτρέλης, 2001).

27



Σχήμα 2.17: Υπέρθραυση του πετρώματος για τη δημιουργία χώρου για τον εξοπλισμό διάτρησης των περιμετρικών διατρημάτων (*Γωνία εκτροπής 3° δίνει παρέκκλιση 5cm/m διατρήματος) (Τσουτρέλης, 2001)

2.6.1 Προχώρηση

Η προχώρηση ανά ανατίναξη εκφράζεται επί τοις εκατό σε σχέση με το διατρηθέν μήκος και είναι μια σημαντική παράμετρος στις υπόγειες ανατινάξεις, καθώς αυτό που συνήθως επιθυμεί ένας μηχανικός σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ο υψηλός ρυθμός εκσκαφής.

Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο οι επιλογές είναι δύο. Η πρώτη είναι να αυξηθεί το βάθος της προχώρησης ανά ανατίναξη, κάτι που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε σχέση με τον έλεγχο των τοιχωμάτων αν το πέτρωμα δεν είναι υψηλής αντοχής, εκτός αν εφαρμόζεται μέθοδος απαλής ανατινάξεως. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να κερδηθεί πολύς χρόνος, καθώς ο αριθμός των ανατινάξεων μειώνεται. Η δεύτερη επιλογή βασίζεται σε μικρότερες προχωρήσεις ανά ανατίναξη, με μικρότερους όμως χρόνους των κύκλων εργασίας. Αυτή η επιλογή προτιμάται σε περιπτώσεις αδύναμων βραχομαζών και δίνει πολύ καλή απόδοση όσον αφορά την προχώρηση.

Η επιλογή της επιθυμητής προχώρησης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του πετρώματος, το μέγεθος της διατομής της εκσκαφής, το σύστημα υποστήριξης και την ποιότητα της ανατίναξης. Αυτό όμως που συνήθως λαμβάνεται περισσότερο υπόψη είναι ο διαθέσιμος διατρητικός εξοπλισμός (Singh and Goel, 2006). Στο Σχήμα 2.18 δίνεται το βάθος της προχώρησης για διάφορες διατομές στοών από τον Γερμανό ερευνητή Ziegler (1985).



Σχήμα 2.18: Βάθος προχώρησης συναρτήσει της διατομής της στοάς (Singh and Goel, 2006)

2.6.2 Συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού – συντελεστής διάτρησης

Η ποσότητα του εκρηκτικού που είναι απαραίτητη για τη θραύση 1 m³ ή 1 t πετρώματος λέγεται συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού ή ειδική γόμωση. Σύμφωνα με αρκετούς ειδικούς, αυτός ο παράγοντας δεν είναι ο καλύτερος ούτε ο μόνος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό μιας ανατίναξης, εκτός αν αφορά πρότυπα εκρηκτικά ή εκφράζεται ως ενεργειακή κατανάλωση, κυρίως γιατί η χωρική κατανομή της γόμωσης του εκρηκτικού μέσα στη βραχόμαζα έχει μεγάλη επιρροή στα αποτελέσματα της ανατίναξης (Jimeno et al., 1995).

Ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού μιας ανατίναξης αυξάνεται από (Jimeno et al., 1995) :

Την αύξηση της διαμέτρου των διατρημάτων, την αντοχή του πετρώματος και το βαθμό θραύσης του, την επιθυμητή μετατόπιση και διόγκωση.

Την κακή κατανομή της γόμωσης, τη χαμηλή αντίσταση στην εκτίναξη της επιγόμωσης, την παρουσία κοιλώματος, την παρουσία διπλανής ελεύθερης επιφάνειας
ή με την μεσολάβηση του θραυσμένου πετρώματος, την ακατάλληλη αναλογία μήκους/πλάτους και τέλος, τους αναποτελεσματικούς χρόνους καθυστέρησης κατά την έναυση.

Όταν χρησιμοποιούνται διατρήματα παράλληλα στην ελεύθερη επιφάνεια και ισόπλευρες τριγωνικές διατάξεις, με διαδοχικές εναύσεις σε κατάλληλους χρόνους, οι συντελεστές κατανάλωσης του εκρηκτικού θα είναι χαμηλότεροι. Όταν όμως η ειδική γόμωση είναι υψηλή, εκτός από το ότι δίνει καλή θραύση, μετατόπιση και διόγκωση του πετρώματος, βοηθά στο να επιτευχθεί το βέλτιστο κόστος - αποτελεσματικότητα της σειράς εργασιών (διάτρηση, ανατίναξη, φόρτωση, μεταφορά, δευτερογενής θραύση), κάτι το οποίο φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 2.19 (Jimeno et al., 1995).



Σχήμα 2.19: Μείωση του κόστους λειτουργίας σε συνάρτηση με τον συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικού (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

Συντελεστής διάτρησης ή ειδική διάτρηση ορίζεται ο όγκος των διατρημάτων ή το συνολικό μήκος διάτρησης ανά όγκο εξορυχθέντος πετρώματος. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται από τους Jimeno et al. (1995) για τον υπολογισμό του συντελεστή διάτρησης PS σε m/m³ είναι:

$$PS = \frac{\left(H / \cos \beta + J\right)}{\frac{B}{\cos \beta} \times S \times H}$$
(2.1)

όπου : Η= μήκος κενού διατρήματος (m), J= υποδιάτρηση (m), B= φορτίο (απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια σε m), S= απόσταση διατρημάτων (m), β= κλίση διατρήματος (μοίρες).

Στο Σχήμα 2.20, ο συντελεστής διάτρησης εκφράζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου του διατρήματος και της «ανατιναξιμότητας» (blastability) του πετρώματος. Στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζεται νομόγραμμα από όπου μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος του ανατιναχθέντος πετρώματος από τον συντελεστή διάτρησης, ανάλογα με τη διάμετρο των διατρημάτων και αντίστροφα (Jimeno et al., 1995).



Σχήμα 2.20: Ο συντελεστής διάτρησης για τέσσερα είδη πετρώματος σε βαθμίδες ύψους 12 m (Πηγή: Jimeno et al., 1995)



Σχήμα 2.21: Η σχέση της απόδοσης της ανατίναξης με τον συντελεστή διάτρησης (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

Σύμφωνα με τους Langefors και Kihlstrom (1973) και τον Olofsson (1990) ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού και ο συντελεστής διάτρησης σε μια διάνοιξη σήραγγας με εκρηκτικά είναι αντιστρόφως ανάλογοι με τη διατομή της. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 2.14 και 2.15 είναι φανερό ότι ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού και ο συντελεστής διάτρησης είναι πολύ μεγάλοι σε σήραγγες με διατομή πάνω από 10 m². Ο ρυθμός μείωσής τους είναι επίσης πολύ μεγάλος κάτω από αυτές τις συνθήκες, ενώ είναι αμελητέα μικρός σε σήραγγες που ξεπερνάν τα 35 m² διατομή. Για τον Pokrovsky (1980) ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού και από το μέγεθος της σήραγγας, αλλά και από την αντοχή του πετρώματος, καθώς και από τη δομή του, τον τύπο του εκρηκτικού και τη διάμετρο της σήραγγας.

Κατά τον Jimeno et al. (1995), στις υπόγειες ανατινάξεις ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0.9 και 7 kg/m³, ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος, την ελεύθερη επιφάνεια, τη διάμετρο του διατρήματος και τον τύπο της αρχικής κοπής. Με βάση τα ευρήματα των Whittaker και Frith (1990) μπορεί να προκύψει ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα, ότι ο ρυθμός μείωσης του

συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικού και του συντελεστή διάτρησης, καθώς η διατομή της σήραγγας αυξάνεται, είναι υψηλότερος σε πετρώματα μεγαλύτερης αντοχής από ότι σε αδύναμες βραχόμαζες. Στον Πίνακα 2.3 δίνονται οι τυπικές τιμές του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικού σε διαφορετικούς τύπους πετρώματος.

Πίνακας 2.3: Τυπικές τιμές του συντελεστή κατανάλωσης του εκρηκτικού για διάφορους τύπους πετρώματος (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

Τύποι πετρώματος	Εδική γόμωση (kg/m³)
Συμπαγές πέτρωμα υψηλής αντοχής	0,6-1,5
Μέσης αντοχής πέτρωμα	0,30-0,6
Αποσαθτωμένο ή μαλακό πέτρωμα	0,10-0,30

2.6.3 Διαταραχές στη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος

Η εμφάνιση διαταραχών στη βραχόμαζα γύρω από τη σήραγγα/στοά εξαιτίας της ανατίναξης και ο καθορισμός τους, έχουν υπάρξει αντικείμενο έρευνας εδώ και αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Ο τύπος της διαταραχής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις ομάδες (Singh and Goel, 2006):

1. Δομική διαταραχή εξαιτίας της θραύσης

2. Δομική διαταραχή επωφελούμενη από ασυνέχειες και διατμήσεις

 Λιθολογική διαταραχή που προκαλεί αποχωρισμό δύο διαφορετικών μονάδων πετρώματος ή λιθολογικά όρια μεταξύ όμοιων τύπων πετρώματος

Αυτή η αλλοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος πετρώματος (Σχήμα 2.22) μπορεί να μελετηθεί με τεχνικές όπως η λήψη πυρήνων από το θόλο και τις παρειές της σήραγγας/στοάς και η πραγματοποίηση πειραματικών δοκιμών, ή αν είναι εφικτό με την χρήση τομογραφίας (Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 2.22: Επιδράσεις στο περιβάλλον πέτρωμα λόγω ανατίναξης για τη διάνοιξη σήραγγας ή στοάς (Τσουτρέλης, 2001)

Το σύστημα ταξινόμησης βραχόμαζας MBR του Bieniawski (1984) λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις στο περιβάλλον πέτρωμα εξαιτίας της ανατίναξης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4 και αναπτύχθηκε κυρίως για εκμεταλλεύσεις με τη μέθοδο της κατακρήμνισης.

Goel, 2006)				
Μέθοδος εκσκαφής	Βαθμός Συντελεστής βλάβης προσαρμογής βλάβης λόγω ανατίναξης		Ποσοστό μείωσης	
Μηχανική εκσκαφή	Καμία	1,0	0	
Ελεγχόμενη ανατίναξη	Μικρή	0,94-0,97	3-6	
Καλή συμβατική ανατίναξη	Μέτρια	0,9-0,94	6-10	
Κακή ανατίναξη	Σοβαρή	0,9-0,8	10-20	

Πίνακας 2.4: Επιδράσεις της ανατίναξης στο περιβάλλον πέτρωμα με το
τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης της βραχόμαζας MBR (Πηγή: Singh and
Goel, 2006)

Κατά τους Laubscher και Taylor (1976) προτείνονται οι παρακάτω μειώσεις όσον αφορά τον Δείκτη Ποιότητας Πετρώματος (RQD) και την βαθμονόμηση της κατάστασης των ασυνεχειών μετά την ανατίναξη, ώστε να χρησιμοποιηθούν στην ταξινόμηση με το σύστημα RMR (Singh and Goel, 2006):

- 1. Μηχανική εκσκαφή: Καμία μείωση
- Ελεγχόμενη ανατίναξη (smooth blasting): 3% μείωση
- 3. Καλή συμβατική ανατίναξη: 6% μείωση
- 4. Κακή συμβατική ανατίναξη: 20% μείωση

Όπως αναφέρεται από τους Singh και Goel (2006), πολλές μέθοδοι που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί διεθνώς για την εκτίμηση των φθορών λόγω ανατίναξης στα πετρώματα δίνονται από τον Scoble et al. (1996).

Οι Ouchterlony et al. (1991) παρατήρησαν ότι η διαταραχθείσα ζώνη θα μπορούσε να έχει μήκος 0,5 m με μια προσεκτική ανατίναξη. Ο McKenzie (1994) συσχέτισε την μέγιστη τιμή της μοριακής ταχύτητας PPV, (v_{max}) για την αρχική θραύση, με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (q_t) , τον συντελεστή του Young και την ταχύτητα του θλιπτικού κύματος τύπου P (V_p) όπως φαίνεται παρακάτω (Singh and Goel, 2006):

$$v_{\max} = \frac{q_t \cdot V_p \cdot 10^{-3}}{E} (m/s)$$
(2.2)

όπου:

q_t= αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)

 $V_p \texttt{=}$ ταχύτητα θλιπτικού κύματος τύπου P (m/s) και

E= συντελεστής του Young (GPa)

Οι Pusch και Stanfors (1996) και άλλοι παρατήρησαν ότι η ελάχιστη διατάραξη λόγω ανατίναξης έχει αναφερθεί σε περιπτώσεις που ο προσανατολισμός της σήραγγας ήταν στις 15 μοίρες σε σχέση με την εμφάνιση των ασυνεχειών (Singh and Goel, 2006).

Οι Yu και Vongpaisal (1996) συμπέραναν, ότι η φθορά είναι συνάρτηση της πίεσης λόγω ανατίναξης και της αντοχής του πετρώματος. Πρότειναν μάλιστα τον δείκτη φθοράς λόγω ανατίναξης (D_{ib}), όπως δίνεται στην παρακάτω εξίσωση, με τον οποίο γίνεται η εκτίμηση του τύπου της φθοράς του πετρώματος λόγω ανατίναξης. Ο δείκτης αυτός είναι η αναλογία της πίεσης λόγω της ανατίναξης, με την αντίσταση του πετρώματος στη φθορά (Singh and Goel, 2006):

$$D_{ib} = \frac{v_R \cdot \rho_r \cdot V_p}{k_s \cdot q_{td}} \times 10^{-6}$$
(2.3)

όπου:

 v_R = ανυσματικό άθροισμα της μέγιστης μοριακής ταχύτητας (m/s) ρ_r = πυκνότητα βραχόμαζας (kg/m³)

 k_s = σταθερά ποιότητας τοποθεσίας (με μέγιστο το 1.0)

Ο δείκτης D_{ib} χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση της φθοράς της βραχόμαζας γύρω από την οριζόντια υποβρύχια σήραγγα no.1 στο υδροηλεκτρικό έργο του ποταμού Koyna (Stage IV), στην Ινδία (Singh and Goel, 2006).

2.6.4 Μετατόπιση, προφίλ σωρού απόθεσης και θραύση

Η αποτελεσματικότητα κατά την φόρτωση, άρα και η καλή απόδοση της ανατίναξης, εξαρτάται κατά πολύ από το βαθμό της θραύσης, καθώς και από το προφίλ του σωρού απόθεσης του θραυσμένου πετρώματος. Συγκεκριμένα, ένας συμπαγής σωρός επηρεάζει αρκετά δυσμενώς την αποτελεσματικότητα της φόρτωσης. Παράγοντες όπως οι ιδιότητες της βραχόμαζας, οι παράμετροι της γόμωσης, ο τύπος και η σειρά έναυσης, καθώς και ο λόγος της απόστασης των διατρημάτων προς το φορτίο, είναι γνωστό πως επηρεάζουν σημαντικά τη θραύση και το προφίλ του σωρού του θραυσμένου πετρώματος. Η σημασία του ελέγχου των γεωλογικών συντελεστών κατά τη θραύση έχει αναγνωριστεί με την πάροδο των χρόνων. Αναλύσεις του όγκου του προς εξόρυξη πετρώματος πριν και μετά την ανατίναξη έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για την προσέγγιση της αξιοποίησης της εκρηκτικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα ανάλυσης ψηφιακών εικόνων.

Η μετατόπιση του εξορυχθέντος πετρώματος μετά από ανατίναξη σε μια σήραγγα/στοά εξαρτάται από (Singh and Goel, 2006):

- τον συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικού,
- τον προσανατολισμό των διατρημάτων,
- τους χρόνους επιβράδυνσης,
- τη θέση των αρχικών κοπών (προεκσκαφών) και
- τον τύπο της έναυσης.

Με τη χρήση παράλληλης διάταξης αρχικών κοπών έχει αναφερθεί ότι η μετατόπιση είναι μικρότερη από ότι με τη χρήση προεκσκαφών υπό γωνία. Η τοποθέτηση της αρχικής κοπής στο κατώτερο μέρος της σήραγγας ή της στοάς παρέχει μικρότερη μετατόπιση, αλλά μεγαλύτερα τεμάχια. Ο λόγος είναι ότι η δύναμη της βαρύτητας ευνοεί την κίνηση του φορτίου σε αυτή την περίπτωση (Singh and Goel, 2006).

Οι χρόνοι επιβράδυνσης μεταξύ των διατρημάτων κατά την έναυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης ως εργαλείο για τον έλεγχο της μετατόπισης, του προφίλ του σωρού καθώς και της διόγκωσης του πετρώματος που είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των μηχανισμών θραύσης στις επόμενες ομάδες διατρημάτων. Η χρήση μικρών χρόνων επιβράδυνσης παράγει μεγαλύτερη μετατόπιση από ότι η χρήση μεγαλύτερων. Μια πολύ μικρή επιβράδυνση έναυσης όμως, δεν παρέχει επαρκή χρόνο ώστε να μετακινηθεί το φορτίο και να δημιουργήσει χώρο για τη διευθέτηση των τεμαχίων που παράγονται στις επιτυχείς επιβραδύνσεις των επόμενων διατρημάτων (Singh and Goel, 2006).



Σχήμα 2.23: Προτεινόμενοι χρόνοι έναυσης για αρχική κοπή τύπου Burn Cut (Πηγή: Hagan, 1982)

Όταν γίνεται χρήση παράλληλων διατάξεων στην αρχική κοπή, οι πρώτες γομώσεις που εκρήγνυνται είναι αυτές που βρίσκονται πιο κοντά στα κενά διατρήματα. Το φορτίο μεγαλώνει καθώς η διαδοχή των εναύσεων συνεχίζεται (Σχήμα 2.23).

Το πέτρωμα που έχει θραυστεί από την έκρηξη των πρώτων διατρημάτων εκτοξεύεται πλευρικώς στον μικρό ελεύθερο χώρο που είναι διαθέσιμος. Σε διατρήματα με μήκος μεγαλύτερο των 3 m, ο χρόνος που είναι απαραίτητος για τη δυναμική μετατόπιση των θραυσμάτων του πετρώματος μέσα στη ζώνη της προεκσκαφής είναι αρκετά μεγάλος και συνήθως μεγαλύτερος των 100 ms. Η μάζα πετρώματος κινείται προς το μέτωπο με ταχύτητα 40 με 60 m/sec. Στην περίπτωση διατρημάτων προχώρησης μήκους 4 m ο χρόνος που απαιτείται κυμαίνεται από 60 ως 100 ms πριν το διαλυμένο πέτρωμα μετακινηθεί από το χώρο προεκσκαφής. Γι' αυτό ο χρόνος επιβράδυνσης ανάμεσα σε διαδοχικά διατρήματα θα πρέπει να υπερβαίνει τα 100 ms, ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση του πετρώματος στην ζώνη της αρχικής κοπής και να εξασφαλιστεί η δημιουργία μιας ικανής ελεύθερης επιφάνειας για τις επόμενες σειρές διατρημάτων (Σχήμα 2.24), (Jimeno et al., 1995). Τα παραπάνω έχουν αποδειχθεί στην πράξη με πειραματικές ανατινάξεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5 και στο Σχήμα 2.25.



Σχήμα 2.24: Επίδραση των χρόνων επιβράδυνσης στο αποτέλεσμα της ανατίναξης (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

Χρόνοι	Προχώρηση %	Αριθμός	Μετατόπιση (m)
Επιβράδυνσης (ms)		θραυσμάτων>300m	
5	88	15	23
25	97	26	20
100	96	27	15
150	97	26	12
1000	96	26	9

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα πειραματικών ανατινάξεων για την επίδραση των χρόνων επιβράδυνσης (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

Οι μελέτες αυτές δείχνουν ότι πολύ μικρά διαστήματα δίνουν καλύτερη θραύση, παράλληλα όμως ελαττώνουν την προχώρηση της ανατίναξης και αυξάνουν την μετατόπιση του πετρώματος, κάνοντας τη φόρτωση πιο δύσκολη, εξαιτίας του διασκορπισμού των θραυσμάτων.



Σχήμα 2.25: Επίδραση των χρόνων επιβράδυνσης στη μετατόπιση και το σχήμα του σωρού απόθεσης σε σήραγγες ή στοές (Πηγή: Jimeno et al., 1995)

Σε σήραγγες ή στοές μεσαίας και μεγάλης διατομής δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν χρόνοι επιβράδυνσης μεγαλύτεροι των 100 ms, λόγω του διαθέσιμου αριθμού καψυλλίων. Γι' αυτό το λόγο έχει καταστεί αναγκαίο να χρησιμοποιούνται συστήματα έναυσης της τάξης των millisecond για την αρχική κοπή και του μισού δευτερολέπτου για τα υπόλοιπα τμήματα της εκσκαφής (Jimeno et al., 1995).

2.7 Σχεδιασμός ανατίναξης

Για τον σχεδιασμό μιας ανατίναξης λαμβάνονται υπόψιν παράμετροι που έχουν να κάνουν με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατρημάτων όπως η διάμετρος, το μήκος και η κλίση, τον τρόπο διάταξής τους και την απόσταση μεταξύ τους, καθώς και την απαιτούμενη γόμωση ανά διάτρημα και την διαδοχή των χρόνων έναυσης τους. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται αναλυτικά οι παράμετροι αυτοί.

2.7.1 Διάμετρος διατρημάτων

Η διάμετρος των διατρημάτων πρέπει να είναι όσο μεγαλύτερη γίνεται, ώστε να είναι αποδοτική η διάτρηση και παράλληλα ικανοποιητικό το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων. Εξάλλου είναι αυτή που καθορίζει την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης με την οποία γομώνεται το διάτρημα. Στις περισσότερες περιπτώσεις το κρίσιμο πρόβλημα είναι η εξόρυξη ολόκληρου του μήκους του διατρήματος. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρός του, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του εκρηκτικού που τοποθετείται στον πυθμένα του, όπου και υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη, ώστε το μέτωπο που απομένει να είναι ομαλό.

Όταν η διάμετρος των διατρημάτων είναι μεγάλη, ο αριθμός των διατρημάτων μειώνεται. Ανάλογα με το πέτρωμα, μειώνοντας τον αριθμό των διατρημάτων μπορεί να μειωθεί και ο χρόνος διάτρησης. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί ο ολικός χρόνος διάτρησης να μην ελαττωθεί, εξαιτίας του μειωμένου ρυθμού διείσδυσης που παρατηρείται κατά την όρυξη οπών μεγάλης διαμέτρου. Επομένως, η επιλογή της διαμέτρου πρέπει να αξιολογείται σε σχέση το είδος του πετρώματος.

Επιπλέον, η επιλογή της διαμέτρου του διατρήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψιν την κατανομή του εκρηκτικού η οποία θα παραγάγει την επιθυμητή θραύση. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλου τύπου εκρηκτικής ύλης. Γενικά τα διατρήματα που χρησιμοποιούνται είναι διαμέτρου μεταξύ 26 και 50 mm. Στη Σουηδία η διάμετρος που χρησιμοποιείται κυμαίνεται από 32-38mm, ενώ στις ΗΠΑ η διάνοιξη στοών πραγματοποιείται κυρίως με χρήση διατρημάτων με διάμετρο από 42-46mm (Bhandari, 1997).

2.7.2 Μήκος διατρημάτων

Το μήκος των διατρημάτων εξαρτάται από τον τύπο του προς ανατίναξη πετρώματος. Σε χαμηλής αντοχής υλικό, το οποίο εύκολα θραύεται, χρησιμοποιούνται συνήθως πιο μικρού μήκους διατρήματα και μικρότερες ποσότητες γόμωσης. Το μήκος των οπών εξαρτάται ακόμη από το διαθέσιμο χρόνο για την ολοκλήρωση κύκλου εξόρυξης και συγκεκριμένα από το χρόνο διάτρησης και φόρτωσης. Η προχώρηση ανά έκρηξη είναι γενικά μικρότερη κατά 300-400 mm σε σχέση με το μήκος διάτρησης (Bhandari, 1997).

Εν τούτοις, έχουν γίνει προσπάθειες όρυξης μεγαλύτερου μήκους διατρημάτων, καθώς όπως έχει αναφερθεί ήδη σε προηγούμενες παραγράφους, η προχώρηση ανά γύρο έκρηξης εξαρτάται από αυτό. Η προχώρηση κυμαίνεται από 0,5 m για αποσαρθρωμένα εδάφη όπου χρειάζεται άμεση υποστήριζη, μέχρι 3 m για συμπαγή πετρώματα όπου η υποστήριξη δεν είναι απαραίτητη και για μεγάλης διαμέτρου εκσκαφές. Αν η μέση προχώρηση ανά έκρηξη αυξηθεί σημαντικά, τότε ο αρχικός χρόνος για παραγωγή θα μειωθεί, καθώς επίσης και το συνολικό κόστος της ανατίναξης. Σήμερα επιτυγχάνονται προχωρήσεις 4-4,5 m, με διατρήματα μήκους 5 m και διαμέτρου 48 mm ή μεγαλύτερης και χρήση αρχικής κοπής παράλληλης διάταξης με ένα ή δύο κενά διατρήματα μεγάλης διαμέτρου (Ouchterlony, 1992). Οι Niklasson και Keisu (1993) δείχνουν ότι αρχικές κοπές με οπές διαμέτρου μόλις 64 mm και μήκος 4,0-4,4 m δίνουν καλή προχώρηση, όση και οι κλασσικές προεκσκαφές με κεντρικά διατρήματα μεγάλης διαμέτρου. Κατά τους Fjellborg και Olsson (1996) μπορεί να επιτευχθεί προχώρηση ως και 100% του μήκους διάτρησης, με χρήση διατρημάτων μήκους 7,5 m και κενό διάτρημα διαμέτρου 300 m στην αρχική κοπή (Bhandari, 1997).

2.7.3 Αριθμός διατρημάτων

Ο αριθμός των διατρημάτων που απαιτούνται σε ένα μέτωπο εξαρτάται από το εμβαδόν του μετώπου, το σχήμα της σήραγγας ή της στοάς, τον τύπο του πετρώματος, τον απαιτούμενο βαθμό θραύσης και το μέγεθος των οπών. Ο αριθμός των διατρημάτων που χρειάζονται ανά μονάδα εμβαδού του μετώπου είναι μεγαλύτερος για μικρότερες στοές. Μάλιστα, όπως αναφέρει ο Πολυχρονόπουλος (1979), σε πολύ σκληρά πετρώματα ο αριθμός αυτός είναι δυνατόν να διπλασιαστεί. Η υψηλότερη συγκέντρωση διατρημάτων βρίσκεται στην αρχική κοπή, και σε μία μικρή στοά το εμβαδόν της προεκσκαφής αποτελεί υψηλό ποσοστό επί του συνολικού του μετώπου. Ένας άλλος παράγοντας είναι ο αριθμός των περιμετρικών διατρημάτων, του οποίου η αύξηση δεν είναι μεγάλη αφού ισούται με την τετραγωνική ρίζα του εμβαδού του μετώπου (Bhandari, 1997).

Ο Bhandari (1997) δίνει έναν πίνακα οδηγό των Whittaker και Frith (1990), ο οποίος έχει βασιστεί στην εμπειρία και παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 2.5).

Πίνακας 2.5: Ο	αριθμός απαιτούμενω	ν διατρημάτων σε	: σχέση με τη	διατομή της
σήραγγας και	ι τον τύπο του πετρώμ	ιατος (Πηγή: Whi	ttaker kai Fr	ith, 1990)

Διατομή σήραγγας (m²)	Απαιτούμενος αριθμός διατρημάτων ανά ανατίναξη		
	Ημίσκληρο πέτρωμα	Σκληρό πέτρωμα	
10	23-27	35-50	
25	45-50	60-70	
50	75-85	95-110	

2.7.4 Φορτίο και Απόσταση μεταξύ των διατρημάτων

Η μέγιστη απόσταση του διατρήματος από την ελεύθερη επιφάνεια μπροστά από αυτό ονομάζεται φορτίο (burden) και συμβολίζεται με Β. Το φορτίο είναι ανάλογο με την διάμετρο του διατρήματος, εξαρτάται όμως και από άλλους παράγοντες (Σοφατζίδη, 2007):

- Την απόσταση και τη διάμετρο των διατρημάτων
- Τα χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης
- Τα δομικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετώπου και ορισμένων άλλων παραμέτρων που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των ανατινάξεων

Το μήκος μεταξύ των διατρημάτων της ίδιας σειράς που μετρείται κάθετα προς το φορτίο B ονομάζεται απόσταση (spacing) και συμβολίζεται με S. Το μέγεθος της απόστασης μεταξύ των διατρημάτων είναι συνάρτηση των παρακάτω παραμέτρων (Σοφατζίδη, 2007):

- Των χαρακτηριστικών του πετρώματος
- Του φορτίου
- Του μήκους των διατρημάτων
- Της θέσης του εναύσματος στο διάτρημα
- Του χρόνου έναυσης των γειτονικών διατρημάτων

Ο λόγος της απόστασης προς το φορτίο (S/B) εκφράζει τις συνθήκες εξόρυξης. Όταν η απόσταση είναι μεγάλη το μέτωπο που προκύπτει μετά την ανατίναξη δεν είναι ομαλό, ενώ στην αντίθετη περίπτωση (Σχήμα 2.26) το θραυσμένο πέτρωμα παρουσιάζει μεγάλο ποσοστό θρυμματισμού, εξαιτίας της μεγάλης αλληλοεπικάλυψης των ορθογώνιων πρισμάτων (σύμφωνα με τη θεωρία κρατήρα). Συνήθως για μεγάλες διαμέτρους διατρημάτων χρησιμοποιούνται μικρότερες σχέσεις S/B (Αγιουτάντης 2007).



Σχήμα 2.26: Θρυμματισμός του πετρώματος, εξαιτίας της αλληλεπικάλυψης των κώνων δύο διατρημάτων που ανατινάζονται ταυτόχρονα.

2.7.5 Χρησιμοποιούμενη εκρηκτική ύλη

Οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται γενικά στα υπόγεια έργα πρέπει να είναι μεγάλης ισχύος (ενέργειας που εκλύεται κατά την έκρηξη) και ειδικού βάρους, καθώς και καλής ικανότητας αντίστασης στο νερό, ενώ η ποσότητα των εκλυόμενων αερίων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περιορισμένη (Πολυχρονόπουλος, 1979). Εκρηκτικά με βάση τη νιτρογλυκερίνη χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις για πάνω από 100 χρόνια. Ο πετρελαιοαμμωνίτης (ANFO = Ammonium Nitrate – Fuel Oil) και τα εκρηκτικά υγρής φάσης (slurries), παρότι είναι εύκολα στην αποθήκευση και στη χρήση, χάνουν πολύ σε απόδοση σε σύγκριση με αυτά που βασίζονται στη νιτρογλυκερίνη χρησιμοποιούνται σήμερα παγκοσμίως για τη διάνοιξη υπογείων έργων.

Τα εκρηκτικά γαλακτώματα είναι ομοιογενή υλικά αποτελούμενα από μικρά σταγονίδια υπερκορεσμένου οξειδωτικού διαλύματος (π.χ. νιτρικό αμμώνιο) μέσα ελαιώδη μήτρα, σε υγρή ή στερεή φάση (καύσιμο). Το γαλάκτωμα που σχηματίζεται σταθεροποιείται με τη βοήθεια γαλακτωματοποιητικού μέσου. Για τον έλεγχο της πυκνότητας, προστίθενται μικροσκοπικές φυσαλίδες αέρα ή τεχνητές φυσαλίδες από γυαλί, ρητίνη ή πλαστικό (Σχήμα 2.27). Με τον τρόπο αυτό ρυθμίζεται η ευαισθησία του παραγόμενου εκρηκτικού γαλακτώματος (το αν είναι δηλαδή ευαίσθητο σε πυροδότηση με χρήση καψυλλίων ή με χρήση ενισχυτικών εναυσμάτων). Καθώς διαδίδεται ο αρχικός κρουστικός παλμός, οι μικροσκοπικές φυσαλίδες (αέρα ή τεχνητές) θερμαίνονται πρώτες και λειτουργούν ως θερμά σημεία (hot – spots) μέσα στο γαλάκτωμα, με τη θερμοκρασία τους να κυμαίνεται στους 1500-1800 °C. Έτσι, σε μια τόσο υψηλή θερμοκρασία, λαμβάνει χώρα η αντίδραση της έκρηξης. Επιπλέον, η ελαιώδης μεμβράνη που καλύπτει τα σταγονίδια προσδίδει στο υλικό εξαιρετική αντοχή στο νερό.

Η ταχύτητα έκρηξης των γαλακτωμάτων ποικίλει, ανάλογα με τον τύπο του καύσιμου που χρησιμοποιείται. Έτσι μπορούν να κατασκευαστούν σε μορφή φυσιγγίων διαφόρων μεγεθών ή να χρησιμοποιηθούν ως χύδην εκρηκτικό, τόσο σε υπαίθριες όσο και σε υπόγειες ανατινάξεις (Sharma, 2005).

44



Σχήμα 2.27: Οι φυσαλίδες αέρα δρουν ως θερμά σημεία (hot-spots) μέσα στο γαλάκτωμα κι έτσι λαμβάνει χώρα η αντίδραση της έκρηξης (Πηγή: Sharma, 2005)

2.7.6 Σειρά πυροδότησης

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι συνθήκες ανατίναξης σε μια σήραγγα είναι πολύ πιο δυσμενείς από αυτές σε μια υπαίθρια ανατίναξη. Η επιλογή των επιβραδύνσεων και των χρόνων τους πρέπει να είναι τέτοια, ώστε από την εκτίναξη του θραυσμένου πετρώματος, να δημιουργηθεί μια ελεύθερη επιφάνεια και να υπάρχει χώρος για τη διόγκωση του πετρώματος που συμβαίνει κατά της επόμενες ανατινάξεις.

Ο χρόνος που χρειάζεται για την εξάπλωση των ρωγμών και τον σχηματισμό της θραύσης εξαρτάται από την κατάσταση του πετρώματος. Η ταχύτητα επέκτασης των ρωγμών ή της θραύσης είναι μεγαλύτερη για σκληρά και εύθρυπτα πετρώματα από αυτή σε πιο μαλακά. Κυμαίνεται από 1 ως 3 ms/m, ενώ η ταχύτητα εκτίναξης του πετρώματος μετά την έκρηξη μπορεί να είναι περίπου 20 με 30 m το δευτερόλεπτο, δηλαδή από 2-3 cm/ms. Κατά συνέπεια, για διάτρημα μήκους 4 m χρειάζεται χρόνος από 300-400 ms, έτσι ώστε το θραυσμένο πέτρωμα να έχει μετακινηθεί εντελώς από την αρχική κοπή. Για το λόγο αυτό, προτιμώνται μεγάλες επιβραδύνσεις της τάξεως του μισού δευτερολέπτου για της ανατινάξεις σε σήραγγες ή στοές. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται συνδυασμοί μικρών και μεγάλων χρόνων επιβράδυνσης. Οι μικροί χρόνοι εφαρμόζονται κυρίως στις προεκσκαφές, καθώς αρχικά απαιτείται θρυμματισμός του πετρώματος, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ελεύθερη επιφάνεια για την επόμενη ομάδα διατρημάτων, αυτών της κύριας εκσκαφής (Sharma, 2005).

2.8 Ανατινάξεις για όρυξη φρεάτων

Τα φρέατα είναι, εκτός από τις σήραγγες, ένας άλλος τρόπος προσπέλασης για την ανάκτηση υπόγειων κοιτασμάτων ή την κατασκευή υπόγειων θαλάμων. Μπορεί να είναι κάθετα ή επικλινή και χαρακτηρίζονται από τη γραμμική τους σχεδίαση και τις δυσκολίες στη διάτρηση (Jimeno et al., 1995). Για την όρυξή τους, η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι όπως αυτή για την διάνοιξη στοών και σηράγγων, μόνο που στην περίπτωση των φρεάτων οι δυσκολίες είναι περισσότερες και η επικινδυνότητα μεγαλύτερη.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων, που μηχανοποιούν τις εργασίες μέσω ειδικών τεχνικών και συστημάτων διάτρησης, αυξάνοντας την προχώρηση και την παραγωγή και βελτιώνοντας τις συνθήκες ασφαλείας (Jimeno et al., 1995). Ο τρόπος εκσκαφής τους εξαρτάται από το αν υπάρχει από πριν υπόγειο άνοιγμα ή όχι. Μπορεί επομένως να είναι μηχανική αν υπάρχει προηγούμενο υπόγειο έργο ή συμβατική με διάτρηση και ανατίναξη. Το φρέαρ είναι συνήθως κυκλικής διατομής, όμως έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν και φρέατα με ορθογώνια, τετραγωνική, καθώς και ελλειπτική διατομή. Η κυκλική διατομή εξυπηρετεί καλύτερα τη μηχανική φόρτωση του υλικού που εξορύσσεται, καθώς και την επένδυση με εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Επίσης παρέχει μεγαλύτερη αντοχή στις πλευρικές πιέσεις (Τσουτρέλης, 2001). Στα Σχήματα 2.28-2.32 φαίνονται τα διάφορα στάδια κατά τη διάνοιξη φρεάτων με τη συμβατική μέθοδο, στο βορειοδυτικό Arkansas (Beaver Water District, water expansion project).



Σχήμα 2.28: Διάτρηση για την διάνοιξη φρέατος με ανατίναξη σε όλη τη διατομή. Στο κέντρο διακρίνονται τα διατρήματα της προεκσκαφής, που είναι πυκνότερα τοποθετημένα (Dykon Blasting Corp.,1999-2007).



Σχήμα 2.29: Ανατίναξη διατρημάτων κατά τη διάνοιξη φρέατος στη λίμνη Beaver του βορειοδυτικού Arkansas (Dykon Blasting Corp.,1999-2007)



Σχήμα 2.30: Φόρτωση και μεταφορά του θραυσμένου πετρώματος, μετά από ένα γύρο ανατίναξης (Dykon Blasting Corp.,1999-2007)



Σχήμα 2.31: Προσωρινή υποστήριξη με εκτοξευμένο σκυρόδεμα και μεταλλικό πλέγμα. Η απομάκρυνση των υδάτων γίνεται με αντλία (Dykon Blasting Corp.,1999-2007)



Σχήμα 2.32: Μόνιμη υποστήριξη με οπλισμένο σκυρόδεμα (Dykon Blasting Corp.,1999-

Οι μέθοδοι για τη διάνοιξη φρεάτων μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες (Τσουτρέλης, 2001):

 Τη μέθοδο προσβολής κατά το ήμισυ για διαμόρφωση βαθμίδας (benching ή halfbottom method)

2. Τη σπειροειδή μέθοδο (spiral method)

3. Τη μέθοδο προσβολής σε όλη την διατομή (full-bottom method)

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικότερα οι επιμέρους αυτές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη φρεάτων με την τεχνική της διάτρησης και ανατίναξης.

2.8.1 Μέθοδος προσβολής κατά το ήμισυ για διαμόρφωση βαθμίδας

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τετραγωνικής ή ορθογώνιας διατομής φρέατα. Συνίσταται στη διάτρηση της μισής διατομής με διατρήματα σε διάταξη βεντάλιας, με κλίση από 45° έως 90° μοίρες, αφήνοντας το υπόλοιπο μισό (που είναι χαμηλότερα) ως δεξαμενή για ύδατα ή μπάζα αν κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο, ή ως ελεύθερη κοιλότητα (Jimeno et al., 1995).

Η διαδικασία της ανατίναξης είναι παρόμοια με αυτή των μικρών βαθμίδων, όπου υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια. Το θραυσμένο πέτρωμα εκτοπίζεται στο χώρο που έχει δημιουργηθεί από την ανατίναξη του προηγούμενου γύρου (Jimeno et al., 1995). Η εκσκαφή προχωράει ανατινάζοντας την απέναντι πλευρά κάθε φορά, ώστε να αποκτηθεί η επιθυμητή κάθετη προχώρηση. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η χρήση του χαμηλότερου μισού της διατομής ως δεξαμενή για την συλλογή των φυσικών υδάτων η αυτών της διάτρησης, καθώς και για την τοποθέτηση του κάδου των χωμάτων εκσκαφής (Roach and Roy, 2003). Στα Σχήματα 2.33 και 2.34 παρουσιάζονται η κάτοψη και τομή μιας τυπικής περίπτωσης εφαρμογής της μεθόδου αυτής, με διατρήματα διαμέτρου 1 3/8" ή 1 1/4".



Σχήμα 2.33: Τυπική περίπτωση κάτοψης της μεθόδου διανοίξεως φρέατος με προσβολή κατά το ήμισυ για διαμόρφωση βαθμίδας (Πηγή: Dyno Nobel Ltd., 2003)



Σχήμα 2.34: Τυπική περίπτωση τομής της μεθόδου διανοίξεως φρέατος με προσβολή κατά το ήμισυ για διαμόρφωση βαθμίδας (Πηγή: Dyno Nobel Ltd., 2003)

2.8.2 Σπειροειδής μέθοδος

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη Σουηδία και η διάταξη των διατρημάτων αποτελείται από ακτινικές σειρές που ξεκινούν από το κέντρο του μετώπου και χωρίζουν το μέτωπο σε τομείς (Σχήμα 2.35). Ξεκινώντας από οριζόντιο μέτωπο, τα διατρήματα ορύσσονται με σταθερό βάθος σε κάθε ακτίνα, αλλά αυξανόμενο διαδοχικά από ακτίνα σε ακτίνα, π.χ. αν η πρώτη είναι μηδενικού βάθους, οι διαδοχικές ακτίνες σε μια 16άκτινη διάταξη θα ορύσσονταν σε βάθη αυξανόμενα 100 mm ανά ακτίνα, για να φτάσουν σε ένα μέγιστο βάθος 1,6 m σε ένα γύρο έκρηξης. Τα διατρήματα βλέπουν με μικρή κλίση προς τη εκάστοτε ελεύθερη επιφάνεια, εκτός από τα περιμετρικά. Οι τομείς εξορύσσονται διαδοχικά, με τον καθένα να φτάνει βαθύτερα από τον προηγούμενο. Θεωρητικά, αυτό θα παρήγαγε ένα μέτωπο που υποχωρεί με σπειροειδή τρόπο, με ένα αξονικά προσανατολισμένο επίπεδο να συνδέει το τέλος της σπείρας με την αρχή της. Στην πράξη η γεωμετρία αυτή δεν επιτυγχάνεται ποτέ ακριβώς, με την κύρια διαφορά να είναι η παντελής απουσία παραγόμενου υλικού κοντά στο κέντρο του φρέατος (Peterson et al., 1977).

Η σπειροειδής μέθοδος εκτός από τα πλεονεκτήματα στην απόδοση και το κόστος, παρουσιάζει ενδιαφέρον και λόγω του ότι το μήκος της κοπής μπορεί να συγχρονίζεται σε συνάρτηση με το πλάνο εργασιών, τα σχέδια διάτρησης και τα συστήματα πυροδότησης είναι απλά και τέλος, το προσωπικό δεν χρειάζεται να είναι εξειδικευμένο. Επιπλέον, καθώς το θραυσμένο πέτρωμα παραμένει πάντα στο βαθύτερο τμήμα της εξόρυξης, η παραγωγικότητα των μηχανημάτων φόρτωσης είναι υψηλή (Jimeno et al., 1995).

Εξάλλου, η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και για την όρυξη στοών (White Pine copper mine, 1977), με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού προχώρησης της εκσκαφής ως και 4 φορές σε σχέση με τις συνηθισμένες μεθόδους και την μείωση του κόστους περίπου στο 50% ανά πόδι προχώρησης, ενώ έχει μελετηθεί και η δυνατότητα της χρήσης της μεθόδου και για εξορύξεις τύπου επιμήκους μετώπου, σε κοιτάσματα σκληρού πετρώματος (Rapidex Inc., 1977).



Σχήμα 2.35: Η σπειροειδής μέθοδος εξόρυξης (Jimeno et al., 1995)

2.8.3 Μέθοδος προσβολής ολόκληρης της διατομής

Η μέθοδος διανοίξεως φρεάτων με προσβολή σε ολόκληρη τη διατομή χρησιμοποιείται συχνά, καθώς είναι κατάλληλη και για ορθογώνιες και για κυκλικές διατομές. Οι τεχνικές τοποθέτησης των διατρημάτων είναι πολλές, καθώς όπως συμβαίνει και κατά τη διάνοιξη σηράγγων και στοών, είναι απαραίτητη η δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας με την όρυξη κενών διατρημάτων (εκτός αν υπάρχει ήδη κάποιο πιλοτικό διάτρημα μεγάλης διαμέτρου). Η αρχική κοπή (προεκσκαφή) διανοίγεται με τη βοήθεια διατρημάτων σε διάταξη κωνοειδή ή σφηνοειδή, πυραμιδοειδή, καθώς επίσης και με τη βοήθεια κενών διατρημάτων ανακούφισης, που θυμίζει την αρχική κοπή τύπου burn cut . Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.36, 2.37, 2.38 και 2.39 (Jimeno et al., 1995).

Η διάταξη μορφής V (μονού, διπλού ή τριπλού V) ή σφηνοειδούς μορφής (wedge cut) χρησιμοποιείται για φρέατα ορθογώνιας ή τετράγωνης διατομής (Σχήμα 2.36), μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και σε κυκλικής διατομής φρέατα. Απαραίτητο είναι, τα επίπεδα των δίεδρων που σχηματίζονται από τα διατρήματα κλίσεως από 50 έως 75 μοίρες, να είναι παράλληλα με τις ασυνέχειες, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η θραύση του πετρώματος (Jimeno et al., 1995). Κατά την ανατίναξη με αυτής της μορφής τη διάταξη, ταυτόχρονα με τα διατρήματα της αρχικής κοπής εκρήγνυται και ένα κεντρικό διάτρημα κατακόρυφης διεύθυνσης, το οποίο ανήκει και αυτό στην προεκσκαφή (Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 2.36: Διάταξη σφηνοειδούς προεκσκαφής σε ορθογωνικής διατομής φρέαρ (Jimeno et al., 1995)

Η κωνικής μορφής διάταξη (cone cut) χρησιμοποιείται περισσότερο για τη διάνοιξη φρεάτων κυκλικής διατομής, λόγω του ότι η μηχανοποίηση της όρυξης των διατρημάτων είναι πιο εύκολη, και ο συντελεστής κατανάλωσης του εκρηκτικού είναι μικρότερος σε σύγκριση με την αρχική κοπή τύπου burn cut. Τα διατρήματα τοποθετούνται έτσι ώστε να σχηματίζουν πολλούς ανεστραμμένους κώνους στο κέντρο της διατομής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.38 (Jimeno et al., 1995).



Σχήμα 2.37: Διάταξη αρχικής κοπής τύπου burn cut (Jimeno et al., 1995)

Η προχώρηση κάθε ανατίναξης, όπως και ο αριθμός των διατρημάτων εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως είναι ο τύπος του πετρώματος, η διάμετρος και η διάταξη των διατρημάτων, ο τύπος της αρχικής κοπής, ο σχεδιασμός των εργασιών και κυρίως η διατομή της εκσκαφής. Συγκεκριμένοι κανόνες για το σχεδιασμό των δύο αυτών διατάξεων δεν μπορούν να αναφερθούν, καθώς πρέπει καθορίζονται κάθε φορά, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν.



Σχήμα 2.38: Διατάξεις διατρημάτων κωνικής και διπλής κωνικής κοπής (Jimeno et al., 1995)



Σχήμα 2.39: Αρχική κοπή με κεντρικό άνοιγμα μεγάλης διαμέτρου (Jimeno et al., 1995)

Για παράδειγμα για την διάνοιξη αρκετών φρεάτων στη Ν. Αφρική με διατρήματα διαμέτρου 32 mm, ο αριθμός των απαιτούμενων διατρημάτων έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση των Espley-Jones και Wilson (1979):

$$NB = 2D_p^2 + 20$$
 (2.7)

όπου: NB = αριθμός διατρημάτων χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα περιμετρικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ήπιες μέθοδοι ανατίναξης, και D_p = διάμετρος φρέατος σε m (Jimeno et al., 1995).

Όσο για την προχώρηση κάθε γύρου ανατίναξης, ο Wild (1984) συνιστά τις ενδεικτικές τιμές που δίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.40 και είναι σε συνάρτηση με τη διάμετρο του φρέατος (Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 2.40: Προχώρηση ανά ανατίναξη σε συνάρτηση με τη διατομή του φρέατος

(Τσουτρέλης, 2001)



Σχήμα 2.41: Ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού σε συνάρτηση με τη διατομή του φρέατος (Τσουτρέλης, 2001)

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.41 ο ίδιος συγγραφέας δίνει την ειδική κατανάλωση του εκρηκτικού σε συνάρτηση με τις διαστάσεις του φρέατος.

Η προεκσκαφή τύπου burn cut λειτουργεί όπως και στις σήραγγες και στοές. Τα αποτελέσματα που έχουν αποκτηθεί μέχρι σήμερα είναι πολύ ενδιαφέροντα, έχοντας ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα, αυτό της ευκολότερης διάτρησης.

Όταν για τη γόμωση χρησιμοποιούνται εκρηκτικά καψύλλια, η σχέση ανάμεσα στη διάμετρο των διατρημάτων και αυτή των καψυλλίων πρέπει να είναι γύρω στο 1,2 με 1,25 για μικρά μεγέθη, ενώ για μεγαλύτερα πρέπει να υπάρχει ένα κενό ακτίνας 10 mm.

Εξάλλου, χρήση χύδην εκρηκτικών γαλακτωμάτων είναι ιδανική για τη μείωση του αριθμού των διατρημάτων, ή την μέγιστη εκμετάλλευση της διάτρησης (Jimeno et al., 1995).



Σχήμα 2.42: Συνδέσεις των δακτυλίων σε ανατίναξη φρέατος (Jimeno et al., 1995)

Για την περίπτωση της διάταξης των διατρημάτων κυκλικώς σε δακτυλίους (Σχήμα 2.42), σύμφωνα με τον Konya (1995), ακολουθείται ο παρακάτω σχεδιασμός ανατίναξης (Τσουτρέλης, 2001):

Υπολογισμός ιδανικού φορτίου:

$$\mathbf{B} = 0.012 \left(\frac{2\rho_e}{\rho} + 1.5\right) d_e$$

όπου:

$$\begin{split} B &= \varphi o \rho \tau i o \ (m) \\ \rho_e &= \pi υ \kappa v \acute{o} \tau \eta \tau \alpha \ \tau \eta \varsigma \ ε \kappa \rho \eta \kappa \tau \iota \kappa \acute{\eta} \varsigma \ \acute{u} \lambda \eta \varsigma \ (g/cm^3) \\ \rho &= \pi \upsilon \kappa v \acute{o} \tau \eta \tau \alpha \ \tau \upsilon \upsilon \ \pi \epsilon \tau \rho \acute{u} \mu \alpha \tau \circ \varsigma \ (g/cm^3) \\ d_e &= \delta \iota \acute{a} \mu \epsilon \tau \rho \circ \varsigma \ \gamma \circ \mu \acute{\omega} \sigma \epsilon \omega \varsigma \ \tau \eta \varsigma \ \epsilon \kappa \rho \eta \kappa \tau \iota \kappa \acute{\eta} \varsigma \ \acute{u} \lambda \eta \varsigma \ (mm) \end{split}$$

Υπολογισμός αριθμού δακτυλίων :

$$N_R = \frac{\left\{R_s - \frac{B}{2}\right\}}{B} + 1$$

όπου:

 N_R = αριθμός δακτυλίων R_S = ακτίνα φρέατος (m) B = φορτίο (m)

Υπολογισμός πραγματικού φορτίου (από δακτύλιο σε δακτύλιο):

$$B_A = \frac{2R_S}{2N_R - 1}$$

Σχέση αποστάσεως προς φορτίο (εκτίμηση):

$$S = B$$

όπου:

 $\mathbf{S}=$ απόσταση (m) μεταξύ των διατρημάτων του ίδιου δακτυλίου

B = φορτίο (m)

Αριθμός διατρημάτων ανά κυκλικό δακτύλιο:

$$N_H = \frac{2\pi \cdot R_R}{S}$$

όπου:

 $N_{\rm H}$ = αριθμός διατρημάτων ανά δακτύλιο

 R_R = ακτίνα του δακτυλίου (m)

S = απόσταση (m)

Πραγματική απόσταση μεταξύ των διατρημάτων του ίδιου δακτυλίου:

$$S_A = \frac{2\pi R_R}{N_H}$$

Προχώρηση ανά έκρηξη:

 $L = 2 \cdot B$ όπου: L = προχώρηση (m)B = φορτίο (m)

<u>Υποδιάτρηση:</u>

 $J = 0.3 \cdot B \ (\mathrm{m})$

<u>Επιγόμωση:</u>

 $h_s = 0.5 \,\mathrm{B} \,\mathrm{(m)}$

Εεκτροπή περιμετρικών διατρημάτων:

 $LO = 0,1 + H(\tan 2^{\circ})$ όπου: LO = πλάτος εκτροπής (m) H = μήκος διατρήσεως (m)

Χχρόνοι επιβράδυνσης:

Ελάχιστη διαφορά χρόνου ανά δακτύλιο 100-150 ms ή χρήση μέσων επιβράδυνσης LP

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΚΟΠΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή της αρχικής κοπής ή προεκσκαφής (opening cut), αποτελεί την πιο σημαντική διαδικασία σε μια ανατίναξη για τη διάνοιξη υπογείων έργων. Από αυτήν άλλωστε καθορίζεται η προχώρηση του έργου ανά ανατίναξη.

Τα διατρήματα της αρχικής κοπής αποσκοπούν με την έκρηξή τους να δημιουργήσουν στο πέτρωμα μια κατάλληλης γεωμετρικής μορφής εκσκαφή, ώστε η επιφάνειά της να χρησιμεύσει ως επιφάνεια ανάκλασης του κρουστικού κύματος από τις εκρήξεις της επόμενης σειράς διατρημάτων. Αυτό επαναλαμβάνεται για την επόμενη σειρά διατρημάτων κοκ., μέχρι να ολοκληρωθεί η ανατίναξη στο μέτωπο (Τσουτρέλης, 2001). Συνεπώς, η προεκσκαφή βοηθά στη δημιουργία ελεύθερων επιφανειών, έτσι ώστε να βελτιωθεί ο μηχανισμός θραύσης του πετρώματος. Από αυτήν εξαρτάται δηλαδή η επιτυχία του όλου σχεδίου της ανατίναξης.

Οι διατάξεις των διατρημάτων προεκσκαφής είναι διαφόρων τύπων, ενώ σύμφωνα με τους περισσότερους ερευνητές διακρίνονται δύο ομάδες αρχικών κοπών:

- Κοπές υπό γωνία (angled cuts)
- Παράλληλες κοπές (parallel cuts)

Στην πρώτη κατηγορία προεκσκαφών περιλαμβάνονται (Τσουτρέλης, 2001):

- 1. ο κωνοειδής ή σφηνοειδής τύπος (V cut/wedge cut),
- 2. ο πυραμιδοειδής τύπος (pyramid cut),
- 3. ο ριπιδοειδής τύπος ή τύπος βεντάλιας (fan cut).

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται (Τσουτρέλης, 2001):

 η κυλινδρική προεκσκαφή και παραλλαγές της όπως είναι οι: fagersta cut, διπλής σπείρας (double spiral cut) και coromant cut,

2. η προεκσκαφή πυκνής διάτρησης (burn cut).

Η επιλογή της κοπής πρέπει να γίνεται με γνώμονα την επιθυμητή προχώρηση ανά ανατίναξη, τον διαθέσιμο τύπο συστήματος διάτρησης και την ικανότητα των χειριστών, καθώς επίσης τον τύπο του προς ανατίναξη πετρώματος και τέλος, το βάθος στο οποίο γίνεται η εξόρυξη. Σύμφωνα πάντως με τον Τσουτρέλη (2001), η διάταξη που χρησιμοποιείται περισσότερο για την διάνοιξη αρχικής κοπής είναι η κυλινδρική και συγκεκριμένα αυτή των τεσσάρων τετραγώνων, με αμέσως επόμενη την πυραμιδοειδή διάταξη.

Στις επόμενες παραγράφους δίνεται η περιγραφή των τύπων προεκσκαφής που αναφέρονται παραπάνω, ενώ γίνεται και μια προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ τους.

3.2 Διατάξεις διατρημάτων αρχικής κοπής υπό γωνία

Η αρχική κοπή με διάταξη διατρημάτων υπό γωνία αποτελείται από διατρήματα, τα οποία ορύσσονται υπό διάφορες γωνίες προς το μέτωπο έτσι, ώστε να παρέχεται στο προς ανατίναξη πέτρωμα όσο περισσότερη ελευθερία κίνησης γίνεται (Bhandari, 1997). Έτσι, γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας του υπόγειου έργου και επί πλέον είναι δυνατός ο προσανατολισμός τους προς τυχόν ορατές ασυνέχειες του πετρώματος του μετώπου. Κατά τη χρήση τέτοιου είδους διατάξεων οι συντελεστές διάτρησης και κατανάλωσης εκρηκτικού είναι μικροί, αφού απαιτείται μικρότερος αριθμός διατρημάτων και μικρότερη ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά μέτρο προχώρησης σε σχέση με τις παράλληλες διατάξεις.

Παρόλα αυτά όμως, σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το πλάτος του αρχικού ανοίγματος είναι περιοριστικό. Πρέπει δηλαδή το άνοιγμα να είναι πλάτους τέτοιου, που να επιτρέπει την τοποθέτηση των διατρημάτων σε σχετικά μικρές προς το μέτωπο γωνίες. Επιπλέον, παρουσιάζονται δυσκολίες κατά τη διάνοιξη των διατρημάτων κι έτσι απαιτείται πιο έμπειρο προσωπικό για τη χρήση του διατρητικού εξοπλισμού. Συνήθως κατά τη διάταξη διατρημάτων υπό γωνία, το πέτρωμα μετακινείται αρκετά μακριά από το αρχικό άνοιγμα, ενώ η θραύση είναι πιο χονδρόκοκκη εκτός της προεκσκαφής. Ακόμη, απαιτούνται μεγαλύτερου μήκους διατρητικά στελέχη για την όρυξη των διατρημάτων υπό γωνία, έτσι ώστε να επιτευχθεί το ίδιο βάθος με αυτό των περιβαλλόντων διατρημάτων του γύρου ανατίναξης (Bhandari, 1997). Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι διάφοροι τύποι διατάξεων διατρημάτων υπό γωνία.

3.2.1 Κωνοειδής ή σφηνοειδής τύπος

Ο κωνοειδής ή σφηνοειδής τύπος προεκσκαφής (V- cut), στην απλούστερη μορφή του, αποτελείται από δύο ή τρεις σειρές διατρημάτων τα οποία ορύσσονται γύρω από το κέντρο διατομής της στοάς και υπό γωνία προς το μέτωπο, έτσι ώστε να συγκλίνουν σε μία κοινή ευθεία γραμμή, κάθετα ή οριζόντια. Έτσι, μέρος της δύναμης που προσφέρεται από την εκρηκτική ύλη κατευθύνεται προς την ελεύθερη επιφάνεια του μετώπου, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας εγκοπής μορφής V (Σχήμα 3.1). Η γωνία στην κορυφή που σχηματίζεται είναι περίπου 60 μοιρών ή και μεγαλύτερη. Σύμφωνα με τους Jimeno et al. (1995), ο λόγος είναι ότι αν η γωνία ήταν μικρότερη, οι γομώσεις θα ήταν σε πολύ περιορισμένο χώρο κι έτσι θα απαιτείται η γωνία να είναι οξύτερη, π.χ. λόγω έλλειψης χώρου, τότε γομώνονται πυκνότερα τα διατρήματα ή χρησιμοποιείται η διπλή σφηνοειδής διάταξη. Αυτού του τύπου η διάταξη, του διπλού V, χρησιμοποιείται επίσης σε περιπτώσεις που το πέτρωμα είναι μεγάλης σκληρότητας



Σχήμα 3.1: (α) Προεκσκαφή σφηνοειδούς διάταξης, (β) Γεωμετρική μορφή της σχηματιζόμενης σφήνας, (γ) Ανάλυση της δυνάμεως που ασκείται στο πέτρωμα κατά την έκρηξη (Τσουτρέλης, 2001)

ή όταν μεγαλύτερες προχωρήσεις είναι επιθυμητές. Σπανιότερα η διάνοιξη της προεκσκαφής γίνεται και σε περισσότερες από δύο φάσεις (Τσουτρέλης, 2001).

Σε περιπτώσεις σκληρών πετρωμάτων, εκτός από τη διάταξη πολλαπλών φάσεων, όπου τοποθετούνται σφήνες η μία μέσα στην άλλη με αμβλυνόμενη διαδοχικά την γωνία της κορυφής που σχηματίζεται, χρησιμοποιούνται και ακόμα πιο περίπλοκες διατάξεις. Μία εκδοχή είναι αυτή κατά την οποία η αρχική κοπή δεν είναι συμμετρική ως προς την κεντρική γραμμή και τα διατρήματα σε κάθε πλευρά εναλλάσσονται (στρεβλωμένη σφηνοειδής διάταξη). Άλλη περίπτωση είναι αυτή της κάθετης σφηνοειδούς διάταξης, η οποία είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις που το πλάτος της στοάς είναι μεγαλύτερο από το ύψος (Bhandari, 1997).

Για τη σωστή κατεύθυνση των διατρημάτων χρησιμοποιείται ένας οδηγός ορύξεως όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Στον οδηγό αυτόν, αφού δοθεί η επιθυμητή κλίση, π.χ. 60° και στερεωθεί καλά πάνω στο μέτωπο με τον μεσαίο σωλήνα, ξεκινά η όρυξη των διατρημάτων (Πολυχρονόπουλος, 1979).



Σχήμα 3.2: Οδηγός όρυξης διατρημάτων προεκσκαφής σφηνοειδούς διάταξης (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Οι κύριες παράμετροι για το σχεδιασμό της προεκσκαφής σε συνάρτηση με την διάμετρο D της διάτρησης είναι (Jimeno et al., 1995):

- Συνολικό ύψος προεκσκαφής $H_c = 46D$.
- Φορτίο B= 34D.

- $Y \psi \circ \zeta \gamma \circ \mu \omega \sigma \varepsilon \omega \varsigma \pi \upsilon \theta \mu \varepsilon \nu \alpha l_f = 0.3L$ (space L to $\mu \eta \kappa \circ \varsigma$ tou diatrh matos).
- Ύψος επιγόμωσης T= 12D.
- Αριθμός σφηνών (V) κατακορύφως: 3.



Σχήμα 3.3: Διάταξη διατρημάτων στην περίπτωση διπλής σφηνοειδούς διατάξεως (Jimeno et al., 1997)

Τα βοηθητικά διατρήματα (διευρύνσεως), τα οποία επίσης ορύσσονται υπό γωνία με τον άξονα της στοάς (Σχήμα 3.3), τοποθετούνται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις (Jimeno et al. 1995):

- Φορτίο B= 24D.
- Συγκέντρωση γομώσεως πυθμένα $q_f = 990 D^2$ (η D σε m).
- $Y \psi o \zeta \gamma o \mu \omega \sigma \varepsilon \omega \zeta \pi u \theta \mu \varepsilon v \alpha l_f = 0.3L$ (ópou L to $\mu \eta \kappa o \zeta$ tou diatrh matos).
- Ύψος επιγόμωσης T= 12D.

Το μέγεθος του φορτίου θα πρέπει να ικανοποιεί την εξής συνθήκη: $B \le 0.5L - 0.2m$, δηλαδή για μικρού μήκους διατρήματα το φορτίο θα πρέπει να μειωθεί. Πολλές από τις παραμέτρους αυτές μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια διαγραμμάτων, όπως αυτό του Olofsson (1988) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4, ή με τη χρήση πινάκων όπως αυτοί του Πολυχρονόπουλου (1979), οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για τον υπολογισμό της διατρήσεως και γομώσεως των διατρημάτων για περιπτώσεις ασβεστολιθικών πετρωμάτων (Πίνακας 3.1 και 3.2).



Σχήμα 3.4: Υπολογισμός των φορτίων των διατρημάτων προεκσκαφής και των βοηθητικών, καθώς και του ύψους της προεκσκαφής στο μέτωπο, συναρτήσει της γόμωσης πυθμένα, για διαφορετικές διαμέτρους διάτρησης και είδη εκρηκτικών (Τσουτρέλης, 2001)

Διάμετρος	Συνολικό ύψος	Πραγματικό	Συγκέντρωση	Αριθμός V-cut
διατρημάτων d	προεκσκαφής	εύρος μετώπου	γομώσεως	(κατακορύφως)
(mm)	(m)	V ₁ (m)	πυθμένα (kg/m)	
30	1,5	1,0	0,9	3
38	1,6	1,2	1,4	3
45	1,8	1,5	2,0	3
51	2,0	2,0	2,6	3

Πίνακας 3.1: Διάτρηση και γόμωση διατρημάτων προεκσκαφής σφηνοειδούς διάταξης (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Τα περιμετρικά διατρήματα πρέπει να τοποθετούνται από 0,10 έως 0,20 m εντός της διατομής και να διευθύνονται λοξά προς τα έξω, έτσι ώστε το βάθος τους να μην ξεφεύγει από την περίμετρό της. Τα διατρήματα της προεκσκαφής, όπως επίσης και τα βοηθητικά, θα πρέπει να πυροδοτηθούν με ms-καψύλλια. Αυτό γιατί αν γινόταν π.χ. χρήση καψυλλίων με επιβράδυνση 0,5 sec δεν θα υπήρχε καλός συντονισμός μεταξύ των διατρημάτων και επομένως ο θρυμματισμός του πετρώματος δεν θα ήταν ικανοποιητικός. Το ίδιο αποτέλεσμα όσον αφορά τον θρυμματισμό, θα λαμβανόταν και αν ο χρόνος επιβράδυνσης μεταξύ των σφηνών (V- cuts) ήταν μικρός, αφού δε θα επέτρεπε τη χαλάρωση του πετρώματος (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Όσον αφορά τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής και τα περιμετρικά, υπολογίζονται με τον τρόπο που έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4.

Διάμετρος διατρημάτων d	Πραγματικό εύρος μετώπου	Συγκέντρωση γομώσεως		Τμήμα επιγομώσεως
(mm)	V ₁ (m)	Πυθμένα (kg/m)	Στήλης (kg/m)	(m)
30	0,80	0,90	0,36	0,40
38	0,90	1,40	0,55	0,45
45	1,00	2,00	0,80	0,50
48	1,10	2,30	0,90	0,55
51	1,20	2,60	1,00	0,60

Πίνακας 3.2: Διάτρηση και γόμωση βοηθητικών διατρημάτων προεκσκαφής σφηνοειδούς διάταξης (Πολυχρονόπουλος, 1979)
Για να είναι ευκολότερη η σύγκριση της διάταξης αυτής σε σχέση με τις υπόλοιπες, είναι σημαντικό να παρατεθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι:

1. Είναι κατάλληλη για κάθε είδους πέτρωμα.

 Σε περίπτωση που παρουσιάζονται ασυνέχειες στο πέτρωμα η προεκσκαφή γίνεται αναλόγως (π.χ. οριζόντια σφηνοειδής διάταξη για την περίπτωση οριζόντιων ρωγμών).

 Απαιτείται μικρός αριθμός διατρημάτων, αφού έχει τη μικρότερη ειδική διάτρηση ανά μέτρο προχωρήσεως της στοάς.

Τα μειονεκτήματα είναι :

Επιτυγχάνεται σχετικά μικρή προχώρηση ανά ανατίναξη (45-50% του πλάτους της στοάς).

 Υπάρχει πάντοτε ο κίνδυνος παρεκκλίσεως, που σε στοά μεγάλου πλάτους μπορεί να φτάσει το 5% (25 cm) και κάτι τέτοιο ενδέχεται να προκαλέσει συμπαθητική ανατίναξη γειτονικών διατρημάτων.

 Είναι απαραίτητη η επίτευξη ακρίβειας κατά την όρυξη των διατρημάτων, διαδικασία που θεωρείται χρονοβόρος και δύσκολη, ιδιαίτερα όταν ως κριτήριο προβάλλεται η ταχύτητα προχωρήσεως.

4. Το εξορυσσόμενο πέτρωμα εκτοξεύεται μακριά απ' το μέτωπο με αποτέλεσμα:

(α) Τη δυσχερή απομάκρυνση τυχόν χαλαρών τεμαχίων από την οροφή, λόγω του ότι το δάπεδο εργασίας που σχηματίζεται από θραυσμένο πέτρωμα δεν έχει αρκετά μεγάλο ύψος.

(β) Την αναγκαστική απομάκρυνση του διατρητικού εξοπλισμού σε μεγάλη απόσταση από το μέτωπο.

(γ) Τον κίνδυνο να προκληθεί ζημιά στο σύστημα αερισμού του μετώπου.

 Θεωρείται γενικά δύσκολος ο σχεδιασμός και η τροποποίηση των διατρημάτων της διάταξης αυτής και για το λόγο αυτό, η χρήση της είναι περιορισμένη.

3.2.2 Σφυροειδής διάταξη

Η σφυροειδής διάταξη (Hammer cut/Draw cut) των διατρημάτων προεκσκαφής που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5, είναι ουσιαστικά μια τροποποιημένη σφηνοειδής. Συνήθως τοποθετείται εκτός του κέντρου του μετώπου και τα διατρήματα ορύσσονται έτσι ώστε να μη συγκλίνουν σε ένα σημείο. Μια διάταξη τέτοιας μορφής απαιτεί πολύ προσεκτική διάτρηση, όταν όμως αυτή, η γόμωση και η πυροδότηση γίνει σωστά, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι πολύ ικανοποιητικά. Ιδιαιτέρως σε περιπτώσεις που παρουσιάζεται κάποια ρωγμή ή ασυνέχεια στο κάτω μέρος ή το πλάι της νοητής σφήνας που σχηματίζεται, η απόδοση της μεθόδου είναι πολύ καλή. Μάλιστα, η πιο συνηθισμένη περίπτωση εφαρμογής της είναι για τη διάνοιξη μικρών υπόγειων ανοιγμάτων, όπου ακόμα και οι ελαφρές διατρητικές αερόσφυρες, ή άλλου είδους ελαφρά διατρητικά μηχανήματα δεν έχουν αρκετό χώρο, ώστε να μπορεί η προεκσκαφή να ορυχθεί στο κέντρο του μετώπου (Bhandari, 1997).



Σχήμα 3.5: Σφυροειδής διάταξη διατρημάτων προεκσκαφής (Bhandari, 1997)

3.2.3 Πυραμιδοειδής διάταξη

Η μορφή αυτή διατάξεως των διατρημάτων είναι και η παλαιότερη σύμφωνα με τον Τσουτρέλη (2001), ενώ σύμφωνα με τους Πολυχρονόπουλο (1979) και Jimeno et al. (1995), θεωρείται παραλλαγή της σφηνοειδούς διάταξης. Για τη διάνοιξη, ορύσσονται τέσσερα ή και περισσότερα διατρήματα έτσι, ώστε να συγκλίνουν σε κοινό σημείο, σχηματίζοντας μια νοητή πυραμίδα με κορυφή στο πίσω μέρος του μετώπου. Με τον τρόπο αυτό, η συγκέντρωση της εκρηκτικής ύλης στην κορυφή της πυραμίδας είναι μεγάλη. Έτσι με ταυτόχρονη έκρηξη όλων των διατρημάτων, δημιουργείται μια ικανοποιητική σε όγκο και επιφάνεια αρχική κοπή, αρκεί η γωνία της κορυφής της πυραμίδας να μην είναι πολύ οξεία. Η προχώρηση που μπορεί να επιτευχθεί με τη διάταξη αυτή, φτάνει το 70-80% του πλάτους της εκσκαφής, ενώ δεν υπερβαίνει το 1,5-2,0 m ανά ανατίναξη. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε στοές με διατομή της τάξεως των 6-7 m² και θεωρείται κατάλληλη για κάθε είδους πέτρωμα, εκεί που χρησιμοποιείται όμως περισσότερο είναι στα σκληρά πετρώματα. Η όρυξη των διατρημάτων γίνεται με γρήση ελαφρών διατρητικών αεροσφυρών, στηριζόμενων σε υποστάτη, ή μικρών ευέλικτων υδραυλικών διατρητικών φορείων υπογείων (jumbo), προσαρμοσμένων για σήραγγες μικρού πλάτους (π.χ. το Boomer H-104 της Atlas Copco με υδραυλική σφύρα). Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι αυτή της διπλής πυραμίδας οκτώ διατρημάτων, όπου η διάνοιξη της προεκσκαφής γίνεται σε δύο φάσεις (Τσουτρέλης, 2001). Άλλες παραλλαγές περιλαμβάνουν διατάξεις της μορφής κολοβής πυραμίδας ή κώνου (Bhandari, 1997). Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι δύο βασικές μορφές πυραμιδοειδούς διάταξης διατρημάτων, με τους αριθμούς να υποδηλώνουν τη σειρά εκρήξεώς τους.



Σχήμα 3.6: Πυραμιδοειδής διάταξη των διατρημάτων προεκσκαφής: (α) Μονή πυραμίδα, (β) Διπλή πυραμίδα (Τσουτρέλης, 2001)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι όμοια με αυτά της σφηνοειδούς διάταξης, με επιπλέον τα εξής:

1. Η διάταξη των διατρημάτων είναι απλής μορφής.

 Η προχώρηση σε σχέση με το πλάτος της προεκσκαφής είναι μεγαλύτερη (70-80%).

 Θεωρείται η πλέον κατάλληλη για πολύ σκληρά πετρώματα και για την όρυξη φρεάτων, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης εκρηκτικής ύλης στην κορυφή της πυραμίδας.

Τα μειονεκτήματα είναι:

1. Τα διατρήματα με κλίση προς τα κάτω μπορεί να παρουσιάσουν δυσκολία κατά την όρυξή τους.

 Η πιθανότητα παρεκκλίσεως των διατρημάτων είναι μεγάλη, επομένως για μεγάλα μήκη διάτρησης (άρα και προχώρησης), τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά. Όπως και στην περίπτωση της σφηνοειδούς διάταξης το εξορυσσόμενο πέτρωμα εκτοξεύεται μακριά από το μέτωπο.

3.2.4 Ριπιδοειδής διάταξη

Σύμφωνα με τον ριπιδοειδή τύπο διάταξης (fan cut), ορύσσονται δύο ή τρεις σειρές οριζόντιων διατρημάτων. Το πρώτο διάτρημα ορύσσεται υπό γωνία προς το μέτωπο και πυροδοτείται πρώτο. Τα επόμενα ορύσσονται έτσι, ώστε η γωνία συνεχώς να αυξάνει παράλληλα με το μήκος τους και πυροδοτούνται κατά σειρά. Με τον τρόπο αυτό, κάθε διάτρημα εκρήγνυται προς μια καινούρια ελεύθερη επιφάνεια, κι έτσι η αρχική κοπή διευρύνεται σταδιακά. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (drag cut), με τρεις συνήθως σειρές διατρημάτων, όταν το άνοιγμα είναι στενό. Τα διατρήματα στην περίπτωση αυτή έχουν κλίση προς τα μέσα και κατεύθυνση προς το επάνω μέρος του μετώπου, ενώ σε περίπτωση που το άνοιγμα είναι πολύ μικρό, κατευθύνονται προς τα κάτω. Η όρυξη τους γίνεται με χρήση οδηγού όπως και στη σφηνοειδή διάταξη, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η διάταξη μορφής ριπιδίου δίνει καλά αποτελέσματα σε λεπτοπλακώδη πετρώματα, όμως δεν εφαρμόζεται συχνά, λόγω της δύσκολης διάτρησης. Εκεί που βρίσκει περιορισμένου βαθμού εφαρμογή είναι σε μικρά μέτωπα, όπου χρησιμοποιείται ελαφρύς διατρητικός εξοπλισμός (Πολυχρονόπουλος 1979, Bhandari 1997, Τσουτρέλης 2001).

Στο Σχήμα 3.7 περιγράφονται οι διατάξεις διατρημάτων προεκσκαφής μορφής ριπιδίου σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση.



Σχήμα 3.7: Κατακόρυφες τομές και κατόψεις των διατάξεων διατρημάτων προεκσκαφής ριπιδοειδούς μορφής (α) Οριζόντια διάταξη σε 2 ή 3 σειρές (β) Κατακόρυφη διάταξη σε 3 σειρές (Τσουτρέλης, 2001)

Όταν η διατομή της στοάς είναι μεγάλου πλάτους, η προεκσκαφή διανοίγεται με διατρήματα που σχηματίζουν δύο ριπίδια τα οποία επικαλύπτονται και το ένα τοποθετείται σε απόσταση 0,3 m πάνω από το άλλο. Αυτό, αφήνει ένα μέρος του πετρώματος ανέπαφο στο κέντρο του πίσω μέρους της εκσκαφής, το οποίο έχει τη μορφή σφήνας. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα, αυτό που γίνεται συνήθως είναι να μειώνεται ελαφρώς το μήκος των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής, με συνέπεια να μειώνεται και η προχώρηση ανά ανατίναξη (Bhandari, 1997).

Οι παράμετροι σχεδιασμού της ανατίναξης για τα διατρήματα προεκσκαφής ριπιδοειδούς διάταξης υπολογίζονται με τρόπο ίδιο με αυτόν της σφηνοειδούς. Το φορτίο πρέπει να ικανοποιεί την εξής συνθήκη:

$$B < L - 0,4$$
 (3.1)

και το εύρος του μετώπου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $\frac{L-0,4}{2}$, όπου B το φορτίο και L το μήκος του διατρήματος (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Τα διατρήματα διευρύνσεως αυτού του τύπου ορύσσονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις (Jimeno et al., 1995):

- Φορτίο B= 23D.
- Συγκέντρωση γομώσεως πυθμένα $q_f = 990 D^2$ (η D σε m).
- Υψος γομώσεως πυθμένα l_f= 0,3L (όπου L το μήκος του διατρήματος).

Ένας ακόμη τρόπος υπολογισμού των βοηθητικών διατρημάτων δίνεται από τον Πολυχρονόπουλο (1979) στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Διάταξη και γόμωση των βοηθητικών διατρημάτων ριπιδ	οειδούς
τύπου προεκσκαφής με 3 Fan cut (Πολυχρονόπουλος, 1979)	

Διάμετρος διατρημάτων ο	Ύψος προεκσκα-	Πραγματικό Εύρος	Συγκέντρωση γομώσεως		Τμήμα επινομώσεως	
(mm)	φής (m)	μετώπου V ₁ (m)	Πυθμένα (kg/m)	Στήλης (kg/	(m)	
30	1,50	0,80	0,90	0,35	0,50	
40	1,60	0,90	1,60	0,65	0,55	
45	1,80	1,00	2,00	0,80	0,60	
48	1,90	1,10	2,30	0,90	0,65	
51	2,00	1,20	2,60	1,00	0,75	

Σε ειδικές περιπτώσεις ελεγχόμενης εξόρυξης, το ύψος της γομώσεως πυθμένα πρέπει να μειώνεται, κάτι που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, όπου περιγράφονται αναλυτικά οι ελεγχόμενες μέθοδοι ανατίναξης.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ριπιδοειδούς διάταξης για τα διατρήματα προεκσκαφής είναι:

 Η ικανοποιητική προχώρηση στις περιπτώσεις που μπορεί να εφαρμοσθεί και ιδιαίτερα σε λεπτοπλακώδη πετρώματα και μικρού μήκους στοές. Τα μήκη των διατρημάτων δεν εξαρτώνται τόσο πολύ από το πλάτος της στοάς σε σύγκριση με τη σφηνοειδή διάταξη.

Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα δεν είναι λίγα:

1. Δύσκολη όρυξη των διατρημάτων.

Δύσκολος σχεδιασμός και τροποποίηση των διατρημάτων, σε περίπτωση που για κάποιο λόγο (π.χ. ποιότητα του πετρώματος) χρειαστεί να μεταβληθεί η θέση τους ή η προχώρηση ανά ανατίναξη.

 Λόγω της ασυμμετρίας της μεθόδου, είναι δυνατόν σε ορισμένες περιπτώσεις να μην επιτευχθεί πλήρης προχώρηση σε όλο το πλάτος της διατομής.

 Για να επιτευχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα πρέπει το πλάτος της στοάς να επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου και το πέτρωμα να θραύεται εύκολα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σχεδιασμός του ριπιδοειδούς προτύπου διάτρησης δεν είναι απλός. Η αρχή της κατασκευής του περιγράφεται παρακάτω, στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Κατασκευή της διάταξης μορφής ριπιδίου (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Σύμφωνα με τον Πολυχρονόπουλο (1979), για την κατασκευή του προτύπου, σχεδιάζεται αρχικά η κατακόρυφη ευθεία που διέρχεται από το μέσον της διατομής κι έπειτα η οριζόντια, σε απόσταση $E = 0,75 \cdot V$, όπου V το μέγιστο εύρος του μετώπου. Οι επόμενες σειρές διατρημάτων απέχουν μεταξύ τους $E = 0,8 \cdot V$. Αφού επιλεγεί το επιθυμητό μήκος προχώρησης A_m, σχεδιάζεται το διάτρημα H₃ ξεκινώντας από το σημείο A, όπου τέμνονται η γραμμή εύρους του μετώπου με την κατακόρυφο. Ο σχεδιασμός του γίνεται έτσι, ώστε η απόσταση της πλευράς της στοάς από το μέτωπο (α₂), να είναι τουλάχιστον ίση με το μήκος του διατρήματος H₃. Δηλαδή πρέπει να ισχύει α₁ = α₂. Κατόπιν, η απόσταση $E = 0,8 \cdot V$ μεταφέρεται στη γραμμή εύρους του μετώπου, εκατέρωθεν της κατακόρυφου και κατασκευάζονται με τρόπο συμμετρικό τα διατρήματα H₄ και H₅. Η κλίση των διατρημάτων σχεδιάζεται όπως και για το διάτρημα H₃.

Ο αριθμός των διατρημάτων που θα τοποθετηθούν μεταξύ του H₃ και του κέντρου της διατομής, εξαρτάται από τα επιτρεπόμενα εύρη μετώπου V₁, V₂, ... V_n, τα οποία διαφοροποιούνται σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με την εμφάνιση ρωγμών στο πέτρωμα. Όταν το πέτρωμα δεν παρουσιάζει ρωγμές τα εύρη V, λαμβάνονται ίσα μεταξύ τους.

Το μήκος κάθε διατρήματος μεταξύ του H₄ και του κέντρου της διατομής δεν πρέπει να απέχει από το διάτρημα H₅ πάνω από 0,50 m. Η γωνία α μεταξύ του διατρήματος H₁ και της επιφανείας του μετώπου, δεν επιτρέπεται αν είναι μεγαλύτερη από 35°, ενώ η γωνία β μεταξύ των διατρημάτων H₁, H₂, H₃ και του τόξου AB δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 75°.

Στη συνέχεια από τα σημεία 1, 2, 3, 4 και 5 της κάτοψης μεταφέρονται και σχεδιάζονται τα διατρήματα στην κατακόρυφη διατομή της στοάς και έπειτα το άνοιγμα της αρχικής κοπής.

Η χρόνοι έναυσης των διατρημάτων της προεκσκαφής φαίνονται παραπάνω στο Σχήμα 3.8, όμως όπως είναι φανερό και στο Σχήμα 3.7, η πυροδότηση μπορεί να γίνει και με διαφορετική σειρά.

Είναι φανερό λοιπόν, ότι ο σχεδιασμός μιας τέτοιας μορφής προεκσκαφής, όπως άλλωστε συμβαίνει και με τη σφηνοειδή, παρουσιάζει δυσκολίες. Το ίδιο ισχύει όπως αναφέρθηκε παραπάνω και στην εφαρμογή των διατάξεων αυτών, καθώς και στην τυχόν τροποποίηση τους. Για τους λόγους αυτούς, ενώ παλαιότερα η μέθοδος είχε ευρεία χρήση, στις μέρες μας έχει περιοριστεί.

3.3 Παράλληλες διατάξεις διατρημάτων προεκσκαφής

Σε αντίθεση με τις διατάξεις υπό γωνία, κατά τις οποίες το αρχικό άνοιγμα που σχηματίζεται έχει τη μορφή σφήνας ή πυραμίδας, με τη χρήση παράλληλων διατάξεων των διατρημάτων προεκσκαφής, ο όγκος του εξορυσσόμενου πετρώματος είναι μορφής κυλίνδρου ή ορθογωνίου πρίσματος σταθερής διατομής κατά το μήκος του άξονα προχώρησης της στοάς (Bhandari, 1997).

Οι παράλληλες μέθοδοι προεκσκαφής χρησιμοποιούν κενά διατρήματα (αγόμωτα), τα οποία ονομάζονται ανακούφισης (relief holes) και δρουν ως ελεύθερες επιφάνειες ανάκλασης του κρουστικού κύματος που προέρχεται τα γύρω διατρήματα. Για να πετύχει η ανατίναξη, πρέπει να δοθεί αρκετός χρόνος και χώρος στο πέτρωμα που θραύεται προς την κατεύθυνση του κενού διατρήματος, ώστε να εκτοξευθεί προς τα έξω. Επομένως η διάτρηση πρέπει να γίνεται προσεκτικά έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η παραλληλία μεταξύ των διατρημάτων, όπως επίσης και ο καθορισμός των χρόνων έναυσής τους, ώστε η μέθοδος να είναι όσο πιο αποτελεσματική γίνεται.

Σε κάθε περίπτωση, τα διατρήματα ορύσσονται κάθετα προς το μέτωπο και παράλληλα προς τον άξονα προχώρησης της εκσκαφής. Η αρχική κοπή είναι προτιμότερο να τοποθετείται στο μέσον του εύρους της στοάς, ενώ η απόστασή της από το δάπεδο είναι τέτοια, ώστε να διευκολύνονται οι σχετικές εργασίες. Για να αποφευχθεί η συνάντηση των διατρημάτων με ρωγματωμένο πέτρωμα, η θέση της προεκσκαφής εναλλάσσεται λίγο δεξιά ή λίγο αριστερά από το κέντρο του πλάτους της διατομής μετά από κάθε ανατίναξη. Η διάνοιξή της γίνεται σταδιακά, με την έκρηξη των διατρημάτων που βρίσκονται γύρω από το κενό διάτρημα και την εκτίναξη του θραυσμένου πετρώματος εκτός της εκσκαφής να ακολουθεί (Τσουτρέλης, 2001).

Σε σύγκριση με τις διατάξεις υπό γωνία, οι παράλληλες δίνουν καλύτερο θρυμματισμό του πετρώματος, ενώ η απόσταση που αυτό εκτοξεύεται είναι μικρότερη, επιτρέποντας έτσι το εύκολο ξεσκάρωμα οροφής και παρειών της στοάς από το ύψος του σωρού που σχηματίζεται και χρησιμεύει ως πάτωμα εργασίας.

3.3.1 Κυλινδρικές διατάζεις

Στις μέρες μας, η κυλινδρική διάταξη (cylinder cut) των διατρημάτων προεκσκαφής είναι η πιο διαδεδομένη για τη διάνοιξη στοών ή σηράγγων, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις τους. Θεωρούνται ως η εξέλιξη ή η βελτιστοποίηση των διατάξεων πυκνής διάτρησης οι οποίες περιγράφονται σε επόμενη ενότητα. Αυτός ο τύπος διάταξης αποτελείται από ένα ή δύο κενά διατρήματα (ανακούφισης) προς τα οποία εκρήγνυνται σταδιακά τα γομωμένα διατρήματα (Σχήμα 3.9). Η διάμετρος των αγόμωτων διατρημάτων είναι μεγαλύτερη από των υπολοίπων (65- 175 mm) και ορύσσονται με κωνικά άκρα κομβίου (reaming bits) τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν στα ίδια διατρητικά στελέχη που χρησιμοποιούνται και για τα υπόλοιπα διατρήματα. Όλα τα διατρήματα της προεκσκαφής ορύσσονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές, κάτι που εξηγεί τη συχνή χρήση διατρητικών φορείων (jumbo drills), τα οποία διαθέτουν αυτόματο σύστημα παραλληλισμού (Jimeno, 1995).



Σχήμα 3.9: Κυλινδρική διάταξη ενός και δύο κενών διατρημάτων (Atlas Copco, 2003)

Εξάλλου, οι αποστάσεις αυτές μεταβάλλονται ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες διαμέτρους D και d. Το είδος του πετρώματος επηρεάζει επίσης την απόσταση και τη γόμωση των διατρημάτων και πρέπει να ρυθμίζεται σε κάθε περίπτωση, για να επιτευχθεί ικανοποιητική θραύση. Ο τύπος κυλινδρικής διάταξης που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι αυτός των τεσσάρων τετραγώνων, καθώς είναι ο ευκολότερος όσον αφορά στη σχεδίαση και εφαρμογή.

Για τον σχεδιασμό της ανατίναξης, οι σχέσεις που προτείνονται με τους εκάστοτε πάντα περιορισμούς ποικίλουν. Αυτό γιατί οι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τον υπολογισμό των παραμέτρων που συνθέτουν το πλάνο μιας υπόγειας ανατίναξης, και συγκεκριμένα για παράλληλη διάταξη διατρημάτων προεκσκαφής είναι πολλοί. Η Σοφατζίδη (2007), μετά από μελέτη των θεωρήσεων πέντε ερευνητών, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι αυτή που είναι η αντικειμενικότερη είναι των Persson (1994) και Παναγιώτου (1991) κι αυτό γιατί λαμβάνουν υπόψη όλες τις παραμέτρους μιας ανατίναξης. Συγκεκριμένα οι υπολογισμοί βασίζονται στη διάμετρο των διατρημάτων, τον τύπο της εκρηκτικής ύλης, τις διαστάσεις της σήραγγας, τον τύπο του πετρώματος και την γωνία παρέκκλισης των διατρημάτων. Η θεώρηση αυτή περιέχει τους ίδιους περίπου τύπους υπολογισμού των παραμέτρων της ανατίναξης της προεκσκαφής, με αυτούς της θεώρησης των Jimeno et al. (1995) και Bhandari (1997), με τη διαφορά ότι είναι λιγότερο απλοποιημένοι.

Κατά τους Persson (1994) και Παναγιώτου (1991) λοιπόν, η προχώρηση περιορίζεται από τη διάμετρο του κενού διατρήματος της αρχικής κοπής και από τις αποκλίσεις των μικρότερης διαμέτρου διατρημάτων. Για λόγους οικονομίας, πρέπει να γίνεται χρήση όλου του μήκους του διατρήματος. Η διάνοιξη στοών/σηράγγων μπορεί να γίνει πολύ αντιοικονομική αν η προχώρηση είναι πολύ μικρότερη από το 95% του μήκους διάτρησης. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται το απαιτούμενο μήκος διάτρησης σαν εξίσωση της διαμέτρου του κενού διατρήματος για επιθυμητή προχώρηση 95%, με διάταξη διατρημάτων αρχικής κοπής τεσσάρων τετραγώνων.

Η εξίσωση για το μήκος διάτρησης ℓ γράφεται (Persson et al., 1994):

$$\ell = 0.15 + 34.1 \cdot D_o - 39.4 \cdot D_o^2 \tag{3.2}$$

όπου D_o είναι η διάμετρος του διατρήματος εκφρασμένη σε μέτρα και $0.05 \le D_o \le 0.25$ m.

Η προχώρηση *l* δίνεται ως το 95% του μήκους διάτρησης και είναι (Persson et al., 1994):

$$\ell_a = 0.95 \cdot \ell \tag{3.3}$$

και οι δύο παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για παρέκκλιση διατρημάτων που δεν ξεπερνά το 2%.



Σχήμα 3.10: Απαιτούμενο μήκος διάτρησης για προχώρηση 95%, σε συνάρτηση με τη διάμετρο του κενού διατρήματος για αρχική κοπή τεσσάρων τετραγώνων (Persson et al., 1994)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, κάποιες φορές συμφέρει να χρησιμοποιηθούν δύο ή και περισσότερα κενά διατρήματα κατά την αρχική κοπή (π.χ. όταν ο διατρητικός εξοπλισμός δεν είναι ικανός για διατρήματα μεγάλης διαμέτρου). Τότε οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν η διάμετρος D_o' υπολογιστεί από την σχέση (Persson et al., 1994):

$$D_o' = d\sqrt{n} \tag{3.4}$$

όπου d είναι η διάμετρος των κενών διατρημάτων ίδιας διαμέτρου.

Η γεωμετρία των διατρημάτων με διάταξη κυλινδρικής προεκσκαφής και συγκεκριμένα η διάταξη των τεσσάρων τετραγώνων δίνεται στο Σχήμα 3.11.

A) <u>Διάταξη τεσσάρων τετραγώνων</u>

Η διάταξη αυτή είναι σήμερα η πλέον διαδεδομένη, ιδιαιτέρα σε περιπτώσεις περιορισμένου πλάτους στοών, που οι συνθήκες δεν επιτρέπουν τη διάνοιξη διατρημάτων υπό γωνία, λόγω του μεγέθους του διατρητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται.

Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης ανάλογα με τη διάμετρο των διατρημάτων υπολογίζεται με βάση τη σχέση (Persson et al., 1994):

$$q = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot P}{4} \text{ (kg/m)}, \tag{3.5}$$

όπου Ρ η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.



Σχήμα 3.11: Διάταξη διατρημάτων κυλινδρικής προεκσκαφής. (α) Η θέση της προεκσκαφής στη διατομή της στοάς (β) Η διάταξη των διατρημάτων προεκσκαφής της μεθόδου τεσσάρων τετραγώνων (Τσουτρέλης, 2001)

Πρώτο τετράγωνο

Η απόσταση ανάμεσα στο κενό διάτρημα και τα γομωμένα στο πρώτο τετράγωνο της διάταξης δεν πρέπει να ξεπερνά τις 1,7 φορές τη διάμετρο D_o του κενού διατρήματος έτσι, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε σχέση με την θραύση και τη μετακίνηση του πετρώματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12 που έχουν δώσει οι Langefors και Kihlström (1963), όταν γίνεται χρήση φορτίου μεγαλύτερου από $2 D_o$, η γωνία της επιφάνειας του θραυσμένου πετρώματος είναι πολύ μικρή και αυτό που επιτυγχάνεται είναι μόνο πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος ανάμεσα

Το μέγιστο φορτίο του πρώτου τετραγώνου είναι:

$$B_{1\max} = 1,7 \cdot D_o \tag{3.6}$$

Όταν η απόκλιση των διατρημάτων ξεπερνάει το 1% (κάτι που στην πράξη συμβαίνει πάντα), τότε χρησιμοποιείται ο συντελεστής λανθασμένης διάτρησης F:

$$F = a_1 + \ell \cdot a_2 \tag{3.7}$$

όπου a_1 η περιμετρική απόκλιση σε m και a_2 η γωνιακή απόκλιση σε m/m.

Έτσι, η σχέση υπολογισμού του πραγματικού φορτίου σε m γίνεται:

$$B_1 = B_{1\max} - F \tag{3.8}$$

<u>Η πλευρά του πρώτου τετραγώνου σε m είναι</u>: $A_1 = B_1 \cdot \sqrt{2}$ (3.9)

<u>Το μήκος επιγόμωσης σε m είναι</u>: $h_s = 10 \cdot d$ (3.10)

<u>Το μήκος γόμωσης σε m είναι</u>: $h_c = \ell - h_s$ (3.11)



Σχήμα 3.12: Σχέση μεταξύ κενού διατρήματος και φορτίου Β₁ κατά την ανατίναξη του πρώτου τετραγώνου (Τσουτρέλης, 2001)

Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης σε kg/m είναι:

$$q_{t} = 55d \cdot \left(\frac{B_{1man}}{D_{o}}\right)^{1.5} \cdot \left(B_{1max} - \frac{D_{o}}{2}\right) \cdot \left(\frac{C}{0.4}\right) \cdot \frac{1}{s_{ANFO}}$$
(3.12)

όπου: d= διάμετρος των γομωμένων διατρημάτων (m), C= συντελεστής ποιότητας πετρώματος (π.χ. 0,4 για τον Σουηδικό γρανίτη), s_{ANFO}= σχετική ισχύς της εκρηκτικής ύλης κατά βάρος, σε σύγκριση με πρότυπο (που είναι ANFO με τιμή 100).

<u>Η ποσότητα γόμωσης διατρημάτων σε kg είναι:</u> $Q_1 = q_t \cdot h_c$ (3.13)

Δεύτερο τετράγωνο

Μετά τον υπολογισμό του πρώτου τετραγώνου, το γεωμετρικό πρόβλημα προς επίλυση αλλάζει, αφού η έκρηξη προς ένα κυκλικό διάτρημα απαιτεί περισσότερη συγκέντρωση γόμωσης, από ότι προς ένα τετραγωνικό άνοιγμα (Σχήμα 3.13). Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του μεγαλύτερου περιορισμού και της λιγότερο αποτελεσματικής ανάκλασης του κρουστικού παλμού (Persson et al., 1994).

<u>Το μήκος ελεύθερης επιφάνειας σε m είναι:</u> $A = \sqrt{2 \cdot (B_1 - F)}$ (3.14)



Σχήμα 3.13: Γεωμετρία ανατίναξης προς ένα τετραγωνικό άνοιγμα πλευράς Α (Persson et al., 1994)

Το μέγιστο φορτίο του δεύτερου τετραγώνου είναι:

$$B_{2\max} = 10.5 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{(B_1 - F) \cdot q \cdot s_{ANFO}}{d \cdot C}}$$
(3.15)

<u>Το πραγματικό φορτίο του δευτέρου τετραγώνου σε m είναι:</u> $B_2 = B_{2 \max} - F$ (3.16) ενώ δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 2^A

Η πλευρά της ελεύθερης επιφάνειας του δεύτερου τετραγώνου σε m είναι:

$$A_2 = \sqrt{2} \cdot \left(B_2 + \frac{A_1}{2}\right) \tag{3.15}$$

Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης σε kg/m είναι:
$$q_t = \frac{540 \cdot d \cdot C \cdot A}{s_{ANFO}}$$
 (3.16)

Το μήκος της επιγόμωσης σε m είναι: το ίδιο με του πρώτου τετραγώνου (Σχέση 3.10)

<u>Το μήκος γόμωσης σε m είναι</u>: το ίδιο με του πρώτου τετραγώνου (Σχέση 3.11) <u>Η ποσότητα γόμωσης διατρημάτων σε kg είναι:</u> $Q_2 = q_t \cdot h_c$ (3.17)

Τρίτο και τέταρτο τετράγωνο

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία με το δεύτερο τετράγωνο υπολογίζονται οι παράμετροι και στο τρίτο και τέταρτο τετράγωνο με τις παρακάτω διαφορές:

Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης: υπολογίζεται από τη σχέση 3.5

Η πλευρά της ελεύθερης επιφάνειας του τρίτου τετραγώνου σε m είναι:

$$A_{3} = \sqrt{2} \cdot \left(B_{2} + \frac{A_{1}}{2} - F \right)$$
(3.18)

Η πλευρά της ελεύθερης επιφάνειας του τέταρτου τετραγώνου σε m είναι:

$$A_4 = \sqrt{2} \cdot \left(B_3 + \frac{A_2}{2} - F \right)$$
(3.19)

Το μέγιστο φορτίο του τρίτου τετραγώνου σε m είναι:

$$B_{3\max} = 10.5 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{B_2 \cdot q_t \cdot s_{ANFO}}{d \cdot C}}$$
(3.20)

Το μέγιστο φορτίο του τρίτου τετραγώνου σε m είναι:

$$B_{4\max} = 10.5 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{B_3 \cdot q_t \cdot s_{ANFO}}{d \cdot C}}$$
(3.21)

Τα πλεονεκτήματα της κυλινδρικής μεθόδου εκσκαφής είναι πολλά και για το λόγο αυτό είναι τόσο διαδεδομένη:

 Είναι πολύ εύκολη στο σχεδιασμό και στην εκτέλεση, αφού η διάτρηση επιτυγχάνεται με ακρίβεια με τη χρήση μηχανοποιημένου εξοπλισμού.

 Όταν εφαρμόζεται σωστά είναι η πλέον κατάλληλη για όλους σχεδόν τους τύπους των πετρωμάτων.

3. Η εκσφενδόνιση των προϊόντων της ανατίναξης εκτός του ανοίγματος θα είναι σχετικά μικρή και η μάζα τους συγκεντρωμένη, αφού η ανατίναξη γίνεται αρχικά προς ένα κεντρικό άνοιγμα. Έτσι μειώνεται ο χρόνος φόρτωσης και διευκολύνονται οι εργασίες έχοντας ως πάτωμα τον σωρό του θραυσμένου πετρώματος.

4. Η μέγιστη προχώρηση ανά ανατίναξη δεν εξαρτάται από το μέγεθος της διατομής της εκσκαφής, αλλά από τη διάμετρο του κενού διατρήματος κι έτσι είναι κατάλληλη για προχωρήσεις μεγάλου βάθους, ακόμα και για μικρής διατομής εκσκαφές.

5. Όταν η εκρηκτική ύλη κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος των διατρημάτων, ο θρυμματισμός είναι ικανοποιητικότερος και πιο ομοιόμορφος με κυλινδρικές προεκσκαφές από ότι με τις υπό γωνία διατάξεις.

 Λόγω της ευρείας χρήσης της μεθόδου, έχουν πλέον γίνει πάρα πολλές δοκιμές από πολλούς ερευνητές και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία.

Στον αντίποδα, τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι πολύ λιγότερα:

 Το πρόσθετο κόστος που απαιτεί η κατασκευή του κενού διατρήματος με μεγάλη διάμετρο, ιδιαίτερα για σκληρά πετρώματα.

2. Ο αριθμός των διατρημάτων είναι μεγάλος, αυξάνοντας έτσι τον συντελεστή διάτρησης και κατανάλωσης, με συνέπεια να αυξάνεται και το συνολικό κόστος.

3. Απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στη διάτρηση και πολύ προσεκτική επιλογή στις επιβραδύνσεις και στη σειρά των χρόνων έναυσης, έτσι ώστε να υπάρχει διαθέσιμος χώρος για τη διόγκωση του πετρώματος που ανατινάσσεται.

Στο Σχήμα 3.14, παρουσιάζονται διατάξεις των διατρημάτων με προεκσκαφή κυλινδρικού τύπου, οι οποίες έχουν από ένα έως τέσσερα κενά διατρήματα διαμέτρου 76 ή 102 mm.



Σχήμα 3.14: Διάταξη διατρημάτων κυλινδρικής προεκσκαφής με ένα έως τέσσερα κενά διατρήματα (Τσουτρέλης, 2001)

B) Διάταξη σπείρας

Στις κυλινδρικές διατάξεις, μετά από κάθε διαδοχική έκρηξη διατρήματος, ο διαθέσιμος χώρος για τα επόμενα διατρήματα που δεν έχουν ακόμη πυροδοτηθεί μεγαλώνει, άρα το φορτίο μπορεί να αυξάνεται διαδοχικά, με αποτέλεσμα τα γομωμένα διατρήματα να σχηματίζουν μία σπείρα όπως στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Διάταξη διατρημάτων προεκσκαφής μονής σπείρας πέντε διατρημάτων (Τσουτρέλης, 2001)

Οι Zhou et al. (2008) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με δοκιμές πεδίου συνέκριναν τη μέθοδο αυτή, με αυτή της πυκνής διάτρησης 9 διατρημάτων (9-hole cut) και τη διπλή σφηνοειδή διάταξη διατρημάτων, σε στοές διατομής 10,89 m² του ορυχείου σιδήρου Da-ye στην Κίνα.

Με τη χρήση της προσομοίωσης δια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνονται τα καταστατικά μοντέλα διάδοσης τασικών κυμάτων, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο υπολογισμού της έντασης του τασικού παλμού και έμμεσα για τον υπολογισμό του θρυμματισμού του πετρώματος, αλλά και για να προβλέψουν τις διάφορες επιδράσεις για διάφορα σχέδια ανατίναξης (Σαρρής, 2004). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι η μέθοδος μονής σπείρας έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- 1. Αποτελεσματική διάδοση και επίθεση του τασικού παλμού
- Υψηλότερη μέγιστη τάση
- 3. Μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης στο πέτρωμα

Στις δοκιμές πεδίου, με δεδομένες τις συνθήκες παραγωγής, συνέκριναν τα αποτελέσματα των ανατινάξεων σε σχέση με τη μέση προχώρηση, το βαθμό απόδοσης και την ειδική κατανάλωση εκρηκτικού. Οι παράμετροι παραθέτονται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων ανατίναξης με προεκσκαφή διάταξης μονής σπείρας και άλλες δύο διατάξεις αρχικής κοπής (Zhou et al., 2008)

Είδος	Αριθμός	Ποσότητο	Μέσο	Μέσο	Ποσοστό	Κατανά-
προεκ-	διατρημά	εκρηκτι-	Μήκος	μήκος	προχώ-	λωση
σκαφής	των	κής ύλης Ι	Διατρη-	προχώ-	ρησης %	εκρηκτι-
			μάτων m	ρησης m		ко́v kg/m
Διπλό	42	39,6	1,65	0,95	58	41,7
wedge cut						
Μονής	44(3)	38,3	1,68	1,22	73	31,4
σπείρας						
Πυκνής	46(4)	39,6	1,69	1,17	69	33,8
διάτρηση						

Τα συμπεράσματα μετά και από τις δοκιμές, δείχνουν την διάταξη μονής σπείρας να υπερέχει των άλλων, λόγω:

 Της απλής δομής της, που διευκολύνει το σχεδιασμό και μειώνει το χρόνο διάτρησης, άρα και το κόστος.

 Της υψηλής αποτελεσματικότητάς της όσον αφορά την προχώρηση ανά ανατίναξη.

 Της μικρότερης κατανάλωσης εκρηκτικής ύλης και επομένως του κόστους των εκρηκτικών.

Στο Σχήμα 3.16 δίνονται η τομή, η πλάγια όψη και η κάτοψη της διάταξης των διατρημάτων, για τη διάνοιξη στοάς με προεκσκαφή σπειροειδούς διάταξης.



Σχήμα 3.16: Διάταξη διατρημάτων για διάνοιξη στοάς με τη σπειροειδή μέθοδο με δύο κενά διατρήματα (Πηγή: Bhandari, 1997)

Όταν απαιτούνται προχωρήσεις μεγάλου μήκους, χρησιμοποιείται ο τύπος της προεκσκαφής διπλής σπείρας, του οποίου η διάταξη δίνεται στο Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17: Προεκσκαφή διπλής σπείρας και διάταξη διατρημάτων με τη σειρά πυροδοτήσεως τους για όρυξη στοάς με χρήση αυτής της μεθόδου (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Οι αποστάσεις a, b, c και d είναι αυτές των σημείων 1-2, 3-4, 5-6 και 8-7 αντίστοιχα, από το κέντρο του κενού διατρήματος. Τα μεγέθη των αποστάσεων αυτών, όπως επίσης οι συγκεντρώσεις των γομώσεων σε kg/m δίνονται εμπειρικά από τον Πολυχρονόπουλο (1979) στον Πίνακα 3.5. Οι συγκεντρώσεις γομώσεως 1¹ και 1² αφορούν τα διατρήματα που σημειώνονται στο Σχήμα 3.17 με σταυρό (+) και τελεία (•) αντίστοιχα.

Σε μια προεκσκαφή διπλής σπείρας, το κενό διάτρημα είναι διαμέτρου από 75 έως 200 mm, ενώ αν πρόκειται για δύο η διάμετρός τους κυμαίνεται από 42-57 mm. Τα γομωμένα διατρήματα που βρίσκονται απέναντι το ένα με το άλλο πυροδοτούνται διαδοχικά. Το γεγονός αυτό δίνει στη διάταξη αυτή, εκτός από τα πλεονεκτήματα όλων των κυλινδρικών διατάξεων, τα εξής επιπλέον θετικά αποτελέσματα (Πολυχρονόπουλος, 1979, Bhandari, 1994):

1. Καλύτερο καθαρισμό του ανοίγματος

 Μεγαλύτερη προχώρηση ανά κύκλο ανατίναξης, αφού το ένα τμήμα της διπλής σπείρας μπορεί να προκαλέσει θραύση του πετρώματος ανεξάρτητα από το άλλο. Όπως σε όλες τις κυλινδρικές διατάξεις έτσι και στη διάταξη διπλής σπείρας, η προχώρηση ανά ανατίναξη εξαρτάται από τη διάμετρο του γομωμένου διατρήματος και από το μήκος διάτρησης και όχι από τη διατομή της εκσκαφής. Το βάθος διάτρησης για σχετική προχώρηση 95% και διάφορες διαμέτρους κενών διατρημάτων δίνεται εμπειρικά στον Πίνακα 3.6. Είναι φανερό ότι με χρήση διατρήματος ανακούφισης διαμέτρου 200 mm η προχώρηση φτάνει τα 6 m.

				741		•		
D mm	75	85	100	110	125	150		
a mm	110	120	130	140	160	190	250	
b mm	130	140	160	170	190	230	310	
c mm	160	175	195	210	240	290	380	
d mm	270	290	325	350	400			
l ¹ kg/m	0.30	0.35	0.44	0.50	0.55	0.60	0.80	
l ² kg/m	0.65	0.75	0.85	0.90	1.1	1.3	1.7	

Πίνακας 3.5: Στοιχεία κατασκευής της προεκσκαφής διπλής σπείρας (Πολυγρονόπουλος, 1979)

Γ) Διάταξη Coromant

Η παραλλαγή αυτή της κυλινδρικής διάταξης και πιο συγκεκριμένα της διπλής σπείρας, είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όρυξης στοών και κεκλιμένων μικρής διατομής και αναπτύχθηκε από την Sadviken Steel Works Co Ltd. Το κύριο χαρακτηριστικό που την διαφοροποιεί από τον τύπο διπλής σπείρας είναι η διάνοιξη δύο μερικώς αλληλεπικαλυπτόμενων διατρημάτων διαμέτρου 57 mm, τα οποία σχηματίζουν ένα επίμηκες άνοιγμα μορφής 8.

Ένας ειδικός μεταλλικός διάτρητος οδηγός (ιχνάριο) χρησιμοποιείται για την όρυξη των διατρημάτων, μέσα από τον οποίον ορύσσεται το ένα διάτρημα των 57 mm στο κέντρο της θέσης της αρχικής κοπής. Στη συνέχεια ένας σωλήνας-οδηγός εισάγεται και ορύσσεται και το επόμενο κενό διάτρημα (Σχήμα 3.18). Το διατρητικό άκρο αφήνεται να επικαλύψει το πρώτο διάτρημα, όμως δεν μπορεί να μπει τελείως μέσα σε αυτό εξαιτίας του σωλήνα-οδηγού. Μέσα στα αλληλεπικαλυπτόμενα διατρήματα τοποθετείται το μεταλλικό ιχνάριο και με τη βοήθειά του ορύσσονται και τα υπόλοιπα έξι διατρήματα σε καθορισμένες θέσεις, τα οποία γομώνονται. Η χρήση αυτού του οδηγού διάτρησης εξασφαλίζει την παραλληλότητα και την σωστή θέση των διατρημάτων της προεκσκαφής (Πολυχρονόπουλος, 1979, Bhandari, 1997).

Πίνακας 3.6: Μήκος διάτρησης διπλής σπείρας για σχετική προχώρηση 95% και κανονική απόκλιση διατρήματος (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Διάμετρος									
κενού									
διατρήματος									
D (mm)	2x 57	75	83	100	275	110	125	150	200
Προεκσκαφή									
σε m	3.1	3.0	3.3	3.8	4.1	4.1	4.5	5.1	6.3



Σχήμα 3.18: α) Διάταξη προεκσκαφής τύπου Coromant, β)Μεταλλικός οδηγός διάτρησης (ιχνάριο), γ)Χρήση του οδηγού για την όρυξη των διατρημάτων με ελαφριά αερόσφυρα (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Τα πλεονεκτήματα που εξασφαλίζονται με τη χρήση αυτής της μεθόδου προεκσκαφής είναι (Πολυχρονόπουλος, 1979):

 Η ακρίβεια στη διάτρηση, ακόμη κι αν ο χειριστής του διατρητικού εξοπλισμού δεν έχει μεγάλη εμπειρία.

 Η διάνοιξη κεντρικού ανοίγματος μεγαλύτερης διαμέτρου με χρήση συνήθως, του ίδιου τύπου διατρητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται και για τα υπόλοιπα διατρήματα.

3. Η προχώρηση μπορεί να προσαρμοστεί στις ειδικές συνθήκες και ανάγκες κάθε κύκλου ανατίναξης χωρίς να τροποποιηθεί η μορφή της διάταξης, αποφεύγοντας έτσι τη δημιουργία «κενών» χρόνων εργασίας, άρα και μειώνοντας το κόστος.

Η προχώρηση ανά ανατίναξη που έχει επιτευχθεί με την προεκσκαφή αυτού του τύπου έχει φτάσει και τα 3 m (10 ft) σε σκληρό πέτρωμα, με διάτρηση μήκους 3,2 m (10,5 ft), δηλαδή πάνω από 95% του μήκους διάτρησης. Ενώ η ειδική κατανάλωση για τα διατρήματα της αρχικής κοπής είναι περίπου 0,3 kg/m διάτρησης (www.maden.hacettepe.edu.tr/dmmrt/).

Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζονται οι διαδοχικές φάσης της έκρηξης μετά τον καθαρισμό του ανοίγματος με προεκσκαφή τύπου Coromant, με δύο κενά διατρήματα των 57 mm και προχώρηση 3.1 m.



Σχήμα 3.19: Οι διαδοχικές φάσεις της έκρηξης των διατρημάτων σε εκσκαφή τύπου Coromant (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Δ) <u>Διάταζη Fagersta</u>

Η προεκσκαφή αυτού του τύπου είναι άλλη μια παραλλαγή κυλινδρικής προεκσκαφής, κατά την οποία ορύσσεται ένα κεντρικό κενό διάτρημα διαμέτρου 64 ή 76 mm. Τα υπόλοιπα διατρήματα τα οποία γομώνονται, είναι μικρότερης διαμέτρου (32 mm) και τοποθετούνται σε σειρές γύρω από το κενό, σύμφωνα με το Σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Διάταξη των διατρημάτων προεκσκαφής τύπου Fagersta (Jimeno et al., 1995)

Η προεκσκαφή αυτού του τύπου διάταξης είναι στην ουσία μία διασταύρωση της διάταξης τεσσάρων τετραγώνων και της διπλής σπείρας, ενώ είναι κατάλληλη για μικρές στοές μεταλλείων, όπου χρησιμοποιείται ελαφρύς χειροκίνητος διατρητικός εξοπλισμός. Η παραλλαγή αυτή παρουσιάζει επίσης, το πλεονέκτημα της μικρής κατανάλωσης εκρηκτικής ύλης (Πολυχρονόπουλος, 1979, Jimeno et al., 1995).

3.3.2 Διατάζεις πυκνής διάτρησης

Ένας άλλος τύπος παράλληλης διάταξης των διατρημάτων της αρχικής κοπής, που είναι και ο παλαιότερος, είναι αυτός της πυκνής διάτρησης (burn cut), όπου τα διατρήματα ανακούφισης έχουν συνήθως την ίδια διάμετρο με τα γομωμένα, που δεν ξεπερνά τα 50 mm. Λόγω του μεγάλου αριθμού και της πυκνής τοποθέτησής τους στην προεκσκαφή η συγκέντρωση της εκρηκτικής ύλης είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα το πέτρωμα που θρυμματίζεται να φτάνει μέχρι την κονιορτοποίηση του (Τσουτρέλης, 2001). Ο όγκος αυτός του πετρώματος επομένως θεωρείται «καμένος» (burnt), εξ ου και η ονομασία της διάταξης.

Η διάταξη τύπου burn cut χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε εκσκαφές μικρής διατομής, γιατί όλα τα διατρήματα ορύσσονται παράλληλα στον κεντρικό άξονα και επιτρέπουν έτσι προχωρήσεις μεγαλύτερου μήκους. Είναι πολύ σημαντικό όλα τα διατρήματα σε μια τέτοια διάταξη να ορύσσονται παράλληλα και σε σωστές αποστάσεις το ένα με το άλλο.

Η προεκσκαφή τοποθετείται συνήθως στο κέντρο του μετώπου όμως, όπως και στις κυλινδρικές διατάξεις, για την αποφυγή ήδη διαταραγμένου πετρώματος κατά τη διάτρηση συνήθως μετά από κάθε ανατίναξη μετακινείται λίγο δεξιά ή αριστερά από την αρχική της θέση. Αυτό γιατί αν τοποθετηθεί στην ίδια θέση, οι πιθανότητες κάποιων διατρημάτων να μην εκραγούν είναι πολύ μεγάλες (Bhandari, 1995).

Τα διατρήματα που χρησιμοποιούνται έχουν διάμετρο από 32 ως 70 mm, ανάλογα με τις ειδικές συνθήκες κάθε περίπτωσης. Η διάμετρος θα πρέπει να είναι η μεγαλύτερη που είναι συμβατή με τον διαθέσιμο διατρητικό εξοπλισμό, για μέγιστη αποδοτικότητα στη διάτρηση και την καλύτερη κατανομή του εκρηκτικού, ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός θρυμματισμός.

Ο σχεδιασμός της προεκσκαφής εξαρτάται από το είδος του πετρώματος, τον τύπο του εκρηκτικού και τη διάμετρο των διατρημάτων, ενώ το μέγεθος του φορτίου θα πρέπει να παρέχει χώρο στο πέτρωμα, του οποίου ο όγκος μετά το θρυμματισμό μεγαλώνει ανάλογα με τον συντελεστή διόγκωσής του. Συνήθως το 15% της επιφάνειας της εκσκαφής, που επηρεάζεται από τα πρώτα διατρήματα που εκρήγνυνται, είναι βασικό για τον επιτυχή θρυμματισμό του πετρώματος. Το ποσοστό ποικίλει ανάλογα με τον είδος του σχηματισμού του πετρώματος. Πο ποσοστό ποικίλει ανάλογα με τον είδος του σχηματισμού του πετρώματος. Το ποσοστό ποικίλει ανάλογα με τον είδος του σχηματισμού του πετρώματος αυτόσο, όσο περισσότερος χώρος προσφέρεται για τη διόγκωση του πετρώματος, τόσο επιτυχής θα είναι και η ανατίναξη αναφορικά με το ποσοστό της προχώρησης σε σχέση με το μήκος διάτρησης. Ο παράγοντας αυτός είναι πολύ σημαντικός για προεκσκαφές τέτοιου τύπου τόσο, ώστε ο χρόνος που ξοδεύεται στη διάτρηση των επιτυχάνεται με τον τρόπο αυτόν (Bhandari, 1995). Στο Σχήμα 3.21 παραθέτονται διάφορες παραλλαγές της προεκσκαφής.

92



Σχήμα 3.21: Παραλλαγές της προεκσκαφής τύπου burn cut α)Gröulunt cut, β)Michigan cut, γ)με τρία κενά διατρήματα (D=75 mm), δ)τριγωνική με τρία κενά διατρήματα (D=75 mm) και έξι διατρήματα εκτός της προεκσκαφής (Πολυχρονόπουλος, 1979)

Οι διαστάσεις του ανοίγματος που αναπτύσσεται με τη διάταξη burn cut είναι πλευράς 200-350 m, με τη μικρότερη διάσταση (άρα και μικρότερη απόσταση μεταξύ των διατρημάτων) να εφαρμόζεται σε σκληρά πετρώματα και τη μεγαλύτερη

(μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των διατρημάτων) σε ημίσκληρα. Η προχώρηση ανά ανατίναξη που μπορεί να επιτευχθεί φτάνει τα 2,80 m, με χρήση διατρημάτων διαμέτρου 40 mm, μήκους 3,0 m και χρήση ζελατινοδυναμίτιδας σε φυσίγγια διαμέτρου 32mm, γραμμικής γόμωσης ίσης με 1,25 kg/m σε μήκος διατρήματος 2,70 m και με επιγόμωση 0,30 m. Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι φάσης διάνοιξης της προεκσκαφής με τη διάταξη burn cut.



Σχήμα 3.22: Σταδιακή διάνοιξη προεκσκαφής με χρήση της διάταξης τύπου burn cut (Τσουτρέλης, 2001)

Λόγω της πυκνής τοποθέτησης των διατρημάτων ο τύπος αυτός προεκσκαφής παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα όπως:

 Χρήση μεγάλης ποσότητας εκρηκτικού, άρα και μεγαλύτερη οικονομική επιβάρυνση.

Απώλεια του πετρώματος της περιοχής της αρχικής κοπής λόγω κονιορτοποιήσης.

 Απαίτηση μέγιστης ακρίβειας για εντελώς παράλληλη διάτρηση, ώστε να αποφευχθεί η δυναμική υπερσυμπίεση η συμπαθητική έκρηξή των διατρημάτων.

4. Μεγάλη πιθανότητα για υπερβολικό θρυμματισμό του πετρώματος προς ανατίναξη, αφού ο καθαρισμός του ανοίγματος στο πίσω μέρος πολλές φορές δεν είναι καλός, με αποτέλεσμα να θραύεται το πέτρωμα μόνο μέχρι το σημείο που το άνοιγμα είναι καθαρό.

Για τους παραπάνω λοιπόν λόγους στις μέρες μας η μέθοδος τείνει να εγκαταλειφθεί ακόμα και για περιπτώσεις μικρής διατομής σηράγγων.

4. ΚΥΡΙΑ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Το σχέδιο ανατίναξης, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, εκτός από τα διατρήματα της αρχικής κοπής περιλαμβάνει και αυτά της κύριας εκσκαφής, όπως επίσης του πατώματος, της οροφής και τα πλευρικά (Σχήμα 2.12). Ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων του σχεδίου για τις ομάδες αυτές είναι όμοιος όμως, αν οι συνθήκες το απαιτούν, η μέθοδος σχεδιασμού για τα περιμετρικά διατρήματα αλλάζει, εφαρμόζοντας μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης.

Μετά την ολοκλήρωση της ανατίναξης, το πέτρωμα που παραμένει είναι πολύ συχνά μέρος μιας κατασκευής η οποία πρέπει να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Ο απαιτούμενος χρόνος ζωής, κατά τον οποίο το πέτρωμα πρέπει να παραμείνει ευσταθές, εξαρτάται από το σκοπό τον οποίο εξυπηρετεί το υπόγειο έργο. Η αντοχή και ευστάθεια του περιβάλλοντος πετρώματος π.χ. μιας μεγάλης, μόνιμης, υπόγειας αποθήκης είναι πολύ σημαντικές, ώστε να αποφευχθεί τυχόν κατάρρευση η οποία θα έπληττε ανθρώπους και εξοπλισμό. Ακόμη, υπόγειες διαβάσεις και αυτοκινητόδρομοι σε πόλεις, σήραγγες μέσα σε βουνά ή υποθαλάσσιες, πρέπει να είναι τόσο μεγάλης

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις λοιπόν, είναι απαραίτητο να γίνει χρήση μιας τεχνικής ανατίναξης, που να ελαχιστοποιεί τη διαταραχή στο εναπομείναν πέτρωμα. Όσο μικρότερης αντοχής είναι το πέτρωμα, τόσο περισσότερη προσοχή πρέπει να δοθεί ούτως ώστε η φθορά να αποφευχθεί. Ειδικά στις περιπτώσεις που απαιτείται έλεγχος της περιμέτρου της εκσκαφής, εφαρμόζονται συνήθως μέθοδοι κατά τις οποίες μειώνεται η συγκέντρωση γομώσεως που γειτνιάζει με την περίμετρο (Persson et al., 1994).

Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων της κύριας ανατίναξης με τη χρήση ελεγχόμενων μεθόδων.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται τα στάδια της κύριας ανατίναξης για τη διάνοιξη στοάς και των περιμετρικών διατρημάτων με τη χρήση ελεγχόμενης ανατίναξης.

95



Σχήμα 4.1: Στάδια της κύριας ανατίναξης για τη διάνοιξη στοάς και των περιμετρικών διατρημάτων με τη χρήση ελεγχόμενης ανατίναξης (Hoek, 2007)

4.2 Διατρήματα κύριας εκσκαφής

Τα διατρήματα αυτά, ανάλογα με τη διεύθυνσή τους, διακρίνονται σε δύο ομάδες: Εκείνα που η θραύση είναι ανιούσας ή οριζόντιας φοράς (Σχήμα 4.2) και εκείνα που είναι κατιούσας φοράς (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.2: Ομάδα διατρημάτων με θραύση ανιούσας και οριζόντιας φοράς (Olofsson, 1991)



Σχήμα 4.3: Ομάδα διατρημάτων με θραύση κατιούσας φοράς (Olofsson, 1991)

Ο σχεδιασμός τους ακολουθεί τους παρακάτω εμπειρικούς κανόνες, σύμφωνα με τους οποίους οι ερευνητές που μελετήθηκαν για την παρούσα εργασία, υπολογίζουν τις απαραίτητες παραμέτρους:

<u>Πολυχρονόπουλος (1979) - Bhandari (1997)</u>:

Σύμφωνα με τους Πολυχρονόπουλο (1979) και Bhandari (1997) οι υπολογισμοί γίνονται με τον παρακάτω τρόπο:

Διατρήματα ανιούσας φοράς ή οριζόντια:

Τα διατρήματα γομώνονται με το ύψος της γόμωσης να φτάνει το ένα τρίτο του μήκους τους, δηλαδή:

$$h_b = \frac{1}{3} \cdot H \tag{4.1}$$

Το φορτίο είναι:

$$B_1 \le \frac{M\eta \kappa o \varsigma \, \delta \iota \alpha \tau \rho \eta \mu \alpha \tau o \varsigma - 0,40}{2} \tag{4.2}$$

Η απόσταση μεταξύ διατρημάτων της ίδιας σειράς είναι:

$$S_1 = 1, 1 \cdot B \tag{4.3}$$

Η γραμμική γόμωση πυθμένα *q_b* που καλύπτει το ένα τρίτο του μήκους του διατρήματος δίνεται από τον *Πίνακα 1.1*:

Πίνακας 4.1:Απαιτούμενη γραμμική γόμωση πυθμένα για τα διατρήματα της ομάδας Α (Τσουτρέλης, 2001)

Διάμετρος διατρήματος (mm)	Γραμμική γόμωση πυθμένα q _b (kg/m)
30	1,1
40	1,3
50	1,5

Η γραμμική γόμωση της στήλη
ς \boldsymbol{q}_{l} είναι:

$$q_l = 0,50 \cdot q_b \tag{4.4}$$

Το μήκος επιγόμωσης είναι:

$$h_1 = 0,50 \cdot B \tag{4.5}$$

Διατρήματα κατιούσας φοράς:

Καθώς στα διατρήματα αυτά απαιτείται μικρότερη προσπάθεια για να θραυστεί το πέτρωμα, ενώ η διόγκωση του βοηθείται και από τη δύναμη της βαρύτητας, η γραμμική γόμωση πυθμένα μπορεί να μειωθεί όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Απαιτούμενη γραμμική γόμωση πυθμένα για τα διατρήματα της ομάδας Β (Τσουτρέλης, 2001)

Διάμετρος διατρήματος	Γραμμική γόμωση πυθμένα q _b
(mm)	(kg/m)
30	1,1
40	1,3
50	1,5

Persson et al. (1994) - Jimeno et al. (1995):

Η μέθοδος υπολογισμού για τα διατρήματα μιας σειράς της κύριας εκσκαφής σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται για τις υπαίθριες ανατινάξεις ορθών βαθμίδων, αν θεωρηθεί ως ύψος της βαθμίδας η προχώρηση ανά ανατίναξη. Έτσι χρησιμοποιείται η σχέση:

$$B = 0.9 \sqrt{\frac{q_t \cdot s_{ANFO}}{\overline{c} \cdot f(S/B)}}$$
(4.6)

όπου:

S/B= σχέση φορτίου και απόστασης διατρημάτων (αλληλοεπικάλυψη κώνων) με τιμή σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3

f= συντελεστής πάκτωσης με τιμή σύμφωνα με τον ίδιο πίνακα

qt= γραμμική πυκνότητα γόμωσης σε kg/m, ίση με το 50% της γόμωσης πυθμένα (σχέση 3.12)

 \overline{c} = συντελεστής διόρθωσης πετρώματος ο οποίος υπολογίζεται από τις σχέσεις:

 $\overline{c} = c + 0.05$ gia $B \ge 1.4m$

 $\overline{c} = c + 0.07 / B$ gia B < 1.4m

όπου c= ποσότητα εκρηκτικής ύλης που απαιτείται για τη θραύση 1m³ πετρώματος.

Φορ <mark>ά</mark> θραύσης διατρηματων	Συντελεστής πάκτωσης f	Σχέση S/B 1.25	
ανοδική και οριζόντια	<mark>1.45</mark>		
καθοδική	1.20	1.25	

Πίνακας 4.3: Συντελεστής f και αλληλοεπικάλυψη κώνων για τα διατρήματα της κύριας ανατίναξης (Jimeno et al., 1995)

Olofsson (1991):

Ο Olofsson για τον υπολογισμό των φορτίων (B) και των γομώσεων χρησιμοποιεί ως βάση (για τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής αλλά και για αυτά της περιμέτρου), το γράφημα του Σχήματος 4.4.



Σχήμα 4.4: Το φορτίο Β σε συνάρτηση με τη γραμμική πυκνότητα γόμωσης πυθμένα, για διατρήματα διαφόρων διαμέτρων και διαφορετικές εκρηκτικές ύλες (Τσουτρέλης, 2001)

Όταν το φορτίο B, το μήκος διατρήματος H και η γραμμική πυκνότητα γόμωσης πυθμένα q_b είναι γνωστά, ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 4.4) δίνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάτρησης και της γόμωσης της ανατίναξης, ούτως ώστε να γίνει σωστά ο σχεδιασμός της.

Κατηγορία διατρημάτων		Φορτίο Απόσταση		Μήκος γομώσεως	Γραμμική kg/	γόμωση m	Μήκος
		B (m)	3 (m) S (m)	πυθμένα (m)	Πυθμένα	Στήλης	(m)
	Ανιόντα	1xB	1,1xB	1/3xh	q _b	0,5xq _b	0,5xB
Κύρια εκσκαφή Κ	Οριζόντια	1xB	1,1xB	1/3xh	q₀	0,5xq _b	0,5xB
	Κατιόντα	1xB	1,2xB	1/3xh	q _b	0,5xq _b	0,5xB
	Οροφής	0,9xB	1,1xB	1/6xh	q _b	0,3xqb	0,5xB
Περιμετρικά	Παρειών	0,9xB	1,1xB	1/6xh	q _b	0,4xqb	0,5xB
	Δαπέδου	1xB	1,1xB	1/3xh	q _b	1,0xq _b	0,2xB

Πίνακας 4.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάτρησης και της γόμωσης της ανατίναξης (Τσουτρέλης, 2001)

Στο σημείο αυτό συγκρίνοντας τις παραπάνω θεωρήσεις παρατηρείται ότι:

 Οι Πολυχρονόπουλος και Bhandari χρησιμοποιούν μόνο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατρημάτων και της γόμωσής τους για τον σχεδιασμό της κύριας ανατίναξης.

 Οι Persson et al. και Jimeno et al. λαμβάνουν υπόψη στο σχεδιασμό και τα χαρακτηριστικά του προς ανατίναξη πετρώματος, αλλά και αυτά της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιείται.

Ο Olofsson από την άλλη, χρησιμοποιεί εμπειρικά διαγράμματα και πίνακες για
 το σχεδιασμό όχι μόνο της κύριας ανατίναξης, αλλά και των περιμετρικών
 διατρημάτων, κάτι που κάνει τους υπολογισμούς αρκετά απλούστερους.

4.3 Διατρήματα δαπέδου

Τα διατρήματα του δαπέδου (ντούκια) πρέπει λόγω της επίδρασης της δύναμης της βαρύτητας να έχουν μεγαλύτερο συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικού (γραμμική
πυκνότητα γόμωσης) και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στους χρόνους έναυσής τους. Όταν δεν χρησιμοποιείται ελεγχόμενη ανατίναξη, το φορτίο και οι αποστάσεις μεταξύ των διατρημάτων υπολογίζονται όπως και στην περίπτωση αυτών της κύριας εκσκαφής, θεωρώντας ότι η διεύθυνση της ανατίναξης είναι προς τα πάνω (Bhandari, 1997). Επιπλέον, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλα τα περιμετρικά διατρήματα είναι η γωνία εκτροπής γ προς τα έξω, η οποία πρέπει να λαμβάνεται ως 3° για προχώρηση 3,0 m (που αντιστοιχεί σε 5 cm/m). Για το λόγο αυτό το φορτίο που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι μικρότερο από αυτό που υπολογίζεται με τη σχέση 4.6 που έχει δοθεί παραπάνω για τα διατρήματα κύριας εκσκαφής.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η γεωμετρία των διατρημάτων δαπέδου σε κάτοψη και τομή.



Σχήμα 4.5: Κάτοψη (α) και τομή (β) των διατρημάτων δαπέδου για την διάνοιξη στοάς με διάτρηση και ανατίναξη (Τσουτρέλης, 2001)

Σύμφωνα με τον Πολυχρονόπουλο (1979) οι υπολογισμοί για τα διατρήματα δαπέδου γίνονται με τον ίδιο τρόπο, όπως για τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής με ανιούσα φορά που περιγράφηκε παραπάνω. Η μόνη διαφορά είναι ο υπολογισμός της επιγόμωσης, που φτάνει μέχρι το 20% της γόμωσης δηλαδή $h_1 = 0, 2 \cdot V_1$, ενώ η συγκέντρωση γόμωσης της στήλης είναι ίση με το 70% της γόμωσης πυθμένα, δηλαδή: $l_p = 0, 7 \cdot l_b$.

Ο Olofsson (1991) χρησιμοποιεί το διάγραμμα και τον πίνακα που δόθηκαν παραπάνω (Σχήμα 4.4 και Πίνακας 4.4), ενώ οι Persson et al. (1994), Jimeno et al.

(1995) και Bhandari (1997) χρησιμοποιούν τον τρόπο που περιγράφεται αμέσως παρακάτω.

Το μέγιστο φορτίο B δίνεται από τη σχέση 4.6, οπού ως συντελεστής πάκτωσης λαμβάνεται το f= 1.45.

Ο αριθμός των διατρημάτων δίνεται από την σχέση:

$$N = \frac{\Pi \lambda \dot{\alpha} \tau o_{\zeta} \, \sigma \tau o \dot{\alpha} \zeta + 2\mathbf{H} \cdot \sin \gamma}{B} + 2 \tag{4.8}$$

όπου :

N= αριθμός διατρημάτων (λαμβάνεται ο πλησιέστερος υψηλότερος ακέραιος αριθμός) Η= μήκος διατρημάτων

γ = γωνία εκτροπής

Β= φορτίο

<u>Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων (</u>εκτός από τα γωνιακά) υπολογίζονται από τη σχέση:

$$S = \frac{\pi \lambda \dot{\alpha} \tau o \varsigma \, \sigma \tau o \dot{\alpha} \varsigma + 2 \mathbf{H} \cdot \sin \gamma}{N - 1} \tag{4.9}$$

Η απόσταση για τα γωνιακά διατρήματα είναι:

$$S' = S - H \cdot \sin \gamma \tag{4.10}$$

<u>Το πραγματικό φορτίο</u> που χρησιμοποιείται λαμβάνοντας την γωνία εκτροπής γ, αλλά όχι την τυχόν παρέκκλιση των διατρημάτων είναι:

$$B_L = B - H \cdot \sin \gamma \tag{4.11}$$

Αν ληφθεί υπόψη και η παρέκκλιση τότε από την παραπάνω σχέση, αφαιρείται και την ποσότητα F που είναι ο συντελεστής λαθεμένης διάτρησης που υπολογίστηκε από τη σχέση 3.7 του προηγούμενου κεφαλαίου.

Το μήκος γόμωσης πυθμένα είναι:

$$h_b = 1,25 \cdot B_L \tag{4.12}$$

Το μήκος της στήλης γόμωσης είναι:

$$h_c = H - h_b - 10d \tag{4.13}$$

Το μήκος της επιγόμωσης είναι:

 $h_s = 10d$ όπου: d= διάμετρος του διατρήματος.

Η σχέση 4.6 ισχύει με την προϋπόθεση να επαληθεύεται η συνθήκη B≤ 0,6H. Αν δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο, τότε το μέγιστο φορτίο πρέπει να μειωθεί διαδοχικά χαμηλώνοντας τα συγκέντρωση της γόμωσης. Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του πραγματικού φορτίου και της απόστασης μεταξύ των διατρημάτων (Persson et al., 1994).

4.4 Διατρήματα πλευρών και οροφής

Όταν η χρήση ελεγχόμενης ανατίναξης δεν είναι απαραίτητη, ο υπολογισμός των γεωμετρικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των διατρημάτων αυτών γίνεται όπως και για τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής με φορά της έκρηξης προς τα κάτω ή οριζόντια. Οι διαφορές δίνονται παρακάτω (Πολυχρονόπουλος 1979, Bhandari 1997):

Το φορτίο είναι ίσο με το 0,9 αυτού των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής με κατιούσα ή οριζόντια φορά θραύσης.

<u>Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων είναι:</u>	
$S_n = 1, 2 \cdot B_n$	(4.15)

Το μήκος γόμωσης πυθμένα είναι:

$$h_b = \frac{1}{6} \cdot H \tag{4.16}$$

<u>Το μήκος επιγόμωσης είναι:</u> $h_s = 0.5 \cdot B_p$

Η γραμμική γόμωση της στήλης είναι: $q_c = 0, 4 \cdot q_b$ (4.18) όπου:

(4.17)

 q_b = γραμμική πυκνότητα γόμωσης πυθμένα.

Κατά τους Jimeno et al. (1995) ο υπολογισμός των διατρημάτων των πλευρών και της οροφής γίνεται όπως και για τα διατρήματα δαπέδου (βλέπε ενότητα 4.3), με τη διαφορά ότι συντελεστή πάκτωσης λαμβάνεται ο f= 1.2, η σχέση αλληλοεπικάλυψης των κώνων S/B= 1,25 και η γόμωση της στήλης είναι $q_c = 0,5 \cdot q_b$, με q_b την πυκνότητα γόμωσης πυθμένα.

Με τη χρήση πάντως της κανονικής τεχνικής ανατίναξης για τα διατρήματα αυτά, η θραύση και η ρωγμάτωση του πετρώματος εκτός των ορίων που έχουν οριστεί για τη εκσκαφή είναι μεγάλη (Σχήμα 4.6). Αυτό που είναι επιθυμητό σε κάθε περίπτωση είναι αυτή η υπέρθραυση να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος για την υποστήριξη των τοιχωμάτων. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ένα διάτρημα διαμέτρου 50 mm, με γραμμική γόμωση που αποτελείται από 1,5 kg/m ANFO, μπορεί να δημιουργήσει ζώνη διαταραχής και ρωγμάτωση μέχρι και 1,3 m έξω από τα όρια της εκσκαφής σε ανθεκτικό πέτρωμα.

Για να περιοριστούν οι συνέπειες αυτές λοιπόν έχουν αναπτυχθεί τεχνικές ελεγχόμενης ανατίναξης, όπως η μέθοδος λείων τοιχωμάτων (ή περιμετρική), η μέθοδος πρότμησης και η μέθοδος πυκνής διατρήσεως, οι οποίες χρησιμοποιούνται στις υπόγειες ανατινάξεις για τη διάνοιξη φρεάτων, στοών ή σηράγγων. Η διαφορά του πλάτους της υπέρθραυσης που προκαλείται ανάμεσα στις δύο τεχνικές μπορεί να φτάσει και τα 30 cm ή και περισσότερο, ανάλογα το είδος του πετρώματος (Olofsson, 1990, Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 4.6: Υπέρθραυση και ρωγμάτωση εκτός της επιθυμητής περιμέτρου της εκσκαφής (Τσουτρέλης, 2001)

4.5 Τεχνικές ελεγχόμενης ανατίναξης στις υπόγειες ανατινάξεις

Βιβλιογραφικά, αυτό που αναφέρεται ως «ελεγχόμενη ανατίναξη» έχει σχέση με τις ειδικές τεχνικές και μεθοδολογίες που αποσκοπούν στην διαμόρφωση τελικών επιφανειών, έτσι που να ικανοποιούνται συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις και προδιαγραφές. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι, η πρότμηση ή προρηγμάτωση, η «απαλή» ανατίναξη, των λείων τοιχωμάτων, παραλλαγές της γραμμικής διάτρησης, κλπ.

Στην πράξη, ή τουλάχιστον στην εργοταξιακή πρακτική και ορολογία, η έννοια είναι αρκετά ευρύτερη και πολύπλευρη. Ως «ελεγχόμενες ανατινάξεις» δεν θεωρούνται μόνον αυτές που στοχεύουν στην διαμόρφωση – εξασφάλιση αδιατάρακτων ή καθαρών τελικών επιφανειών. Ειδικά στα τεχνικά έργα, η ικανοποίηση πρόσθετων παραμέτρων ή κριτηρίων ή απαιτήσεων, είναι συνδεδεμένη, και συχνά ταυτισμένη με την υλοποίηση των θεωρούμενων «ελεγχόμενων ανατινάξεων», υπονοώντας και υποδηλώνοντας τις ανατινάξεις εκείνες που βασίζονται σε κατάλληλο σχεδιασμό, σε ειδική προετοιμασία ή τεχνική γόμωσης.

Στις ελεγχόμενες ανατινάξεις, εντάσσονται επίσης και αυτές που συνοδεύονται από ελέγχους και συλλογή – αξιολόγηση καταγραφικών δεδομένων και ενόργανων παρατηρήσεων, κυρίως για τις προκαλούμενες δονήσεις. Έτσι στην πράξη έχει καθιερωθεί να ζητούνται ή να επιδιώκονται «ελεγχόμενες ανατινάξεις», με στόχο ή επιδίωξη, οι ανατινάξεις ενός έργου, να εξασφαλίζουν, ταυτόχρονα ή κατά περίπτωση, ότι:

- δεν θα προκαλούν κινδύνους δυσμενών επιπτώσεων, βλάβες, ή ζημίες,

 - θα ικανοποιούν κατά τον καλύτερο τρόπο τις τεχνικές και παραγωγικές απαιτήσεις (μεταξύ αυτών ενδεχομένως και ότι αφορά μόρφωση πρανών ή τελικών επιφανειών), και

- θα συνοδεύονται από ελέγχους και μετρήσεις (δονήσεων κατά κανόνα).

Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά σε αυτό που βιβλιογραφικά αναφέρεται ως «ελεγχόμενες ανατινάξεις» και συγκεκριμένα σε αυτές που χρησιμοποιούνται στα υπόγεια έργα. Στις τεχνικές δηλαδή που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις στις οποίες, λόγω της φύσης των πετρωμάτων, αν χρησιμοποιηθεί η συμβατική μέθοδος ανατινάξεων, δεν αποφεύγονται οι προαναφερθείσες δυσμενείς καταστάσεις (υπερεκσκαφές, διαταραχές πετρώματος κ.λπ.).

106

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε υπόγεια έργα είναι:

- Η μέθοδος πρότμησης
- Η μέθοδος πυκνής διάτρησης

Η μέθοδος λείων τοιχωμάτων

Όλες οι μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης έχουν ως κοινό στόχο (Πολυχρονόπουλος, 1979, Persson et al., 1994):

 Την καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας της έκρηξης για το θρυμματισμό του εξορυσσόμενου πετρώματος.

 Τη μείωση της διατάραξης του παραμένοντος πετρώματος, με τη βοήθεια του σχηματισμού μιας επιφάνειας πρότμησης, στην οποία ανακλώνται τα κρουστικά κύματα της έκρηξης και κατευθύνονται προς την επιθυμητή διεύθυνση.

3. Τη μείωση της υπέρθραυσης (ή υπερεκσκαφής), που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου μεταφοράς του επιπλέον εξορυσσόμενου υλικού και τη μείωση του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται για την επένδυση των τοιχωμάτων της εκσκαφής.

4. Τη μείωση των παραγόμενων δονήσεων.

Στο Σχήμα 4.7 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της συμβατικής μεθόδου ανατίναξης με αυτά που λαμβάνονται από την εφαρμογή ελεγχόμενων τεχνικών.



Σχήμα 4.7: Σύγκριση των αποτελεσμάτων συμβατικής ανατίναξης με αυτά των ελεγχόμενων τεχνικών (Sharma, 2009)

Όταν πραγματοποιείται ελεγχόμενη ανατίναξη, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ των διατρημάτων (Jimeno et al., 1995, Persson et al., 1994, Τσουτρέλης, 2001):

$$S = k \cdot d \tag{4.19}$$

όπου:

d= διάμετρος του διατρήματος.

<u>Το φορτίο είναι:</u>

$$B = \frac{S}{0.8} \tag{4.20}$$

Η γραμμική γόμωση για διαμέτρους έως 155 mm είναι:

$$q_t = 90 \cdot d^2 \tag{4.21}$$

με το d να εκφράζεται σε m.

Στην περίπτωση αυτή δεν χρησιμοποιείται επιγόμωση, ενώ η γόμωση είναι συνεχής σε όλο το μήκος της εκρηκτικής στήλης. Στο Σχήμα 4.8 η γραμμική γόμωση εκφράζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου του διατρήματος με χρήση ειδικών εκρηκτικών υλών Nabit και Gurit σε φυσίγγια μικρής διαμέτρου.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 4.8: Η ελάχιστη απαιτούμενη γραμμική γόμωση ως συνάρτηση της διαμέτρου του διατρήματος με χρήση ειδικών εκρηκτικών υλών Nabit και Gurit (Τσουτρέλης, 2001)

4.5.1 Μέθοδος πρότμησης

Η μέθοδος πρότμησης ή προρηγμάτωσης (presplitting/pre-shearing/pre-slotting) έχει ως σκοπό τον σχηματισμό, προ της έκρηξης των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής, ενός επιπέδου με μικρότερη αντίσταση μεταξύ της προς εξόρυξη επιφανείας και του πετρώματος που παραμένει. Για το λόγο αυτό ορύσσεται στα όρια της επιφάνειας που πρόκειται να εξορυχθεί μια σειρά διατρημάτων με διάμετρο 51-125 mm και σε απόσταση 0,45-0,60 m το ένα από το άλλο, τα οποία λέγονται διατρήματα πρότμησης. Τα διατρήματα αυτά πυροδοτούνται πριν από τα γειτονικά διατρήματα της κύριας εκσκαφής.

Η θεωρία της μεθόδου βασίζεται στο ότι, όταν δύο γομώσεις γειτονικών διατρημάτων πυροδοτούνται ταυτόχρονα, η σύγκρουση των κρουστικών κυμάτων μεταξύ των θέσεων των διατρημάτων αυτών και η πίεση που αναπτύσσεται σχηματίζουν μια ζώνη πρότμησης μεταξύ των διατρημάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Η ζώνη αυτή εμποδίζει το κρουστικό κύμα που παράγεται από την κύρια έκρηξη να μεταδοθεί στην επιφάνεια του παραμένοντος πετρώματος και να προκαλέσει ρωγμές. Αν μάλιστα γίνει υπερβολική γόμωση των διατρημάτων, τότε η ζώνη πίεσης που διακρίνεται στο σχήμα μπορεί να επεκταθεί και ακόμα πιο πίσω (Πολυχρονόπουλος, 1979).



Σχήμα 4.9: Θραύση μεταξύ δύο διατρημάτων κατά την ελεγχόμενη ανατίναξη (Τσουτρέλης, 2001)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις εξορύξεων πετρωμάτων που δεν υπάρχει καμία ελεύθερη επιφάνεια πέρα από το μέτωπο που γίνεται η διάτρηση, όπως συμβαίνει στις ανατινάξεις για την διάνοιξη υπόγειων ανοιγμάτων.

Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει το 1/2 της απόστασης των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής. Η απόσταση και γόμωσή τους εξαρτώνται από τον τύπο του πετρώματος, ενώ είναι πολύ σημαντικό για τη μέθοδο αυτή να είναι οι κατάλληλες. Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος μάλιστα, επιδρούν πολύ περισσότερο στο αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής σε σχέση με τις υπόλοιπες. Όταν το πέτρωμα είναι χαλαρό, καλό είναι να παραμένουν κάποια διατρήματα αγόμωτα ανάμεσα στα άλλα, ως ανακουφιστικά, έτσι ώστε να διευκολύνεται η εκτόνωση των αερίων της έκρηξης προς την επιθυμητή διεύθυνση. Ακόμα και σε πολύ σκληρά πετρώματα όμως, η χρήση ανακουφιστικών διατρημάτων δίνει καλύτερα αποτελέσματα από ότι αν αυξανόταν η γόμωση ανά διάτρημα. Γενικά η μέθοδος εφαρμόζεται καλύτερα σε ομογενή πετρώματα που είναι ανθεκτικά στη ρήξη και τη μετάπτωση. Πάντως καλό είναι να γίνονται πάντα κάποιες πειραματικές δοκιμές πριν γίνει ο τελικός σχεδιασμός της ανατίναξης

Τα διατρήματα μπορούν να πυροδοτηθούν είτε όλα μαζί ως ανεξάρτητη φάση πριν από την κύρια ανατίναξη (προγενέστερη μέθοδος πρότμησης), είτε πριν την κύρια ανατίναξη (ταυτόχρονη πρότμηση) και να προηγούνται τουλάχιστον 50 ms. Η ελαφριά γόμωση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένων σωληνοειδών φυσιγγίων, με χρήση φυσιγγίων στερεωμένων κατιόντως στην θρυαλλίδα ή με θρυαλλίδα με πυκνότητα γόμωσης 10-20 g/m. Στον πυθμένα πάντως, χρησιμοποιούνται πιο μεγάλης πυκνότητας εκρηκτικά. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται τρεις τρόποι γόμωσης των διατρημάτων πρότμησης (Πολυχρονόπουλος, 1979, Bhandari, 1997, Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 4.10: Τρεις τυπικοί τρόποι γόμωσης για την μέθοδο πρότμησης (Bhandari, 1997)

Για το σχεδιασμό της μεθόδου ο Τσουτρέλης (2001) δίνει τις οδηγίες του National Highway Institute των Η.Π.Α. που παρέχονται από τον Konya (1991):

• <u>Γραμμική γόμωση στήλης</u>: $q_c = d^2/28 \sigma \epsilon \, lb/ft$ (4.22)

όπου d η διάμετρος του διατρήματος σε ίντσες

• <u>Απόσταση μεταξύ διατρημάτων</u>: S = 10d (in) (4.23)

Στην πράξη η τιμή μπορεί να αυξηθεί μέχρι 12 ή και 14d.

- $\Gamma \acute{o}\mu\omega\sigma\eta \pi\upsilon\theta\mu\acute{e}\nu\alpha$: $q_b = 2$ $\acute{e}\omega\varsigma 3 q_c$ (4.24)
- Υποδιάτρηση δεν προτείνεται.

Η εκρηκτική ύλη σε όποια μορφή κι αν χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι αποζευγμένη, με διάμετρο μικρότερη από το μισό αυτής του διατρήματος, έτσι ώστε να μην έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματά του.

Ως επιγόμωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα προϊόντα της διάτρησης. Σε πετρώματα συμπαγή και χαμηλής αντοχής σε θλίψη η επιγόμωση δεν είναι απαραίτητη.

Οι Jimeno et al. (1995) από την άλλη προτείνουν δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της γραμμικής πυκνότητας της στήλης, όταν χρησιμοποιείται εκρηκτική ύλη πυκνότητας 1,2 g/m³ σε πέτρωμα μέσης αντοχής:

$$q_c = 8.5 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 \quad \text{(kg/m)} \tag{4.25}$$

$$q_c = d/130$$
 (kg/m) (4.26)

όπου d διάμετρος διατρήματος σε mm.

Ωστόσο, ένας πρακτικός κανόνας είναι η ανατίναξη της πρότμησης να ξεκινά δοκιμαστικά με γόμωση 0,50 kg ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας εκσκαφής και ανάλογα με τα αποτελέσματα που θα λαμβάνονται, να γίνει ο τελικός σχεδιασμός (Τσουτρέλης, 2001).

Αν και πολλά χρόνια η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται επιτυχώς σε σκληρά ή σχετικά μαλακά πετρώματα στα επιφανειακά μέτωπα, έχουν γίνει δοκιμές για τη χρήση της και σε σήραγγες και στοές. Τα αποτελέσματα ωστόσο δεν ήταν ικανοποιητικά, ιδιαίτερα σε σύγκριση με τη μέθοδο λείων τοιχωμάτων. Όταν η εκσκαφή είναι σε μεγάλο βάθος, οι κατακόρυφες πιέσεις που δέχεται η στοά είναι πολύ μεγάλες κι έτσι εμποδίζεται ο σχηματισμός οριζόντιας ζώνης πρότμησης στην οροφή. Από την άλλη μεριά όμως, η εφαρμογή της μεθόδου έχει δώσει καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όρυξης φρεάτων (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το χαμηλό κόστος, αφού σε σύγκριση με τη μέθοδο γραμμικής διάτρησης που περιγράφεται στη συνέχεια, είναι μικρότερος ο αριθμός των διατρημάτων και η φόρτωση και μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού ολοκληρώνεται σε μία φάση.

4.5.2 Μέθοδος πυκνής διάτρησης

Η μέθοδος πυκνής ή γραμμικής διάτρησης (line drilling) βασίζεται στην πυκνή διάτρηση μιας σειράς διατρημάτων μικρής διαμέτρου τα οποία ορύσσονται με μεγάλη ακρίβεια κατά μήκος της περιμέτρου της εκσκαφής (Σχήμα 4.11). Έτσι ορίζεται ένα «επίπεδο αδυναμίας» το οποίο θραύεται ευκολότερα. Στην πραγματικότητα η μέθοδος αυτή δεν είναι ακριβώς ανατίναξης, αφού τα γραμμικώς ορυγμένα διατρήματα παραμένουν αγόμωτα. Η διάμετρός τους κυμαίνεται από 50 έως 75 mm και τοποθετούνται σε απόσταση (κέντρο με κέντρο) δύο έως τέσσερις φορές τη διάμετρό τους. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να ορυχθεί η πυκνή διάτρηση εξαρτάται από το πόσο ακριβής είναι η ευθυγράμμιση των διατρημάτων, είναι περίπου ίσο με το 50-75% του κανονικού φορτίου του μετώπου και συνήθως δεν ξεπερνά τα 10 m. Για μεγαλύτερη προστασία της περιμέτρου της εκσκαφής, τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής που βρίσκονται αμέσως πριν από τα αγόμωτα της γραμμικής διάτρησης ορύσσονται πιο πυκνά μεταξύ τους και γομώνονται πιο ελαφρά (50% ή και λιγότερο) σε σχέση με τα υπόλοιπα της κύριας ανατίναξης. Η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι με μορφή φυσιγγίων μικρής διαμέτρου, π.χ. Gurit με διάμετρο 17 mm της Nitro Nobel. Έτσι επιτυγχάνεται σχέση διαμέτρου φυσιγγίου – διατρήματος d/D < 1. Σε κάποιες περιπτώσεις η σχέση ισούται και με τη μονάδα, τότε όμως η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι πιο ασθενής από αυτή που χρησιμοποιείται για την κύρια εκσκαφή. Καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε ομοιογενή πετρώματα με λίγες στρώσεις και ασυνέχειες (Πολυχρονόπουλος 1979, Olofsson 1990, Bhandari 1997).



Σχήμα 4.11: Διάταξη διατρημάτων της μεθόδου πυκνής διάτρησης (Τσουτρέλης, 2001)

Η χρήση της μεθόδου περιορίζεται συνήθως σε περιπτώσεις που ακόμα και η χρήση ελαφριάς γόμωσης στην περίμετρο, θα προκαλούσε μη αποδεκτές φθορές στο πέτρωμα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου πυκνής διάτρησης είναι πάντως απρόβλεπτα, το κόστος διάτρησης μεγάλο και όλα εξαρτώνται από την ακρίβεια της διάτρησης. Τα διατρήματα δεν πρέπει να παρεκκλίνουν πάνω από 150 mm, διαφορετικά περιορίζεται το μήκος διάτρησης. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως όταν συναντώνται σχηματισμοί υψηλής σκληρότητας ή όταν η απόσταση ανάμεσα στα πυκνά διατρήματα μεγαλώσει. είναι δυνατόν τα γραμμικά διατρήματα να γομώνονται ελαφρώς με μικρή ποσότητα εκρηκτικής ύλης.

Σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους πάντως, η τεχνική της πυκνής διάτρησης είναι η λιγότερο οικονομική και από άποψη κόστους, αλλά και χρόνου. Το πλεονέκτημα είναι ότι παρέχει ομαλότερες παραμένουσες επιφάνειες και με λιγότερες ρωγμές (Bhandari, 1997).

4.5.3 Μέθοδος λείων τοιχωμάτων

Η μέθοδος λείων τοιχωμάτων που ονομάζεται και περιμετρική μέθοδος (smoothwall blasting), αναπτύχθηκε και τελειοποιήθηκε στη Σουηδία τη δεκαετία 1950 και 1960 και χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως σε υπόγεια μέτωπα μορφής σήραγγας ή στοάς.

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, ορύσσονται διατρήματα παραπλεύρως της επιθυμητής περιμέτρου της εκσκαφής, τα οποία πυροδοτούνται μετά από αυτά της κύριας ανατίναξης με επιβράδυνση 100 ms από αυτά (Σχήμα 4.12). Ο σκοπός είναι να «κουρευτεί» το περίσσιο υλικό από τα τοιχώματα της εκσκαφής και να βελτιωθεί η ευστάθειά τους. Τα διατρήματα που ορύσσονται περιμετρικά γομώνονται ελαφρώς και πυροδοτούνται έτσι, ώστε να απομακρυνθεί το ανεπιθύμητο υλικό.



Σχήμα 4.12: Διάταξη και χρόνοι έναυσης διατρημάτων με την τεχνική των λείων τοιχωμάτων (smoothwall blasting), (Bhandari, 1997)

Επιρροή στα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής έχουν οι σχέσεις απόστασης διατρημάτων και φορτίου, διαμέτρου διατρήματος και φυσιγγίων, όπως επίσης ο χρόνος πυροδότησης των περιμετρικών διατρημάτων και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων είναι μικρότερη από ότι στα υπόλοιπα διατρήματα της ανατίναξης, συνήθως 15-16 φορές τη διάμετρό τους, ενώ η σχέση απόστασης και φορτίου είναι στο 0,8 (όσο αυξάνεται, τόσο πιο ανώμαλη επιφάνεια προκύπτει). Έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι η σχέση D/d (όπου D η διάμετρος διατρήματος και d η διάμετρος φυσιγγίου) πρέπει να είναι 30-50%, ώστε να παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η σχέση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση εκρηκτικού Gurit με ειδικά φυσίγγια, ο οποίος αποτελείται από δυναμίτιδα που περιέχει νιτρογλυκερίνη, νιτροβάμβακα, νιτρικό νάτριο, σκόνη αλουμινίου και ανθρακούχα συστατικά. Η πυκνότητά του είναι 1,1 kg/lt και η ταχύτητα έκρηξης φτάνει τα 3.800 m/sec.

Για την ανάκτηση καλύτερων αποτελεσμάτων με την τεχνική των λείων τοιχωμάτων, οι περιμετρικές γομώσεις πρέπει να εναύονται ταυτόχρονα. Επίσης καλό είναι, εκτός από τα περιμετρικά διατρήματα, να γίνεται σωστά κατανεμημένα και η γόμωση των διατρημάτων που είναι κοντά σε αυτά. Αυτό, γιατί αν η γόμωσή τους είναι υπερβολική, μπορεί να προκύψει υπερεκσκαφή πριν ακόμα πυροδοτηθούν τα περιμετρικά διατρήματα (Σχήμα 4.13), χαλώντας την τελική περίμετρο της εκσκαφής. (Πολυχρονόπουλος, 1979, Bhandari, 1997).

Σε σχέση με τη μέθοδο της πρότμησης που περιγράφεται παραπάνω, οι συνθήκες είναι πολύ διαφορετικές. Κατά τη χρήση της μεθόδου πρότμησης τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής δεν έχουν εναυθεί πριν κι έτσι πρακτικά, το φορτίο είναι άπειρο. Ωστόσο στην τεχνική των λείων τοιχωμάτων το φορτίο κυμαίνεται σε λογικά μεγέθη, αφού η ανατίναξη της κύριας εκσκαφής έχει ήδη πραγματοποιηθεί (Σχήμα 4.14).

Ένα ακόμη πλεονέκτημα που προκύπτει από το γεγονός ότι έχει προηγηθεί η κύρια εκσκαφή, είναι η έγκαιρη απόκτηση όλων των απαραίτητων γεωλογικών πληροφοριών. Ο σχεδιασμός της ανατίναξης με την τεχνική αυτή πρέπει να χρησιμοποιεί φορτία μεγαλύτερα από τις αποστάσεις ούτως ώστε, να εξασφαλίζεται ότι οι ρωγμές συνδέονται κατάλληλα μεταξύ των διατρημάτων και δεν κινούνται πρόωρα προς τη διεύθυνση του φορτίου. Επιπλέον, στην πρότμηση οι αποστάσεις των διατρημάτων είναι μικρότερες κατά 50-75% από ότι στην λείων τοιχωμάτων, αφού η ρωγμή από διάτρημα σε διάτρημα σχηματίζεται με τη βοήθεια της ελαστικής

115

παραμόρφωσης του πετρώματος και από τις δύο μεριές (γιατί το πέτρωμα δεν έχει θραυτεί) (Olofsson, 1990, Persson et al., 1994, Bhandari, 1997).



Σχήμα 4.13: Τα διατρήματα που βρίσκονται πριν από εκείνα της περιμέτρου, μπορεί να προκαλέσουν μεγαλύτερη διαταραχή στο παραμένον πέτρωμα από ότι τα περιμετρικά (Olofsson, 1990)



Σχήμα 4.14: Σύγκριση των συνθηκών της μεθόδου των λείων τοιχωμάτων (δεξιά), με αυτές της μεθόδου πρότμησης (αριστερά), (Jimeno et al., 1995)

Σε σχέση με το χρόνο πυροδότησης κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται, όταν η έκρηξη των διατρημάτων των πλευρών να γίνει πριν από εκείνα της οροφής, διότι αν γίνει το αντίστροφο το εξορυγμένο πέτρωμα της οροφής θα εφάπτεται στα πλευρά κι έτσι τα αποτελέσματα δε θα είναι τα επιθυμητά.

Στους Πίνακες 4.5, 4.6 και 4.7 παρατίθενται στοιχεία από τον οίκο Du Pont (1977) και τον Gustafsson (1973) για τον σχεδιασμό ανατίναξης με τη μέθοδο των λείων τοιχωμάτων για σήραγγα τα οποία δίνει ο Τσουτρέλης (2001).

Πίνακας 4.5: Στοιχεία ανατίναξης με τη μέθοδο λείων τοιχωμάτων για σήραγγες όπως δίνονται από τον Du Pont (Τσουτρέλης, 2001)

Διάμετρος διατρήματος (mm)	Απόσταση S (m)	Φορτίο Β (m)	Πυκνότητα Γομώσεως (kg/m)
50-64	0,9	1,2	0,12-0,40
75-88	1,2	1,5	0,20-0,80
100-112	1,5	1,8	0,40-1,15
125-138	1,8	2,1	1,15-1,50
150-165	2,1	2,7	1,50-2,2

Πίνακας 4.6: Στοιχεία ανατίναξης με τη μέθοδο λείων τοιχωμάτων για σήραγγες

όπως δίνονται από τον Gustafsson (Τσουτρέλης, 2001)

Διάμετρος διατρήματος (mm)	Πυκνότητα γομώσεως (kg/m)	Εκρηκτική ύλη και διάμετρος	Φορτίο Β (m)	Απόσταση S (m)
25-32	0,08	11 mm Gurit	0,30-0,45	0,25-0,35
25-43	0,18	17 mm Gurit	0,70-0,80	0,50-0,60
43-48	0,18	17 mm Gurit	0,80-0,90	0,60-0,70
51	0,38	22 mm Nabit	1,00	0,80
64	0,52	25 mm Nabit	1,00-1,10	0,80-0,90

Πίνακας 4.7: Στοιχεία ανατίναξης με τη μέθοδο λείων τοιχωμάτων για σήραγγες όπως δίνονται από τους Berta (1990) και Du Pont (Τσουτρέλης, 2001)

	Διάμετρος διατρήματος (mm)	Διάμετρος γομώσεως (mm)	Πυκνότητα γομώσεως q (kg/m)	Φορτίο Β (m)	Απόσταση S (m)
Berta	32	17	0,22	0,55-0,75	0,40-0,60
	51	25	0,50	0,80-1,20	0,65-0,95
Du Pont	32	1.50	0,18-0,38	0,90	0,60
	51	-	0,18-0,38	1,05	0,75

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται στοιχεία για τη γεωμετρία και τη γόμωση των διατρημάτων για διάφορες διαμέτρους, όπως προτείνονται από τον Olofsson (1990).

Πίνακας 4.8:Η γεωμετρία και γόμωση των διατρημάτων για διάφορες διαμέτρους με την μέθοδο λείων τοιχωμάτων (Olofsson, 1990)

Perimeter hole diam. mm	Charge con- centration kg/m	Charge type	Burden m	Spacing m
25-32	0.11	11 mm Gurit	0.3-0.5	0.25-0.35
25-48	0.23	17 mm Gurit	0.7-0.9	0.50-0.70
51-64	0.42	22 mm Gurit	1.0-1.1	0.80-0.90
51-64	0.45	22 mm Emulite	1.1-1.2	0.80-0.90

Είναι φανερό ότι η μέθοδος αυτή υπερέχει σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αφού, εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα έχει και το μειωμένο κόστος διάτρησης λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων των διατρημάτων και άρα του μικρότερου αριθμού τους. Επίσης δίνει πολύ καλά αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε αδύναμες βραχόμαζες.

4.6 Ένα παράδειγμα εφαρμογής συμβατικής και ελεγχόμενης ανατίναξης και σύγκριση των αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 4.15 δίνονται τα αποτελέσματα από ανατινάξεις που έγιναν για τη όρυξη φρέατος βάθους 140 m και διαμέτρου 22 m, μέσα σε πυροκλαστικά λατυποπαγή και συμπαγή βασαλτικά πετρώματα. Ενώ στην αρχή χρησιμοποιήθηκε η συμβατική μέθοδος ανατίναξης, λόγω των προβλημάτων που προέκυψαν (κόστος-χρόνος), στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ελεγχόμενες τεχνικές (smooth blasting). Το αποτέλεσμα ήταν να μειωθεί η υπέρθραυση από το 10% στο 6,5% της ολικής εκσκαφής και η διαταραχές στο πέτρωμα να είναι πολύ μειωμένες.

Στο Σχήμα 4.16 δίνεται η διαδοχή των σταδίων εκσκαφής, καθώς επίσης και το σχέδιο διάτρησης, ενώ στο Σχήμα 4.17 δίνεται ο σχεδιασμός της γόμωσης και τα γεωμετρικά στοιχεία της διάταξης των διατρημάτων.



Σχήμα 4.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων σε σχέση με την υπέρθραυση και τη μέση μηνιαία εκσκαφή πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου smooth blasting (Chakraborty et al., 1995)



Σχέδιο 4.16: Διαδοχή των σταδίων εκσκαφής, καθώς επίσης και σχέδιο διάτρησης για την όρυξη φρέατος (Chakraborty et al., 1995)

		2.1m 1-4 For rows	ANFO - Gel-SG 80 - Air gop 02 - Air gop 02 - ANFO - Gel-SG 80 (1), (2) Bi (3 Blast - Para Volume excov Total explosi Sp. charge (k	0% 2 meters (par roled = 113 ve = 49-1 g/cum) = 0-43	1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 2.22	— Stemming — Spacer — 1/3 Stick <u>y row</u>	
			Total no. of h	oles = 70	nile		
	6		Total no. of h	oles = 70 pading Deta	uils		
Row	Spocing (m)	Burden (m)	Total no. of h La Charge/hole (kg)	oles = 70 oading Deta No. of holes	ails Charge/row (kg)	Delays used (holes/delay)	Max. charge/delay (kg)
Row 1	Specing (m) 1·3	Burden (m) 11	Total no. of h La Charge/hole (kg) 1-12	oles = 70 oading Deta No. of holes 10	bils Charge/row (kg) 11-2	Delays used (holes/delay) Z 1 (5), (5)	Max. chorge/delay (kg) 5-6
Row 1 2	Spocing (m) 1·3 1·2	Burden (m) 1-1 1-1	Total no. of h La Charge/hole (kg) 1·12 1·12	oles = 70 bading Deta No. of holes 10 12	bils Charge/row (kg) 11·2 13-44	Delays used (holes/delay) Z 1 (5), (5) 2 3 4 (4), (4), (4)	Max. chorge/delay (kg) 5-6 4-48
Row 1 2 3	Spacing (m) 1·3 1·2 1·2	Burden (m) 1:1 1:1 1:0	Total no. of h La Charge/hole (kg) 1-12 1-12 1-12	No. of holes	11-2 13-44 15-68	Delays used (holes/delay) Z 1 (5), (5) 2 3 4 (4), (4), (4) 5 6 7 (5), (4), (5)	Max. chorge/delây (kg) 5-6 4-48 5-6
Row 1 2 3 Periphery row	Spocing (m) 1·3 1·2 1·2 0·5	Burden (m) 1:1 1:1 1:0 0:65	Total no. of h La Charge/hole (kg) 1-12 1-12 1-12 1-12 0-26	No. of holes	2115 Charge/row (kg) 11-2 13-44 1568 8-84	Delays used (holes/delay) Z 1 (5), (5) 2 3 4 (4), (4), (4) 5 6 7 (5), (4), (5) 8 9 10 (11), (12), (11)	Max. chorge/deloy (kg) 5-6 4-48 5-6 3-12

Σχήμα 4.17: Στοιχεία της γόμωσης και της γεωμετρίας διατρημάτων για τη διάνοιξη φρέατος με smooth blasting (Chakraborty et al., 1995)

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Είναι αναγκαίο να τονιστεί, ότι κάθε ανατίναξη είναι και μία ξεχωριστή περίπτωση. Μπορεί π.χ. να είναι φανερό από τα βιβλιογραφικά στοιχεία που υπάρχουν, ότι οι παράλληλες αρχικές κοπές δίνουν πάντα μεγαλύτερη προχώρηση ανά ανατίναξη. Όμως σε μικρού μεγέθους εκσκαφές, οι συντελεστές διάτρησης και κατανάλωσης είναι πολύ μεγάλοι σε σύγκριση με τις κοπές υπό γωνία που ο αριθμός των διατρημάτων είναι μικρότερος. Συνεπώς, παρόλο που στην περίπτωση διάταξης των διατρημάτων υπό γωνία το πλάτος της διατομής περιορίζει το ρυθμό προχώρησης, αναφορικά με το κόστος οι παράλληλη προεκσκαφή δε συμφέρει, παρά μόνο σε έργα μεσαίας ή μεγάλης διατομής.

Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνονται επί τόπου μετρήσεις και να προσαρμόζεται ο σχεδιασμός της ανατίναξης στις συνθήκες που επικρατούν στο μέτωπο, όπως επίσης και στις προτιμήσεις του υπεύθυνου μηχανικού, σε σχέση με το οικονομικό και χρονικό κόστος της εκσκαφής.

Παρακάτω δίνεται ο Πίνακας 5.1 στον οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά η σύγκριση των αρχικών κοπών που έγινε στην παρούσα εργασία, σύμφωνα με τα δεδομένα που δίνονται από την ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία. Επίσης δίνονται τα Διαγράμματα 5.1 και 5.2, που κατασκευάστηκαν με σκοπό να αποκτηθεί μια πιο καθαρή εικόνα της σύγκρισης μεταξύ τους, αναφορικά με το ποσοστό της προχώρησης ανά ανατίναξη. Τα δεδομένα για τα Διαγράμματα 5.3 και 5.4 έχουν ληφθεί από τους Chakraborty et al. (1998) σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάνοιξη στοών με διάτρηση και ανατίναξη σε υπόγεια μεταλλεία μπραουνίτη (νησοπυριτικό ορυκτό του μαγγανίου με χημικό τύπο (Mn,Si)₂O₃), ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ανομοιογενές πέτρωμα με αρκετές ασυνέχειες.

Τύπος προεκσκαφής	Μέγεθος διατομής	Είδος πετρώματος	Θέση σωρού απόθεσης	Προχώρη σ η	Συντελεστές διάτρησης και κατανάλωσης
Πυκνής διάτρησης (Burn cut)	Μικρή	Σκληρό	Κοντά στο μέτωπο	93% του μήκους διάτρησης	Μεγάλοι
Κυλινδρική (απλή/4 τετραγώνων)	Μεσαία- μεγάλη	Σκληρό και ανθεκτικό	Κοντά στο μέτωπο	95% του μήκους διάτρησης	Μεγάλοι
Coromant/ Μονής ή Διπλής σπείρας	Μεσαία- μεγάλη	Σκληρό και ανθεκτικό	Κοντά στο μέτωπο	>95% του μήκους διάτρησης	Μικροί
Σφηνοειδής (V cut)	Οποιοδήποτε	Όλα τα είδη	Μακριά από το μέτωπο	45-50% του πλάτους διατομής	Μικροί
Πυραμιδοειδής	Οποιοδήποτε	Όλα τα είδη	Μακριά από το μέτωπο	70-80% του πλάτους διατομής	Μικροί
Ριπιδοειδής (Fun cut)	Μικρή	Λεπτο- πλακώδες και εύθρυπτο	Μακριά από το μέτωπο	60% του πλάτους διατομής	Μικροί

Πίνακας 5. 1: Συνοπτική σύγκριση διαφόρων τύπων αρχικών κοπών



Διάγραμμα 5.1: Το ποσοστό της προχώρησης σε σχέση με το μήκος διάτρησης για διάφορα είδη παράλληλων προεκσκαφών



Διάγραμμα 5.2: Το ποσοστό της προχώρησης σε σχέση με το πλάτος της διατομής για διάφορα είδη προεκσκαφών υπό γωνία



Διάγραμμα 5.3:Σύγκριση συντελεστών διάτρησης για παράλληλη και υπό γωνία διάταξη διατρημάτων προεκσκαφής



Διάγραμμα 5.4:Σύγκριση συντελεστών κατανάλωσης εκρηκτικής ύλης για παράλληλη και υπό γωνία διάταξη διατρημάτων προεκσκαφής

Γενικά, η επιτυχία ή όχι της εφαρμογής μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης εξαρτάται κυρίως από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του προς ανατίναξη πετρώματος. Σε σκληρά και ομοιογενή πετρώματα οι τεχνικές αυτές ανατίναξης είναι συνήθως επιτυχείς, όμως σε περιπτώσεις χαλαρών σχηματισμών και αδύναμων βραχομαζών ίσως να μην ισχύει το ίδιο.

Είναι καλό λοιπόν να γίνονται επί τόπου δοκιμές, έτσι ώστε να συμπεραίνεται κάθε φορά το κατά πόσο η χρήση τεχνικών ελεγχόμενης ανατίναξης δίνει περισσότερα οφέλη από ότι κοστίζει κι αν όντως ισχύει κάτι τέτοιο, να σχεδιάζεται η διάταξη και γόμωση των διατρημάτων ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Π.χ. η διάτρηση διατρημάτων σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και με πολύ μικρές διαμέτρους η οποία εφαρμόζεται σε ορισμένες τέτοιες τεχνικές, κοστίζει πολύ περισσότερο από ότι η περιστροφική όρυξη μεγαλύτερης διαμέτρου διατρημάτων. Από την άλλη μεριά όμως η επιφάνεια του εναπομένοντος πετρώματος είναι πολύ πιο ομαλή.

Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι ελεγχόμενες μέθοδοι ανατίναξης σε σχέση με το συνολικό κόστος. Στο Διάγραμμα 5.5 δίνεται μια σύγκριση της μείωσης του Δείκτη Ποιότητας Πετρώματος (RQD) ανάλογα με τη τεχνική εκσκαφής που χρησιμοποιείται. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα η υπεροχή των ελεγχόμενων μεθόδων αναφορικά με τις διαταραχές στο εναπομείναν πέτρωμα. Στο Διάγραμμα 5.6 συγκρίνονται οι αποστάσεις διατρημάτων διαφόρων διαμέτρων που εφαρμόζονται στην τεχνική πρότμησης, με αυτές που εφαρμόζονται στην τεχνική λείων τοιχωμάτων. Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από πίνακες που δίνει ο Bhandari (1997). Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, κατά την εφαρμογή της πυκνής διάτρησης τα περιφερειακά διατρήματα ορύσσονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους και παραμένουν αγόμωτα, επομένως δεν έχει νόημα η σύγκρισή τους με τις αποστάσεις που εφαρμόζονται στις άλλες μεθόδους.

Αυτό που είναι φανερό στο διάγραμμα 5.6, είναι ότι για διαμέτρους πάνω από 40 mm οι αποστάσεις που χρησιμοποιούνται είναι μεγαλύτερες κατά τη χρήση της τεχνικής λείων τοιχωμάτων, ενώ για διαμέτρους από 25 έως 32 mm είναι μικρότερες. Το είδος της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιείται στην κάθε μέθοδο όμως είναι διαφορετικό, κάτι που λαμβάνεται επίσης υπόψη κατά τον υπολογισμό του συνολικού κόστους.

Και σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, η επιλογή της χρήσης ή μη ελεγχόμενων τεχνικών ανατίναξης και του είδους της μεθόδου που θα εφαρμοστεί, εξαρτάται από τις επιτόπου συνθήκες και τις απαιτήσεις του υπεύθυνου μηχανικού του έργου αναφορικά

126

με το συνολικό κόστος και την ποιότητα του αποτελέσματος της ανατίναξης, όπως επίσης και από το διαθέσιμο διατρητικό εξοπλισμό.



Διάγραμμα 5.5: Σύγκριση της μείωσης του Δείκτη Ποιότητας Πετρώματος (RQD) διαφόρων μεθόδων εκσκαφής

Πίνακας 5.2: Σύγκριση συνολικού κόστους διαφόρων μεθόδων ελεγχόμενης

ανατίναξης

Τεχνική ελεγχόμενης ανατίναζης	Κόστος ανατίναξης
Πυκνής διάτρησης (Line drilling)	Χαμηλό
Πρότμησης (Pre-spliting)	Μέτριο
Λείων τοιχωμάτων (Smoothwall)	Υψηλό



Διάγραμμα 5.6: Σύγκριση των μέγιστων αποστάσεων των διατρημάτων που χρησιμοποιούνται σε δύο μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση και τη σύγκριση των τεχνικών αρχικής κοπής στο Κεφάλαιο 3 είναι τα εξής:

Οι παράλληλες κοπές έχουν σίγουρα τα περισσότερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις κοπές υπό γωνία, αφού:

 Η εκσφενδόνιση των προϊόντων της ανατίναξης εκτός του ανοίγματος είναι σχετικά μικρή και η μάζα τους συγκεντρωμένη, άρα η φόρτωση γίνεται ευκολότερα και γρηγορότερα

 Η ακρίβεια στη διάτρηση, ακόμη κι αν ο χειριστής του διατρητικού εξοπλισμού δεν έχει μεγάλη εμπειρία

Όταν εφαρμόζεται σωστά είναι η πλέον κατάλληλη για όλους σχεδόν τους τύπους
των πετρωμάτων.

Η μέγιστη προχώρηση ανά ανατίναξη δεν εξαρτάται από το μέγεθος της διατομής
της εκσκαφής, αλλά από τη διάμετρο του κενού διατρήματος κι έτσι είναι κατάλληλη
για προχωρήσεις μεγάλου βάθους, ακόμα και για μικρής διατομής εκσκαφές.

 Όταν η εκρηκτική ύλη κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος των διατρημάτων, ο θρυμματισμός είναι ικανοποιητικότερος και πιο ομοιόμορφος με παράλληλες προεκσκαφές από ότι με τις υπό γωνία διατάξεις.

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 4 και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα και το κόστος της συμβατικής μεθόδου ανατίναξης με αυτά των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Η χρήση της συμβατικής ανατίναξης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υπέρθραυσης πολύ μεγαλύτερης (ως και 30 cm) από αυτή που θα υπήρχε αν γινόταν χρήση ελεγχόμενων μεθόδων. Οι συνέπειες της χρήσης της συμβατικής μεθόδου στα περιφερειακά διατρήματα είναι:

Η αύξηση του κόστους διάτρησης και γόμωσης

 Το αυξημένο ρίσκο για τους εργαζόμενους αν η ευστάθεια των τοιχωμάτων δεν μπορεί να διατηρηθεί

- Η αύξηση του κόστους υποστήριξης του υπόγειου έργου
- Η αύξηση του κόστους φόρτωσης και μεταφοράς

Η μείωση του ποσοστού αποληψιμότητας του χρήσιμου ορυκτού, όταν πρόκειται για υπόγειο έργο παραγωγής

129

 Η αύξηση της πιθανότητας εισροής υπόγειων υδάτων λόγω των εκτεταμένων ρωγμών

 Η πρόκληση δονήσεων λόγω του μεγάλης έντασης κρουστικού παλμού προκαλεί πολλά προβλήματα όπως:

1. επιβάρυνση του περιβάλλοντος εργασίας λόγω της σκόνης που κατέρχεται από

τις προϋπάρχουσες ρωγμές

2. επέκταση των ρωγμών αυτών

3. σχηματισμός νέων ρωγμών και άλλων σοβαρών φθορών στο πέτρωμα

4. κατάρρευση ετοιμόρροπων κτηρίων που υπέρκεινται της εκσκαφής

Από την άλλη μεριά, με τη χρήση ελεγχόμενων ανατινάξεων σε υπόγεια έργα, εκτός από την **αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων** επιτυγχάνεται:

 Καλύτερος αερισμός, εξαιτίας των πιο λείων τοιχωμάτων του ανοίγματος που μειώνουν την αντίσταση στη ροή του αέρα.

• Λιγότερες ρωγματώσεις στο περιβάλλον της εκσκαφής πέτρωμα

 Καλύτερο προφίλ σωρού απόθεσης, αφού τα θραύσματα δε διασκορπίζονται σε μεγάλο βαθμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

 Αγιουτάντης, Ζ. Στοιχεία Διάτρησης και Ανατίναξης, Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007.

Εξαδάκτυλος, Ε. Γ., Σταυροπούλου, Μ. Σχεδιασμός και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπόγειων Έργων, Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006.

 Πολυχρονόπουλος, Ι. Γ. Εκρηκτικές Υλες- Τεχνική Εξορύξεως των Πετρωμάτων-Καθαίρεση κατασκευών, Εκδόσεις Σελλούντος, Αθήνα, 1979.

Τσουτρέλης, Χ. Εκρηκτικές Υλες και Τεχνική των Ανατινάζεων, Τόμος 2, Εκδόσεις
Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001.

 Σαρρής, Ν.Ε.. Προσομοίωση Ανατίναζης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Σεπτέμβριος 2004.

 Σοφατζίδη, Μ. Δ.. Βελτιστοποίηση Διάταξης Διατρημάτων σε Υπόγεια Εκμετάλλευση Κοιτάσματος Βωξίτη, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Οκτώβριος 2007.

• Dyno Nobel Sweden A.B., Nonel- Οδηγίες Χρήσεως, Nora, Sweden, 2004.

Διεθνής

• Bhandari, S. *Engineering Rock Blasting Operations*, A.A Balkema, Rotterdam, 1997.

• Chakraborty, A. K., V. M. S. R. Murthy and J. L. Jethwa Blasting Problems in Underground Constructions trough Deccan Trap Formation Some Experiences at Konya Hydro- Electric Project, Stage IV, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 311-324, Elsevier Science Ltd, 1998.

• Chakraborty, A. K., P. Pal Roy, J. L. Jethwa. and R. N. Gupta. Blast Performance in Small Tunnels- A Critical Evaluation in Underground Mines, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 331-339, Elsevier Science Ltd, 1998.

- Hagan, T. N., Rock breakage by explosives, *Acta Astronautica*, Vol. 6, pp. 329-340, Pergamon Press, Great Britain, 1979.
- Hoek, E. and E. Brown *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, E & FN Spon, Chapman & Hall, 1997.
- Hoek, E. Big Tunnels in Bad Rock- 2000 Terzaghi Lecture, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 127, No. 9, pp. 726-740, September 2001.

• Hoek, E. *Practical Rock Engeneering,* Course Notes, University of Torondo, 2007, from http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp.

• Hoek, E., C. Carranza-Torres, M. Diederichs and Corkum B. The 2008 Kersten Lecture Integration of geotechnical and structural design in tunnelling, *University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference*, Minneapolis, 29 February, 2008.

 ITA, AITES, General Report on Convetional Tunneling Method, *ITA Report* n^o 002, Switzerland, April 2009

• Jimeno, C. L., J.E. Jimeno, and Carcedo, .F.J.A. *Drilling and Blasting of Rocks*, A.A Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1995.

• Johansen, J. and C.F. Mathiesen. *Modern Trends in Tunneling and Blast Design*, A.A Balkema, Rotterdam, 2000.

• Olofsson, O.S. *Applied Explosives- Technology for Construction and Mining*, APPLEX, Arla, Sweden, 1990.

• Persson, P., Holmberg, R. and Lee, J. *Rock Blasting and Explosives Engineering*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1994.

• Peterson, C.R., A.T. Fisk, J.J. Olson and R.E. Brooks. Spiral Drill-and-Blast Concept May Speed Up Tunneling Advance Rate, *Mining Engineering*, Vol. XXIX, June, 1977, from http://www.onemine.org.

• Qiao, D. Theoretical Model and Numerical Analysis of Millisecond Delay Time of Parallel Cut Blasting in Tunneling Excavation, *Proceedings of the World Tunnel Congress and 32nd ITA Assembly*, Seoul, Korea, 22–27 April 2006.

• Richard, A. Dick, Larry R. Fletcher, and Dennis V. D'Andrea. *Explosives and Blasting Procedures*, USBM Publication, 1986.

• Roach, R.J. and D. Roy. Bulk Loading of Emulsion Explosives in Shaft Sinking, Dyno Nobel, Ontario, 1996, from http://www.dynonobel.com.

• Rustan, A.P. Micro-sequential Contour Blasting- How does it influence the surrounding rock mass?, *Engineering Geology*, Vol. 49, pp. 303-313, Elsevier Science B.V., Lulea, Sweden, 1998.

• Sharma, P.D. Tunnel blasting – emulsion explosives and proper blast design are the prerequisite for better efficiency, *Indian Journal of Mines, Metals and Fuels*, September 2005.

• Sharma, P.D. Blast design for Drifting and Tunneling with Wedge and Burn Cut, July 2009, from http://miningandblasting.wordpress.com.

• Sharma, P.D. Advances in Drilling and Blasting, July 2009, from http://miningandblasting.wordpress.com/2009/07/21/advances-in-drilling-and-blasting/.

• Sharma, P.D. Explosives and Blasting, July 2009, from http://miningandblasting.wordpress.com.

• Sharma, P.D. Techniques of Controlled Blasting for Mines, Tunnels and Construction Workings to Mitigate Various Blast Induced Adnerce Effects, September 2009, from http://miningandblasting.wordpress.com.

• Sharma, P.D. Emulsion Explosives and Proper Blast Design are the Prerequisite for Better Efficiency, India, August 2009, from http://miningandblasting.wordpress.com.

• Singh, B., R.K. Goel and J.A. Hundson. *Tunneling in Weak Rocks*, Elsevier Geo-Engineering Book Series, Vol. 5, Oxford, June 2006

• Singh, S. P. and P. Xavier. Causes, impact and control of overbreak in underground excavations, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 20, pp. 63-71, Elsevier Science Ltd, 2005.

• Tatiya, R. R. Surface and Underground Excavations: Methods, Techniques and Equipment, A.A Balkema, Taylor and Francis Group plc, London, 2005.

• Zhou, C., P. Wang, Y. Lei and X. Yin. Optimization on cut-hole of mining tunnel excavation, *Mining Science and Technology*, Vol. 19, pp. 70-73, Elsevier Science Ltd, 2009.