



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ  
ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ ΣΕ  
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΜΕΤΩΠΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΚΑΤΕΡΙΝΑ Γ.ΔΑΣΚΑΛΑΚΗ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Ζαχαρίας Αγιουτάντης (επιβλέπων)**

**Μιχαήλ Γαλετάκης, Επίκουρος καθηγητής**

**Κωνσταντίνος Κακλής, Δρ**

**Χανιά, Ιούλιος 2012**

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

Αφιερώνεται  
στην οικογένεια μου

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ –ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η Διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Σπουδών μου στο τμήμα “Μηχανικών Ορυκτών Πόρων” του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το θέμα που διαπραγματεύεται αφορά την συγκριτική ανάλυση των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης σε επιφανειακά και υπόγεια μέτωπα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους με βοήθησαν και συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής και συγκεκριμένα:

- Στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ζ. Αγιουτάντη για την επιλογή του θέματος, την άριστη συνεργασία που είχαμε και για την συμπαράσταση που μου παρείχε με τις συμβουλές του και τις ουσιαστικές επισημάνσεις του.
- Στον καθηγητή κ Μ. Γαλετάκη και στον Δρ. κ. Κ. Κακλή για τον χρόνο που διέθεσαν για την διόρθωση και εξέταση της παρούσας εργασίας.
- Στην οικογένεια μου, για την πολύτιμη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια συμβάλλοντας καθοριστικά στην παρούσα εξέλιξη μου.
- Στους φίλους μου Άννα, Γιούλη, Κατερίνα, Νίκο και Νάντια των οποίων την συμβολή θεωρώ ανεκτίμητη και στην Έφη Μπαρμποπούλου για το κουράγιο και την δύναμη που μου παρείχε καθ’ όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική ανάλυση των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης σε επιφανειακά και υπόγεια μέτωπα.

Αρχικά γίνεται αναλυτική περιγραφή των μεθόδων και επισημαίνεται η αναγκαιότητα τους σε περιπτώσεις ανατινάξεων που θεωρείται απαραίτητη η εφαρμογή τους. Με την χρήση αυτών των μεθόδων επιτυγχάνεται μείωση δονήσεων και θορύβου, μείωση υπερεκκαφής, ομαλότερα πρανή, λιγότερες ρωγματώσεις και μοιόμορφα μέτωπα εξόρυξης. Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν ήταν οι εξής: πυκνής διάτρησης (line-drilling), πρότμησης (pre-splitting), ελαφρού φορτίου (trim blasting), απαλής ανατίναξης (cushion blasting), ανατίναξη διαμόρφωσης (buffer blasting) και λείων τοιχωμάτων (smooth blasting).

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση των βασικών παραμέτρων της κάθε μεθόδου ξεχωριστά με κύριο στόχο την κατασκευή σχετικών διαγραμμάτων για την συγκριτική αξιολόγησή τους .

Επιπλέον έγινε σύγκριση των παραπάνω μεθόδων με σκοπό τον πλήρη διαχωρισμό τους με βασικό γνώμονα τα στοιχεία που συλλέχθηκαν και αφορούσαν τις βασικές παραμέτρους τους. Επίσης έγινε αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου ξεχωριστά καθώς και στην συμβολή τους σε διάφορα πεδία εφαρμογής τους.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω της παραπάνω επεξεργασίας έγινε ταξινόμηση των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης σε σχέση με το συγκριτικό κόστος διάτρησης και κόστος εκρηκτικών, στοιχεία που κρίνονται απαραίτητα για την σωστή διαχείριση μιας ανατίναξης τόσο σε επιφανειακά όσο και σε υπόγεια μέτωπα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>1</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>3</b>
<b>ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ</b> .....	<b>3</b>
2.1 Γενικά .....	3
2.2 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των εκρηκτικών υλών.....	3
2.2.1 Ισχύς των εκρηκτικών .....	4
2.2.2 Ταχύτητα έκρηξης .....	4
2.2.3 Εκλυόμενη ενέργεια ή θερμότητα .....	6
2.2.4 Πίεση έκρηξης.....	6
2.2.5 Πυκνότητα εκρηκτικής ύλης .....	7
2.2.6 Ανθεκτικότητα στο νερό .....	8
2.2.7 Ευαισθησία έναυσης .....	8
2.2.8 Ευαισθησία στην τριβή .....	9
2.3 Έναυση εκρηκτικών.....	9
2.4 Συστήματα επιβράδυνσης .....	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>11</b>
<b>ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Γενικά .....	11
3.2 Διάδοση και απόσβεση του κρουστικού κύματος.....	12
3.3 Ανάκλαση και διάθλαση του κρουστικού παλμού .....	12
3.4 Ωστική φάση .....	14
3.5 Δημιουργία κρατήρα.....	15
3.6 Παράμετροι σχεδιασμού ανατίναξης .....	16
3.7 Εμπειρικές εξισώσεις .....	17
3.7.1 Επιφανειακές ανατινάξεις .....	17

3.7.2 Υπόγειες ανατινάξεις .....	20
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>25</b>
<b>ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΙΣ.....</b>	<b>25</b>
4.1 Εισαγωγή.....	25
4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο ελεγχόμενων ανατινάξεων.....	26
4.3 Παράμετροι ελεγχόμενων ανατινάξεων.....	28
4.3.1 Ιδιότητες του πετρώματος .....	28
4.3.2 Ακρίβεια διάτρησης των διατρημάτων .....	30
4.3.3 Πίεση έκρηξης.....	31
4.3.4 Επιλογή εκρηκτικής ύλης .....	32
4.3.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατρημάτων .....	33
4.4 Περιγραφή των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης.....	36
4.4.1 Μέθοδος πυκνής διάτρησης/διάτρηση γραμμής (line drilling) .....	36
4.4.2 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting/ pre-shearing) .....	40
4.4.3 Μέθοδος ελαφρού φορτίου (trim blasting) .....	47
4.4.4 Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting/slashing) .....	50
4.4.5 Ανατίναξη διαμόρφωσης (buffer blasting) .....	55
4.4.6 Μέθοδος λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) .....	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>64</b>
<b>ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΩΝ</b>	
<b>ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ.....</b>	<b>64</b>
5.1 Αναλυτική σύγκριση παραμέτρων που αφορούν την κάθε μέθοδο ελεγχόμενης ανατίναξης ξεχωριστά.....	64
5.1.1 Μέθοδο πυκνής διάτρησης/διάτρηση γραμμής (line drilling) .....	64
5.1.2 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) .....	66
5.1.3 Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting) .....	81
5.1.4 Μέθοδος ελαφρού φορτίου (trim blasting) .....	87
5.1.5 Μέθοδος λείων τοιχωμάτων-επιφανειακά (smooth blasting) .....	87

5.1.6 Μέθοδος λείων τοιχωμάτων-υπόγεια (smooth blasting).....	93
5.2 Αναλυτική σύγκριση των παραμέτρων μεταξύ των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης.....	100
5.2.1 Μέθοδος πυκνής διάτρησης (line drilling)- Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) .....	100
5.2.2 Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting)- Μέθοδος ελαφρού φορτίου (trim blasting).....	102
5.2.3 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) – Μέθοδος λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) .	104
5.2.4 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) – Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting).	107
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>111</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>111</b>
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	111
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	117
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>119</b>



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

Η εξόρυξη των πετρωμάτων και άλλων φυσικών υλικών επιτυγχάνεται σήμερα με δύο τρόπους:

- Χωρίς την χρήση εκρηκτικών υλών, αλλά με την άσκηση μηχανικών, θερμικών και άλλου τύπου δυνάμεων – η διαδικασία αυτή δεν αναλύεται περαιτέρω στην παρούσα διπλωματική.
- Με την χρήση εκρηκτικών υλών, οι οποίες διεγείρονται κατάλληλα μπορούν να προκαλέσουν διάρρηξη του πετρώματος και απόσπαση από την φυσική του θέση ως αποτέλεσμα της βίαιης χημικής αντίδρασης της εκρηκτικής ύλης.

Η θραύση των πετρωμάτων με συμβατικές εκρηκτικές ύλες άρχισε να γίνεται ασφαλέστερη και οικονομικότερη από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Αργότερα έγινε δυνατή η εφαρμογή διαφόρων θερμοδυναμικών, θερμοχημικών κ.α θεωριών που συνδέονται με την γένεση και την διάδοση των κρουστικών κυμάτων με σκοπό τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων των εκρήξεων. Βάσει του αντίστοιχου θεωρητικού υποβάθρου αλλά και της εμπειρίας από τα διαφορετικού τύπου τεχνικά έργα, ο σύγχρονος μηχανικός μπορεί να εφαρμόσει ένα ευρύ πεδίο μεθόδων και υλικών (πχ. εκρηκτικών) ώστε να επιτύχει την βέλτιστη δυνατή εξόρυξη σε δεδομένο τεχνικό έργο (πχ. τον καλύτερο θρυμματισμό του πετρώματος ανάλογα με τις συνθήκες εξόρυξης, την δυνατότητα εύκολης φόρτωσης, την προστασία παρακείμενων κατασκευών, κλπ).

Ειδικότερα, κατά την εξόρυξη των πετρωμάτων με εκρηκτικές ύλες παρουσιάζονται σε τεχνικά κυρίως έργα περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται να

διατηρηθεί όσο είναι δυνατόν η ανθεκτικότητα του παραμένουστος σχηματισμού ώστε να αποτελεί ένα αυτοστηριζόμενο αλλά και ασφαλές τμήμα του τεχνικού έργου που κατασκευάζεται. Σε πολλές περιπτώσεις τεχνικών έργων, παράλληλα με την διατήρηση του περιβάλλοντος πετρώματος, επιδιώκεται και η μείωση της υπερεκσκαφής καθώς και η δημιουργία ομαλών πρανών ή τοιχωμάτων. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις τεχνικών έργων που εκτελούνται πλησίον κατοικημένων περιοχών, αντιμετωπίζεται κατά κανόνα το ζήτημα της μείωσης των εδαφικών δονήσεων αλλά και του θορύβου που προκαλούνται από τις εκρήξεις.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης των παραπάνω ζητημάτων είναι η εφαρμογή ειδικών μεθόδων εξόρυξης ανατίναξης οι οποίες είναι γνωστές ως “Μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης” (controlled blasting). Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται κατά κανόνα στα όρια του όγκου που πρόκειται να εξορυχτεί. Κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι πρόσθετες δαπάνες διάτρησης και γόμωσης, οι οποίες είναι 25-35% μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις δαπάνες των συμβατικών ανατινάξεων. (Τσουτρέλης, 2001)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφεται καταρχήν το θεωρητικό υπόβαθρο των ελεγχόμενων ανατινάξεων και στη συνέχεια αναλύονται οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται κάθε μέθοδος. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που όσον αφορά το θεωρητικό τους υπόβαθρο υπάρχει διάκριση ανάμεσα στις μεθόδους, στην εφαρμογή τους, πολλοί ερευνητές τείνουν να χρησιμοποιήσουν κάποιο συνδυασμό δύο ή περισσότερων μεθόδων. Επομένως, στην πράξη, η συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων αυτών με βάση της παραμέτρους εφαρμογής είναι μια επίπονη διαδικασία.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια πρώτη αναφορά σε βασικές έννοιες που κρίνονται απαραίτητες για την κατανόηση της παρουσίας των μεθόδων και των παραμέτρων τους όπως αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια, ενώ στα κεφάλαια που ακολουθούν αναλύεται κάθε μέθοδος χωριστά και επιχειρείται η συγκριτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ**

#### **2.1 Γενικά**

Εκρηκτική ύλη είναι ένα υλικό σώμα ή σύστημα το οποίο μπορεί με κατάλληλη μηχανική ή θερμική διέγερση να παράγει απότομα, υπό ταυτόχρονη αποδέσμευση της εσωτερικής του ενέργειας, μια μεγάλη ποσότητα αερίων για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον θρυμματισμό των πετρωμάτων (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Μια εκρηκτική ύλη αποτελείται από δύο ή περισσότερες χημικές ουσίες από τις οποίες η μία είναι καύσιμη ύλη (ελλειπής σε οξυγόνο) και η άλλη οξειδωτική (αυτάρκης σε οξυγόνο). Πρέπει να προστεθεί στο σημείο αυτό ότι, εκείνο που χαρακτηρίζει μια εκρηκτική ύλη είναι η αναπτυσσόμενη ενέργεια στην μονάδα του χρόνου και όχι η ποσότητα της αποδιδόμενης ενέργειας κατά την αντίδραση. Η ισχύς οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η χημική αντίδραση της. Η ικανότητα που της προσδίδει λοιπόν η ισχύς, να αποδίδει την ενέργεια της σε πολύ μικρό χρόνο σε ένα τμήμα του πετρώματος την καθιστά κατάλληλη για την θραύση του (Τσουτρέλης, 1997).

#### **2.2 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των εκρηκτικών υλών**

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

- η ισχύς,
- η ταχύτητα έκρηξης,
- η παραγόμενη ενέργεια ή θερμότητα,

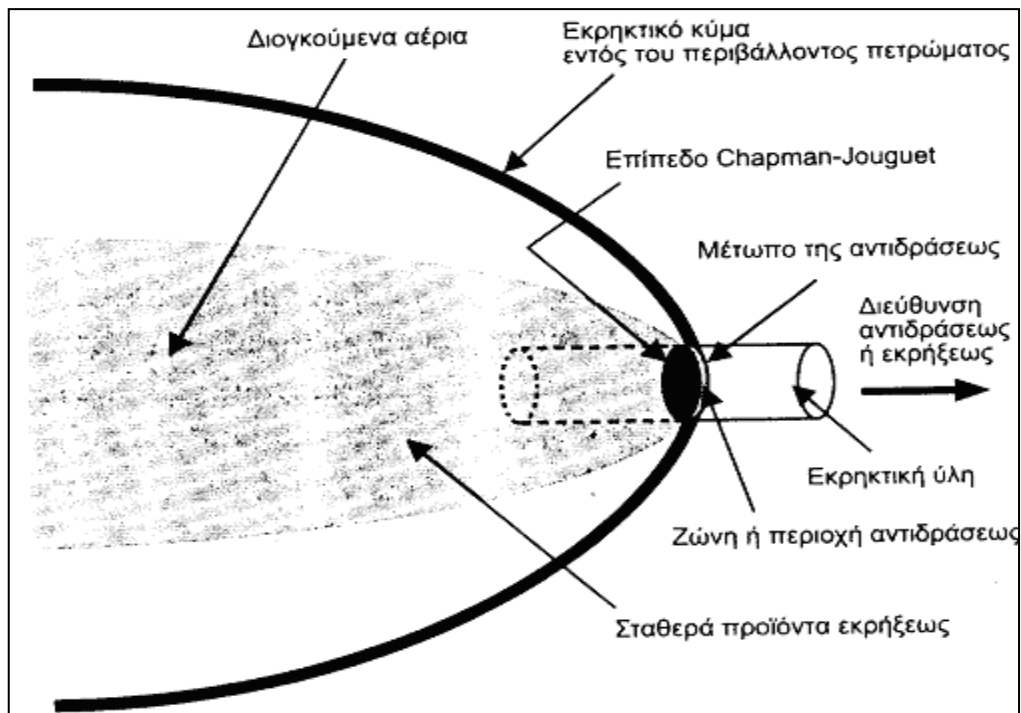
- η πίεση έκρηξης,
- η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης,
- η ανθεκτικότητα στο νερό,
- η ευαισθησία.

### **2.2.1 Ισχύς των εκρηκτικών**

Η ισχύς ενός εκρηκτικού είναι ένα μέτρο του ρυθμού ενέργειας που εκλύεται κατά την έκρηξη. Είναι σημαντικός παράγοντας και έχει μεγάλη σημασία η εκτίμηση της διότι από την μια χρειάζεται μεγάλη ισχύς για τον θρυμματισμό σκληρού πετρώματος και από την άλλη μπορεί να υπάρχουν σημαντικές απώλειες ενέργειας λόγω του μηχανισμού θραύσης του πετρώματος και της συμπεριφοράς του πετρώματος υπό την επίδραση της κρουστικής και ωστικής φάσης, η οποία εξαρτάται από τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Έτσι ισχυρά εκρηκτικά προκαλούν μικρότερη θραύση με μαλακά σε σχέση με εκρηκτικά μικρότερης ισχύς (Πολυχρονόπουλος, 1979).

### **2.2.2 Ταχύτητα έκρηξης**

Η ταχύτητα έκρηξης δηλώνει τον ρυθμό με τον οποίο εκλύεται η ενέργεια του εκρηκτικού ή την ταχύτητα της χημικής αντίδρασης ή την ταχύτητα του κρουστικού παλμού που παράγεται από την έκρηξη. Η ταχύτητα έκρηξης των εμπορικών εκρηκτικών υλών κυμαίνεται από 1500 m/s έως 7600 m/s. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έκρηξης μιας εκρηκτικής ύλης τόσο ταχύτερη είναι η έκλυση της ενέργειας και επομένως ταχύτερη η ωστική φάση και αντίστροφα. Για τον λόγο αυτό εκρηκτικές ύλες με χαμηλή ταχύτητα έκρηξης δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε μέτριας σκληρότητας πετρώματα. Να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια μιας έκρηξης η χημική αντίδραση μεταξύ των συστατικών του εκρηκτικού γίνεται σε μια ζώνη έκρηξης η οποία κινείται μέσα στο εκρηκτικό υλικό από το σημείο έναυσης μέχρι το τέλος της εκρηκτικής στήλης. Η πρωτεύουσα ζώνη έκρηξης περικλείεται ανάμεσα από το μέτωπο του κρουστικού κύματος και το επίπεδο Charman – Jouquet όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Δημιουργία κρουστικού παλμού κατά την έκρηξη (Τσουτρέλης, 1997).

Η ταχύτητα έκρηξης με την σειρά της εξαρτάται κι αυτή από την διάμετρο της εκρηκτικής στήλης, τον βαθμό περιορισμού, τον τρόπο έναυσης του εκρηκτικού και την πυκνότητα γόμωσης (Αγιουτάντης, 2009).

Όταν η ταχύτητα έκρηξης είναι υψηλή, τότε η εκρηκτική ύλη χαρακτηρίζεται από μεγάλη διαρρηκτικότητα και τα κρουστικά φαινόμενα στο γύρω χώρο είναι έντονα. Η ταχύτητα έκρηξης αυτών των εκρηκτικών είναι μεγαλύτερη από 5000 m/s. Όταν η ταχύτητα έκρηξης είναι χαμηλή τότε χαρακτηρίζονται εκρηκτικά χαμηλής διαρρηκτικότητας που συνοδεύονται από μια σημαντική ωστική φάση. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα τους κυμαίνεται κάτω από 2500 m/s.

Τα σκληρά πετρώματα απαιτούν εκρηκτικές ύλες με υψηλή διαρρηκτικότητα ενώ χαλαρά ή μη συνεκτικά πετρώματα απαιτούν εκρηκτικά χαμηλής διαρρηκτικότητας. Τέλος κατά την επιλογή του ενισχυτικού εναύσματος είναι σημαντικό η διάμετρος του εναύσματος να είναι παραπλήσια με αυτή του διατρήματος ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή έναυση σε όλο το διάτρημα (Τσουτρέλης, 2001).

### 2.2.3 Εκλυόμενη ενέργεια ή θερμότητα

Η ενέργεια που εκλύεται από την αποσύνθεση μιας εκρηκτικής ύλης είναι συνάρτηση της χημικής σύνθεσης του υλικού και των αντιδράσεων που γίνονται στις δεδομένες συνθήκες. Η αποδοτικότητα και η καταλληλότητα ενός εκρηκτικού δεν εξαρτάται μόνο από την συνολική εκλυόμενη ενέργεια, αλλά από τον ρυθμό έκλυσης της, από τον τρόπο χρησιμοποίησης αυτής για την θραύση ή/και μετατόπιση του πετρώματος.

Σημειώνεται επίσης η χρήση του δείκτη της απόλυτης ισχύος ενός εκρηκτικού (ASV), ο οποίος εκφράζει την ενέργεια (σε joule) που παράγεται από 0,1 kg εκρηκτικής ύλης (Clark, 1987).

Οι ενεργειακές μέθοδοι εκτίμησης ενός εκρηκτικού έχουν το μειονέκτημα ότι δεν περιλαμβάνουν ένα μέτρο της διαρρηκτικότητας του εκρηκτικού που συνδέεται με την πίεση έκρηξης (Τσουτρέλης, 1997).

### 2.2.4 Πίεση έκρηξης

Η πίεση έκρηξης είναι η πίεση του κρουστικού κύματος που προηγείται από την ζώνη χημικής αντίδρασης. Το μέγεθος της παραμέτρου αυτής κυμαίνεται από 5 ως 150 kbar (500 ως 15000MPa) (Hartman, 1987) είναι καθοριστικό για την αποδοτικότητα και καταλληλότητα του εκρηκτικού υλικού και τον τρόπο θραύσης του πετρώματος. Η πίεση έκρηξης είναι συναρτήσει της ταχύτητας έκρηξης, της μοριακής ταχύτητας του υλικού και της πυκνότητας του εκρηκτικού. Η πίεση αυτή μπορεί να υπολογιστεί από διάφορες εμπειρικές εξισώσεις.

Η πίεση έκρηξης είναι διαφορετική με την πίεση που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του διατρήματος από τα αέρια μετά την αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης γι αυτό δεν θα πρέπει να συγχέονται. Η πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος είναι συνάρτηση του βαθμού περιορισμού του εκρηκτικού και της θερμοκρασίας των αερίων της έκρηξης. Επιπρόσθετα η πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος είναι μικρότερη από την πίεση έκρηξης. Η πίεση στο διάτρημα είναι της τάξεως 10 έως 60 kbar (1000 έως 6000 MPa) (Hartman, 1987) και καθορίζει την ικανότητα της εκρηκτικής ύλης να θρυμματίσει χαμηλής συνεκτικότητας/αντοχής πετρώματα καθώς να μετατοπίσει και το θραυσμένο πέτρωμα (Τσουτρέλης, 1997).

### 2.2.5 Πυκνότητα εκρηκτικής ύλης

Η πυκνότητα εκρηκτικής ύλης αναφέρεται στην πυκνότητα του μίγματος όπως παρασκευάζεται από τον κατασκευαστή. Έτσι η παράμετρος αυτή καθορίζει την θεωρητική ποσότητα του εκρηκτικού που τοποθετείται στο διάτρημα. Στα εκρηκτικά υλικά που διατίθενται χύδην διερευνάται η πυκνότητα γόμωσης που είναι η τελική πυκνότητα του υλικού μετά την γόμωση του διατρήματος. Η πυκνότητα γόμωσης εξαρτάται από τον τρόπο γόμωσης του υλικού (χύδην, πνευματικά κ.λπ.) και συνήθως είναι διαφορετική από την θεωρητική πυκνότητα του εκρηκτικού. Η εκτίμησης της καταλληλότητας και αποδοτικότητας του εκρηκτικού συναρτηίσει της πυκνότητας του γίνεται με βάση την πραγματική του πυκνότητα στο διάτρημα, την πυκνότητα γόμωσης.

Όταν το πέτρωμα είναι υψηλής συνεκτικότητας/αντοχής τότε απαιτείται η χρήση εκρηκτικών με μεγάλη πυκνότητα ενώ όταν είναι χαμηλής συνεκτικότητας/αντοχής συνιστάται η χρήση εκρηκτικών με χαμηλή πυκνότητα. Η πυκνότητα των εκρηκτικών στον τομέα της εξόρυξης κυμαίνεται από 0,8 έως 1,6 g/cm<sup>3</sup> επομένως, αν το εκρηκτικό έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το νερό, τότε επιπλέει με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η γόμωση υγρών διατρημάτων (Αγιουτάντης, 2009).

Υπερβολική αύξηση της πυκνότητας ενός εκρηκτικού επιφέρει σημαντική μείωση στην ευαισθησία του. Όταν ένα εκρηκτικό φτάσει η ξεπεράσει την τιμή της κρίσιμης πυκνότητας, τότε δεν μπορεί να εναυθεί ακόμα και ισχυρά ενισχυτικά εναύσματα.

### **2.2.6 Ανθεκτικότητα στο νερό**

Η ανθεκτικότητα ενός εκρηκτικού στο νερό δηλώνει την δυνατότητα του να εκραγεί κάτω από υγρές συνθήκες ή την ικανότητα του να εμποδίσει το νερό να εισέλθει στην μάζα του. Η ανθεκτικότητα στο νερό εκφράζεται από τον αριθμό των ωρών που μπορεί να παραμείνει μέσα σε νερό ένα εκρηκτικό χωρίς να χάσει την ικανότητα του να εκραγεί από καψύλλιο ισχύος Ν<sup>ο</sup> 6 (Αγιουτάντης, 2009).

Όταν το νερό εισέλθει σε όλη την μάζα του εκρηκτικού τότε η ευαισθησία του εκρηκτικού μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να μην εκρήγνυται ή στην χειρότερη περίπτωση να εκρήγνυται ανεξέλεγκτα. Ορισμένες δυναμίτιδες ή εκρηκτικά υγρής φάσης έχουν καλή ανθεκτικότητα στο νερό ενώ εκρηκτικά που περιέχουν νιτρικό αμμώνιο έχουν χαμηλή έως και μηδενική ανθεκτικότητα στο νερό αφού το νιτρικό αμμώνιο είναι υγροσκοπικό.

Για την αποφυγή των προβλημάτων αυτών καλό θα είναι να γίνεται άμεση πυροδότηση των λιγότερο ανθεκτικών στο νερό αμέσως μετά την γόμωση, την χρήση ενισχυτικών εναυσμάτων και η διατήρηση της συσκευασίας του εκρηκτικού σε καλή κατάσταση (Τσουτρέλης, 1997).

### **2.2.7 Ευαισθησία έναυσης**

Η ευαισθησία έναυσης μιας εκρηκτικής ύλης καθορίζεται από την ελάχιστη ποσότητα ενέργειας, που απαιτείται για να προκληθεί με σταθερό ρυθμό αντίδραση έκρηξης. Υπάρχουν δύο τρόποι για τον προσδιορισμό της ευαισθησίας έναυσης.

Ο πρώτος τρόπος αναφέρεται στην ελάχιστη ποσότητα έναυσης σε επαφή με την εκρηκτική ύλη που απαιτείται για την έναυση της. Δηλαδή δοκιμάζεται η έναυση της εκρηκτικής ύλης σε μια σειρά ισχυρότερων εναυσμάτων μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική έκρηξη. Ο δεύτερος τρόπος αναφέρεται στην ικανότητα της να εναυθεί μέσω παρεμβαλλόμενου διάκενου αέρα (Αγιουτάντης, 2009).

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της ισχύος μιας εκρηκτικής ύλης και της ευαισθησίας της, αλλά σε γενικές γραμμές όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς τόσο μεγαλύτερη είναι και η ευαισθησία (Τσουτρέλης, 1997).



### **2.2.8 Ευαισθησία στην τριβή**

Τα εκρηκτικά υλικά πολύ συχνά έρχονται σε επαφή μεταξύ τους ή με διάφορες επιφάνειες ή οι κόκκοι μεταξύ τους με αποτέλεσμα την τριβή των επιφανειών αυτών. Κάτω όμως από συγκεκριμένες συνθήκες η τριβή αυτή μπορεί να προκαλέσει την έναυση των εκρηκτικών. Η ενέργεια που απαιτείται για να υπερνικηθεί η δύναμη της τριβής αποδίδεται είτε σε έργο είτε σε θερμότητα.

Στην περίπτωση βέβαια, που οι επιφάνειες δεν είναι λείες η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα εντοπίζεται σε συγκεκριμένα σημεία. Τα σημεία αυτά της θέρμανσης καλούνται θερμά σημεία και μπορούν να προκαλέσουν την έναυση της χημικής αντίδρασης έκρηξης. Η θερμοκρασία των θερμών σημείων εξαρτάται από την σχετική ταχύτητα μεταξύ των δύο περιοχών τριβής, τον συντελεστή τριβής και την κάθετη δύναμη που συγκρατεί τα δύο υλικά σε επαφή. Ο υπολογισμός σε ευαισθησία μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας διάφορες συσκευές (Αγιουτάντης, 2009).

### **2.3 Έναυση εκρηκτικών**

Τα συστήματα έναυσης των εκρηκτικών υλών κατηγοριοποιούνται ως εξής: στα μη ηλεκτρικά και ηλεκτρικά – ηλεκτρονικά μέσα έναυσης.

Στα μη ηλεκτρικά συστήματα έναυσης περιλαμβάνονται η εκρηκτική θρυαλλίδα, η θρυαλλίδα ασφαλείας, τα καψύλλια και το σύστημα NONEL (χαμηλής ισχύος εκρηκτική θρυαλλίδα).

Η έναυση με ηλεκτρικά μέσα είναι αρκετά διαδεδομένη τόσο σε επιφανειακές όσο και σε υπόγειες ανατινάξεις λόγω της ευκολίας σύνδεσης και ελέγχου των κυκλωμάτων. Τα συστήματα αυτά πρέπει να αποφεύγονται σε περιοχές με υγρασία και σε παράσιτα. Πρέπει κατά τον έλεγχο του κυκλώματος τα άκρα των αγωγών πρέπει να είναι βραχυκυκλωμένα για την αποφυγή άκαιρης έναυσης. Υπάρχουν οι εξής τύποι καψυλλίων: τα ηλεκτρικά καψύλλια πυρίτιδας, τα ηλεκτρικά καψύλλια διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών και τα ηλεκτρονικά καψύλλια.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν: τα ηλεκτρικά καψύλλια πυρίτιδας, τα ηλεκτρικά καψύλλια των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών και τα ηλεκτρονικά καψύλλια (Αγιουτάντης, 2009).

#### **2.4 Συστήματα επιβράδυνσης**

Στις επιφανειακές και υπόγειες ανατινάξεις είναι απαραίτητη η επιβράδυνση στην πυροδότηση των διατρημάτων για να δοθεί αρκετός χρόνος ώστε να σχηματιστούν οι απαραίτητες ελεύθερες επιφάνειες για την θραύση του πετρώματος. Τα συστήματα αυτά λοιπόν διαχωρίζονται και αυτά σε μη ηλεκτρικά συστήματα και σε ηλεκτρικά συστήματα.

Τα μη ηλεκτρικά συστήματα επιβράδυνσης κατασκευάζονται με τυποποιημένες επιβραδύνσεις (5, 9, 17, 25, 35, 45, και 65 ms). Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα στα μη ηλεκτρικά συστήματα επιβράδυνσης είναι η αποκοπή των αγωγών πριν μεταδοθεί το σήμα σε όλα τα σημεία έναυσης. Γι αυτό λοιπόν κάθε διάτρημα θα πρέπει να πυροδοτηθεί από δύο σημεία (Αγιουτάντης, 2009).

Τα ηλεκτρικά συστήματα επιβράδυνσης δημιουργούνται από ηλεκτρικά καψύλλια που μπορούν να ενσωματωθούν τυποποιημένα στοιχεία επιβράδυνσης με αποτέλεσμα την κατασκευή καψυλλίων επιβράδυνσης με διαφορετικούς χρόνους. Έτσι διακρίνονται δύο τύποι καψυλλίων: τα καψύλλια συνήθους επιβράδυνσης και τα καψύλλια επιβράδυνσης μικροχρόνου. Τα καψύλλια συνήθους επιβράδυνσης αριθμούνται συνήθως από το 0 και η επιβράδυνση μεταξύ δύο καψυλλίων είναι 0,5 s. Τα καψύλλια επιβράδυνσης μακροχρόνου αριθμούνται από το 0 ή από το 1 και η επιβράδυνση μεταξύ των καψυλλίων είναι συνήθως 25 ms για 0-8 ενώ 50 ms για 9-14 και 100 ms για 15-18 κ.λ.π. Να σημειωθεί στο σημείο αυτό επειδή τα καψύλλια διαφέρουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή θα πρέπει σε ομαδική πυροδότηση να χρησιμοποιούνται από τον ίδιο κατασκευαστή (Αγιουτάντης, 2009).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

#### 3.1 Γενικά

Η τεχνική της εξόρυξης των πετρωμάτων με χρήση εκρηκτικών υλών εξαρτάται από την φύση του πετρώματος και τον τύπο του εφαρμοζομένου μετώπου εξόρυξης. Τα μέτωπα εξόρυξης διακρίνονται σε επιφανειακά και σε υπόγεια.

Η εξόρυξη σε επιφανειακά μέτωπα είναι πολύ απλούστερη και αποδοτικότερη σε σύγκριση με την υπόγεια, διότι δεν θα υπάρχουν ορισμένες τεχνικές φάσεις, όπως η υποστήριξη, ο αερισμός και η άντληση υδάτων που επηρεάζουν αρνητικά την υπόγεια εκμετάλλευση των πετρωμάτων (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης ισχυρού διατρητικού εξοπλισμού επιφέρει μείωση του κόστους αλλά από την άλλη η επίδραση των καιρικών συνθηκών στο μέτωπο εξόρυξης αποτελεί μειονέκτημα για τις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις.

Η εξόρυξη σε υπόγεια μέτωπα παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες σε σύγκριση με τις επιφανειακές. Κατά την διάνοιξη στοών, σηράγγων, φρεάτων εμφανίζεται μια μόνο ελεύθερη επιφάνεια, η επιφάνεια του μετώπου, η οποία είναι και περιορισμένης έκτασης. Καθ' όλη την διαδικασία της όρυξης παρουσιάζονται και άλλα προβλήματα όπως η αντιστήριξη, ο αερισμός, ο φωτισμός, η άντληση υδάτων κ.τ.λ.

Η χρήση των εκρηκτικών υλών για την θραύση του πετρώματος καθώς και η επίτευξη των ανατινάξεων, σε οποιοδήποτε τύπο εξόρυξης, προϋποθέτουν γνώση του μηχανισμού με τον οποίο θραύεται το πέτρωμα υπό την επίδραση των εκρηκτικών υλών. Πρόκειται για ένα σύνθετο μηχανισμό που λαμβάνει χώρα σε δύο ξεχωριστές μεταξύ τους φάσεις, από τις οποίες η πρώτη οφείλεται στο κρουστικό κύμα που δημιουργήθηκε από την έκρηξη και η δεύτερη, που έπεται χρονικά, στη δράση των αερίων της έκρηξης (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Στο σημείο αυτό να αναφερθεί, από καθαρά ενεργειακής πλευράς, ότι η ενέργεια, που περιέχεται στην κρουστική φάση της έκρηξης μια εκρηκτικής ύλης είναι ποσοτικά πολύ μικρότερη της ενέργειας, που περιέχει η ωστική φάση, που ακολουθεί, χωρίς όμως να μπορεί να διατυπωθεί με βεβαιότητα ότι και το αποδιδόμενο έργο

είναι πραγματικά ανάλογο των διατιθέμενων σε κάθε φάση ποσών ενέργειας (Kutter et al, 1971).

### **3.2 Διάδοση και απόσβεση του κρουστικού κύματος**

Η διάδοση του κρουστικού παλμού και η γεωμετρία του εξαρτάται από την ταχύτητα έναυσης, την ταχύτητα έκρηξης, την ταχύτητα διάδοσης ελαστικών κυμάτων στο πέτρωμα, από την θέση του σημείου έναυσης και από την γεωμετρία της εκρηκτικής στήλης. Σε περίπτωση που ο λόγος του μήκους της εκρηκτικής στήλης και της διαμέτρου της είναι μικρότερος από 6:1 τότε το μέτωπο του κύματος και η γόμωση είναι σφαιρικού σχήματος. Αλλά εάν η ταχύτητα έκρηξης είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων τότε το σχήμα στο μέτωπο κύματος θα είναι κυλινδρικό. Στην πράξη, το μέτωπο αυτό έχει μια κωνική μορφή που τείνει στην μία ή στην άλλη θεώρηση ανάλογα με τις παραμέτρους έκρηξης.

Ο διαθέσιμος χώρος για την αρχική εκτόνωση των θερμών αερίων προϊόντων έκρηξης είναι σημαντικός παράγοντας για την μέγιστη πίεση του κρουστικού κύματος. Ο χώρος αυτός υπολογίζεται από τον συντελεστή γόμωσης, ο λόγος του όγκου του εκρηκτικού προς τον όγκο του διατρήματος ή σε περίπτωση φυσιγγίων, ο λόγος της διαμέτρου του εκρηκτικού προς την διάμετρο του διατρήματος. Έτσι, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής γόμωσης τόσο λιγότερος είναι ο κενός χώρος άρα και μεγαλύτερη η μέγιστη πίεση αερίων που δέχεται το πέτρωμα. Η πίεση αυτή οφείλεται στην σταδιακή εκτόνωση των αερίων που δημιουργούνται στο χώρο της έκρηξης κατά την ωστική φάση. Η ωστική φάση διαρκεί μέχρι μερικές εκατοντάδες μs και προκαλεί την θραύση των πετρωμάτων (Αγιουτάντης, 2009).

### **3.3 Ανάκλαση και διάθλαση του κρουστικού παλμού**

Όταν το κρουστικό κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετικές ελαστικές και φυσικές ιδιότητες από το αρχικό, δηλαδή ελεύθερη επιφάνεια ή διεπιφάνεια, τότε μέρος του προσπίπτοντος κύματος θα ανακλαστεί και το υπόλοιπο θα διαθλαστεί. Τα ποσοστά ανάκλασης και διάθλασης του κύματος υπολογίζονται από την σύνθετη αντίσταση το υλικού, που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Z = \rho * V$$

όπου:

$Z$  = η σύνθετη αντίσταση του υλικού,

$\rho$  = η πυκνότητα του υλικού,

$V$  = η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Το μέγεθος των τάσεων που διαθλώνται ή και ανακλώνται συναρτήσει του αρχικού τασικού παλμού δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\sigma_t = \sigma_i \frac{2}{1 + n}$$

$$\sigma_r = \sigma_i \frac{1 - n}{1 + n}$$

όπου:

$\sigma_i$  = η τάση που οφείλεται στο προσπίπτον κύμα,

$\sigma_t$  = η τάση που οφείλεται στο διαθλώμενο κύμα,

$\sigma_r$  = η τάση που οφείλεται στο ανακλώμενο κύμα,

$n$  = ο λόγος των σύνθετων αντιστάσεων του πρώτου και δεύτερου υλικού,  $n = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2}$ .

Στην συνέχεια θα αναφερθούν οι περιπτώσεις όπου η πρόσπτωση του κρουστικού κύματος γίνεται σε ελεύθερη επιφάνεια και σε ανοιχτή ρωγμή (Αγιουτάντης, 2009).

Σε περίπτωση που το κρουστικό κύμα προσπίπτει σε ελεύθερη επιφάνεια τότε το ανακλώμενο κύμα θα είναι πάντα εφελκυστικό, με αποτέλεσμα το πέτρωμα μεταξύ του σημείου έκρηξης και της ελεύθερης επιφάνειας να δέχεται θλιπτικές και εφελκυστικές ακτινικές τάσεις με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο θρυμματισμός του. Όταν η διεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος δεν είναι κάθετη στην ελεύθερη επιφάνεια, τότε η ανάκλαση γίνεται με πιο σύνθετο τρόπο και έτσι να δημιουργείται μικρότερης έντασης εφελκυστικός παλμός.

Όμως στην περίπτωση που η πρόσπτωση του κρουστικού κύματος γίνεται σε ανοιχτή ρωγμή τότε το θλιπτικό κύμα την συναντάει και το κύμα ανακλάται μέχρι το ένα τοίχωμα του ανοίγματος λόγω του προσπίπτοντος κύματος κινηθεί και φτάσει το

άλλο τοίχωμα. Έτσι όταν το αρχικό άνοιγμα κλείσει τότε μέρος του κύματος αρχίζει να διαδίδεται προς την νέα επιφάνεια (Αγιουτάντης, 2009).

### **3.4 Ωστική φάση**

Η εκλυόμενη ενέργεια κατά την χημική αντίδραση μιας εκρηκτικής ύλης κατανέμεται σε εκείνη που περιέχεται στο κρουστικό κύμα και σε εκείνη που περιέχεται στα υπό υψηλή ακόμα πίεση αέρια προϊόντα έκρηξης μέσα στο θάλαμο. Υπολογίζεται ότι μόνο το 10 – 20% της συνολικής ενέργειας περιέχεται στο κρουστικό κύμα και η υπόλοιπη συνδέεται με τα αέρια έκρηξης. Θεωρείται ότι η μέγιστη πίεση των αερίων έκρηξης για πλήρη ζεύξη της εκρηκτικής ύλης με το διάτρημα είναι της τάξης του 10% έως του 20% της πίεσης έκρηξης, που μεταδόθηκε στο τοίχωμα και σημειώνεται σε ελάχιστο χρόνο μετά την στιγμή διέλευσης του κρουστικού κύματος. Υπό την πίεση αυτή οι υφιστάμενες ρωγμές επεκτείνονται με την συγκέντρωση τάσεων στην άκρη τους και παράλληλα διευρύνονται με αποτέλεσμα οι μικρορωγμές να μετατρέπονται σε μεγαλορωγμές. Μέρος της ενέργειας καταναλώνεται για την εκτόξευση του ήδη θραυσμένου πετρώματος. Η έκταση της θραύσης εξαρτάται από την πίεση των αερίων, την ικανοποιητική επιγύμωση του διατρήματος, την ύπαρξη ασυνεχειών στο πέτρωμα και τον προσανατολισμό τους, ο οποίος μπορεί να διοχετεύει τα αέρια της έκρηξης γρήγορα στην επιφάνεια μειώνοντας την απόδοσή τους (Τσουτρέλης, 2001).

Όπως αναφέρει ο Roberts (1981) το πλάτος της θρυμματισμένης ζώνης εξαρτάται από την αντοχή σε εφελκυσμό, την ταχύτητα διάδοσης των κρουστικών κυμάτων, την πίεση και την ταχύτητα έκρηξης αλλά και το ποσοστό απορρόφησης ενέργειας από το πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2009).

### 3.5 Δημιουργία κρατήρα

Τα χαρακτηριστικά της δημιουργίας κρατήρα από εκρήξεις περιγράφονται με την βοήθεια της θεωρίας μεταφοράς ενέργειας. Ο ρυθμός απόδοσης μιας ενέργειας ενός εκρηκτικού είναι ανάλογος με την ταχύτητα έκρηξης, ενώ η ενέργεια είναι ανάλογη με την ποσότητα του εκρηκτικού. Η ενέργεια που μεταφέρεται στο πέτρωμα μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο όταν:

- αυξάνεται το βάρος του εκρηκτικού για σταθερό βάθος, ή/και
- μειώνεται το βάθος για σταθερό βάρος εκρηκτικού.

Το βάθος για το οποίο μόλις παρατηρείται αστοχία στην επιφάνεια ονομάζεται κρίσιμο βάθος και η ποσότητα εκρηκτικού αντίστοιχα κρίσιμο βάρος. Η παρακάτω σχέση συνδέει το κρίσιμο βάθος και το κρίσιμο βάρος:

$$d_c = E\sqrt[3]{W_c}$$

όπου:

$d_c$  = το κρίσιμο βάθος,

$E$  = ο συντελεστής ενέργειας παραμόρφωσης,

$W_c$  = το κρίσιμο βάρος.

Στην περίπτωση που το βάρος του εκρηκτικού αυξηθεί μέχρι την δημιουργία κρατήρα τότε παρατηρείται θραύση. Ο μέγιστος αποχωρισμός του θραυσμένου πετρώματος από το αρχικό αντιστοιχεί με το βέλτιστο βάρος εκρηκτικού, που υπολογίζεται το βέλτιστο βάθος από την επόμενη εξίσωση:

$$d_0 = \Delta E \sqrt[3]{W_0} \rightarrow d_0 = \frac{B}{d_c} E \sqrt[3]{W_0}$$

όπου

$d_0$  = το βέλτιστο βάθος,

$\Delta$  = ο λόγος του φορτίου προς το κρίσιμο βάθος,

$W_0$  = το βέλτιστο βάρος,

$E$  = ο συντελεστής ενέργειας παραμόρφωσης,

$B$  = το φορτίο,

$d_c$  = το κρίσιμο βάθος.

Όταν το βάρος ξεπεράσει την βέλτιστη τιμή τότε είναι πιθανή η εκτόξευση τεμαχίων από το πέτρωμα με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας (Αγιουτάντης, 2009).

### 3.6 Παράμετροι σχεδιασμού ανατίναξης

Για τον επιτυχή σχεδιασμό μιας ανατίναξης απαιτούνται γνώσεις για τις ιδιότητες των εκρηκτικών υλών, των μηχανισμό θραύσης και θρυμματισμού του πετρώματος, των περιορισμών των συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν και των επιπτώσεων μη βέλτιστου σχεδιασμού ανατινάξεων.

Μετά τον καθορισμό της γεωμετρίας του μετώπου οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό μιας ανατίναξης είναι:

- η επιλογή του κατάλληλου εκρηκτικού και η ποσότητα του σε κάθε διάτρημα,
- η επιλογή της διάταξης και των αντίστοιχων χρόνων επιβράδυνσης των διατρημάτων,
- η επιλογή του συστήματος έναυσης, ο τρόπος γόμωσης και πυροδότησης των υπονόμων,
- οι επιτόπου συνθήκες, όπως η μεταβολή των χαρακτηριστικών και των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος κλπ,
- η ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων στα πετρώματα και η σχέση της με την ταχύτητα έκρηξης,
- και η βασικότερη που είναι ο προσδιορισμός του φορτίου που αντιστοιχεί σε κάθε διάτρημα.

Ακόμα γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό μιας ανατίναξης είναι η διάταξη και ο τύπος των ασυνεχειών και η ύπαρξη ζωνών αδυναμίας (Αγιουτάντης, 2009).

Οι ασυνέχειες επηρεάζουν τα όρια μιας εκσκαφής και την σταθερότητα τους. Η δυναμική θραύση του πετρώματος έχει σαν αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του σε τμήματα ανάλογα με τα συστήματα των επιπέδων αδυναμίας. Όταν τα επίπεδα αδυναμίας χαρακτηρίζονται από οξείες γωνίες τότε αναμένεται υπερεκσκαφή, ενώ όταν τα επίπεδα απέχουν μεταξύ τους τότε θα είναι μέτριος ο θρυμματισμός του



πετρώματος. Στην περίπτωση όμως που η διεύθυνση των ασυνεχειών είναι παράλληλη με το μέτωπο τότε η επίδραση τους εξαρτάται από την κλίση τους.

Η ύπαρξη τυχόν ζωνών αδυναμίας θα πρέπει να είναι γνωστή γιατί αλλιώς η ενέργεια έκρηξης διαδίδεται από την οδό με την μικρότερη αντίσταση, δηλαδή μέσα από τις ζώνες αυτές με αποτέλεσμα τον ανεπαρκή θρυμματισμό του πετρώματος. Για την αποφυγή ενός τέτοιου λάθους θα πρέπει οι ζώνες αδυναμίας να προσδιορίζονται με ακρίβεια και στην συνέχεια να πληρώνονται με αδρανές υλικό (Αγιουτάντης, 2009).

Επιπρόσθετα, πετρώματα με μεγάλο ειδικό βάρος απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες εκρηκτικών ή ισχυρότερα για τον θρυμματισμό τους. Η ψαθυρότητα και η σκληρότητα ενός πετρώματος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά μια ανατίναξη. Ένα πέτρωμα χαμηλής συνεκτικότητας έχει περισσότερες πιθανότητες να επιφέρει λάθη από ότι ένα σκληρό πέτρωμα (Dick et al, 1973).

### 3.7 Εμπειρικές εξισώσεις

#### 3.7.1 Επιφανειακές ανατινάξεις

**Φορτίο B:** ή ενεργό φορτίο ορίζεται ως η απόσταση από την πλησιέστερη ελεύθερη στατική ή δυναμική επιφάνεια (Αγιουτάντης, 2009).

**Η εξίσωση του φορτίου κατά Anderson (1952) δίνεται από τη σχέση (Αγιουτάντης, 2009):**

$$B = c \cdot \sqrt{d \cdot l}$$

όπου:

B = φορτίο (ft),

d = διάμετρος διατρήματος (ft),

l = μήκος του διατρήματος (ft),

c = συντελεστής του πετρώματος.

**Η εξίσωση του Pearse (1955) δίνεται από τη σχέση:**

$$B = k \cdot 10^{-3} \cdot d \cdot \sqrt{\frac{p_d}{\sigma_t}}$$

όπου:

B = μέγιστο φορτίο (m),

k = συντελεστής πετρώματος με τιμές μεταξύ 0,7-1,0 (0,8 για τα συνήθη πετρώματα ),

d = διάμετρος διατρήματος (mm),

$p_d$  = πίεση έκρηξης ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ),

$\sigma_t$  = αντοχή σε εφελκυσμό ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

**Η εξίσωση του Κοργα δίνεται από τη σχέση (Αγιουτάντης, 2009):**

$$B = 3,15 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\rho_e}{\rho_r}}$$

Όπου:

B = το φορτίο (ft)

d = η διάμετρος του διατρήματος εκρηκτικού (in)

$\rho_e$  = η πυκνότητα του εκρηκτικού ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho_r$  = η πυκνότητα του πετρώματος ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

**Απόσταση S:** ορίζεται η απόσταση δύο διαδοχικών διατρημάτων στην ίδια σειρά (Αγιουτάντης, 2009).

**Η εξίσωση του Pearse δίνεται από τη σχέση:**

$$S = 2 \cdot B$$

Όπου

S = η απόσταση (m),

B = το φορτίο (m).

**Η εξίσωση του Ash δίνεται από τη σχέση:**

$$S = K_s \cdot B$$

Όπου:

S = η απόσταση (m),

$K_s$  = συντελεστής απόστασης,

B = το φορτίο (m).

**Η εξίσωση των Vutukari και Bhandari (1961) δίνεται από τη σχέση (Αγιουτάντης, 2009):**

$$S = 0,9 \cdot B + 0,9$$

Όπου:

S = η απόσταση μεταξύ των διατηρημάτων (m)

B = το φορτίο (m).

Σύμφωνα με τον Olofsson (1988) μετά τον υπολογισμό του φορτίου είναι δυνατόν να υπολογιστούν και οι υπόλοιποι παράμετροι σχεδιασμού μιας επιφανειακής ανατίναξης από τις επόμενες σχέσεις:

**Υποδιάτρηση J:**

$$J = 0,3 \cdot B \text{ (m)}$$

με ελάχιστη τιμή  $10 \times d$ , ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες προεξοχές του πετρώματος στο δάπεδο της βαθμίδας.

**Μήκος γόμωσης πυθμένα  $h_b$ :**

$$h_b = 1,3 \cdot B \text{ (m)}$$

**Γόμωση πυθμένα:**

$$Q_b = q_b \cdot h_b \text{ (kg)}$$

Όπου  $q_b$  η γραμμική πυκνότητα γόμωσης σε kg/m.

**Μήκος επιγόμωσης:**

$$T = B \text{ (m)}$$

Αν το  $T < B$ , τότε αυξάνεται ο κίνδυνος εκτόξευσης του εξορυσσόμενου πετρώματος σε μεγάλη απόσταση, ενώ παράλληλα μειώνονται τα μεγάλα τεμάχια. Αν όμως  $T > B$ , τότε θα υπάρξει παραγωγή μεγάλων τεμαχίων αλλά και περιορισμός στην εκτόξευση του εξορυσσόμενου πετρώματος.

### Μήκος γόμωσης στήλης:

$$h_c = l - h_b - T \text{ (m)}$$

όπου  $l$  το μήκος της διατρητικής στήλης σε m.

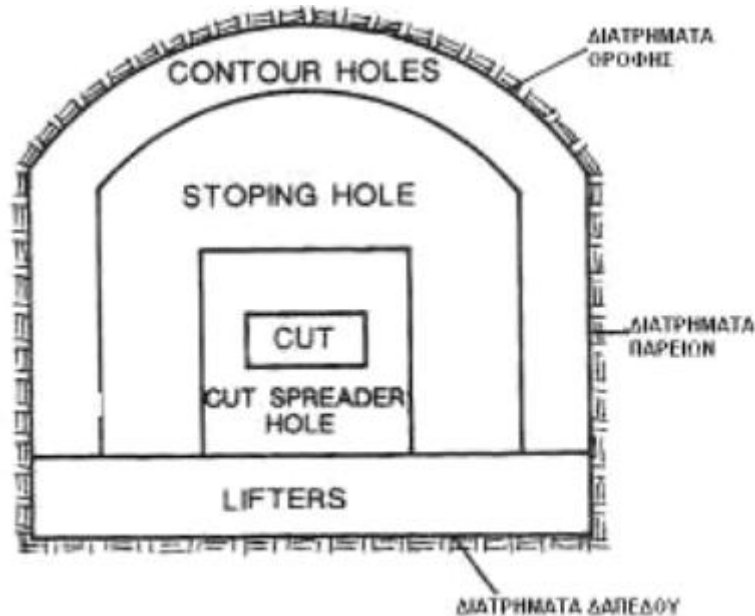
### Γόμωση στήλης:

$$Q_c = q_c \cdot h_c \text{ (kg)}$$

Όπου  $q_c$  η γραμμική πυκνότητα γόμωσης στήλης.

### **3.7.2 Υπόγειες ανατινάξεις**

Τα διατρήματα σε ένα μέτωπο σήραγγας διαιρούνται σε κατηγορίες ανάλογα με την σειρά έναυσης τους όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.



Εικόνα 3.1: Διάρθρωση των διατρημάτων του μετώπου σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την σειρά έκρηξης τους (Jimeno et al, 1995).

Στις υπόγειες ανατινάξεις η γραμμική γόμωση στήλης κατά κύριο λόγο προκύπτει από εμπειρικά διαγράμματα με γνώμονα την διάμετρο του διατρήματος  $d$ , το φορτίο  $B$  κ.α.

**Διατρήματα προεκκαφής:** Ο σκοπός τους είναι η δημιουργία κατά την ανατίναξη μιας κατάλληλης σε γεωμετρική μορφή και όγκο εκσκαφής, που θα χρησιμεύει ως ελεύθερη επιφάνεια ανάκλασης του προερχόμενου κρουστικού παλμού από τις επόμενες εκρήξεις κρουστικού κύματος. Ανάλογα με την γεωμετρική

διάταξη των διατρημάτων χωρίζονται σε παράλληλες διατάξεις προεκσκαφής και σε διατάξεις προεκσκαφής υπό γωνία.

Οι παράλληλες διατάξεις προεκσκαφής χωρίζονται σε κυλινδρικές (τυπική, σπεροειδής κ.α.) και σε διάταξη πυκνής διάτρησης. **Η τυπική κυλινδρική διάταξη** είναι η πιο διαδεδομένη σε μέτωπα μορφής σήραγγας όπου συνιστάται ένα η περισσότερα διατρήματα μεγάλης διαμέτρου στο κέντρο της προεκσκαφής και από μια σειρά κανονικής διαμέτρου γύρω από αυτά, τα οποία σχηματίζουν μέχρι τέσσερα τετράγωνα. Το φορτίο στο πρώτο τετράγωνο υπολογίζεται από τις εξής σχέσεις υπόλοιπα (Τσουτρέλης, 2001):

- $B_1 = (1,5 \sim 1,7) \cdot D_0$  (m) για ένα διάτρημα στο κέντρο της προεκσκαφής
- $B_1 = (1,5 \sim 1,7) \cdot D_0'$  (m) για περισσότερα από ένα διατρήματα στο κέντρο της προεκσκαφής με:

$$D_0' = d \cdot \sqrt{n}$$

Όπου

$D_0$  = διάμετρος του κενού διατρήματος (m),

$D_0'$  = ισοδύναμη διάμετρος (m),

$n$  = ο αριθμός των κενών διατρημάτων ίδιας διαμέτρου  $d$ .

Όσον αφορά το φορτίο των υπόλοιπων τετραγώνων και το μήκος της πλευράς των τεσσάρων τετραγώνων προκύπτουν βάσει γεωμετρίας όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός φορτίου και πλευράς τετραγώνου (Τσουτρέλης, 2001).

ΤΕΤΡΑΓΩΝΟ	ΦΟΡΤΙΟ B	ΠΛΕΥΡΑ A
ΠΡΩΤΟ	$B_1 = 1,5D_0$	$A_1 = B_1\sqrt{2}$
ΔΕΥΤΕΡΟ	$B_2 = B_1\sqrt{2}$	$A_2 = 1,5B_2\sqrt{2}$
ΤΡΙΤΟ	$B_3 = 1,5B_2\sqrt{2}$	$A_3 = 1,5B_3\sqrt{2}$
ΤΕΤΑΡΤΟ	$B_4 = 1,5B_3\sqrt{2}$	$A_4 = 1,5B_4\sqrt{2}$

Οι διατάξεις διατρημάτων προεκσκαφής υπό γωνία χωρίζεται σε σφηνοειδή ή V-διάταξη, σε πυραμιδοειδή και σε διάταξη ριπιδίου.

Στην σφηνοειδή προκύπτει (Τσουτρέλης, 2001):

$$q_c = (30 \sim 50\%) \cdot q_b$$

Όπου

$q_c$  = γραμμική πυκνότητα γόμωσης στήλης διατρημάτων (kg/m),

$q_b$  = γραμμική πυκνότητα γόμωσης πυθμένα (kg/m).

**Διατρήματα κύριας εκσκαφής:** πρόκειται για την κατηγορία διατρημάτων που απεικονίζονται στο σχήμα 3.1. Όπως αναφέρουν ο Bhandari (1997) και ο Olofsson (1988), για να δώσουν εμπειρικούς κανόνες για τον σχεδιασμό αυτών των διατρημάτων, τα διακρίνουν σε δύο κατηγορίες στα διατρήματα ανιούσα ή οριζόντιας φοράς και στα διατρήματα κατιούσας φοράς. Ο Κοργα (1995) όμως δίνει τις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό του φορτίου  $B$ , της απόστασης  $S$  μεταξύ των διατρημάτων και το μήκος επιγόμεσης  $h_s$  χωρίς να κάνει κάποιο διαχωρισμό των διατρημάτων:

$$B = 0,012 \cdot \left( \frac{2\rho_e}{\rho} + 1,5 \right) \cdot d$$

όπου:

$B$ : φορτίο (m),

$\rho_e$ : η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (g/cm<sup>3</sup>),

$\rho$ : η πυκνότητα του πετρώματος (g/cm<sup>3</sup>),

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

$$S = 1,1 \cdot B \quad \text{και} \quad h_s = 0,5 \cdot B$$

όπου:

$S$ : η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων (m),

$h_s$ : το μήκος επιγόμεσης (m).

**Διατρήματα οροφής και πλευρών:** Κατά τον σχεδιασμό των περιμετρικών διατρημάτων της οροφής και των πλευρών πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε κάθε περίπτωση επιβάλλεται ο περιορισμός της θραύσης και ρωγμάτωσης του πέρα της διατομής της σήραγγας πετρώματος. Για το σχέδιο ανατίναξης που θα χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη περίπτωση, διακρίνεται σε δύο περιπτώσεις:

- Κανονική ή συνήθης τεχνική ανατίναξης (normal blasting)
- Ήπια ή ελεγχόμενη ανατίναξη (smooth wall ή controlled blasting). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές ανατίναξης με τις οποίες επιτυγχάνεται περιορισμός της υπέρθραυσης και της σε βάθος ρωγμάτωσης

του πετρώματος. Η περίπτωση αυτή θα αναλυθεί εκτενέστερα σε παρακάτω ενότητες.

Στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί η συνήθης τεχνική, ο Bhandari (1997) προτείνει τις παρακάτω σχέσεις για τον σχεδιασμό της ανατίναξης αυτής (Τσουτρέλης, 2001):

- Η τιμή του φορτίου λαμβάνεται ίση με το 0,9 εκείνης των διατρημάτων κύριας εκσκαφής, η δε απόσταση  $S_p$  λαμβάνεται ως:

$$S_p = 1,2 \cdot B_p \text{ (m)}$$

- Το μήκος της επιγόμωσης πυθμένα περιορίζεται σε:

$$h_b = \frac{1}{6} \cdot h \text{ (m)}$$

- Το μήκος της επιγόμωσης καθορίζεται από την σχέση:

$$h_s = 0,5 \cdot B_p \text{ (m)}$$

- Η γραμμική γόμωση της στήλης καθορίζεται από την σχέση:

$$q_c = 0,40 \cdot q_b \text{ (kg/m)}$$

όπου  $q_b$  η γραμμική πυκνότητα γόμωσης πυθμένα σε kg/m.

**Διατρήματα δαπέδου:** Τα διατρήματα δαπέδου είναι αυτά που διανοίγονται στο δάπεδο της σήραγγας όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Το φορτίο  $B$  για τα διατρήματα αυτά (Persson et al 1994, Lopez Jimeno et al 1995) από την παρακάτω σχέση, η οποία χρησιμοποιείται στις επιφανειακές ανατινάξεις μορφής ορθής βαθμίδας θεωρώντας ότι το ύψος της βαθμίδας αντιστοιχεί προς την προχώρηση της σήραγγας. Παράλληλα λαμβάνεται υπόψη ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη γραμμική πυκνότητα γόμωσης, διότι από τη μια η δύναμη της βαρύτητας ενεργεί αντίθετα από την κατεύθυνση εξόρυξης και από την άλλη υπάρχει μεγαλύτερη χρονική επιβράδυνση μεταξύ των διατρημάτων.

$$B = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{q_t \cdot RWS_{ANFO}}{c \cdot f \cdot S/B}}$$

όπου:

$q_t$  : η γραμμική πυκνότητα γόμωσης των διατρημάτων,

$RWS_{ANFO}$ : κατά βάρος ισχύς της εκρηκτικής ύλης σε σχέση με το ANFO,

f: συντελεστής πάκτωσης. Λαμβάνεται συνήθως 1,45 λόγω της δυσμενούς επίδρασης της δύναμης της βαρύτητας και των χρησιμοποιούμενων χρόνων επιβράδυνσης,  
c: διορθωτικός συντελεστής υπολογιζόμενος από διάφορες σχέσεις.

Η παραπάνω σχέση ισχύει για τετραγωνική διάταξη διατρημάτων. Κατά την τοποθέτηση των διατρημάτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η γωνία εκτροπής των διατρημάτων, η οποία εξαρτάται από τον διατιθέμενο διατρητικό εξοπλισμό και το μήκος των διατρημάτων. Η απόσταση S μεταξύ των διατρημάτων του δαπέδου υπολογίζεται από την σχέση (Τσουτρέλης, 2001):

$$S = \frac{T_w + 2 \cdot l \cdot \sin\gamma}{N - 1}$$

όπου:

$T_w$ : πλάτος σήραγγας (m),

$\gamma$ : η γωνία εκτροπής,

l: μήκος διάτρησης (m),

N: ο μέγιστος αριθμός διατρημάτων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΙΣ

#### 4.1 Εισαγωγή

Κατά την εξόρυξη των πετρωμάτων με εκρηκτικές ύλες παρουσιάζονται σε τεχνικά κυρίως έργα περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται να διατηρηθεί όσο είναι δυνατόν η ανθεκτικότητα του παραμένοντος σχηματισμού ώστε να αποτελεί ένα αυτοστηριζόμενο αλλά και ασφαλές τμήμα του έργου που κατασκευάζεται (π.χ. τοιχώματα σηράγγων, πρανές οδού κ.τ.λ.). Παράλληλα με την διατήρηση της ακεραιότητας του περιβάλλοντος πετρώματος επιδιώκεται και η μείωση της υπερεκσκαφής (overbreak) και η δημιουργία ομαλών βαθμίδων. Επίσης σε περιπτώσεις εξόρυξης πετρωμάτων κοντά σε κατοικημένες περιοχές που επιδιώκεται να μειωθούν οι δονήσεις του εδάφους που προκαλούνται από τις εκρήξεις.

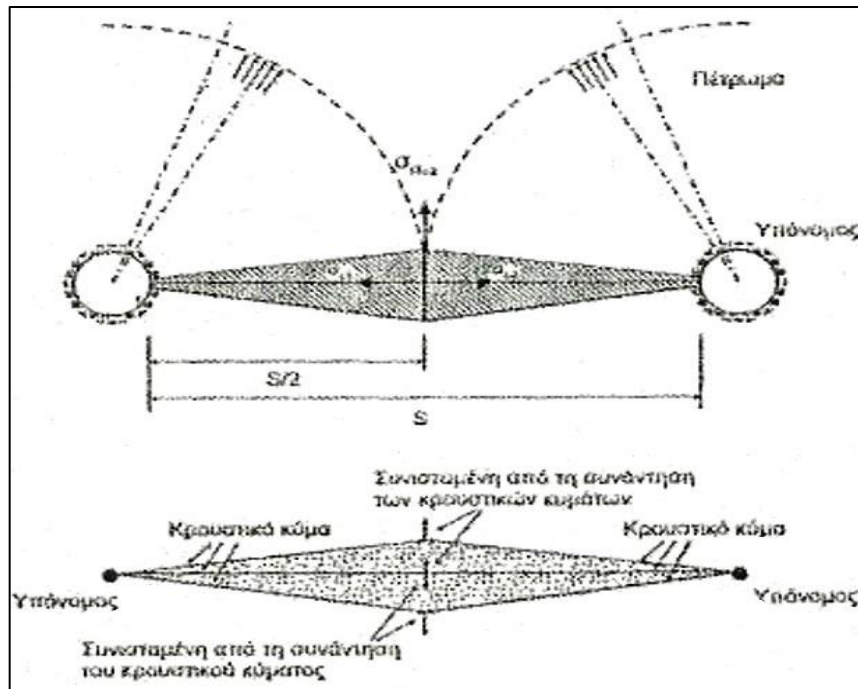
Στις παραπάνω περιπτώσεις εφαρμόζονται στα όρια του όγκου που πρόκειται να εξορυχτεί (οριογραμμή), ειδικές μέθοδοι εξόρυξης με εκρηκτικές ύλες οι οποίες ονομάζονται μέθοδοι ελεγχόμενων ανατινάξεων και έχουν σκοπό (Πολυχρονόπουλος, 2001):

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

## 4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο ελεγχόμενων ανατινάξεων

Όταν ένα διάτρημα εκραγεί δημιουργείται στο περιβάλλον πέτρωμα δημιουργείται ένα ισχυρό δυναμικό εντατικό πεδίο, το οποίο προκαλεί θρυμματισμό του πετρώματος μέχρι κονιοποίησης του σε μια μικρού πάχους ζώνη. Πέρα από αυτή τη ζώνη και μιας μικρής μεταβατικής ζώνης, σχηματίζονται μεγάλου μήκους ακτινικές ρωγμές, οι οποίες οφείλονται στη δράση της εφελκυστικής ακτινικής συνιστώσας τάσης του οδεύοντος στη μάζα του πετρώματος θλιπτικού κύματος, που προήλθε από την έκρηξη.

Για την ερμηνεία του τρόπου θραύσης του πετρώματος σε συγκεκριμένη διεύθυνση έχει προταθεί ένα μοντέλο θραύσης που εικονίζεται στο σχήμα 3.1. Σύμφωνα με αυτό, όταν δύο παράπλευρα διατρήματα και σε μικρή σχετικά απόσταση μεταξύ τους εκραγούν ταυτόχρονα, τότε στο μέσο της ευθείας γραμμής που τα συνδέει, επέρχεται συνάντηση των δύο κρουστικών κυμάτων με αποτέλεσμα κάθετα προς αυτά να δημιουργείται εφελκυστική τάση, που προκαλεί την θραύση του πετρώματος.



Εικόνα 4.1: Θραύση του πετρώματος μεταξύ δύο διατρημάτων στην περίπτωση της ελεγχόμενης ανατίναξης (Τσουτρέλης, 2001).

Κατά την ωστική φάση που ακολουθεί την κρουστική φάση της έκρηξης, τα μόρια των προϊόντων της αντίδρασης, που διατηρούν ακόμα σημαντική κινητική ενέργεια εισχωρούν στην ρωγμή που δημιουργήθηκε μεταξύ των διατρημάτων, διευρύνουν και επεκτείνουν την ρωγμή δημιουργώντας έτσι ένα επίπεδο κοπής μεταξύ των υπονόμων.

Από όλα αυτά προκύπτει η ανάγκη ότι τα διατρήματα της ελεγχόμενης ανατίναξης διαθέτουν ικανοποιητικό μήκος επιγόμωσης για να αποφευχθεί η γρήγορη διαφυγή των αερίων έκρηξης στην ατμόσφαιρα.

Ο σχηματισμός του επιπέδου της πρότμησης οφείλεται σε θραύση του πετρώματος σε εφελκυσμό έτσι ο Brent (1995) δίνει μια στατική λύση βασιζόμενος στην θεωρία παχέων κυλίνδρων. Από αυτή τη θεωρία προκύπτει ότι η εφελκυστική τάση  $\sigma_t$  που δημιουργείται σε απόσταση  $r$  από το κέντρο κυλίνδρου ακτίνας  $r_h$  και σε πίεση  $p$  δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_t = -p \cdot (r_h/r)^2$$

Η ολική εφελκυστική δύναμη  $F$ , που αναπτύσσεται κατά μήκος της απόστασης  $S$  μεταξύ των δύο διατρημάτων ανά μονάδα μήκους του διατρήματος θα είναι:

$$Fr = - \int_r^S p \cdot (r_h/r)^2 dr = p \cdot r_h \cdot (1 - \frac{r_h}{S})$$

Επειδή όμως η ίδια δύναμη αναπτύσσεται και από το άλλο διάτρημα η συνολική δύναμη που ασκείται κατά μήκος της απόστασης μεταξύ των δύο διατρημάτων  $F_t$  θα είναι:

$$F_t = 2 \cdot p \cdot r_h \cdot (1 - \frac{r_h}{S})$$

Ο όρος  $r_h/S$  στην πράξη κυμαίνεται μεταξύ 1/25 και 1/30 μπορεί να παραληφθεί οπότε προκύπτει:

$$F_t = 2 \cdot p \cdot r_h$$

Η δύναμη του πετρώματος, που ανθίσταται στην θραύση του ανά μονάδα μήκους διατρήματος θα είναι:

$$Fr = \sigma_t \cdot (S - 2 \cdot r_h)$$

όπου  $\sigma_t$  είναι η αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό.

Εξισώνοντας τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει ότι για να επιτευχθεί θραύση του πετρώματος κατά την επιθυμητή διεύθυνση, πρέπει:

$$S = 2 \cdot r_h \cdot (p + \sigma_t) / \sigma_t$$

Η εξίσωση αυτή παρέχει την βασική παράμετρο για τον σχεδιασμό μιας ελεγχόμενης ανατίναξης (πρότμησης και λείων τοιχωμάτων). Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της σχέσης και για ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι η πίεση  $p$  να μην είναι μεγαλύτερη της αντοχής του πετρώματος σε θλίψη, ώστε να περιορισθεί ο σχηματισμός ζώνης έντονης ρωγμάτωσης γύρω από το πέτρωμα (Τσουτρέλης, 2001).

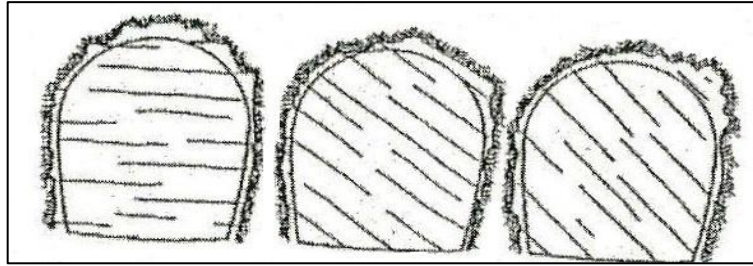
### **4.3 Παράμετροι ελεγχόμενων ανατινάξεων**

Διάφορες παράμετροι, που αναφέρονται στις ιδιότητες του πετρώματος, στην ακρίβεια διατήρησης των διατρημάτων, στις ιδιότητες της εκρηκτικής ύλης και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατρημάτων επηρεάζουν τα αποτελέσματα μιας ελεγχόμενης ανατίναξης. Η επίδραση των παραμέτρων αυτών αναλύεται στην συνέχεια.

#### **4.3.1 Ιδιότητες του πετρώματος**

Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος παίζουν μεγάλο ρόλο στην επιτυχή διεκπεραίωση μιας ελεγχόμενης ανατίναξης. Ομοιογενή πετρώματα με υψηλές μηχανικές ιδιότητες είναι ιδανικά για την εφαρμογή αυτής της τεχνικής εξόρυξης, ενώ τα ανομοιογενή και ρωγματωμένα είναι ακατάλληλα γιατί δεν μπορεί να ελεγχθεί σε αυτά η διάδοση των ρωγμών γύρω από το διάτρημα κατά την έκρηξη. Οι κλειστές ρωγμές ή οι γεμάτες με υλικό προκαλούν λιγότερη υπέρθραυση απ' ό,τι οι ανοικτές ρωγμές.

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ή της διάστρωσης του πετρώματος επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της ανατίναξης κατά την διαμόρφωση της περιμέτρου εξόρυξης μίας σήραγγας, όπως δείχνει το σχήμα 4.2 ή μίας βαθμίδας, όπως δείχνει το σχήμα 4.3.



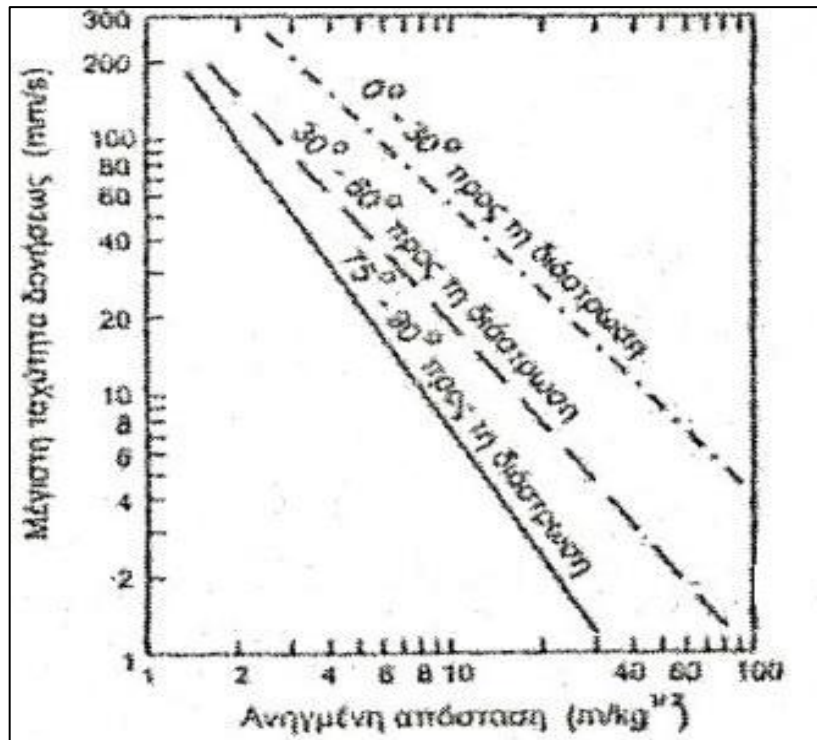
Σχήμα 4.2: Επίδραση της διεύθυνσης των ασυνεχειών στην υπέρθραυση του πετρώματος γύρω από μια σήραγγα (Τσουτρέλης, 2001).

Όταν το επίπεδο των ασυνεχειών είναι παράλληλο προς το πρανές, τότε επιτυγχάνεται καλύτερο αποτέλεσμα με την διαμόρφωση ενός λείου και καθαρού πρανούς. Καθώς διαφοροποιείται η κλίση του επιπέδου των ασυνεχειών και από ομόρροπη γίνεται αντίρροπη, το πρανές γίνεται τραχύτερο και πιο επικίνδυνο για πτώση τεμαχίων του πετρώματος.



Σχήμα 4.3: Επίδραση του προσανατολισμού της διάστρωσης του πετρώματος στη διαμόρφωση του τελικού πρανούς εκσκαφής (Τσουτρέλης, 2001).

Η γωνία επίσης, που σχηματίζει το ίχνος του πρανούς με το οριζόντιο επίπεδο με τη διεύθυνση της διάστρωσης των ασυνεχειών, επηρεάζει το μέγεθος της μέγιστης ταχύτητας δόνησης των σωματιδίων του πετρώματος, που θα δεχθεί το πρανές υπό διάφορες ανηγμένες αποστάσεις, όπως δείχνει το σχήμα 4.4 (Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 4.4: Επίδραση της γωνίας, που σχηματίζει το ίχνος του πρηνούς με το οριζόντιο επίπεδο με την διεύθυνση διάστρωσης του πετρώματος στη μετάδοση της μέγιστης ταχύτητας δονήσεων των σωματιδίων (Τσουτρέλης, 2001).

#### 4.3.2 Ακρίβεια διάτρησης των διατρημάτων

Η ακριβής διάτρηση των διατρημάτων επηρεάζει πάρα πολύ το αποτέλεσμα της ελεγχόμενης ανατίναξης. Τα διατρήματα πρέπει να ορυχθούν στην ακριβώς προβλεπόμενη θέση τους και να διατηρηθούν παράλληλα μεταξύ τους στην προκαθορισμένη απόσταση σε όλο τους το μήκος. Οι κύριες αιτίες, που προκαλούν παρέκκλιση, παρατίθενται στη συνέχεια μαζί με τα μέτρα αντιμετώπισης τους (Τσουτρέλης, 2001):

1. Εσφαλμένη σημείωση της θέσης έναρξης της διάτρησης. Η εργασία αυτή πρέπει να γίνεται από έμπειρο εργοδηγό και όχι από τον χειριστή του διατρητικού μηχανήματος.
2. Εσφαλμένη ευθυγράμμιση του διατρητικού βραχίονα στο οποίο εδράζει η σφύρα προς την διεύθυνση διάτρησης, όταν χρησιμοποιούνται κεκλιμένα διατρήματα. Απαιτείται ο έλεγχος με την χρήση καταλλήλου οργάνου.

3. Δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες, λόγω της παρουσίας στο πέτρωμα σχιστότητας, ρωγματώσεων και εξαλλοιώσεων, οι οποίες τείνουν να εκτρέψουν το διατρητικό στέλεχος από την ορθή διεύθυνση διάτρησης. Η εμπειρία του χειριστή περιορίζει σημαντικά την παρέκκλιση του διατρήματος, που προκαλείται από τους λόγους αυτούς.

Ως προς την τεχνική διάτρησης σημειώνεται ότι, η διάμετρος διάτρησης, η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού άκρου, η ταχύτητα περιστροφής του διατρητικού στελέχους, το είδος αυτού και η χρήση οδηγών επηρεάζουν την παρέκκλιση του διατρήματος.

### 4.3.3 Πίεση έκρηξης

Για να περιοριστεί η γύρω από το διάτρημα θραύση του πετρώματος πρέπει να μειωθεί η επαγόμενη στο τοίχωμα του διατρήματος πίεση από την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης έχοντας υπόψη ότι η πίεση αυτή  $p_b$  είναι της τάξης του 50% της πίεσης έκρηξης με ικανοποιητική προσέγγιση από την εξίσωση:

$$p_d = \frac{\rho_e \cdot D^2}{4}$$

όπου:

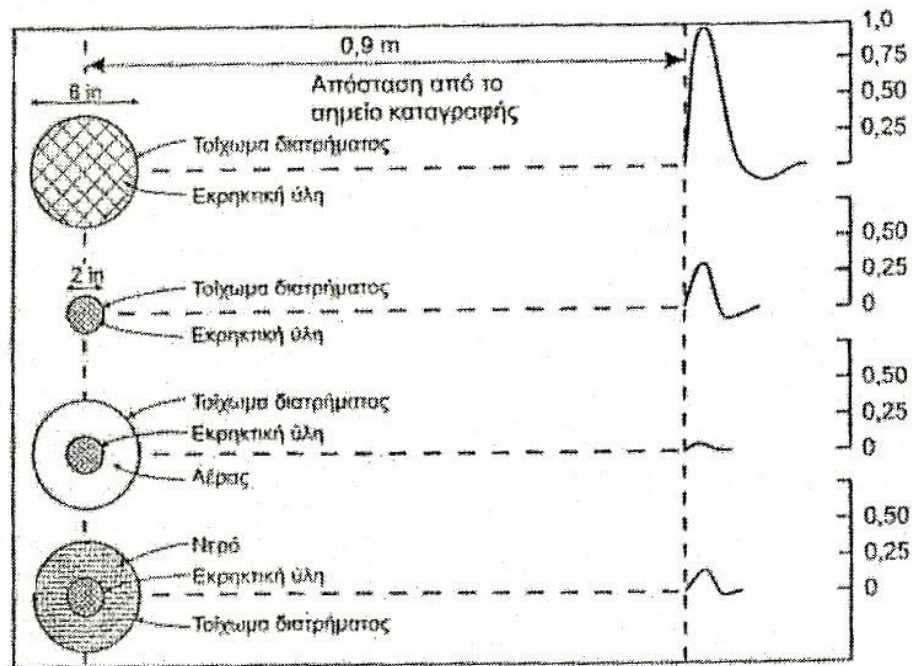
$p_d$  = πίεση έκρηξης (kPa),

$\rho_e$  = πυκνότητα γόμωσης της εκρηκτικής ύλης ( $\text{g/cm}^3$ ),

$D$  = ταχύτητα έκρηξης (m/s).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μείωσης της πίεσης (ή τάσης), που αναπτύσσεται στο τοίχωμα, ώστε να βρεθεί σε συμφωνία με την αντοχή του πετρώματος για να αποφευχθεί η υπέρθραυση του πετρώματος. Μερικοί τρόποι είναι η μείωση της πυκνότητας γόμωσης και της ισχύος αραιώνοντας την εκρηκτική ύλη με αδρανή υλικά όπου μειώνεται και η ταχύτητα έκρηξης, η χρήση διατρημάτων μικρότερης διαμέτρου, από εκείνη στην οποία η εκρηκτική ύλη επιτυγχάνει τη μέγιστη ταχύτητα έκρηξης και επίσης με την παρεμβολή μεταξύ της εκρηκτικής ύλης και του τοιχώματος του διατρήματος διάκενου αέρα, το οποίο ενεργεί ως μέσο μείωσης της πίεσης έκρηξης. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της χρήσης αποζευγμένης γόμωσης με

διάκενο αέρα ή με νερό στην πίεση, που αναπτύσσεται στο τοίχωμα του διατρήματος σε σύγκριση με την κανονική ανατίναξη (Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 4.5: Σύγκριση μεταξύ κανονικής και αποζευγμένης γόμωσης με διάκενο αέρα και κενό (Τσουτρέλης, 2001).

#### 4.3.4 Επιλογή εκρηκτικής ύλης

Εκτός από τις ειδικές εκρηκτικές ύλες, που κατασκευάζονται για το σκοπό αυτό, οι περισσότερες από τις συνήθεις εκρηκτικές ύλες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην ελεγχόμενη ανατίναξη αρκεί, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου, να γίνει κατάλληλη προσαρμογή στην τεχνική ανατίναξης που θα επιλεγεί προς χρήση.

Οι εκρηκτικές ύλες που έχουν ως βάση την νιτρογλυκερίνη (NG) και είναι συσκευασμένες με μορφή φυσιγγίων μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε μορφή αποζευγμένης συνεχής ή διακεκομμένης γόμωσης με έναυση με θρυαλλίδα. Χρησιμοποιούνται λόγοι ζεύξης  $d_e/d$  ( $d_e$ : η διάμετρος του φυσιγγίου και  $d$ : διάμετρος διατρήματος) μεταξύ 20-70% σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και το είδος της διαθέσιμης εκρηκτικής ύλης (Τσουτρέλης, 2001).

Οι ειδικές εκρηκτικές ύλες είναι χαμηλής ισχύς, οι οποίες διατίθενται στο εμπόριο με διάφορα ονόματα όπως Gurit, Nadit, Detagel, Detal Continuous Presplit κ.τ.λ., με διαμέτρους φυσιγγίων όπως 11, 17, 19, 22 μέχρι και 76 mm (3 in) και σε

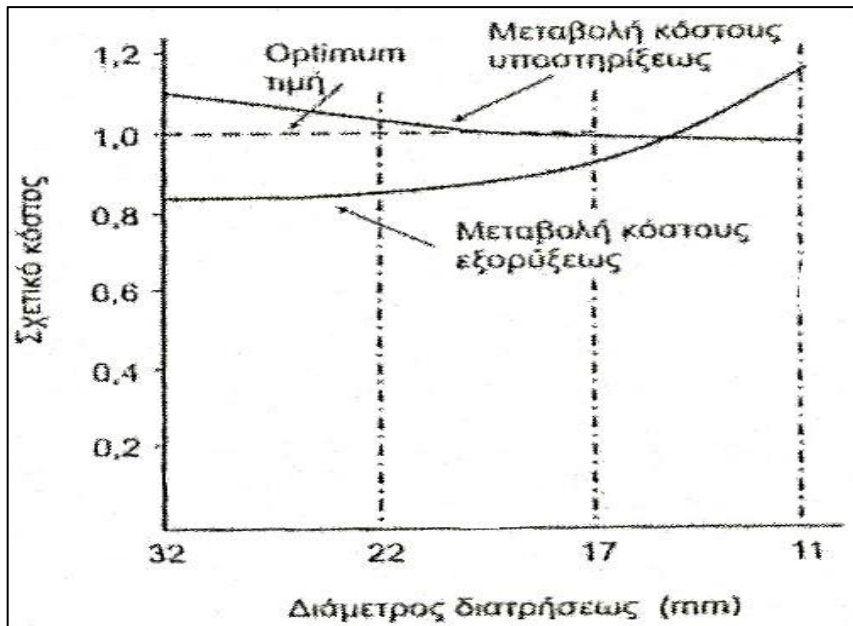


διάφορα μήκη. Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης κυμαίνεται από 110 ως 300 g/m. Η τοποθέτηση τους στο κέντρο γίνεται με την βοήθεια πλαστικών πτερυγίων ή δακτυλίων. Οι ειδικές αυτές εκρηκτικές ύλες χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε υπόγεια έργα, που έχουν διαμέτρους διατρημάτων 32 ως 45 mm.

Σε επιφανειακές ανατινάξεις, που το μήκος και η διάμετρος των διατρημάτων είναι μεγαλύτερο, εκτός από τις ειδικές αυτές εκρηκτικές ύλες σε διαμέτρους μεγαλύτερες των 22 mm χρησιμοποιείται κατάλληλης διαμέτρου πλαστικός σωλήνας, εντός του οποίου τοποθετείται χύμα ή σε φυσίγγια η εκρηκτική ύλη, η οποία εναύεται συνήθως με εκρηκτική θρυαλλίδα. Για μεγαλύτερης διαμέτρου γίνεται συχνά χρήση χαμηλής πυκνότητας εκρηκτικής ύλης, που επιτυγχάνεται με αραίωση π.χ. του ANFO με αδρανές υλικό (κόκκοι διογκωμένης πολυστερίνης διαστάσεων 0,5 ως 3 mm και πυκνότητας 0,03 kg/dm<sup>3</sup>) με σκοπό να μειωθεί η ισχύς της. Με αυτό το τρόπο προκύπτει επιτυγχάνεται συγκρίσιμο αποτέλεσμα με εκείνο της χρήσης πλαστικού σωλήνα αλλά με τρόπο πολύ ταχύτερο και χαμηλότερου κόστους (Τσουτρέλης 2001).

#### **4.3.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατρημάτων**

**Διάμετρος διατρήματος:** Στις υπόγειες ανατινάξεις οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες διαμέτροι δεν υπερβαίνουν συνήθως στα 75 mm σε τεχνικά έργα, ενώ σε υπαίθριες εκμεταλλεύσεις φθάνουν για οικονομικούς λόγους μέχρι 310 mm. Στα υπόγεια έργα κυμαίνονται μεταξύ 32 και 65 mm για την διάνοιξη στοών και σηράγγων, μεταξύ 50 και 65 mm για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων και φθάνουν μέχρι 165 mm σε ειδικές μεθόδους υπόγειας εκμετάλλευσης. Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι για τις υπόγειες ανατινάξεις η αύξηση της διαμέτρου των διατρημάτων συνεπάγεται πάντοτε αύξηση του κόστους υποστήριξης. Κατά συνέπεια σε κάθε περίπτωση πρέπει να αναζητείται η σχέση εκείνη μεταξύ διαμέτρου διατρήματος και ποσότητας γόμωσης, που θα δίνει την άριστη τιμή του συνδυασμού κόστος εξόρυξης και κόστος υποστήριξης. Η περίπτωση αυτή δείχνεται στο σχήμα 4.6 (Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 4.6: Επίδραση της διαμέτρου του διατρήματος στο κόστος εξορύξεως και υποστήριξης στοάς (Τσουτρέλης, 2001).

**Απόσταση μεταξύ των διατρημάτων (S):** Η απόσταση των διατρημάτων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και αυξάνει με την διάμετρο του διατρήματος d.

Κατά τους Calder και Jackson (1981) η κοπή του πετρώματος μεταξύ δύο διατρημάτων διέπεται από την εμπειρική σχέση:

$$p_b \cdot d \geq (S - d) \cdot \sigma_t$$

όπου:

$p_b$  : η πίεση έκρηξης στο τοίχωμα του διατρήματος για την περίπτωση αποζευγμένης γόμωσης,

d: διάμετρος διατρήματος,

S: η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων,

$\sigma_t$ : η δυναμική αντοχή σε εφελκυσμό.

Επιλύοντας την σχέση προς S προκύπτει:

$$S \leq \frac{d \cdot (p_b + \sigma_t)}{\sigma_t}$$

Η πίεση τοιχώματος  $p_b$  στην παραπάνω σχέση η οποία για επιτυχή κοπή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της δυναμικής αντοχής του πετρώματος σε εφελκυσμό και

μικρότερη εκείνης της θλίψης, ώστε να αναπτυχθούν μόνο εφελκυστικές ρωγμές χωρίς θραύση γύρω από το διάτρημα, υπολογίζεται από την σχέση (Hustrulid, 1999):

$$p_b = p_d \cdot (d_e/d)^{2\gamma}$$

με τιμή  $\gamma=1,2$

$p_b$  : η πίεση έκρηξης στο τοίχωμα του διατρήματος για την περίπτωση αποζευγμένης γόμωσης,

$p_d$ : πίεση έκρηξης,

$d_e$ : διάμετρος γόμωσης,

$d$ : διάμετρος διατρήματος,

$\gamma$ : συντελεστής με τιμή 1,2.

Από πλευράς βάθους κοπής του πετρώματος υφίσταται περιορισμός, που προκύπτει από την ανάγκη παραλληλίας μεταξύ των διατρημάτων της ελεγχόμενης ανατίναξης. Ελάχιστη παρέκκλιση παρέχουν κατά κανόνα τα διατρήματα, που διανοίγονται με ενδοδιατρηματική κρουστική σφύρα. Για την περίπτωση μικρής διαμέτρου διατρημάτων μέχρι 65 mm το όριο βάθους διάτρησης είναι 15m για ικανοποιητικά αποτελέσματα.

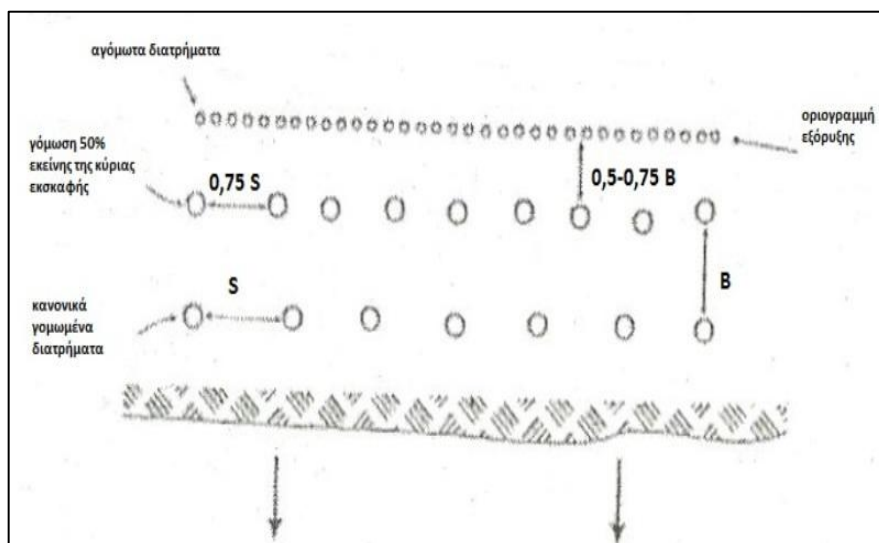
Τα αποτελέσματα από μια ελεγχόμενη ανατίναξη μπορεί να βελτιωθούν με τη χρήση αγόμετων διατρημάτων ιδιαίτερα σε ρωγματωμένα πετρώματα. Σε συμπαγή πετρώματα όμως προτιμάται η συνεχή γόμωση όλων των διατρημάτων στο επίπεδο κοπής (Τσουτρέλης,2001).

Στις επόμενες ενότητες θα γίνει μια περιγραφή των μεθόδων και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν εμπειρικές καταγραφές τιμών σε πίνακες και διαγράμματα για την σύγκριση των δεδομένων και των μεθόδων μεταξύ τους.

#### 4.4 Περιγραφή των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης

##### 4.4.1 Μέθοδος πυκνής διάτρησης/διάτρηση γραμμής (line drilling)

Η αρχή της μεθόδου της οποίας λεπτομέρειες φαίνονται στο σχήμα 4.7 και σχήμα 4.8 βασίζεται στην πυκνή διάτρηση μιας σειράς διατρημάτων με μικρή διάμετρο, τα οποία ορύσσονται με μεγάλη ακρίβεια κατά μήκος της οριογραμμής εξόρυξης. Τα διατρήματα αυτά που παραμένουν αγόμωτα και δεν πυροδοτούνται έχουν ως σκοπό τον σχηματισμό ενός επιπέδου με μικρότερη αντίσταση μεταξύ της προς εξόρυξη επιφάνειας και του πετρώματος που παραμένει (Τσουτρέλης, 2001).



Σχήμα 4.7: Διάταξη διατρημάτων στην μέθοδο πυκνής διάτρησης (line drilling) (Τσουτρέλης, 2001).

Με την έκρηξη των γομωμένων διατρημάτων, η πυκνή σειρά των διατρημάτων, στην οριογραμμή ενεργεί ως ασυνεχής διαχωριστική επιφάνεια πάνω στην οποία ανακλάται το κρουστικό κύμα της έκρηξης και εκτονώνεται κατά την επιθυμητή διεύθυνση, χωρίς να μεταδίδεται στο πέτρωμα που υπάρχει πίσω από την οριογραμμή της εξόρυξης. Πολλές φορές, για να επιτευχθεί καλύτερη διαχωριστική επιφάνεια μερικά από τα διατρήματα της διάτρησης γραμμής (συνήθως ανά 2 ως 4 ή εναλλάξ ή και σπανιότερα όλα) γομώνονται χωρίς διακοπή με ασθενή εκρηκτική ύλη και πυροδοτούνται με ακαριαία θρυαλλίδα 25 msec τουλάχιστον πριν από την έκρηξη των γομωμένων διατρημάτων της κύριας εκσκαφής που βρίσκονται κοντά σε αυτά (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της πυκνής διάτρησης είναι συνήθως:

$$S = k \cdot d$$

όπου:

S: η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων,

k: αδιάστατο μέγεθος με τιμές από 2 έως 4 (Πολυχρονόπουλος 2001, Τσουτρέλης 2001, Olofsson 1990, Konya et al 1995, Dick et al 1983).

d: η διάμετρος των διατρημάτων, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 76mm (3 in) (Πολυχρονόπουλος 2001, Τσουτρέλης 2001, Olofsson 1990). Ο Bhandari (1997) και ο Dick et al (1983) όμως αναφέρουν στην βιβλιογραφία τους ότι η διάμετρος των διατρημάτων D θα πρέπει να είναι 50-75 mm. Επίσης ο Jimeno et al. (1995) δίνει περιορισμό διαμέτρου 35-75 mm.

Τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής, τα οποία βρίσκονται κοντά στην σειρά των διατρημάτων της πυκνής διάτρησης απέχουν από αυτά μια απόσταση ίση με (Olofsson 1990, Bhandari 1997):

$$S_1 = (50\sim 75\%) \cdot S$$

όπου:

S<sub>1</sub>: η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων κοντά στην σειρά των διατρημάτων της μεθόδου πυκνής διάτρησης,

S: η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου τα διατρήματα της διάτρησης γραμμής μπορεί να είναι κατακόρυφα ή οριζόντια, αλλά και στις δύο περιπτώσεις δεν πρέπει να υπερβαίνει τα μερικά μέτρα.

Για διατρήματα διαμέτρου 50 ως 76 mm, το βάθος αυτών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 10 m, διότι το αποτέλεσμα της έκρηξης δεν θα είναι ικανοποιητικό. Αυτό συμβαίνει επειδή βασική προϋπόθεση της επιτυχίας αυτής της μεθόδου είναι να αποφύγουμε τις αποκλίσεις των διατρημάτων, οι οποίες προκαλούν δυσχέρειες στην εξόρυξη και ειδικότερα στην βάση της βαθμίδας (Πολυχρονόπουλος, 1979). Επίσης έχει δοθεί και ο περιορισμός των 12 m για το βάθος των διατρημάτων (Mohd, 2012).

Σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της ανατίναξης με την μέθοδο αυτή έχει η απόκλιση των διατρημάτων, γι αυτό δεν θα πρέπει να είναι και περισσότερη από 150 mm. Οι ανακρίβειες στην διάτρηση συνήθως περιορίζουν το βάθος στο οποίο θα διατρηθούν (Bhandari, 1997).

Το μέγιστο φορτίο της στην σειρά που βρίσκεται κοντά στην σειρά της πυκνής διάτρησης είναι περίπου (Jimeno, 1995):

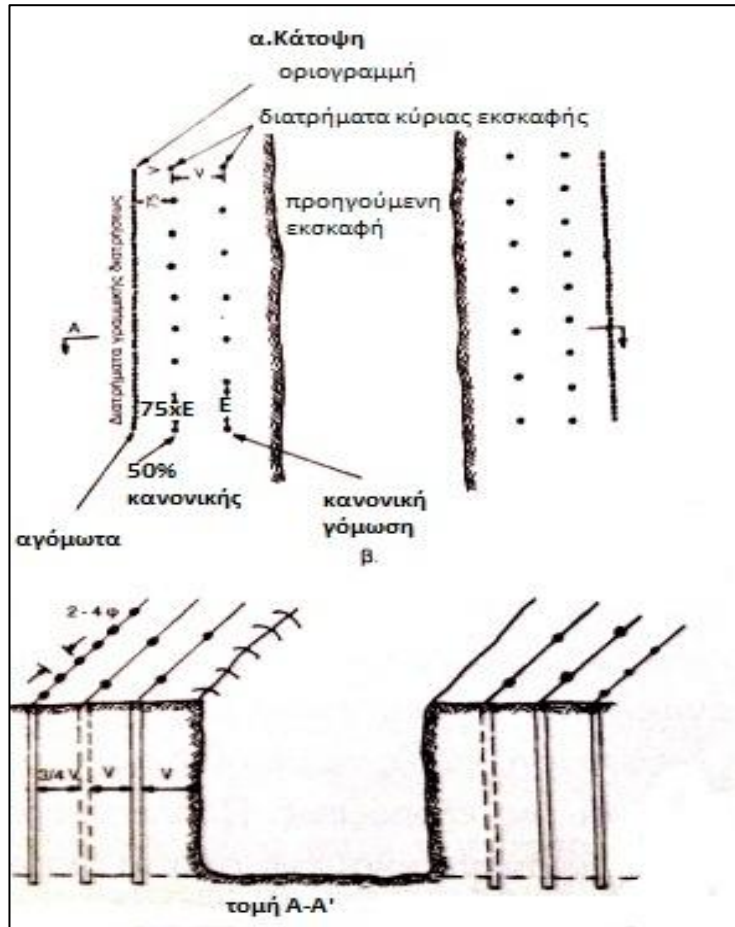
$$B_{\max} = (50\sim 75\%) \cdot B$$

Όπου B το φορτίο της κανονικής διάτρησης.

Σχετικά με την γόμωση, όλα τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής χωρίς την σειρά που βρίσκεται πιο κοντά στην οριογραμμή γομώνονται κανονικά. Στην σειρά των διατρημάτων που βρίσκεται κοντά στην οριογραμμή, η γόμωση φτάνει το 50% ή και λιγότερο από την κανονική. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται εκρηκτική ύλη με ειδικά φυσιγγία μικρής διαμέτρου όπως για παράδειγμα Emulite 150 ή Dynamex M 25x200 (Olofsson, 1990).

Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται σχέση διαμέτρου:  $d < \emptyset < 1$  όπου d η διάμετρος του φυσιγγίου και  $\emptyset$  η διάμετρος του διατρήματος. Πολλές φορές γίνεται χρήση συνεχής γόμωσης για σχέση  $\frac{d}{\emptyset} = 1$  αλλά τότε η εκρηκτική ύλη που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι πιο ασθενής από την υπόλοιπη που χρησιμοποιείται για την κύρια εκσκαφή, δηλαδή  $V_1 < V_2$ , όπου  $V_1$  η ταχύτητα έκρηξης της ασθενούς εκρηκτικής ύλης και  $V_2$  η αντίστοιχη της ισχυρότερης (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Επίσης μπορεί να γίνει χρήση ειδικών εκρηκτικής ύλης μικρότερης διαμέτρου π.χ. 17 mm Gurit της Nitro Nobel όπου επιτυγχάνονται τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο (Τσουτρέλης, 1971).



Εικόνα 4.8: Πρότυπο μεθόδου γραμμικής διάτρησης (Πολυχρονόπουλος, 2001).

### Πλεονεκτήματα:

- Η μέθοδος είναι απλή (Olofsson 1990, Khosrou 1996).
- Απαιτεί μικρή ποσότητα εκρηκτικών οπότε παρατηρείται και μείωση των δονήσεων (Olofsson 1990, Khosrou 1996).
- Παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πετρώματα ομοιογενή, συνεκτικά και σε αυτά που έχουν ελάχιστο αριθμό στρώσεων και κατατμήσεων (Τσουτρέλης 1971, Πολυχρονόπουλος 2001).
- Σε σύγκριση με τις άλλες δύο (μέθοδο πρότμησης και μέθοδο ελαφρού φορτίου) παρέχει πιο ομαλά πρηνή με πιο λίγες ρωγμές (Πολυχρονόπουλος, 2001)
- Εφαρμόζεται ακόμα και σε περιπτώσεις που μικρό φορτίο μπορεί να προκαλέσει καταστροφή πέρα από το επιθυμητό όριο της εκσκαφής (Olofsson, 1990).

### **Μειονεκτήματα:**

- Απαιτεί μικρότερη διάμετρο διατρήματος σε σχέση με τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής (Olofsson 1990, Khosrou 1996).
- Χρονοβόρα και αυξημένο κόστος διάτρησης (Olofsson 1990, Khosrou 1996).
- Δυσκολία στην διατήρηση της ευθυγράμμισης του διατρήματος λόγω της μικρής απόστασης  $S$  μεταξύ των διατρημάτων (Khosrou 1996, Olofsson 1990).
- Τα αποτελέσματα δεν είναι και τόσο ικανοποιητικά σε ανομοιογενή πετρώματα σε σύγκριση με τα ομοιογενή (Olofsson, 1990).

#### **4.4.2 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting/ pre-shearing)**

Διατρύεται στα όρια της επιφάνειας που πρόκειται να εξορυχτεί μια σειρά διατρημάτων τα λεγόμενα διατρήματα πρότμησης. Η μέθοδος πρότμησης διαφέρει από την προηγούμενη μέθοδο διότι τα διατρήματα πρότμησης πυροδοτούνται πριν από τα γειτονικά διατρήματα της κύριας εκσκαφής. Η θεωρία της μεθόδου πρότμησης βασίζεται στο ότι, όταν δύο γομώσεις γειτονικών διατρημάτων πυροδοτούνται ταυτόχρονα η σύγκρουση των κρουστικών κυμάτων μεταξύ των θέσεων των διατρημάτων και η αναπτυσσόμενη πίεση σχηματίζουν μια ζώνη πρότμησης μεταξύ των διατρημάτων. Η σχηματιζόμενη ζώνη πρότμησης εμποδίζει το κρουστικό κύμα που θα παραχθεί από την κύρια έκρηξη να μεταδοθεί στην επιφάνεια του πετρώματος που παραμένει και να προκαλέσει ρωγμές. Αν τα διατρήματα γομωθούν υπερβολικά τότε η ζώνη αυτή μπορεί να επεκταθεί και πίσω από την ζώνη πίεσης που φαίνεται στο σχήμα 3.1 που βρίσκεται σε προηγούμενη ενότητα.

Η απόσταση και η γόμωση των διατρημάτων πρότμησης εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος. Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος επιδρούν σημαντικά στο αποτέλεσμα της μεθόδου πρότμησης από ότι σε άλλες μεθόδους. Σε χαλαρά πετρώματα, το αποτέλεσμα της έκρηξης βελτιώνεται με την παρεμβολή ανακουφιστικών (καθοδηγητικών) διατρημάτων μεταξύ των γομωμένων. Τα διατρήματα αυτά παραμένουν αγόμωτα και διευκολύνουν την εκτόνωση των αερίων της έκρηξης προς την επιθυμητή διεύθυνση. Σε πολύ σκληρά πετρώματα τα



ανακουφιστικά διατρήματα, δίδουν καλύτερα αποτελέσματα από ότι θα έδινε η αύξηση της γόμωσης ανά διάτρημα (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Η διάμετρος των διατρημάτων πρότμησης είναι 30-64 mm και στις περισσότερες περιπτώσεις γομώνονται όλα (Olofsson, 1990).

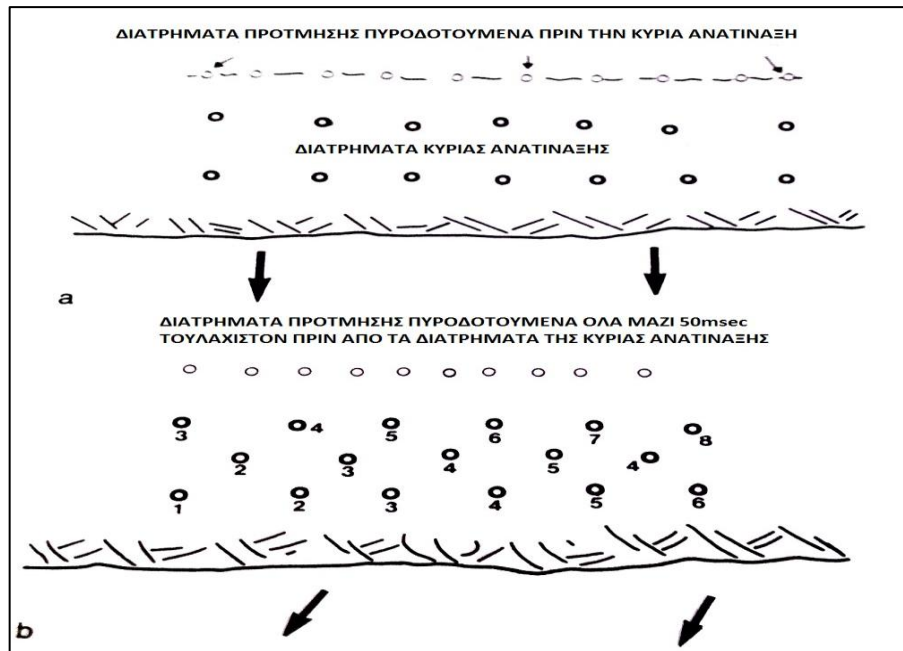
Ο Πολυχρονόπουλος (2001) αναφέρει ότι η διάμετρος  $d$  των διατρημάτων πρότμησης είναι της τάξεως των 51 έως 125 mm και σε απόσταση  $S$  μεταξύ τους 0,45 ως 0,60 m, δηλαδή σε απόσταση μεγαλύτερη από την προηγούμενη μέθοδο. Γομώνονται με ασθενή αποζευγμένη γόμωση 300-700 g/m, ανάλογα βέβαια με την φύση τους προς εξόρυξη πετρώματος και την μεταξύ των διατρημάτων απόσταση.

Ο Τσουτρέλης (1971) δίνει λίγο διαφοροποιημένες τιμές σε σχέση με τα παραπάνω, δηλαδή, διάμετρος  $d$  των διατρημάτων πρότμησης κυμαίνεται από 51 ως 127 mm (2-5 in) και σε απόσταση  $S$  μεταξύ τους 0,46 έως 0,61 m (18-24 in). Γομώνονται όλα ασθενώς με πυκνότητα γόμωσης 300-750 g/m ανάλογα με την φύση του πετρώματος και της σχέσης διαμέτρων :  $d/\emptyset < 1$  όπου  $d$  η διάμετρος του φυσιγγίου και  $\emptyset$  η διάμετρος του διατρήματος.

Επίσης έχει αναφερθεί ότι η διάμετρος των διατρημάτων είναι συνήθως 50 ως 100 mm και η απόσταση  $S$  μεταξύ των διατρημάτων είναι:  $S = (10\sim 20) \cdot d$  (m) (Mohd, 2012).

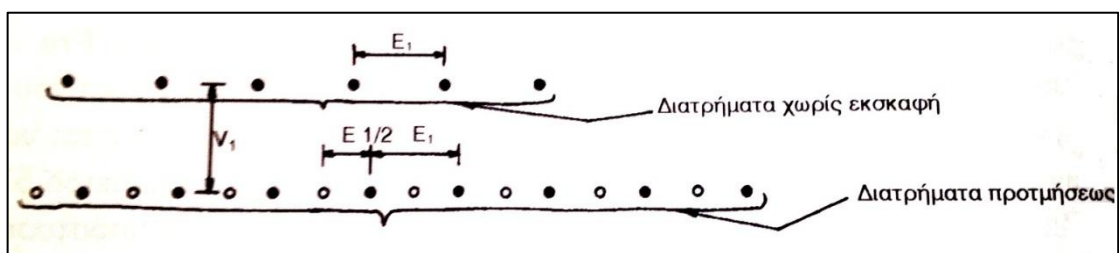
Ο Khosrou (1996) αναφέρει ότι η διάμετρος των διατρημάτων πρότμησης κυμαίνεται από 50 ως 150 mm με βάθος διάτρησης 12-18 m. Μεγαλύτερες διαμέτροι (230-313 mm), μεγαλύτερη απόσταση  $S$  και βάθος μεγαλύτερο από 24 m έχει επιτυχία σε συγκεκριμένες μόνο περιπτώσεις.

Τα διατρήματα αυτά εκρήγνυνται όλα μαζί είτε πριν από την κύρια ανατίναξη (προγενέστερη μέθοδος πρότμησης – prior pre-splitting), όπως δείχνει το σχήμα 4.9α ως ανεξάρτητη φάση με φορτίο πρακτικά άπειρο, είτε πρώτα στη σειρά της κύριας ανατίναξης με επιβράδυνση 50 ms (ταυτόχρονη πρότμηση- simultaneous pre-splitting) όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.9β (Τσουτρέλης, 2001). Οι Jimeno et al (1995) αναφέρουν ότι τα διατρήματα της πρότμησης θα πρέπει να εκρήγνυνται 90-120 ms πριν από την κύρια ανατίναξη. Ενώ ο Sharma (2008) με την σειρά του δίνει 200-250 ms πριν από την κύρια εκσκαφή.



Σχήμα 4.9: α) Ταυτόχρονη έκρηξη πριν από την κύρια ανατίναξη β) Ταυτόχρονη έκρηξη με προπορεία τουλάχιστον 50 ms σε σχέση προς την κύρια ανατίναξη (Bhandari, 1997).

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στις εξορύξεις των πετρωμάτων, τα οποία δεν έχουν καμία ελεύθερη επιφάνεια παρά μόνο την επιφάνεια διάτρησης. Όπως εικονίζεται και στο σχήμα 4.10 η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να είναι μεγαλύτερη από το μισό της απόστασης των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής.



Εικόνα 4.10: Διάταξη διατρημάτων κατά την μέθοδο πρότμησης (Πολυχρόνopoulos, 2001).

Ο Sharma (2008) αναφέρει ότι η απόσταση των διατρημάτων πρότμησης θα πρέπει να είναι:

$$S = (8 \sim 12) \cdot d \text{ (m)}$$

και το φορτίο μπορεί να διατηρηθεί ίδιο με το φορτίο της κύριας ανατίναξης.

Η ακρίβεια στην διάτρηση είναι σημαντικός παράγοντας για τα αποτελέσματα της μεθόδου πρότμησης και γι αυτό το μήκος τους κατά κανόνα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15 m (Πολυχρονόπουλος, 2001). Ο Τσουτρέλης (1971) όμως δίνει ένα πιο αυστηρό περιορισμό στα 10 m για το μήκος διάτρησης.

Το μέγιστο βάθος για διατρήματα πρότμησης εξαρτάται από την ακρίβεια διάτρησης και συνήθως δεν υπερβαίνει τα 16 m. Μια απόκλιση των διατρημάτων από το επίπεδο πρότμησης της τάξης των 15 cm θα έχει δυσμενή αποτελέσματα (Αγιουτάντης, 2009).

Ο Jimeno et al (1995) προτείνουν τη χρησιμοποίηση μια από τις επόμενες δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της γραμμικής πυκνότητας στήλης για εκρηκτική ύλη πυκνότητας  $1,2 \text{ g/cm}^3$  και μέσες ιδιότητες αντοχής του πετρώματος:

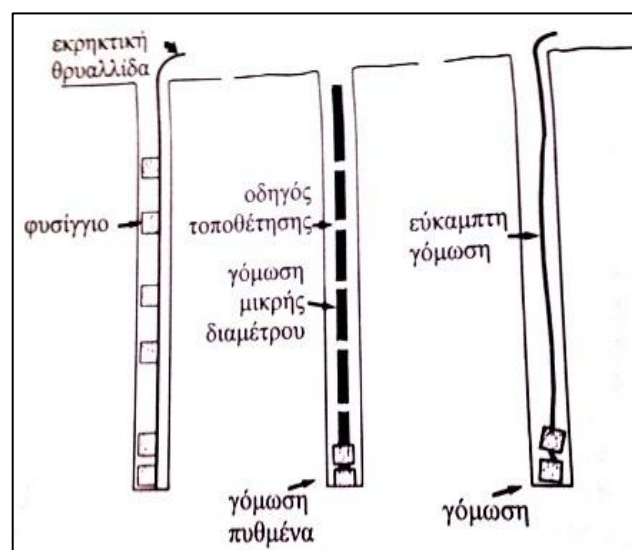
$$q_c = 8,5 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 \text{ (kg/m)}$$

$$q_c = d/130 \text{ (kg/m)}$$

όπου  $d$  η διάμετρος του διατρήματος πρότμησης σε mm.

Σε κάθε περίπτωση η γόμωση πυθμένα σε μήκος ίσο προς  $S/2$  πρέπει να είναι διπλάσια εκείνης της στήλης προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική κοπή του πετρώματος.

Η ασθενής γόμωση επιτυγχάνεται είτε χρησιμοποιώντας ειδικά φυσίγγια εκρηκτικών με μικρή διατομή ή ακόμη και ειδικά ενισχυμένη εκρηκτική (ακαριαία) θρυαλίδα όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Τυπικές γομώσεις διατρημάτων πρότμησης (Αγιουτάντης, 2009).

Τα διατρήματα γομώνονται περίπου κατά 75% του βάθους τους. Σε περίπτωση που το πέτρωμα θρυμματίζεται εύκολα η γόμωση μπορεί να μειωθεί στο 55%. Φυσίγγια με μεγέθη 25, 29, 52 mm μπορούν να τοποθετηθούν σε διατρήματα με διάμετρο 87, 100 και 200 mm σε αποστάσεις 0,7-1,0 m , 0,8-1,2 m και 1,5-2,1 m αντίστοιχα. Η γόμωση θα είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη στο πυθμένα του διατρήματος σε σχέση με το υπόλοιπο για την εξασφάλιση της καλύτερης θραύσης στο πόδι της βαθμίδας (Bhandari, 1997).

Ένας πρακτικός κανόνας είναι η ανατίναξη στο επίπεδο της πρότμησης να αρχίζει δοκιμαστικά με γόμωση 0,50 kg/m<sup>2</sup> επιφάνειας οπής και στην συνέχεια ανάλογα με το αποτέλεσμα να προσαρμόζεται προς τα πάνω ή κάτω (Jimeno et al. 1995).

Η πυροδότηση επίσης επιδρά σημαντικά στα αποτελέσματα της ανατίναξης της συγκεκριμένης μεθόδου. Αν δεν υπάρχει πρόβλημα να προξενήσουν βλάβες από τις παραγόμενες εδαφικές δονήσεις της έκρηξης, χρησιμοποιείται η ακαριαία πυροδότηση, ηλεκτρική ή με ακαριαία θρυαλλίδα και κοινό καψύλλιο. Σε περίπτωση όμως που δεν είναι επιθυμητό να προκληθούν εδαφικές δονήσεις τότε η πυροδότηση στα διατρήματα γίνεται με επιβράδυνση και μάλιστα με ms-καψύλλια. Κατά την χρήση όμως των ms-καψυλλίων πρέπει να σημειώνεται η θέση με την ελάχιστη επιβράδυνση. Αν η επιβράδυνση αυτών των καψυλλίων είναι μεγάλη τότε η μέθοδος της πρότμησης δεν θα δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε πολλές περιπτώσεις που παρουσιάζεται ανάγκη της συνολικής γόμωσης των διατρημάτων πρότμησης, είναι ανάγκη να χρησιμοποιείται ο συνδυασμός πυροδότησης από ms-καψύλλια και ακαριαία θρυαλλίδα, δηλαδή τα διατρήματα συνδέονται σε ομάδες με ακαριαία θρυαλλίδα (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Στην συνέχεια κάθε ομάδα από αυτά πυροδοτείται με ms-καψύλλια έτσι ώστε να σχηματιστεί μια σειρά καψυλλίων επιβράδυνσης. Η γόμωση ανά ομάδα διατρημάτων προσαρμόζεται με τον παρουσιαζόμενο βαθμό των εδαφικών δονήσεων. Έτσι με αυτό τον τρόπο βελτιώνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου πρότμησης. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι για τα διατρήματα πρότμησης πρέπει να αποφεύγεται η ισχυρή γόμωση πυθμένα.

Σε πολλές περιπτώσεις όμως, ιδιαίτερα όταν το μέτωπο στο οποίο πρόκειται να εφαρμοστεί η μέθοδος πρότμησης δεν είναι γραμμικό, τότε συνδυασμός της μεθόδου

πρότμησης με την μέθοδο πυκνής διάτρησης δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Όταν για παράδειγμα πρέπει να διατρηθεί η γωνία συμπαγούς πετρώματος τότε εφαρμόζεται στην γωνία η μέθοδος της πυκνής διάτρησης για να εμποδίσει την ρωγμάτωση του πετρώματος που παραμένει. Τα ανακουφιστικά διατρήματα βοηθούν την πρότμηση κατά μήκος του επιθυμητού επιπέδου (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Οι Hudson et al (1997) αναφέρουν τρεις λόγους οι οποίοι μπορούν να μετριάσουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου πρότμησης:

- Για να αποφευχθεί η μέθοδος πρότμησης να μετατραπεί σε ανεξέλεγκτη ανατίναξη είναι σημαντικό ο σχεδιασμός της ανατίναξης να λαμβάνει χώρα μακριά από μια ελεύθερη επιφάνεια παράλληλη προς το επίπεδο διάτρησης των διατρημάτων, έτσι ώστε η ενέργεια έκρηξης να καθοδηγείται προς το επίπεδο πρότμησης.
- Ασυνέχειες στο εσωτερικό του πετρώματος μπορούν να λειτουργήσουν σαν ελεύθερη επιφάνεια, οι οποίες αν βρίσκονται σε μικρή γωνία τότε θα οδηγήσουν σε τραχύ πρότμηση. Αντίθετα αν οι ασυνέχειες είναι σχεδόν κάθετα στο επίπεδο πρότμησης τότε έχουν μικρή επίδραση στο αποτέλεσμα.
- Οι επί τόπου τάσεις μπορεί να προκαλέσουν αποτελέσματα ανάλογα με την εγγύτητα των ασυνεχειών επειδή το πέτρωμα θα τείνει να σπάσει κάθετα προς την κύρια τάση. Αν οι κύριες τάσεις έχουν αρνητικό προσανατολισμό και μεγάλη τιμή μεγέθους τότε ο μηχανισμός πρότμησης μπορεί να θεωρηθεί αναποτελεσματικός.

Αν και για πολλά έτη η μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία σε σκληρά ή σχετικά μαλακά πετρώματα στα επιφανειακά μέτωπα, αλλά μέχρι σήμερα δεν κατορθώθηκε η ικανοποιητική χρήση της σε σήραγγες και στοές. Όπως απέδειξαν οι δοκιμές που έγιναν σε σημαντικά βάθη στα μεταλλεία, η μέθοδος αυτή αποτυγχάνει από την μεγάλη πίεση την οποία έχει το πέτρωμα στο βάθος αυτό.

Οι κατακόρυφες πιέσεις, οι οποίες ασκούνται στη σήραγγα, είναι υψηλές και εμποδίζουν τον σχηματισμό οριζόντιας ζώνης πρότμησης (**επιφάνεια ασυνέχειας**) στην οροφή της σήραγγας, ενώ οι μικρότερες πλευρικές πιέσεις προκαλούν ορισμένες δυσχέρειες στον σχηματισμό των κάθετων ρωγμών. Καλά αποτελέσματα έδωσε όμως η εφαρμογή της στην όρυξη φρεάτων (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Επίσης ο Bhandari (1997) αναφέρει ότι περιορίζεται η χρήση της μεθόδου πρότμησης σε υπόγειες λόγω της δυσχέρειας και της καθυστέρησης που προκαλείται λόγω της πυροδότησης των διατρημάτων της μεθόδου αυτής πριν από την κύρια ανατίναξη.

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει καλά αποτελέσματα σε ομοιογενή πετρώματα (Πολυχρονόπουλος, 2001).
- Έχει χαμηλό κόστος διάτρησης λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων  $S$  ανάμεσα στα διατρήματα (Τσουτρέλης 1971, Πολυχρονόπουλος 2001).
- Επιπλέον με την μέθοδο αυτή η φόρτωση και η μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού πραγματοποιείται σε μια φάση αντί για δύο όπως συμβαίνει στην μέθοδο ελαφρού φορτίου (Τσουτρέλης 1971, Πολυχρονόπουλος 2001).
- Με την εισαγωγή της μεθόδου πρότμησης εξαλείφονται οι πίσω ζώνες, βελτιώνοντας την σταθερότητα του τοίχου και του πρανούς ώστε να εξασφαλιστεί ενιαίο φορτίο για τα διατρήματα του επόμενου κύκλου ανατινάξεων (Sharma, 2008).
- Δεδομένου ότι έχουν εξαλειφθεί οι πίσω ζώνες, μειώνονται οι προσχηματιζόμενοι ογκόλιθοι με αποτέλεσμα τον καλύτερο κατακερματισμό του πετρώματος από τις επόμενες εκρήξεις (Sharma, 2008).
- Το πεδίο παρατήρησης αποκαλύπτει ότι υπάρχει ουσιαστική μείωση των εδαφικών δονήσεων της τάξης σχεδόν του  $1/3$  σε σχέση με την κανονική ανατίναξη, που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου πρότμησης (Sharma, 2008).
- Η μέθοδος πρότμησης είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος για τον έλεγχο των εδαφικών δονήσεων στην περίπτωση της υπερεκσκαφής από συμπαθητική ανατίναξη (Sharma, 2008).

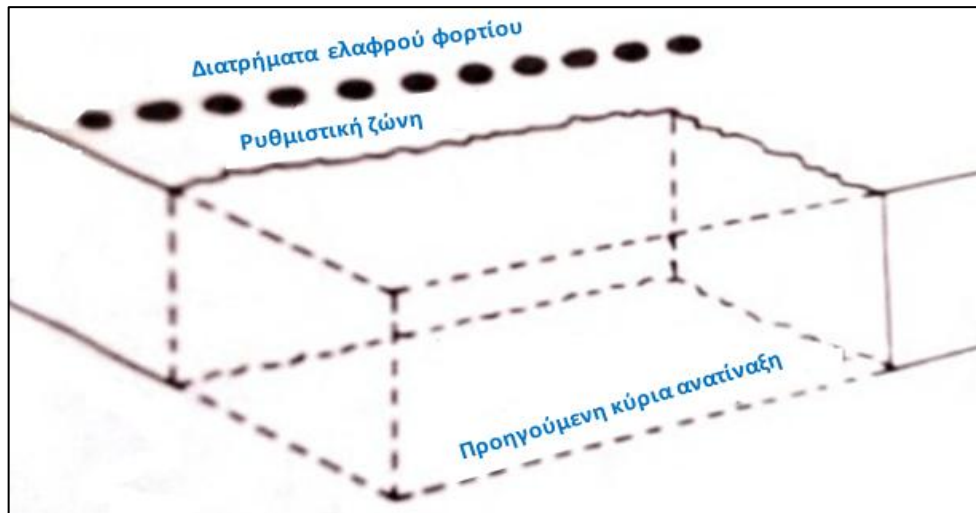
### Μειονεκτήματα:

- Αν συγκριθεί με άλλες μεθόδους παρατηρείται ότι απαιτείται περισσότερη διάτρηση από ότι στην μέθοδο των λείων τοιχωμάτων (smooth blasting).
- Δεν είναι δυνατόν να παρέχει πληροφορίες για τις συνθήκες του βράχου, διότι τα διατρήματα εναύονται πριν από την κύρια ανατίναξη (Khosrou, 1996).
- Η εκτίμηση του αποτελέσματος της μεθόδου μπορεί να γίνει πλήρως μόνο μετά την κύρια ανατίναξη και μετακινώντας το θραυσμένο υλικό (Τσουτρέλης 1971, Khosrou 1996).
- Περισσότερος θόρυβος και εδαφικές δονήσεις σε σχέση με τις μεθόδους αυτού του είδους (Khosrou, 1996).

#### **4.4.3 Μέθοδος ελαφρού φορτίου (trim blasting)**

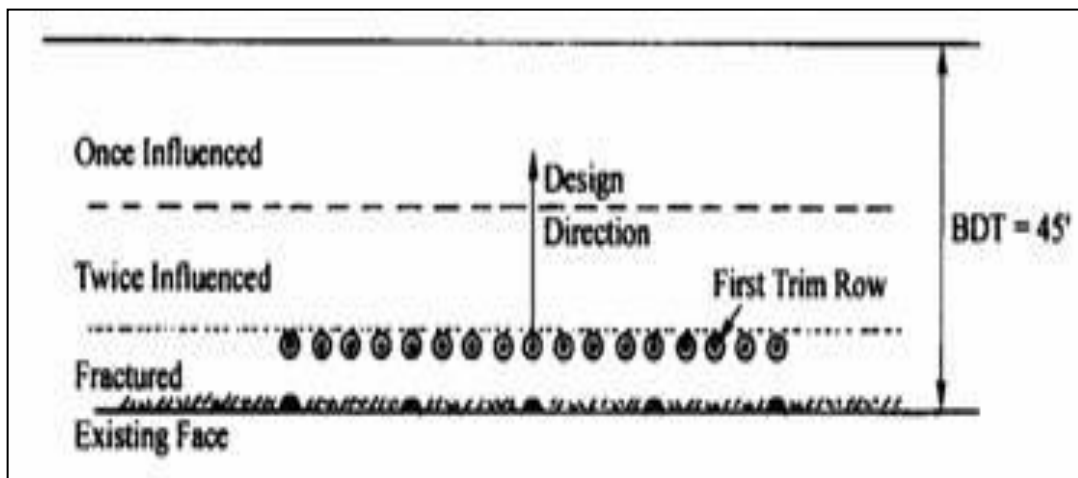
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε επιφανειακές ανατινάξεις για να απομακρύνει από το τελικό πρηνές της υπαίθριας εξόρυξης τυχόν χαλαρά πετρώματα ή προεξέχοντα τεμάχια του πετρώματος δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό μια λεία φαινομενικά επιφάνεια, η οποία όμως έχει διαταραχθεί από το κρουστικό κύμα της κύριας ανατίναξης (Τσουτρέλης, 1971).

Στην προηγούμενη μέθοδο κατά την οποία η έκρηξη για τον σχηματισμό του επιπέδου πρότμησης προηγείται χρονικά από την έκρηξη της κύριας ανατίναξης, η πυροδότηση των διατρημάτων της οριογραμμής εξόρυξης (**διατρήματα ελαφρού φορτίου ή διαμόρφωσης**), τα οποία γομώνονται ελαφρά, πραγματοποιείται βραδύτερα από την κύρια εκσκαφή ή ως ανεξάρτητη φάση ή με επιβράδυνση 50 ms από την έκρηξη των τελευταίων διατρημάτων της κύριας ανατίναξης. Κατά την πυροδότηση των διατρημάτων ελαφρού φορτίου θραύεται μια ζώνη πετρώματος (**ρυθμιστική ζώνη**) με σχετικά μικρό πάχος, η οποία αφήνεται μεταξύ του επιπέδου της τελικής εκσκαφής και της τελευταίας σειράς των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής. Λεπτομέρειες της όλης διάταξης παρέχονται στο σχήμα 4.12 (Πολυχρονόπουλος, 1979).



Σχήμα 4.12: Διάταξη διατρημάτων μεθόδου ελαφρού φορτίου (Τσουτρέλης, 1971).

Η διαδικασία σχεδιασμού διαφέρει από την τεχνική λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) υπό την έννοια ότι η διάταξη ξεκινά από την πραγματική περίμετρο εκσκαφής και προχωράει προς το επιθυμητό τελικό όριο εκσκαφής και όχι το αντίθετο. Αυτό απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 4.13 (Dessureault, 1996).



Σχήμα 4.13: Η διαδικασία σχεδιασμού της μεθόδου ελαφρού φορτίου (Dessureault, 1996).

Σύμφωνα με τον Πολυχρονόπουλο (2001) η διάμετρος των διατρημάτων ελαφρού φορτίου κυμαίνεται από 64 ως 100 mm ενώ ο Τσουτρέλης (1971) αναφέρεται σε λίγο διαφοροποιημένα μεγέθη, δηλαδή 2,5- 4 in (63,5 -102 mm). Ο Sharma (2008) από την άλλη δίνει πιο περιορισμένες τιμές διαμέτρων της τάξεως των 2-4 in (51-102 mm). Επιπρόσθετα ο Dessureault (1996) δίνει για την μέθοδο αυτή,



βάσει πίνακα σε παρακάτω ενότητα, τη μέγιστη τιμή διαμέτρου στην μέθοδο αυτή φτάνει τα 310 mm.

Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της οριογραμμής εξόρυξης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και από τις απαιτήσεις του έργου. Κάθε διάτρημα γομώνεται με συνεχή γόμωση μικρής διαμέτρου ( $\frac{d}{\phi} < 1$ ) και η πυροδότηση πραγματοποιείται ταυτόχρονα με ακαριαία θρυαλλίδα ή ηλεκτρικά.

Όταν τα διατρήματα είναι μεγάλου μήκους ή το πέτρωμα είναι σκληρό, τότε η γόμωση στον πυθμένα των διατρημάτων πρέπει να είναι ισχυρότερη για να επιτύχουμε ικανοποιητική εξόρυξη στην βάση της βαθμίδας. Επίσης για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων, οι οπές πρέπει να ανοίγονται κατά την τελική γωνία του μετώπου (Dessureault, 1996).

Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι η μέθοδος αυτή θεωρείται ότι έχει δύο παραλλαγές, την μέθοδο απαλής ανατίναξης (cushion blasting) και την μέθοδο λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) όπως αναφέρεται και στην σχετική βιβλιογραφία (Πολυχρονόπουλος 2001, Τσουτρέλης 1971). Ενώ σε διεθνή βιβλιογραφία συγχέεται με την μέθοδο απαλής ανατίναξης.

### **Πλεονεκτήματα:**

- Σε περίπτωση κατακερματισμένου πετρώματος η μέθοδος ελαφρού φορτίου δίνει καλύτερη τελική επιφάνεια πρανούς σε σύγκριση με την μέθοδο της πρότμησης, διότι η τεχνική αυτή παρέχει ταχύτερη εκτόνωση της πίεσης των αερίων της έκρηξης από ότι η απλή ρηγμάτωση κατά μήκος των διατρημάτων με την μέθοδο της πρότμησης (Τσουτρέλης 1971, Πολυχρονόπουλος 2001).
- Σε σύγκριση με την μέθοδο πυκνής διάτρησης είναι απλούστερη και οικονομικότερη λόγω της αυξημένης απόστασης S μεταξύ των διατρημάτων που χρησιμοποιείται (Sharma, 2008).
- Πλήρεις γεωλογικές πληροφορίες που λαμβάνονται από την κύρια ανατίναξη η οποία πραγματοποιείται πριν από την μέθοδο ελαφρού φορτίου (Sharma, 2008).

- Η επιτυχία αυτής της τεχνικής έγκειται στο γεγονός ότι αφαιρείται το υλικό που ανατινάχτηκε πριν από την πυροδότηση των διατρημάτων της μεθόδου ελαφρού φορτίου (Sharma, 2008).

#### **Μειονεκτήματα:**

- Η ανάγκη επαναφοράς του διατρητικού εξοπλισμού στο μέτωπο. Δηλαδή μια φορά για την διάνοιξη των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής και μια για την διάνοιξη των διατρημάτων της μεθόδου ελαφρού φορτίου. Με την διαδικασία όμως επαναφοράς του εξοπλισμού στο μέτωπο, υπάρχει ο κίνδυνος, κυρίως στην περίπτωση μετώπου βαθμίδας με μεγάλο ύψος σε κατακερματισμένο πέτρωμα, η τοποθέτηση του να είναι επισφαλής πάνω στην ρυθμιστική ζώνη του πετρώματος λόγω του μικρού πλάτους της (Πολυχρονόπουλος, 2001).
- Η υπερεκσκαφή από την κύρια ανατίναξη αφαιρεί εντελώς ή εν μέρει την βαθμίδα, το οποίο αργότερα είναι δύσκολο να επιτευχθεί η μέθοδος ελαφρού φορτίου (Sharma, 2008).
- Στην περίπτωση ορθής βαθμίδας είναι αδύνατη η αφαίρεση όλου του κατακερματισμένου υλικού της κύριας ανατίναξης (Sharma, 2008).

#### **4.4.4 Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting/slashing)**

Στην μέθοδο αυτή, που η εφαρμογή της είναι σε επιφανειακά μέτωπα, κάθε τρίτο ή τέταρτο διάτρημα στην οριογραμμή εξόρυξης έχει μεγαλύτερη διάμετρο και ασθενέστερη γόμωση από όλα τα υπόλοιπα. Τα υπόλοιπα είναι αγόμωτα παίζουν καθοδηγητικό ρόλο για την διεύθυνση διάρρηξης του πετρώματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.14. Πολλές φορές όμως τα καθοδηγητικά διατρήματα είναι περισσότερα από τέσσερα. Για να μειωθεί το κόστος διάτρησης τα καθοδηγητικά (ανακουφιστικά) διατρήματα ορύσσονται με μικρή διάμετρο και με βάθος που φτάνει μέχρι τα 2/3 του βάθους των γομωμένων διατρημάτων (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Τα αγόμωτα διατρήματα μεταξύ των οπών της “ανατίναξης μαξιλάρι” (cushion blasting) μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον για να έχουν καλύτερα

αποτελέσματα σε διαβρωμένα ή θρυμματισμένα πετρώματα, και ιδιαίτερα γύρω από γωνίες ή καμπύλα τμήματα του μετώπου (Khosrou, 1996).



Σχήμα 4.14: Διατάξεις διατρημάτων μεθόδου απαλής ανατίναξης (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Ο Bhandari (1997) αναφέρει ότι τα διατρήματα απαλής ανατίναξης συνήθως έχουν διάμετρο 100-175 mm και σε απόσταση μεταξύ τους 1,5-2,5 m. Σε παρακάτω ενότητα θα παρουσιαστούν πίνακες με δεδομένα για τον σχεδιασμό μιας τέτοιας ανατίναξης, που δίνουν εύρος διαμέτρου από 50 - 165 mm.

Το μέγιστο βάθος των διατρημάτων, το οποίο είναι δυνατό να επιτύχουμε από την εφαρμογή της μεθόδου, εξαρτάται από την ακρίβεια διεύθυνσης των διατρημάτων. Με διατρήματα μεγάλης διαμέτρου, μπορεί να επιτευχθεί μικρότερη απόκλιση για μεγάλα βάθη. Διατρήματα με βάθος μέχρι 27 m έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα ενώ ο Αγιουτάντης (2009) αναφέρει μέγιστο βάθος τα 30 m. Όταν η παρέκκλιση της διάτρησης είναι μεγαλύτερη από 15 cm, έξω από το επίπεδο που σχηματίζουν τα διατρήματα, τότε τα αποτελέσματα της μεθόδου δεν είναι ικανοποιητικά (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Η απόσταση  $S$  και το φορτίο  $B$  της μεθόδου απαλής ανατίναξης εξαρτάται από τις συνθήκες του πετρώματος, από το πραγματικό παραμένον φορτίο και από τα αποτελέσματα της κύριας εκσκαφής (Khosrou, 1996).

Το φορτίο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερο από την απόσταση δηλαδή:

$$B = (1,2 - 1,3) \cdot S \text{ (m)}$$

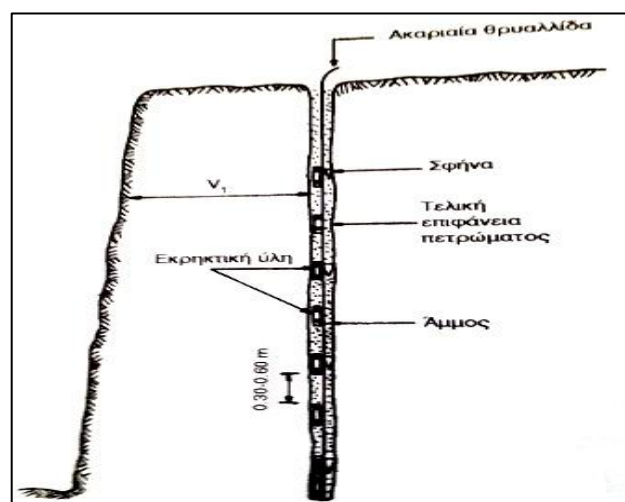
Η υποδιάτρηση δεν είναι απαραίτητη. Τα διατρήματα της μεθόδου αυτής πυροδοτούνται μετά την κύρια ανατίναξη και μια επιβράδυνση μεταξύ αυτών είναι επιθυμητή (Bhandari, 1997).

Κατά την τεχνική της γόμωσης, τα φυσιγγια της κατάλληλης εκρηκτικής ύλης στερεώνονται με μονωτική ταινία στην ακαριαία θρυαλλίδα. Τα φυσιγγια αυτά αφού στερεωθούν κατά ίσα διαστήματα, συνήθως 0,30 ως 0,60 m, κατά μήκος της ακαριαίας θρυαλλίδας, εισάγονται στο διάτρημα (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Ο Olofsson (1990) προτείνει ως διάμετρο φυσιγγίων από 25 ως 32 mm με μήκος ως 200 mm και σε μια σχετική απόσταση 0,30-0,50 m ανάλογα βέβαια με την διάμετρο της οπής.

Το εκρηκτικό που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι αποσυνδεδεμένο κατά 50% από τα τοιχώματα του διατρήματος και η περίμετρος της οπής να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την διάμετρο της (Khosrou, 1996).

Στους κενούς χώρους που δημιουργούνται μεταξύ των φυσιγγίων, παρεμβάλλεται άμμος ή κατά προτίμηση ξύλινοι διαχωριστές που στερεώνονται επίσης πάνω στην θρυαλλίδα. Για καλύτερα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, πρέπει η εκρηκτική ύλη μέσα στο διάτρημα να βρίσκεται προς το μέρος του προς εξόρυξης πετρώματος. Για να στερεοποιηθεί η εκρηκτική ύλη στην κατάλληλη θέση χρησιμοποιούμε σφήνες όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.15.



Σχήμα 4.15: Τρόπος γόμωσης κατά την μέθοδο της απαλής ανατίναξης (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Ικανοποιητικά αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί σε ομοιογενές πέτρωμα με επιγύμωση μόνο του διατρήματος και χωρίς την χρήση ξύλινων διαχωριστών ή άμμου μεταξύ του των φυσιγγίων, αλλά με την δημιουργία κενών χώρων. Στην περίπτωση αυτή, τα αέρια της έκρηξης έχουν μεγαλύτερο χώρο για να εκτονωθούν με αποτέλεσμα να μην ενεργούν με δύναμη στα τοιχώματα του διατρήματος και να προξενούν ρωγμές στο πέτρωμα που παραμένει. Η έναυση γίνεται ταυτόχρονα ή με επιβράδυνση μετά από την κύρια ανατίναξη (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Για να εξασφαλιστεί η κοπή στο κάτω μέρος του διατρήματος της μεθόδου η γύμωση πυθμένα θα πρέπει να είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη από την γύμωση στήλης, ειδικά όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο στο πόδι από ότι στο πάνω μέρος της βαθμίδας (Khosrou, 1996).

Ο Konya (1991) δίνει τα επόμενα στοιχεία σχεδιασμού για την συγκεκριμένη ελεγχόμενη ανατίναξη:

- Γραμμική γύμωση στήλης:

$$q_c = d^2/28 \text{ (lb/ft)}$$

- Απόσταση μεταξύ των διατρημάτων:

$$S = 16 \cdot d \text{ (in)}$$

- Με σκοπό η ενέργεια της εκρηκτικής ύλης να κατευθυνθεί προς το επόμενο διάτρημα και όχι προς το φορτίο, το τελευταίο πρέπει να είναι μεγαλύτερο της απόστασης S. Συνήθως χρησιμοποιείται η σχέση:

$$B > 1,3 \cdot S \text{ (in)}$$

Όταν η μέθοδος δεν εφαρμόζεται σε γραμμική επιφάνεια μετώπου, τότε απαιτείται μικρότερη απόσταση μεταξύ των διατρημάτων στα γωνιακά τμήματα, από ότι οι αποστάσεις αυτών σε ευθύγραμμο τμήμα. Τέλος ενώ παρουσιάζει προσαρμογή στους περισσότερους τύπους πετρωμάτων δεν έχει μεγάλη εφαρμογή διότι, στην οριογραμμή εξόρυξης, διατρημάτων δύο διαμέτρων προκαλεί σημαντικές καθυστερήσεις χωρίς να υπάρχουν αντίστοιχες βελτιώσεις στα αποτελέσματα (Πολυχρονόπουλος, 2001).

### **Πλεονεκτήματα:**

- Η μέθοδος απαλής ανατίναξης απαιτεί μικρό αριθμό διατρημάτων άρα και μικρό κόστος λόγω των μεγάλων αποστάσεων  $S$  μεταξύ των διατρημάτων (Olofsson, 1990).
- Μεγαλύτερη διάμετρο διατρημάτων από τις υπόλοιπες μεθόδους, και γενικά ίδια με την αντίστοιχη της κύριας εκσκαφής (Khosrou, 1996).
- Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου μπορούν να προβληθούν αμέσως μετά την εφαρμογή της (Khosrou, 1996).
- Σε σύγκριση με την μέθοδο πυκνής διάτρησης (Line-Drilling) είναι απλούστερη και οικονομικότερη λόγω της αυξημένης απόστασης  $S$  μεταξύ των διατρημάτων που χρησιμοποιείται (Sharma, 2008).
- Επίσης παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε αποσαθρωμένα πετρώματα (Olofsson, 1990).

### **Μειονεκτήματα:**

- Πρέπει να προηγηθεί η κύρια εκσκαφή πριν από την εφαρμογή της μεθόδου απαλής ανατίναξης (Olofsson, 1990).
- Ιδιαίτερη προσοχή στο φορτίο  $B$  και στην επιγύμωση (Khosrou, 1996).
- Καθυστερήσεις στην παραγωγή (Khosrou, 1996).
- Η υπερεκσκαφή από την πρώτη γραμμή διατρημάτων μπορεί να καταστρέψει τα διατρήματα της μεθόδου απαλής ανατίναξης και να παρουσιαστεί πρόβλημα στην διαδικασία όρυξης καινούριων διατρημάτων για την εφαρμογή της μεθόδου καθώς και στο φορτίο  $B$  (Khosrou, 1996).

#### 4.4.5 Ανατίναξη διαμόρφωσης (buffer blasting)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο ελεγχόμενης ανατίναξης όπως την μέθοδο πρότμησης ή την μέθοδο πυκνής διάτρησης και εφαρμόζεται σε επιφανειακές ανατινάξεις. Ορύσσονται διατρήματα στα όρια της εκσκαφής με ασθενέστερη γόμωση από ότι στην κύρια ανατίναξη για καλύτερα αποτελέσματα στην κλίση της βαθμίδας και στην μείωση ζημιών (Khosrou, 1996).

Οι παράμετροι της ανατίναξης διαμόρφωσης είναι (Zhang and Huang, 2010):

- Η διάμετρος των διατρημάτων της μεθόδου είναι ίδια με την αντίστοιχη της κύριας ανατίναξης διότι σε άλλη περίπτωση θα αυξηθεί το κόστος διάτρησης.
- Η απόσταση των διατρημάτων “διαμόρφωσης”.
- Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των οπών “διαμόρφωσης” και των οπών πρότμησης, είναι μια κύρια παράμετρος από άποψη προστασίας και θα πρέπει να ελεγχθεί ανάλογα με την ζώνη θρυμματισμού γύρω από το διάτρημα.
- Το άνοιγμα της οπής διαμόρφωσης και της αντίστοιχης στην πρότμηση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από εκείνο της κύριας εκσκαφής.

Η απόσταση και το φορτίο είναι μικρότερα από την κύρια ανατίναξη, γενικά το 50-75% από αυτό που χρησιμοποιείται στις κύριες ανατινάξεις. Το φορτίο είναι μικρότερο από την απόσταση των διατρημάτων όσον αφορά το σχέδιο της “ανατίναξης διαμόρφωσης” για την αποφυγή της υπερεκσκαφής (Khosrou, 1996).

Το ιδανικό φορτίο της ανατίναξης διαμόρφωσης δεν πρέπει να μην υπερβαίνει την οκταπλάσια διάμετρο του διατρήματος της μεθόδου. Η απόσταση  $S$  μεταξύ των οπών “διαμόρφωσης” είναι:

$$S = (1,0 - 1,25) \cdot B \text{ (m)}$$

όπου  $B$  το φορτίο της ανατίναξης διαμόρφωσης (Sharma, 2008).

Η διάμετρος και το βάθος των διατρημάτων είναι ίδιο όπως και στην κύρια εκσκαφή αλλά με την διαφορά ότι τα διατρήματα γομώνονται ασθενέστερα (Khosrou, 1996).

Χαρακτηριστικό του σχεδιασμού της γραμμής “διαμόρφωσης” περιλαμβάνει την χρήση ενός ανηγμένου βάθους ταφής στην κορυφή της γόμωσης 1,5 φορά μεγαλύτερη από την τιμή της κύριας ανατίναξης και μείωση του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικού στο 50-80% της αντίστοιχης τιμής στην κύρια ανατίναξη (Sharma, 2008).

Όμως σε βιβλιογραφική ανάλυση της συγκεκριμένης μεθόδου αναφέρεται ότι ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικού για την ανατίναξη διαμόρφωσης είναι ίσος με το 60% του αντίστοιχου συντελεστή στην κύρια ανατίναξη (Khosrou, 1996).

Η σειρά των διατρημάτων της μεθόδου διαμόρφωσης πρέπει να βρίσκεται μπροστά από το προβλεπόμενο επίπεδο του τελικού μετώπου ή της γραμμής πρότμησης (pre-splitting) για την αποφυγή της υπερεκσκαφής. Η απόσταση αυτή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να διασφαλιστεί ότι η τάση στο τελικό μέτωπο είναι επαρκώς εξασθενημένη για να αποφευχθεί η σύνθλιψη πέρα από το επίπεδο του τελικού πρανούς. Έχει παρατηρηθεί ότι σε αρκετά μαλακό πέτρωμα η γραμμή των διατρημάτων διαμόρφωσης πρέπει να είναι σε απόσταση περίπου 3,5 m ή περισσότερο μπροστά από την γραμμή πρότμησης και να διατηρείται με ακρίβεια. Ενώ σε σκληρό πέτρωμα οι αποστάσεις στο πόδι της βαθμίδας πρέπει να είναι μικρότερες για να θραυστεί το πέτρωμα που βρίσκεται ανάμεσα στην γραμμή διαμόρφωσης και στην οριογραμμή πρότμησης ή στο τελικό μέτωπο (Sharma, 2008).

Ανάλογα με την περίμετρο του διατρήματος το βάρος της εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα υπολογίζεται από την εξίσωση του Calder (1977) όπως αναφέρεται από τον (Khosrou, 1996):

$$W = (H_B + S_d - S_T) \cdot w$$

όπου

W: βάρος εκρηκτικής στήλης

H<sub>B</sub>: ύψος βαθμίδας (m),

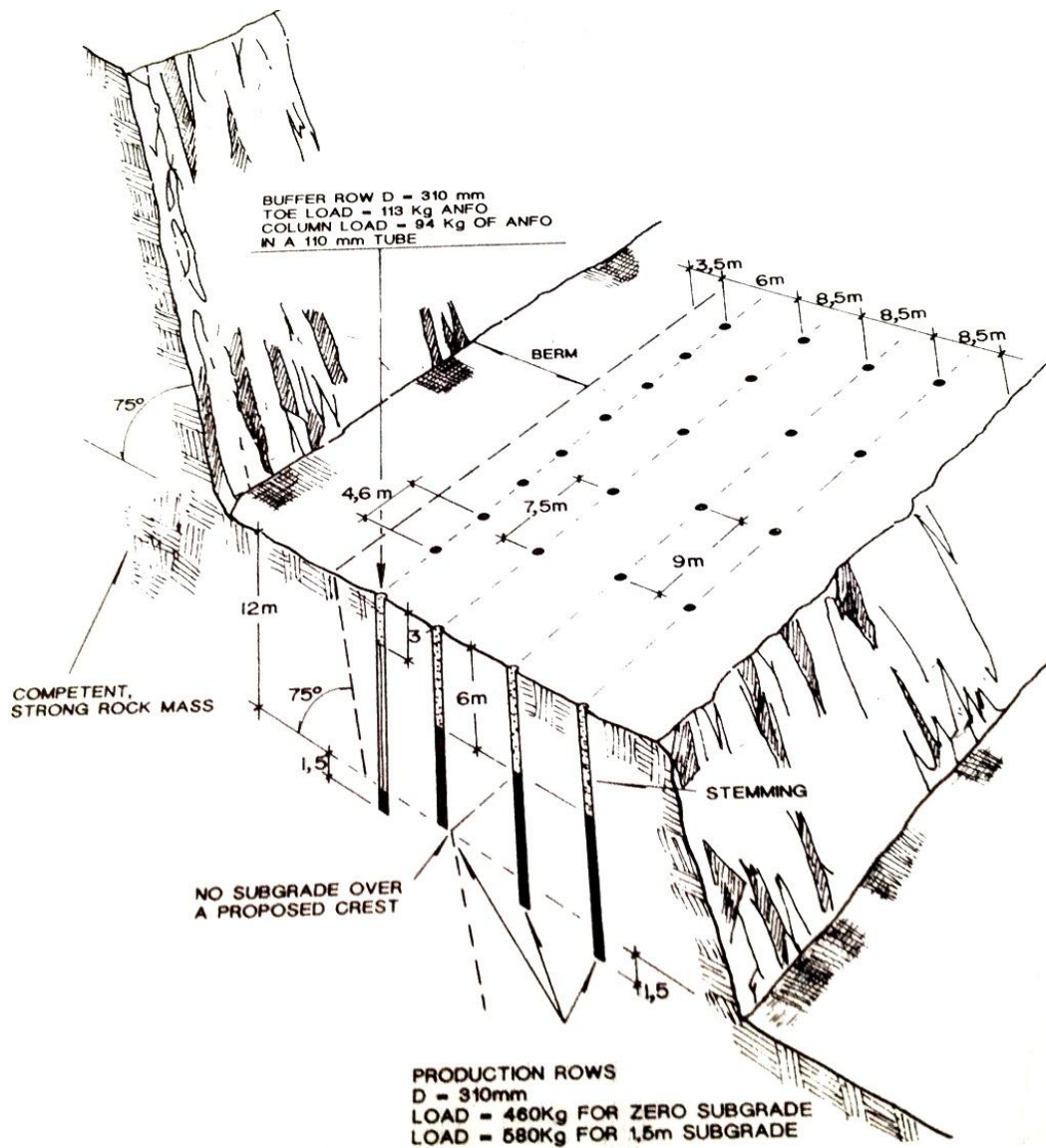
S<sub>d</sub>: μήκος υποδιάτρησης (m),

S<sub>T</sub>: μήκος επιγόμεσης (m),

w: γραμμική πυκνότητα γόμωσης (kg/m).

Ένα τυπικό σχέδιο ανατίναξης διαμόρφωσης εμφανίζεται στην εικόνα 4.16.





Σχήμα 4.16: Τυπικό σχέδιο ανατίναξης για την ανατίναξη διαμόρφωσης (Jimeno et al, 1995).

Στο σχήμα αυτό λοιπόν η διάμετρος των διατρημάτων “διαμόρφωσης” είναι 310 mm η απόσταση  $S$  μεταξύ των διατρημάτων είναι 4,6 m και το φορτίο 3,5 m. Παρατηρείται ότι το εκρηκτικό τοποθετείται στο διάτρημα με την βοήθεια σωλήνα διαμέτρου 110 mm έτσι ώστε να μην έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της οπής. Στην υποδιάτρηση όμως το εκρηκτικό βάσει σχήματος τοποθετείται χύδην και είναι μεγαλύτερη η γόμωση συγκριτικά με την γόμωση στήλης.

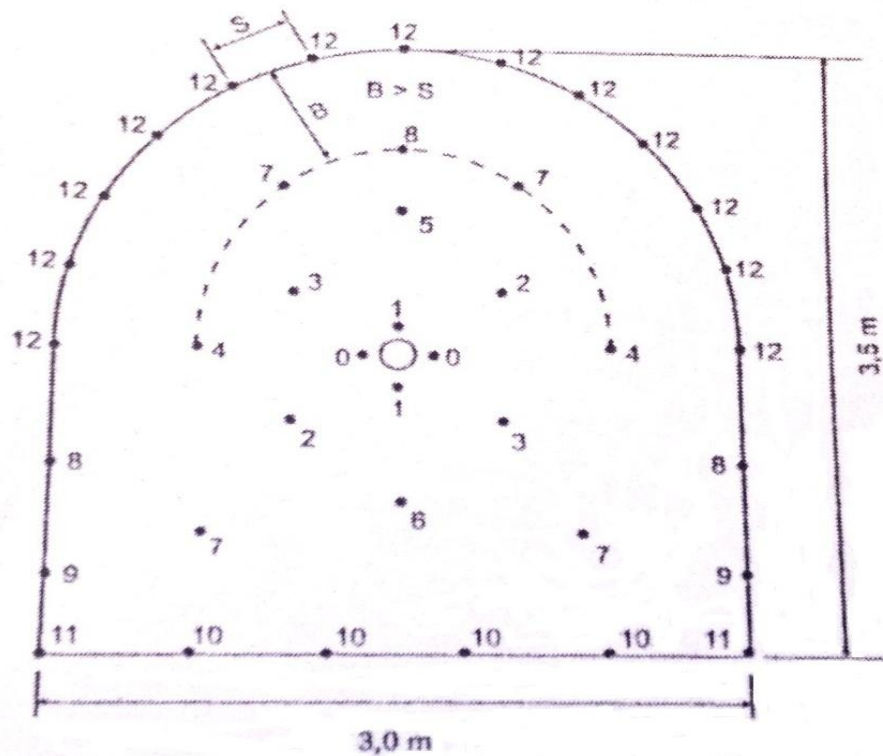
#### 4.4.6 Μέθοδος λείων τοιχωμάτων (smooth blasting)

Η μέθοδος αυτή θεωρείται από διάφορους ερευνητές παραλλαγή της μεθόδου ελαφρού φορτίου (trim blasting), η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα σε υπόγειες ανατινάξεις διότι προσφέρει σημαντική μείωση στην υπέρθραυση και ρωγμάτωση του πετρώματος, στην εργασία απομάκρυνσης των χαλαρών τεμαχίων του πετρώματος από την οροφή και τις πλευρές και στην ποσότητα του απαιτούμενου σκυροδέματος για την επένδυση της σήραγγας. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε πολύ ανθεκτικά πετρώματα, τα τοιχώματα της σήραγγας είναι τόσο λεία που δεν απαιτείται καμία πρόσθετη εργασία (Τσουτρέλης, 2001).

Η τεχνική αυτής της μεθόδου βασίζεται στην πυκνή διάτρηση μιας σειράς περιμετρικών διατρημάτων, τα οποία γομώνονται με ασθενή αποζευγμένη γόμωση έτσι ώστε να ισχύει η σχέση  $\frac{d}{\phi} < 1$  και εκρήγνυνται τελευταία στο προβλεπόμενο σχέδιο ανατίναξης. Στο σχήμα 4.17 που ακολουθεί δίδεται μια τυπική διάταξη διατρημάτων στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου.

Επίδραση στα αποτελέσματα ασκεί ο λόγος ζεύξεως  $\frac{d}{\phi}$ , όπου  $d$  η διάμετρος του φυσιγγίου και  $\phi$  η διάμετρος του διατρήματος, η σχέση  $S/B$  όπου  $S$  η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων και  $B$  το φορτίο, ο χρόνος επιβράδυνσης και τα δομικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με λόγο  $\frac{d}{\phi}$  μεταξύ 30-50%, τιμές του λόγου  $S/B = 0,4-0,7$  για  $S = 0,4-0,6$  m (Τσουτρέλης, 2001).

Όσο η σχέση  $S/B$  αυξάνεται, τόσο η επιφάνεια του πετρώματος καθίσταται ανώμαλη. Για τον λόγο αυτό κατά την εφαρμογή της μεθόδου στα στρωσιγενή πετρώματα, πρέπει να αυξάνεται το φορτίο κατά 10 ως 20% και να μειώνεται αντίστοιχα κατά το ίδιο ποσοστό η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων έτσι ώστε η παραπάνω σχέση να φτάσει μέχρι 0,6 ή και ακόμα χαμηλότερα.



Σχήμα 4.17: Διάταξη διατρημάτων στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου λείων τοιχωμάτων (Τσουτρέλης, 2001).

Ο Mohd (2012) αναφέρει γενικά ότι η απόσταση θα πρέπει να διέπεται από την σχέση:  $S < 1,5B$ .

Για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ των διατρημάτων της μεθόδου ελεγχόμενης ανατίναξης δίνεται η παρακάτω σχέση (Τσουτρέλης 2001, Khosrou 1996):

$$S = (15 - 16) \cdot d \text{ (m)}$$

Επιπρόσθετα ο Τσουτρέλης (2001) αναφέρει ότι η απόσταση θα πρέπει να είναι ίση με το 80% της τιμής του φορτίου και ότι η γραμμική γόμωση  $q_t$  είναι συναρτήσεως της διαμέτρου των διατρημάτων και δίνεται από την παρακάτω σχέση για ένα διάτρημα μέχρι 155 mm:

$$q_t = 90 \cdot d^2$$

με συνεχή γόμωση σε όλο το μήκος χωρίς στήλη επιγόμωσης.

Ο Sharma (2008) δίνει τα παρακάτω δεδομένα για την εκπόνηση του σχεδιασμού της ανατίναξης λείων τοιχωμάτων:

- Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της μεθόδου για μέτρια ως σκληρά πετρώματα υπολογίζονται από την σχέση:  $S = (10 - 12) \cdot d$  ενώ για μαλακό πέτρωμα  $S = (5 - 6) \cdot d$  (m).
- Η απόσταση των διατρημάτων αυτών θα πρέπει να είναι ίση με το 40% της αντίστοιχης απόστασης της κύριας ανατίναξης.
- Το φορτίο της να είναι ίσο με το 75% του φορτίου της κύριας εκσκαφής.

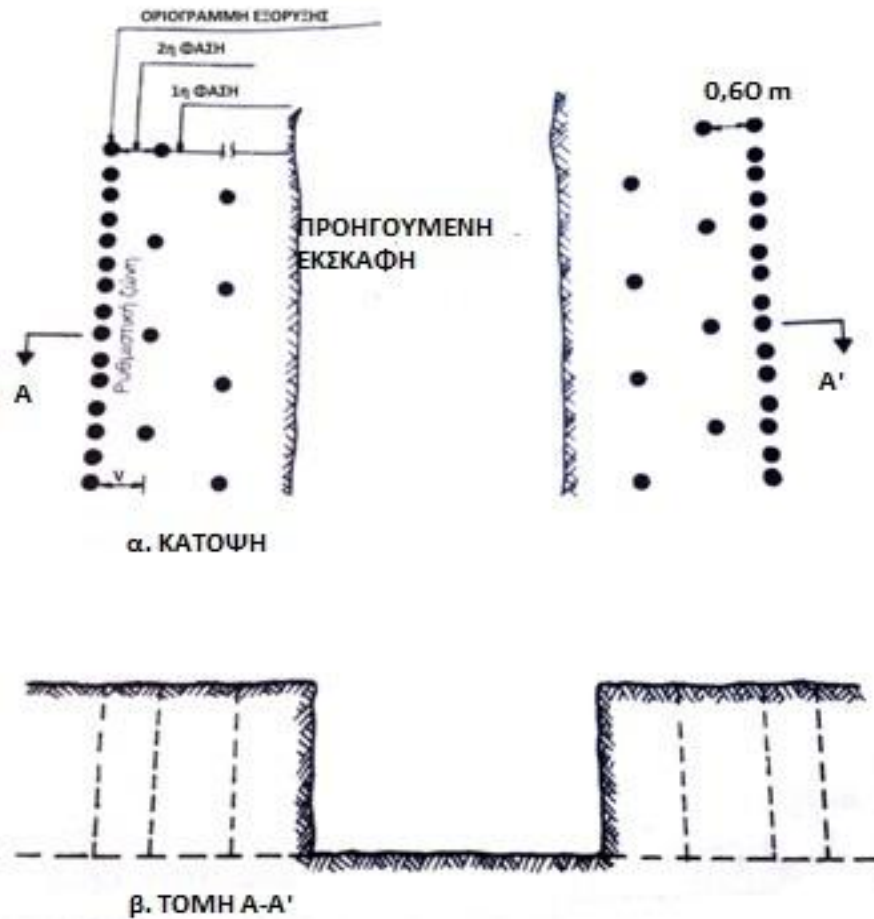
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τέσσερις κανόνες για τον σχεδιασμό της ανατίναξης (Sharma, 2008):

1. Το φορτίο B, η απόσταση S και πυκνότητα γόμωσης της γραμμής των διατρημάτων της μεθόδου επιλέγονται έτσι ώστε η έκταση της περιοχής επίδρασης δεν υπερβαίνει εκείνη του σχεδίου ανατίναξης.
2. Η τιμή της απόστασης S είναι μικρότερη από την τιμή του φορτίου. Συνήθως ακολουθείται και η σχέση που αναφέρθηκε παραπάνω ( $S = 80\% \cdot B$ ).
3. Τα διατρήματα της μεθόδου ελεγχόμενων ανατινάξεων να εναύονται στον ίδιο χρόνο για να εξασφαλιστεί όσο είναι δυνατόν η ταυτόχρονη έκρηξη τους.
4. Ο χρόνος καθυστέρησης μεταξύ της βοηθητικής γραμμής (διατρήματα που γειτνιάζουν με την γραμμή λείων τοιχωμάτων) και της γραμμής της ελεγχόμενης μεθόδου θα πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε τα διατρήματα της μεθόδου να έχουν μια ελεύθερη επιφάνεια

Στο σχήμα 4.18 φαίνεται η διάταξη των διατρημάτων κατά την εφαρμογή της μεθόδου και σε επιφανειακό μέτωπο (Πολυχρονόπουλος, 1979). Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων σε επιφανειακό μέτωπο είναι ίση με το 80% του φορτίου. Εναύονται τελευταία για να μεγιστοποιηθεί η ανακούφιση τους (Mohd, 2012).

Η μέθοδος των λείων τοιχωμάτων εφαρμόζεται με επιτυχία σε συμπαγή πετρώματα, ενώ στη περίπτωση των ρωγματωμένων πετρωμάτων, σε σύγκριση με την μέθοδο πρότμησης δίνει καλύτερη επιφάνεια πρσανούς γιατί η τεχνική ανατίναξης που εφαρμόζεται κατά αυτή τη μέθοδο παρέχει ταχύτερη εκτόνωση της πίεσης των αερίων της έκρηξης, από αυτή που επιτυγχάνεται με την μέθοδο πρότμησης. Σε στρωσιγενή και λεπτοπλακώδη πετρώματα, ειδικά όταν τα επίπεδα των πλακών τέμνουν με μεγάλη κλίση το μέτωπο, η εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζει δυσχέρειες, λόγω της υπερεκσκαφής που θα προκύψει. Στην περίπτωση αυτή θα

πρέπει να μειωθεί η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων  $S$  έτσι ώστε η σχέση που αναφέρθηκε παραπάνω να φτάσει το 0,4 ή να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος γραμμικής διάτρησης (line-drilling) (Πολυχρονόπουλος, 1979).



Σχήμα 4.18: Διάταξη διατρημάτων κατά την εφαρμογή της μεθόδου λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην θέση και διεύθυνση των περιμετρικών διατρημάτων προς τα έξω έτσι ώστε να υπάρχει χώρος για τον επόμενο κύκλο ανατίναξης για την διατήρηση της προβλεπόμενης διατομής της σήραγγας. Όπως αναφέρει και ο Πολυχρονόπουλος έχει αποδειχτεί ότι για ένα μήκος προχώρησης 3,2 m τα διατρήματα της μεθόδου λείων τοιχωμάτων (οροφής και πλευρικά) τοποθετούνται συνήθως σε μια απόσταση 20 cm μέσα από την περίμετρο.

Η γόμωση πυθμένα των διατρημάτων της μεθόδου κυμαίνεται ανάλογα με την διάμετρο των διατρημάτων από 0,1 ως 0,66 kg. Τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής, τα οποία βρίσκονται κοντά στην ζώνη της μεθόδου πρέπει να γομώνονται ασθενώς όπου περισσότερες λεπτομέρειες θα δοθούν παρακάτω.

Εκτός από την διάτρηση και την γόμωση των περιμετρικών διατρημάτων, ένας επίσης σημαντικός παράγοντας είναι η πυροδότηση αυτών. Κατά την όρυξη σιράγγων είναι αναγκαίο να πυροδοτούνται τα περιμετρικά διατρήματα σε συνέχεια των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής με επιβράδυνση 100ms. Το άλμα αυτό της επιβράδυνσης μεταξύ των τελευταίων διατρημάτων κύριας ανατίναξης και των περιμετρικών είναι κατάλληλο σε υπόγειες ανατινάξεις. Σε ιδιαίτερα επικίνδυνες περιπτώσεις, τα περιμετρικά διατρήματα πυροδοτούνται σε ανεξάρτητη φάση. Η ακαριαία έναυση επιδρά αρνητικά στο περιβάλλον πέτρωμα, επειδή προξενεί ρωγμές και υπερεκσκαφή. Η έκταση του σχηματισμού ρωγμών στο πέτρωμα γύρω από την τελική περίμετρο είναι ανάλογη της συχνότητας ταλάντωσης των εδαφικών δονήσεων (Πολυχρονόπουλος, 1979).

Αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι η μέθοδος λείων τοιχωμάτων έχει εφαρμοστεί με επιτυχία και σε ανατινάξεις κοντά σε κτήρια με οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου τα διατρήματα είχαν διάμετρο 35 mm, απείχαν μεταξύ τους 20 cm και η εκρηκτική ύλη είχε τοποθετηθεί κάθε δεύτερο διάτρημα. Σε μια τέτοια όμως περίπτωση καλύτερα αποτελέσματα δίνει η μέθοδος πρότμησης ή οποία δεν αφήνει το κρουστικό κύμα να μεταβεί στο παραμένον πέτρωμα (Πολυχρονόπουλος, 1979).

### **Πλεονεκτήματα:**

- Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου παρατηρείται μείωση της υπέρθραυσης του πετρώματος.
- Μικρότερη απαίτηση για την στήριξη της οροφής και καμία ανασκαφή πριν από την εφαρμογή της.
- Επιπρόσθετα παρατηρείται μείωση του κόστους διάτρησης λόγω της αύξησης της απόστασης μεταξύ των διατρημάτων S (Khosrou, 1996).
- Καλύτερα αποτελέσματα σε διαβρωμένα πετρώματα (Khosrou, 1996).

- Δεν χρειάζεται η κύρια ανατίναξη να έχει πραγματοποιηθεί πριν από την εφαρμογή της μεθόδου λείων τοιχωμάτων (Khosrou, 1996).
- Οι γομώσεις που πραγματοποιούνται γίνονται ελαφριά και καλά κατανεμημένη γόμωση στα περιμετρικά διατρήματα (Khosrou, 1996).

#### **Μειονεκτήματα:**

- Η μέθοδος αυτή δεν είναι ικανή να εξαλείψει την πιθανότητα στήριξης και ειδικά σε κατακερματισμένα πετρώματα.
- Δυσχέρειες λόγω υπέρθραυσης παρατηρούνται σε πετρώματα με καλά αναπτυγμένη λεπτοπλακώδη διάστρωση της οποίας τα επίπεδα τέμνουν το μέτωπο της σήραγγας με μεγάλη κλίση (Τσουτρέλης, 2001).

Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι στις συγκρίσεις που γίνονται όσον αφορά την υπόγεια εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, χρησιμοποιούνται διατρήματα διαμέτρου μέχρι 64mm. Στην πράξη η μέγιστη διάμετρος είναι της τάξεως των 51 mm.

Στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύγκριση των παραμέτρων για κάθε μέθοδο ελεγχόμενης ανατίναξης που απαντήθηκαν στην βιβλιογραφία που εξετάστηκε και περαιτέρω ανάλυση των διαφορών των μεθόδων αυτών μεταξύ τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ

#### 5.1 Αναλυτική σύγκριση παραμέτρων που αφορούν την κάθε μέθοδο ελεγχόμενης ανατίναξης ξεχωριστά

##### 5.1.1 Μέθοδος πυκνής διάτρησης/διάτρηση γραμμής (line drilling)

Με βάση τον συνολικό όγκο δεδομένων που εξετάστηκε για πληροφορίες στην μέθοδο πυκνής διάτρησης παρατηρήθηκαν οι εξής διαφορές:

- Στο εύρος για την διάμετρο των διατρημάτων πυκνής διάτρησης (μέχρι 76 mm, 50-75 mm και 35-75 mm) παρόλο που χρησιμοποιούν την ίδια σχέση για τον υπολογισμό της απόστασης  $S$  μεταξύ των διατρημάτων μέσω της διαμέτρου.
- Στο βάθος διάτρησης των διατρημάτων της μεθόδου αυτής.
- Στο είδος της γόμωσης που έχουν προταθεί στην περίπτωση που τα διατρήματα είναι γομωμένα.

Σε προηγούμενη ενότητα (βλ. 4.4.1) που έχει περιγραφεί η μέθοδος πυκνής διάτρησης, έχει δοθεί μια σχέση για την απόσταση μεταξύ των διατρημάτων  $S$  και της διαμέτρου ( $S = k \cdot D$ ) όπου  $k$  μια σταθερά που παίρνει τιμές από 2 ως 4. Με την σχέση αυτή και με διαμέτρους που επιλέχτηκαν με βάση τη μέγιστη τιμή διάτρησης (76 mm) για την συγκεκριμένη μέθοδο και με τιμές που επιλέχτηκαν να είναι ίδιες με αυτές που περιέχονται στους πίνακες των υπολοίπων μεθόδων κατασκευάστηκε ο επόμενος πίνακας ώστε να γίνει σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

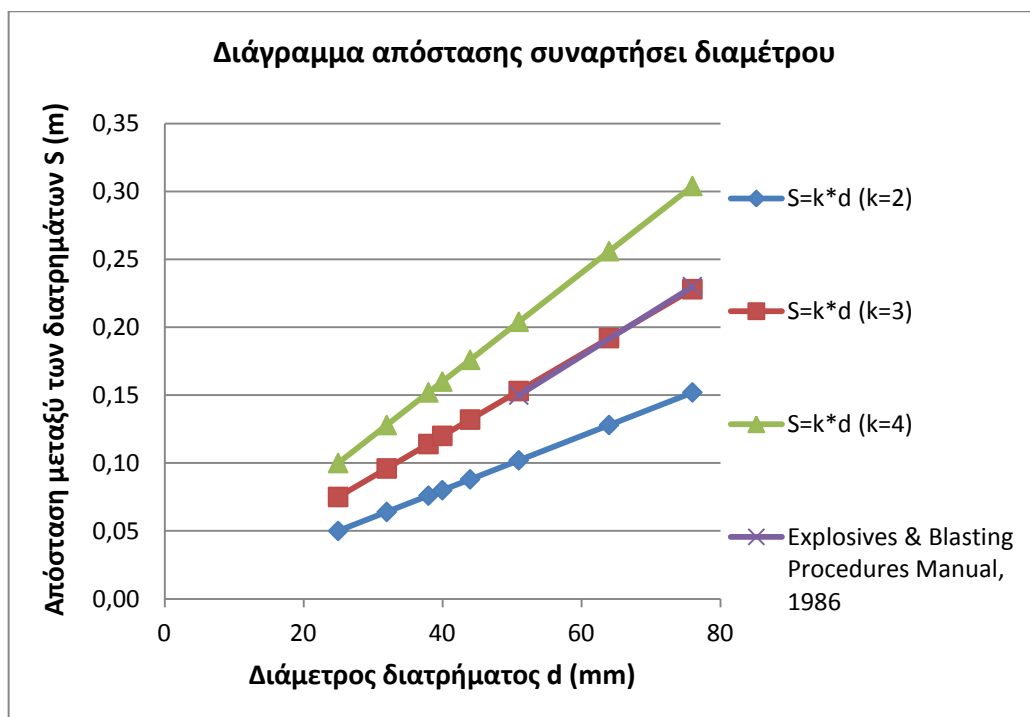


Πίνακας 5.1: Τιμές διαμέτρων και απόστασης για κάθε τιμή του k στην μέθοδο πυκνής διάτρησης.

d (mm)	S(m) για k=2	S(m) για k=3	S(m) για k=4
25	0,05	0,08	0,10
32	0,06	0,10	0,13
38	0,08	0,11	0,15
40	0,08	0,12	0,16
44	0,09	0,13	0,18
51	0,10	0,15	0,20
64	0,13	0,19	0,26
76	0,15	0,23	0,30

Πίνακας 5.2: Τιμές διαμέτρων και απόστασης για την μέθοδο πυκνής διάτρησης (Explosives & Blasting Procedures Manual, 1986)

d (mm)	S (m)
51	0,10-0,20
76	0,15-0,30



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα απόστασης S συναρτήσει της διαμέτρου d για την μέθοδο πυκνής διάτρησης βάσει πινάκων 5.1 και 5.2.

Από το σχήμα 5.1 μπορεί να παρατηρηθεί:

- Το εύρος της απόστασης  $S$  μεταξύ των διατρημάτων για τις συγκεκριμένες τιμές διαμέτρου που δίνονται. Η απόσταση  $S$  αυξάνεται γραμμικά με την διάμετρο σύμφωνα με την σχέση που δόθηκε παραπάνω.
- Ο πίνακας 5.2 ταυτίζεται πλήρως με τις τιμές του πίνακα 5.1 για  $k=3$ , για τις άλλες δύο τιμές του  $k$  η απόκλιση είναι εμφανής.

### 5.1.2 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting)

Σύμφωνα με τους διάφορους ερευνητές που εξετάστηκαν για την μέθοδο πρότμησης παρατηρήθηκαν οι εξής διαφορές:

- Το εύρος διαμέτρου διατρήματος πρότμησης δίνεται διαφορετικό από κάθε ερευνητή όπως έχουν αναφερθεί στην ενότητα 4.4.2 (30-64 mm, 51-125 mm, 51-127 mm και 50-100 mm).
- Δόθηκαν δύο διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό απόστασης συναρτήσει διαμέτρου, η μια εκ των οποίων έχει περιορισμό διαμέτρου μέχρι 100 mm.
- Στην επιβράδυνση που θα χρησιμοποιηθεί για την έναυση των διατρημάτων ταυτόχρονα με την κύρια ανατίναξη, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στις επικρατούσες συνθήκες σε κάθε περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου.

Στην συνέχεια παρατίθενται πίνακες με παραμέτρους για τον σχεδιασμό μιας ελεγχόμενης ανατίναξης πρότμησης, από τους οποίους δημιουργήθηκαν διαγράμματα για περαιτέρω σύγκριση των παραμέτρων αυτών.

## 1) Διαγράμματα σύγκρισης απόστασης S συναρτήσει διαμέτρου διατρημάτων d

Πίνακας 5.3: Τιμές παραμέτρων που αφορούν την γόμωση και την διάτρηση κατά την εφαρμογή της μεθόδου πρότμησης (Πολυχρονόπουλος, 1979).

d (mm)	Πυκνότητα γόμωσης (Ζελ. 20%) (kg/m)	Κατάλληλη εκρηκτική ύλη		Απόσταση διατρημάτων S (m)
		d	Είδος	
25-32	0,07	11	Gurit	0,20-0,30
25-32	0,16	17	Gurit	0,35-0,60
40	0,16	17	Gurit	0,35-0,50
51	0,32	2x17	Gurit	0,40-0,50
51	0,16	17	Gurit	0,40-0,50
64	0,36	22	Αμμωνίτες	0,60-0,80
76	0,5	25	Αμμωνίτες	0,65-0,90
85	0,7	25	Ζελ/δα 20%	0,70-1,00
100	0,9	28	Ζελ/δα 20%	0,80-1,20

Πίνακας 5.4: Τιμές παραμέτρων μεθόδου πρότμησης (Gustafsson 1981, Bhandari 1997).

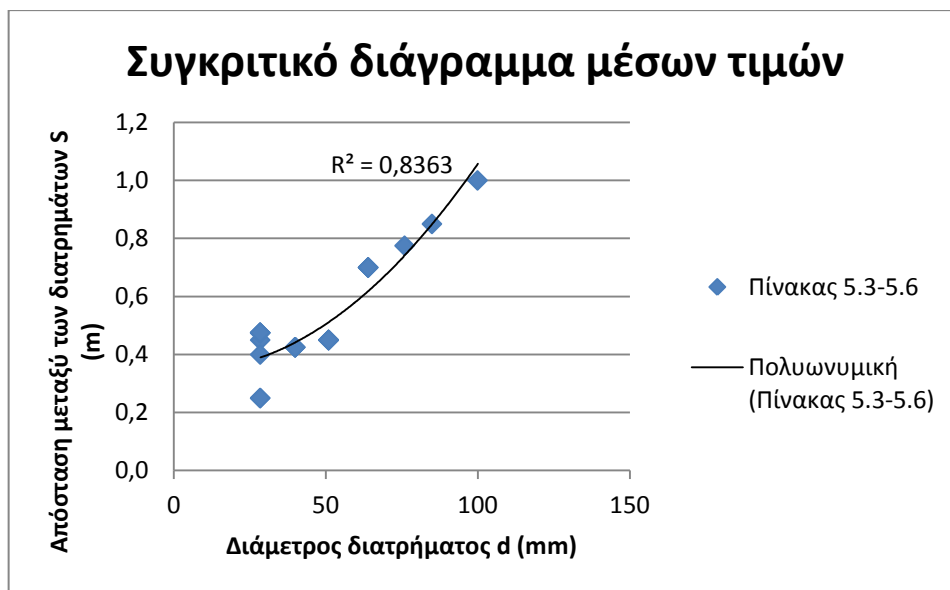
d(mm)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Τύπος γόμωσης	Απόσταση διατρημάτων S (m)
25-32	0,08	Detonating cord	0,30-0,60
25-32	0,30	Pipe charge 17mm	0,35-0,60
40	0,30	Pipe charge 17mm	0,35-0,50
51	0,60	Pipe charge 17mm	0,40-0,50
64	0,46	Charge 25mm	0,60-0,80

Πίνακας 5.5: Διάτρηση και γόμωση διατρημάτων πρότμησης (Swedish Blasting Technique 1973, Khosrou 1996).

d(mm)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Απόσταση διατρημάτων S (m)
25-32	0,07	0,20-0,30
25-32	0,16	0,35-0,60
40	0,16	0,35-0,50
51	0,32	0,40-0,50
51	0,16	0,40-0,50
64	0,36	0,60-0,80

Πίνακας 5.6: Παράμετροι σχεδιασμού ελεγχόμενης ανατίναξης με την μέθοδο πρότμησης (Gustafsson 1973, Τσουτρέλης 2001).

d(mm)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Είδος γόμωσης (mm)	Απόσταση διατρημάτων S (m)
25-32	0,07	11 Gurit	0,20-0,30
25-32	0,16	17 Gurit	0,35-0,60
40	0,16	17 Gurit	0,35-0,50
51	0,32	2x17 Gurit	0,40-0,50
64	0,36	22 Nabit	0,60-0,80



Σχήμα 5.2: Συγκριτικό διάγραμμα των μέσων τιμών S-d βάσει πινάκων 5.3-5.6.

Από τα δεδομένα των παραπάνω πινάκων και από το αντίστοιχο διάγραμμα, σχήμα 5.2 παρατηρείται ότι οι τιμές των διαμέτρων συναρτηθεί των αντίστοιχων αποστάσεων S ταυτίζονται. Συγκεκριμένα:

- Για εύρος τιμών διαμέτρου μεταξύ 25 και 64 mm οι τιμές των πινάκων 5.3, 5.4, 5.5 και 5.6 της απόστασης S είναι ίδιες.
- Στον πίνακα 5.3 επιπλέον γίνεται αναφορά για τιμές διαμέτρων άνω των 64 mm σε αντίθεση με τους υπόλοιπους. Από το σχήμα 5.2 παρατηρείται ότι για τιμές πέρα των 64 mm όσο αυξάνεται η διάμετρος αυξάνεται και η αντίστοιχη απόσταση S μεταξύ των διατρημάτων.
- Επίσης ο συντελεστής συσχέτισης είναι 84%, το οποίο υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3

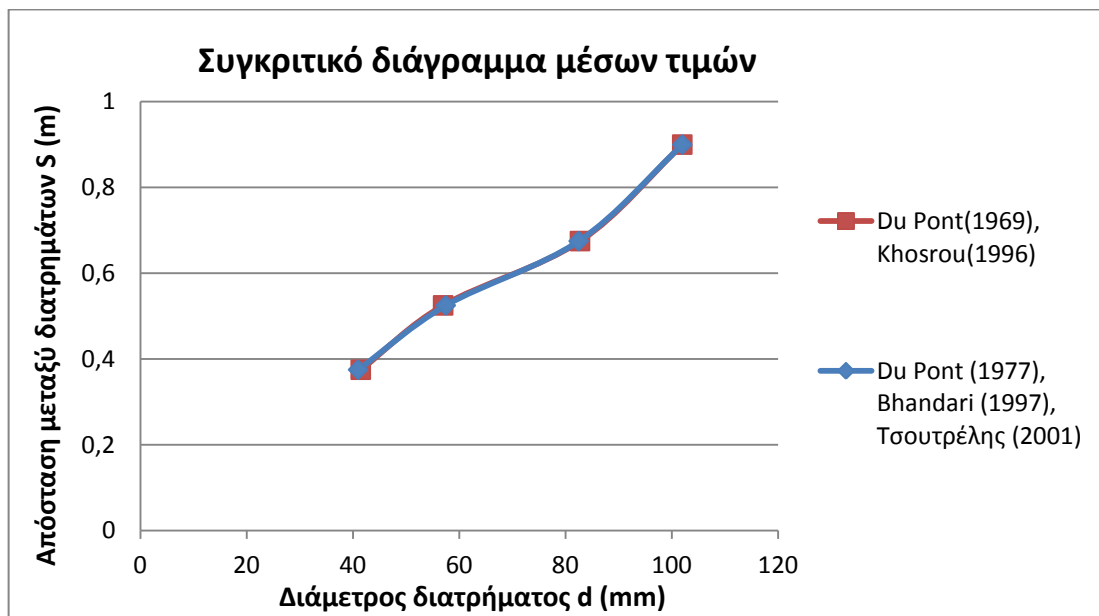
ως 5.6, έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.

Πίνακας 5.7: Παράμετροι μεθόδων πρότμησης (Du Pont 1977, Bhandari 1997, Τσουτρέλης 2001).

d (mm)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Απόσταση διατρημάτων S (m)
38-44	0,12-0,38	0,30-0,45
51-64	0,12-0,38	0,45-0,60
76-89	0,20-0,75	0,45-0,90
102	0,38-1,12	0,60-1,20

Πίνακας 5.8: Τυπικοί παράμετροι για τον σχεδιασμό της μέθοδο πρότμησης (Du Pont 1969, Khosrou 1996).

d(mm)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Απόσταση διατρημάτων S (m)
38-45	0,08-0,25	0,30-0,45
51-63	0,08-0,25	0,45-0,60
76,5-89	0,14-0,50	0,45-0,90
102	0,25-0,75	0,60-1,20



Σχήμα 5.3: Συγκριτικό διάγραμμα των μέσων τιμών S-d για την μέθοδο πρότμησης βάσει πινάκων 5.7 και 5.8.

Από τους πίνακες 5.7 και 5.8 και το γράφημα του σχήματος 5.3 οι τιμές των διαμέτρων με τις αντίστοιχες αποστάσεις είναι ακριβώς ίδιες. Το διάγραμμα όμως του σχήματος 5.2 με τον αντίστοιχο στο σχήμα 5.3 διαφέρουν ως προς το εύρος των τιμών των διαμέτρων. Όσον αφορά το διάγραμμα 5.3 οι τυπικές μέσες τιμές των διαμέτρων ξεκινούν από τα 41 mm ως και τα 89 mm. Για το σχήμα 5.2 ξεκινούν από τα 28,5 mm έως και 64 mm με εξαίρεση τον πίνακα 5.3.

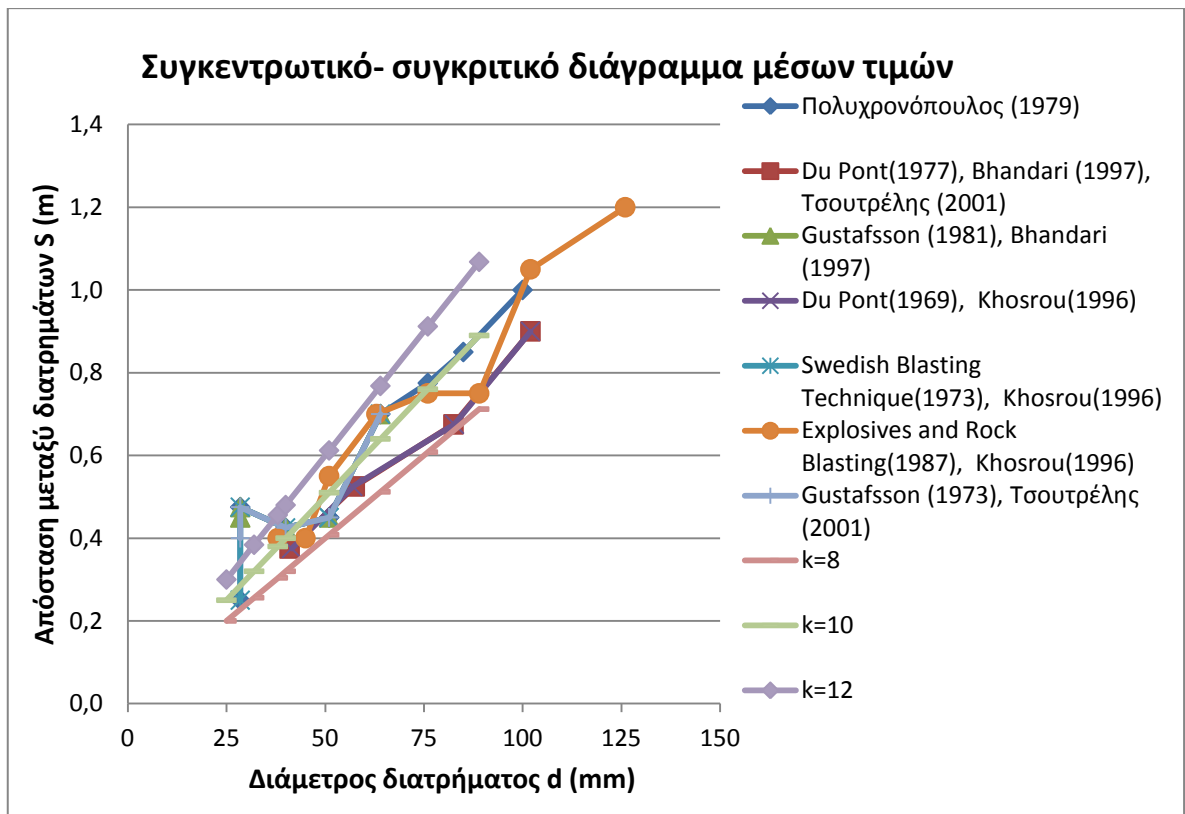
Πίνακας 5.9: Διάτρηση και γόμωση των διατρημάτων της μεθόδου πρότμησης (Explosives and Rock Blasting 1987, Khosrou 1996).

d(mm)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Απόσταση διατρημάτων S (m)
38	0,13	0,30-0,50
45	0,16	0,30-0,50
51	0,25	0,50-0,60
63	0,35	0,60-0,80
76	0,52	0,60-0,90
89	0,75	0,60-0,90
102	0,90	0,90-1,20
126	1,40	0,90-1,50

Ακόμα δημιουργήθηκε ο πίνακας 5.10 με βάση διαμέτρους που έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενους πίνακες και με τον τύπο  $S = (8-12) \cdot d$ .

Πίνακας 5.10: Τιμές απόστασης S συγκεκριμένες διαμέτρους από τον τύπο που αναφέρθηκε παραπάνω.

d(mm)	Απόσταση διατρημάτων S (m) για k=8	Απόσταση διατρημάτων S (m) για k=10	Απόσταση διατρημάτων S (m) για k=12
25	0,20	0,25	0,30
32	0,26	0,32	0,38
38	0,30	0,38	0,46
40	0,32	0,40	0,48
51	0,41	0,51	0,61
64	0,51	0,64	0,77
76	0,61	0,76	0,91
89	0,71	0,89	1,07



Σχήμα 5.4: Συγκεντρωτικό - συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών για την μέθοδο πρότμησης βάσει πινάκων 5.3-5.10.

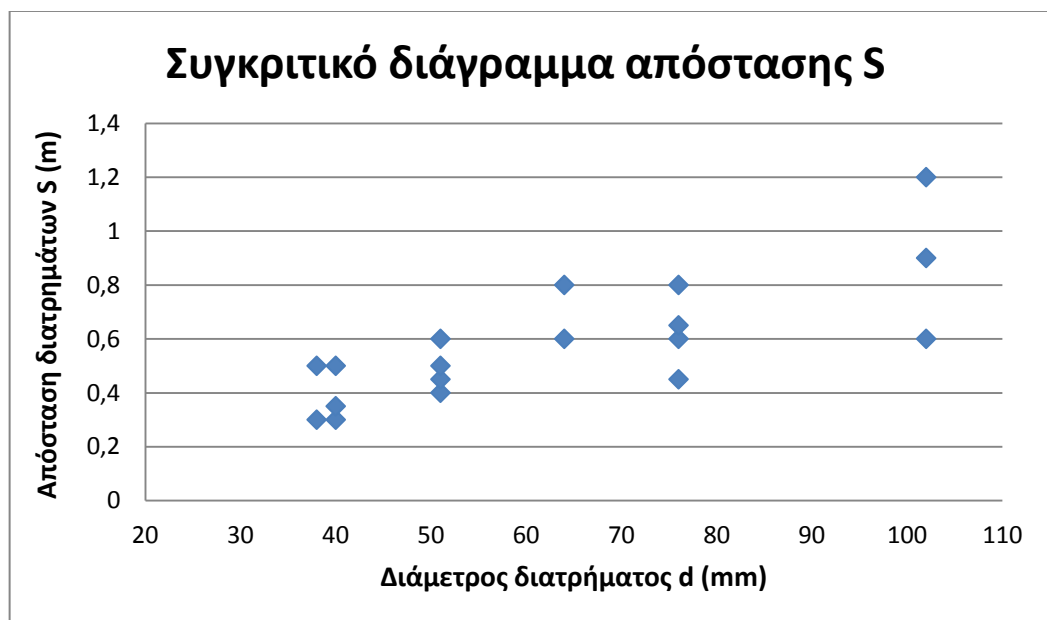
Σύμφωνα με το γράφημα του σχήματος 5.4 παρατηρείται:

- Ότι οι τιμές συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των πινάκων 5.7 και 5.8 για μέση τιμή διαμέτρου 82,5 mm και 57 mm παρουσιάζουν μια μικρή απόκλιση σε σχέση με τις μέσες τιμές των υπόλοιπων πινάκων.
- Για διαμέτρους μεγαλύτερες των 102 mm παρατηρείται αύξηση της απόστασης S μεταξύ των διατρημάτων όσο αυξάνεται και η διάμετρος των διατρημάτων.
- Οι τιμές που δίνουν οι πίνακες παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση με τις θεωρητικές τιμές για  $k = 10$ , που προήλθαν από την εξίσωση και σε αντίθεση με τις άλλες τιμές του  $k$  όπου η απόκλιση αυξάνεται.
- Οι παραπάνω πίνακες έχουν κάποιες κοινές τιμές διαμέτρων διατρήματος αλλά με μια διαφοροποίηση στην τιμή της απόστασης S οι οποίες παρουσιάζονται στο πίνακα 5.11. Πιο αναλυτικά, στον πίνακα αυτό παρατηρείται ότι για συγκεκριμένη διάμετρο η απόσταση S σε ένα πίνακα ή

δεν συμπίπτει με την αντίστοιχη σε κάποιον άλλο ή δεν είναι μέσα στο εύρος τιμών των υπόλοιπων πινάκων ή θα δίνονται διαφορετικά εύρη τιμών.

Πίνακας 5.11: Συγκριτικός πίνακας απεικόνισης απόστασης  $S$  για συγκεκριμένες τιμές διαμέτρων διατρημάτων πρότμησης.

A/A	Διάμετρος διατρήματος $d$ (mm)	Απόσταση $S$ (m)
Πίνακας 5.6 και 5.7	38	0,30
Πίνακας 5.7		0,30-0,50
Πίνακας 5.4 και 5.5	40	0,35-0,50
Πίνακας 5.3 και 5.6		0,30-0,50
Πίνακας 5.3 ως 5.6	51	0,40-0,50
Πίνακας 5.7 και 5.8		0,45
Πίνακας 5.9		0,50-0,60
Πίνακας 5.3 ως 5.6	64	0,60-0,80
Πίνακας 5.7		0,60
Πίνακας 5.3	76	0,65-0,90
Πίνακας 5.7		0,45
Πίνακας 5.9		0,60-0,90
Πίνακας 5.7 και 5.8	102	0,60-1,20
Πίνακας 5.9		0,90-1,20



Σχήμα 5.5: Συγκριτικό διάγραμμα απόστασης  $S$  για συγκεκριμένη τιμή διαμέτρου διατρήματος με βάση τον πίνακα 5.11.



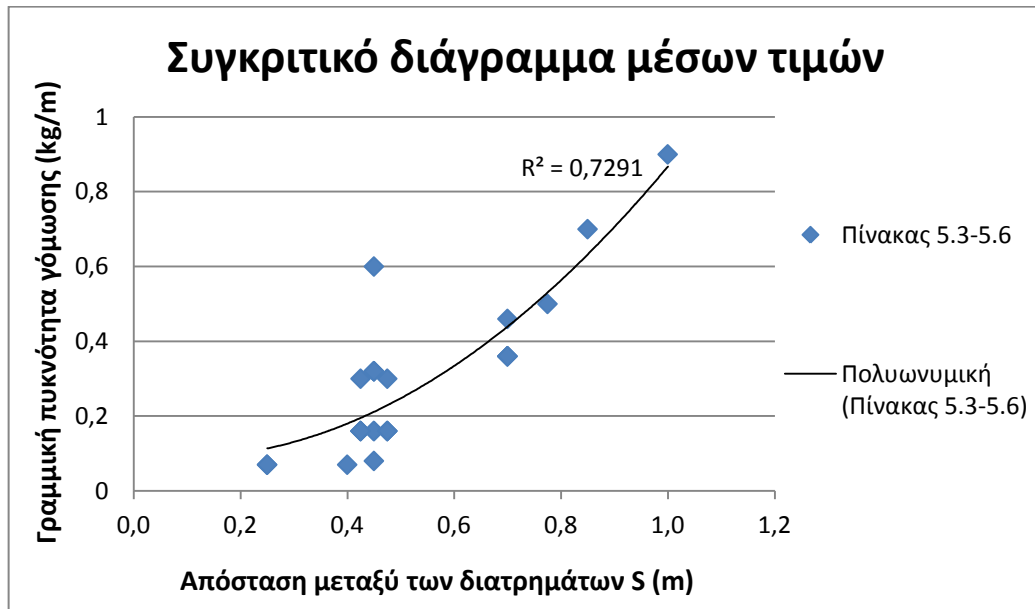
## 2) Διαγράμματα σύγκρισης γραμμικής πυκνότητας γόμωσης συναρτήσει απόσταση διατηρημάτων S.

Από τα δεδομένα των πινάκων και από το διάγραμμα του σχήματος 5.6 προέκυψαν τα εξής:

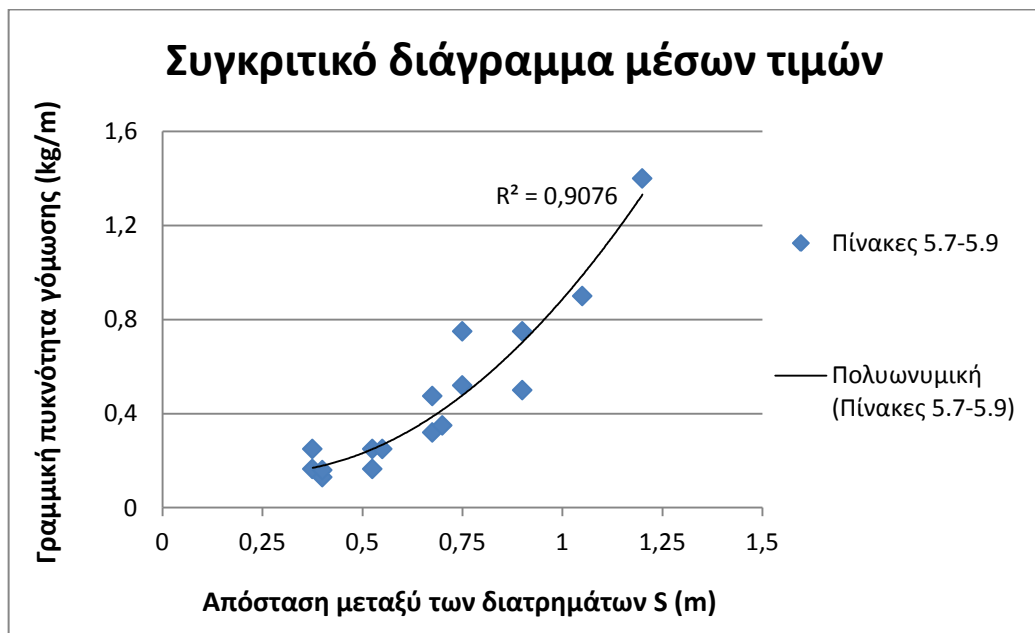
- Στον πίνακα 5.3 παρατηρείται μια παράλληλη αύξηση της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης και της απόστασης S.
- Στον πίνακα 5.4 παρατηρείται μία έντονη αυξομείωση των μέσων τιμών απόστασης και γόμωσης. Συγκεκριμένα, για μέσες αποστάσεις 0,48 m και 0,43 m η γραμμική πυκνότητα γόμωσης ( τιμή και είδος ) είναι ίδια για διαμέτρους 25-32 και 40 mm αντίστοιχα. Για την μέση απόσταση των 0,45 m όμως, παρατηρείται μια απότομη αύξηση της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης. Στην συνέχεια υπάρχει μια αύξηση της τιμής της απόστασης παράλληλα με την αύξηση της πυκνότητας.
- Στον πίνακα 5.5 επίσης παρατηρείται μια αυξομείωση των τιμών σε μικρότερο βαθμό από την προηγούμενη. Καταρχάς δίνεται ίδια γόμωση για μέσες αποστάσεις 0,48, 0,43 και 0,45 m οι οποίες όμως αναφέρονται σε διαφορετική διάμετρο (25-32, 40 και 51 mm αντίστοιχα). Επίσης στα 51 mm δίνονται δύο εναλλακτικές γόμωσης με ίδια μέση τιμή απόστασης S. Οι τιμές αυτού του πίνακα συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με τις αντίστοιχες του πίνακα 5.4.
- Στον πίνακα 5.6 παρατηρείται μια αυξομείωση των μέσων τιμών της απόστασης S. Συγκεκριμένα για τις μέσες αποστάσεις 0,48 και 0,43 m η γόμωση είναι ίδια (ποσότητα και είδος) παρόλο που αναφέρονται σε διαφορετικές μέσες τιμές διαμέτρων (25-32 και 40 mm αντίστοιχα). Στην συνέχεια η γόμωση αυξάνεται παράλληλα με την απόσταση S και αλλάζει το είδος της γόμωσης.
- Επίσης ο συντελεστής συσχέτισης είναι 73%, το οποίο υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3 ως 5.6, έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των τιμών των παραμέτρων που παρουσιάζονται στους πίνακες εντοπίστηκε σε αποστάσεις από 0,40 έως 0,50 m για τις διαφορετικές τιμές γόμωσης που δίνεται από το καθένα. Πιθανόν

αυτή η διαφορά να οφείλεται στον διαφορετικό είδος γόμωσης που χρησιμοποιείται. Για το είδος και τα χαρακτηριστικά του πετρώματος δεν μπορεί να γίνει λόγος αφού στους πίνακες δεν γίνεται αναφορά για τις ιδιότητες του πετρώματος.



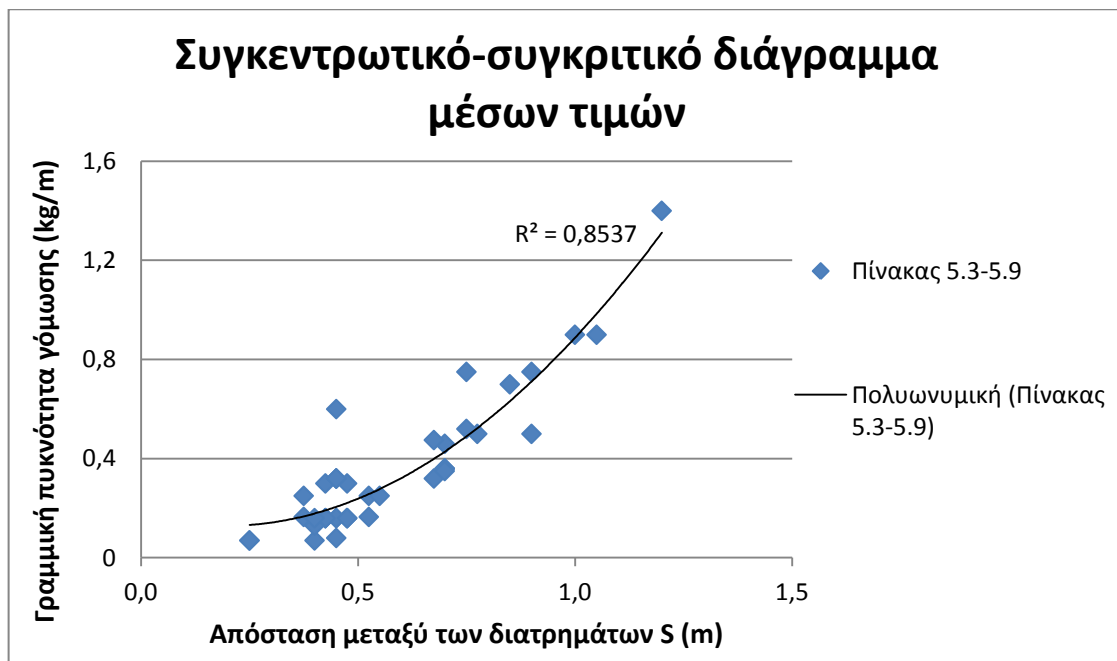
Σχήμα 5.6: Συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών γραμμικής γόμωσης και απόστασης για την μέθοδο της πρότμησης με βάση τους πίνακες 5.3 ως 5.6.



Σχήμα 5.7: Συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών γραμμικής πυκνότητας γόμωσης και απόστασης για την μέθοδο πρότμησης με βάση τους πίνακες 5.7 ως 5.9.

Από το σχήμα 5.7 και από τους πίνακες 5.7-5.9 παρατηρείται ο συσχετισμός απόστασης  $S$  και γραμμικής πυκνότητας γόμωσης, δηλαδή:

- Οι τιμές των παραμέτρων που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.7 και 5.9 παρουσιάζουν παρόμοια αύξηση με μια μικρή απόκλιση στην γραμμική πυκνότητα γόμωσης.
- Ο πίνακας 5.8 για μέσες τιμές απόστασης μέχρι και 0,75 m παρουσιάζει μικρή απόκλιση σε σχέση με τους άλλους δύο πίνακες. Για μέσες τιμές απόστασης  $S$  από 1,0 m και άνω είναι ο μόνος πίνακας που δίνει δεδομένα για την γραμμική πυκνότητα γόμωσης.
- Με βάση τον συντελεστή συσχέτισης του διαγράμματος (91%) ο οποίος υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.7 ως 5.9 έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.



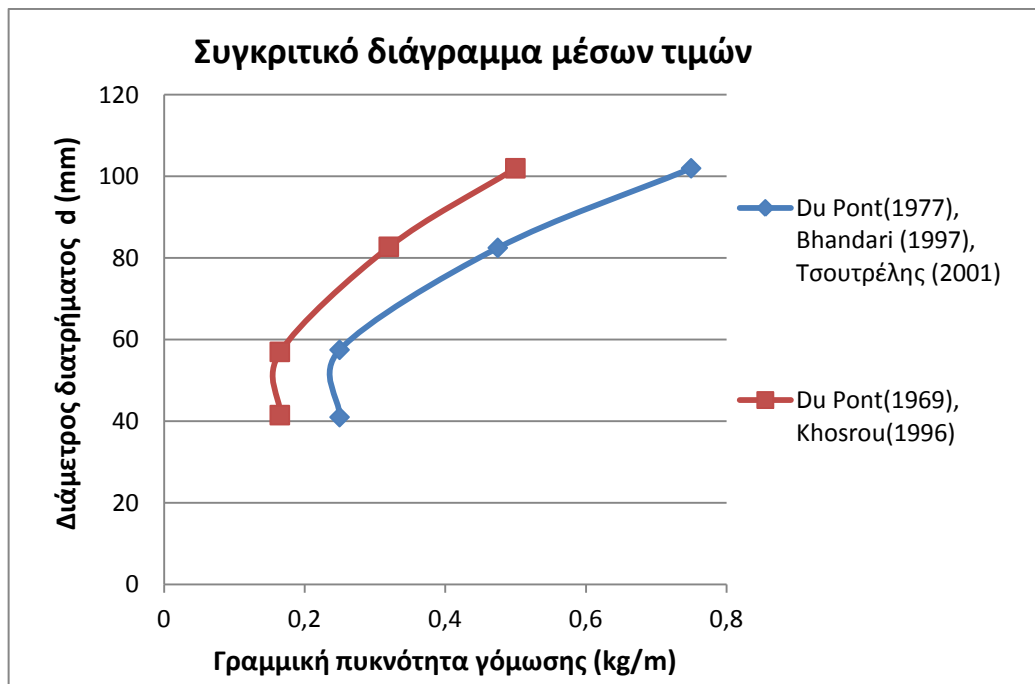
Σχήμα 5.8: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών απόστασης και γραμμικής πυκνότητας γόμωσης (βάσει πινάκων 5.3 ως και 5.9).

Από τους πίνακες 5.3-5.9 και από το σχήμα 5.8 όπου είναι συγκεντρωμένες όλες οι τιμές των παραμέτρων από τους πίνακες που αφορούν την μέθοδο πρότμησης (pre-splitting). Συγκεκριμένα:

- Παρατηρούνται συγκεντρωτικά οι διαφορές που υπήρχαν στις τιμές της γραμμικής γόμωσης για μέσες αποστάσεις 0,43 ως 0,48 m από τους πίνακες.
- Επίσης παρατηρούνται οι αποκλίσεις στις μέσες τιμές της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης για μέσες αποστάσεις άνω των 0,75 m από τους πίνακες που δίνουν στοιχεία για τέτοιες τιμές.
- Ο συντελεστής συσχέτισης που προέκυψε (85,37%) υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3 ως 5.9 έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.

### 3) Διαγράμματα σύγκρισης διαμέτρου διατρημάτων $d$ συναρτήσει γραμμικής πυκνότητας γόμωσης.

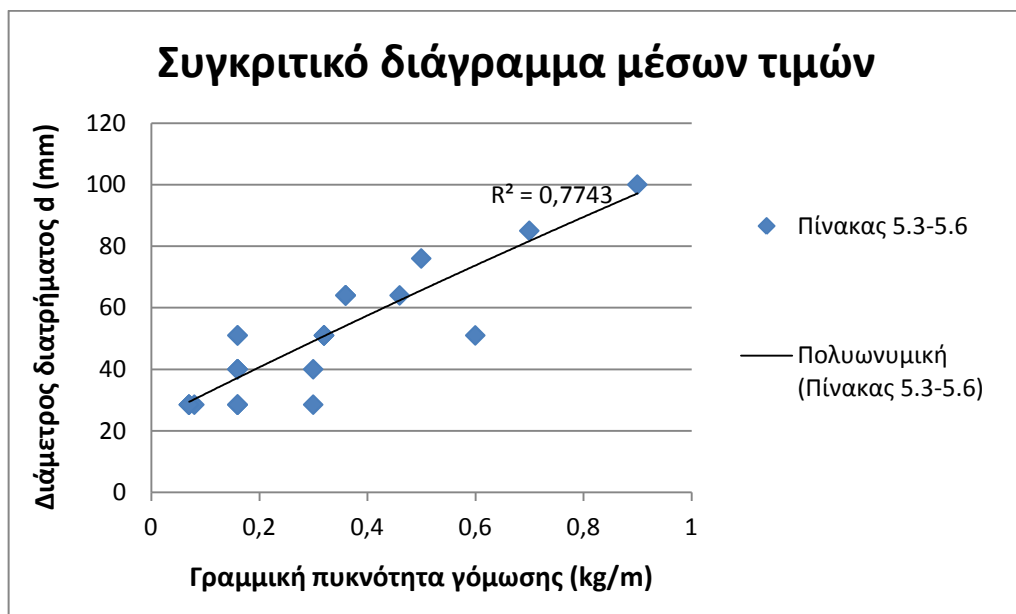
Για τα διαγράμματα που προκύπτουν παρακάτω έχουν χρησιμοποιηθεί οι παραπάνω πίνακες (5.3-5.9).



Σχήμα 5.9: Συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών γραμμικής πυκνότητας γόμωσης και διάμετρο διατρήματος πρότμησης βάσει πινάκων 5.7 και 5.8.

Από το γράφημα του σχήματος 5.9 παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Για ίδια διάμετρο διατρήματος χρησιμοποιείται διαφορετική γραμμική πυκνότητα γόμωσης στους δύο πίνακες.
- Στα δεδομένα του πίνακα 5.7 δίνεται μεγαλύτερη γραμμική πυκνότητα γόμωσης σε σχέση με αυτά του 5.8.
- Για μέση τιμή διαμέτρου 57,5 mm και άνω η γραμμική πυκνότητα γόμωσης αυξάνεται παράλληλα με τη διάμετρο. Από την τιμή των 57,5 mm και κάτω η γραμμική πυκνότητα γόμωσης παραμένει ως επί το πλείστον σταθερή.



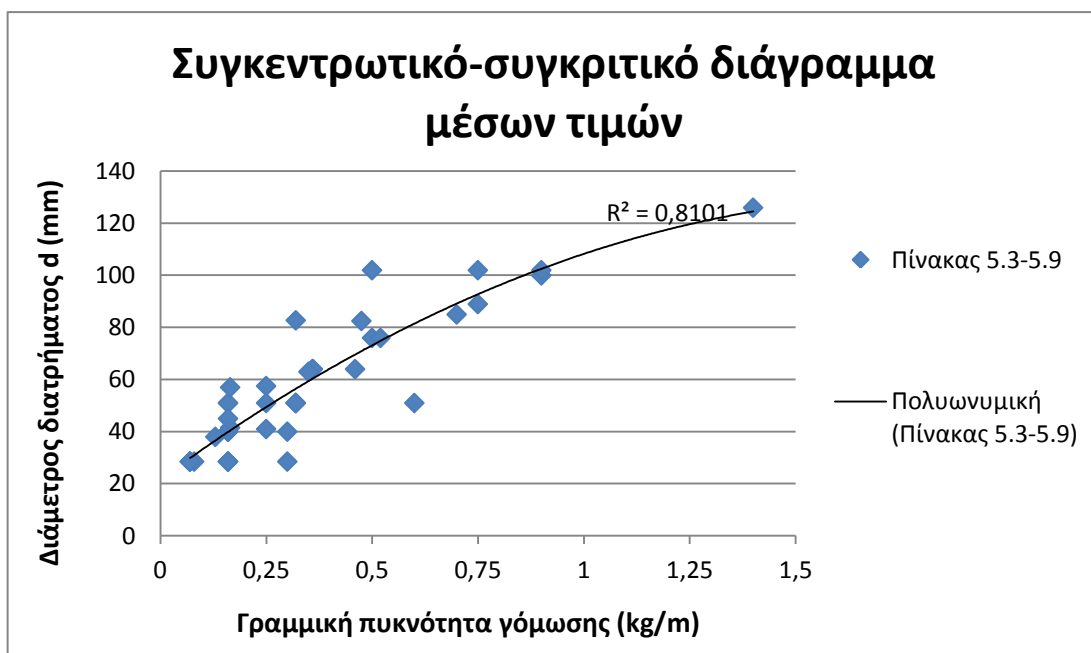
Σχήμα 5.10: Συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών γραμμικής πυκνότητας γόμωσης και διάμετρο διατρήματος πρότμησης βάσει πινάκων 5.3 ως 5.6.

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.10) και από τους πίνακες είναι σαφές ότι:

- Τα στοιχεία του πίνακα 5.3 (οι μέσες τιμές της διαμέτρου των διατρημάτων πρότμησης και της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης) ταυτίζονται με τα στοιχεία του πίνακα 5.5 μέχρι την τιμή της διαμέτρου των 64 mm. Από τα 64 mm και άνω μόνο ο πίνακας 5.3 περιλαμβάνει στοιχεία με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει σύγκριση τιμών μέχρι στιγμής.
- Ο πίνακας 5.6 ταυτίζεται ικανοποιητικά με τους πίνακες 5.5 και 5.4 με την διαφορά όμως ότι δεν δίνει δύο τυπικές τιμές γόμωσης για την διάμετρο των 51 mm όπως στους άλλους δύο. Οι πίνακες αυτοί δίνουν για 51 mm μια

επιπλέον τιμή γόμωσης (0,32 kg/m), όπου είναι και το μοναδικό σημείο που παρεκκλίνουν οι τρεις αυτοί πίνακες στο διάγραμμα.

- Οι μέσες τιμές της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης που αντιστοιχούν σε κάθε μέση τιμή των διαμέτρων του πίνακα 5.4 αποκλίνουν σημαντικά από τις τιμές των υπολοίπων πινάκων. Η γόμωση που προτείνεται από τον πίνακα αυτό είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τους υπόλοιπους.
- Με 77,43% συντελεστή συσχέτισης υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3 ως 5.6 έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.



Σχήμα 5.11: Συγκεντρωτικό - συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών για την μέθοδο πρότμησης βάσει πινάκων 5.3-5.9.

Από το συγκεντρωτικό – συγκριτικό διάγραμμα του σχήματος 5.11 και από τους πίνακες 5.3-5.9 γίνεται αντιληπτό ότι:

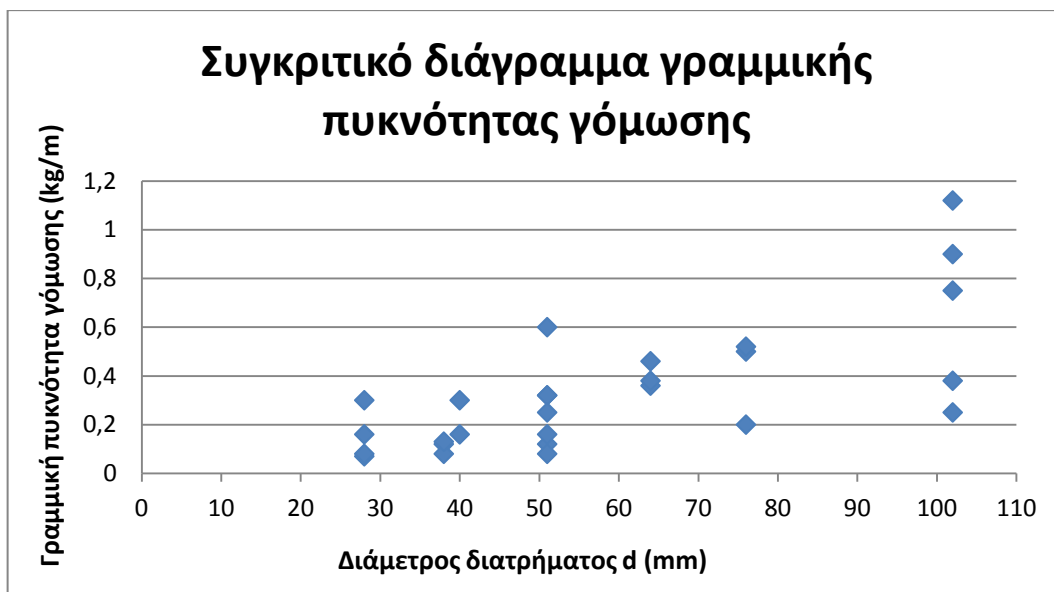
- Οι (μέσες) τιμές των πινάκων 5.3, 5.5, 5.6 και 5.9 ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό για τιμή διαμέτρου μέχρι 64 mm. Όμως για μέση διάμετρο μεγαλύτερη των 102 mm παρέχει μόνο ο πίνακας 5.9, που παρατηρείται παράλληλη αύξηση της τιμής της διαμέτρου και της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης.
- Οι μέσες τιμές των πινάκων 5.7 και 5.8 ταυτίζονται σε μικρότερο βαθμό με τους πίνακες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα παρατηρείται διαφορετική μέση τιμή γραμμικής πυκνότητας γόμωσης για μέση τιμή διαμέτρου 82,5 mm και 102 mm σε σχέση με τον πίνακα 5.3 και 5.9 αντίστοιχα.
- Όμως οι τιμές του πίνακα 5.4 δεν ταυτίζονται σε σημαντικό βαθμό με τους υπόλοιπους πίνακες. Παρατηρείται ότι για μέσες τιμές διαμέτρων αντιστοιχούν λίγο μεγαλύτερες μέσες τιμές γραμμικής πυκνότητας γόμωσης σε σύγκριση με τους υπόλοιπους πίνακες.
- Με 81,01% συντελεστή συσχέτισης υποδηλώνεται ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3 ως 5.9 έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.

Στον πίνακα 5.12 παραθέτονται αναλυτικά οι διαφορές που εντοπίστηκαν στις τιμές της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης σε όλους τους πίνακες για συγκεκριμένη διάμετρο. Γενικά από τον πίνακα αυτό είναι σαφές ότι υπάρχουν αξιόλογες διαφορές στις τιμές της γόμωσης που δίνονται αλλά και μικρότερες διαφορές.

Πίνακας 5.12: Συγκριτικός πίνακας απεικόνισης γραμμικής πυκνότητας γόμωσης (kg/m) για συγκεκριμένες τιμές διαμέτρων διατρημάτων πρότμησης.

A/A	Διάμετρος διατρήματος d (mm)	Γραμμική πυκνότητα γόμωσης (kg/m)
Πίνακας 5.3, 5.5 και 5.6	25-32	0,07 και 0,16
Πίνακας 5.4		0,08 και 0,30
Πίνακας 5.7	38	0,12
Πίνακας 5.8		0,08
Πίνακας 5.9		0,13
Πίνακας 5.3, 5.5 και 5.5	40	0,16
Πίνακας 5.4		0,30
Πίνακας 5.3 και 5.5	51	0,32 και 0,16
Πίνακας 5.4		0,60
Πίνακας 5.6		0,32
Πίνακας 5.7		0,12
Πίνακας 5.8		0,08
Πίνακας 5.9		0,25
Πίνακας 5.3, 5.5 και 5.6	64	0,36
Πίνακας 5.4		0,46
Πίνακας 5.7		0,38
Πίνακας 5.3	76	0,50
Πίνακας 5.9		0,52
Πίνακας 5.7		0,20
Πίνακας 5.7	102	0,38-1,12
Πίνακας 5.9		0,90
Πίνακας 5.8		0,25-0,75





Σχήμα 5.12: Συγκριτικό διάγραμμα γραμμικής πυκνότητας γόμωσης για συγκεκριμένη τιμή διαμέτρου διατρήματος με βάση τον πίνακα 5.12.

### 5.1.3 Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting)

Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν κατά τους ερευνητές για την μέθοδο απαλής ανατίναξης είναι οι εξής:

- Διαφορετικό εύρος διαμέτρου διατρήματος (100-175 mm, 50-165 mm).
- Στο βάθος που θα επιτευχθεί διάτρηση διατρήματος.
- Στην διάμετρο των προτεινόμενων φυσιγγίων, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στις επικρατούσες συνθήκες και
- στην σχέση που υπολογίζει την επιτρεπόμενη τιμή του φορτίου B σε σχέση με την απόσταση S (βλ ενότητα 4.4.4).

Στην συνέχεια με βοήθεια διαγραμμάτων θα συγκριθούν τα δεδομένα που δίνουν οι πίνακες από διαφορετικούς ερευνητές.

Πίνακας 5.13: Τιμές των παραμέτρων στην μέθοδο απαλής ανατίναξης (Du Pont 1977, Τσουτρέλης 2001).

d(mm)	Απόσταση S(m)	Φορτίο B(m)	Πυκνότητα γόμωσης (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	1,50-2,20

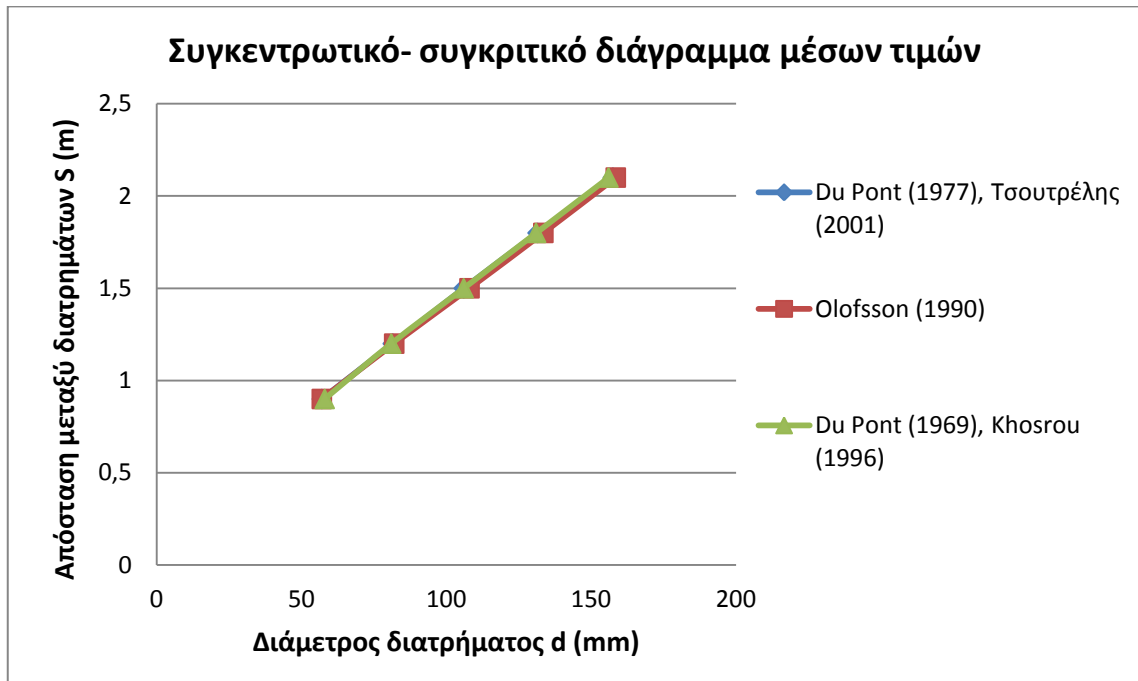
Πίνακας 5.14: Προτεινόμενες τιμές για διάτρηση και γόμωση σχεδίου απαλής ανατίναξης (Olofsson, 1990).

d(mm)	Απόσταση S(m)	Φορτίο B(m)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)
50-64	0,9	1,2	0,12-0,35
75-89	1,2	1,5	0,20-0,70
102-114	1,5	1,8	0,35-1,10
127-140	1,8	2,1	1,10-1,50
152-165	2,1	2,7	1,50-2,20

Πίνακας 5.15: Τιμές παραμέτρων στην μέθοδο απαλής ανατίναξης (Du Pont 1969, Khosrou 1996).

d(mm)	Απόσταση S(m)	Φορτίο B(m)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Προτεινόμενος τύπος γόμωσης
51-65	0,9	1,2	0,12-0,38	Em 150, DxM, 25mm
75-87	1,2	1,5	0,13-0,75	Em 150, DxM, 32mm
100-112	1,5	1,8	0,38-1,13	Em 150, DxM, 32mm denser charged
125-137	1,8	2,1	1,13-1,5	Em 150, DxM, 55mm
150-162	2,1	3,2	1,50-2,25	Em 150, DxM, 65mm

## 1) Διάγραμμα σύγκρισης απόστασης S συναρτήσει διαμέτρου διατρημάτων d.



Σχήμα 5.13: Συγκεντρωτικό- συγκριτικό διάγραμμα μέσω τιμών απόστασης και διαμέτρου διατρήματος απαλής ανατίναξης με βάση τους πίνακες 5.13 ως και 5.15.

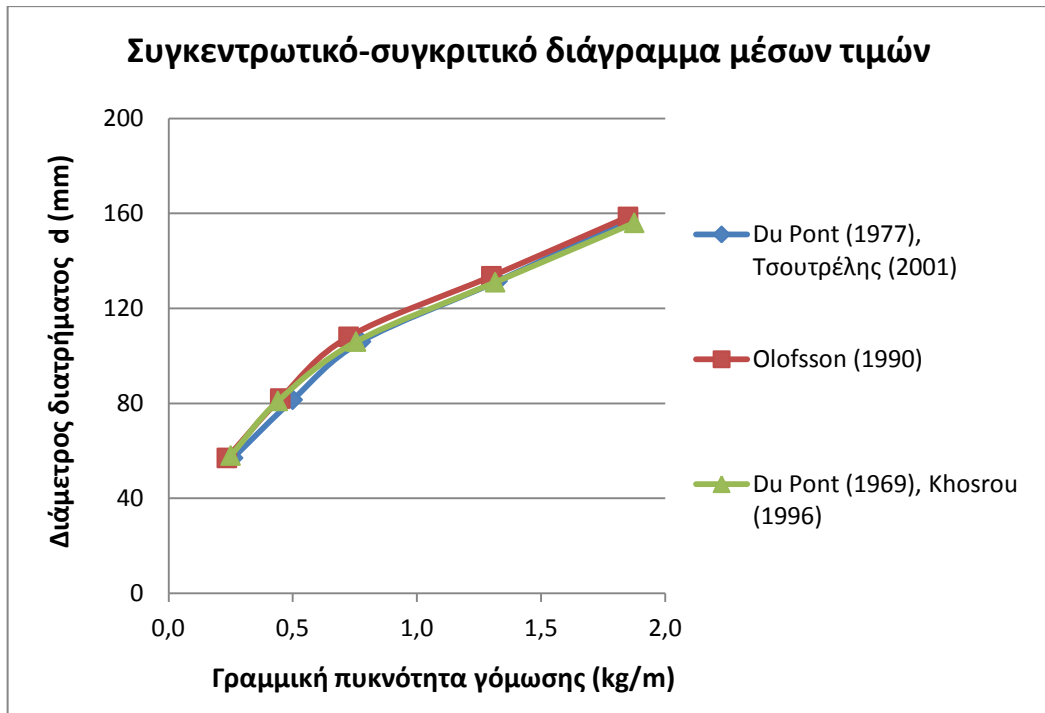
Με βάση το σχήμα 5.13 παρατηρείται ότι:

- Οι μέσες τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων από τους πίνακες 5.13, 5.14 και 5.15 συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό.
- Οι αποστάσεις που δίνονται από τους πίνακες είναι ίδιες για τις διαμέτρους των διατρημάτων απαλής ανατίναξης, με μια απόκλιση στις μέσες τιμές των διαμέτρων της τάξης των 3 mm.

## 2) Διάγραμμα σύγκρισης διαμέτρου διατρημάτων d συναρτήσει γραμμικής πυκνότητας γόμωσης.

Από το παρακάτω λοιπόν διάγραμμα (σχήμα 5.14) παρατηρείται ότι:

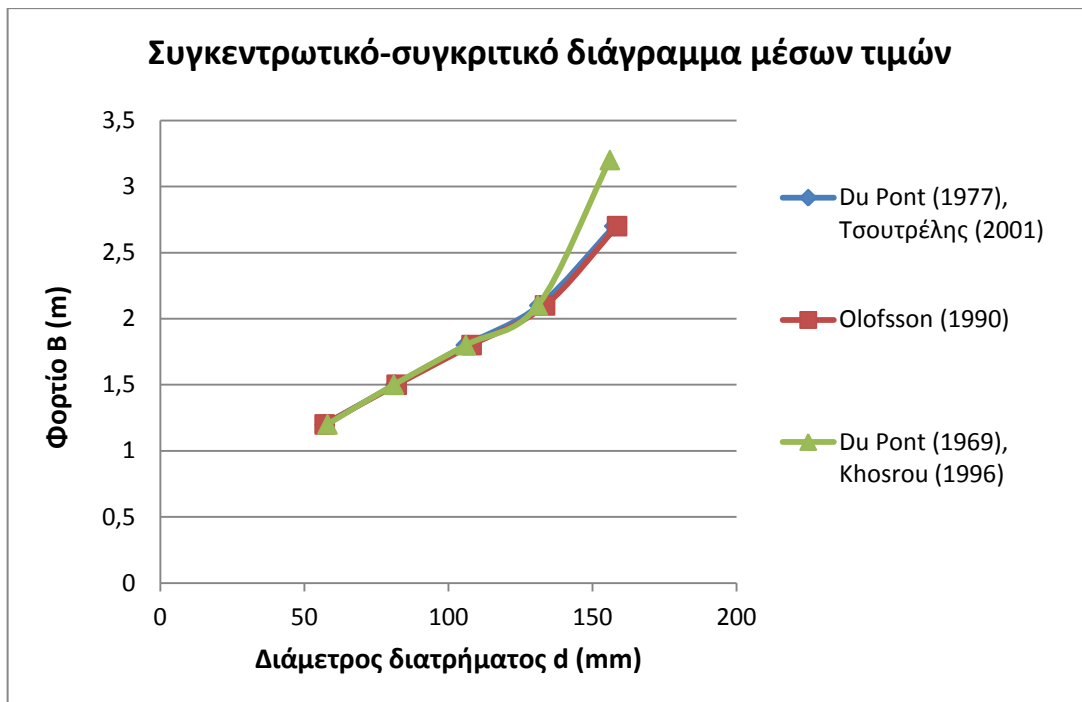
- Οι μέσες τιμές των παραμέτρων από τους πίνακες συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό.
- Ο Olofsson (1990) (πίνακας 5.14), δίνει λίγο μεγαλύτερες τιμές διαμέτρων σε σύγκριση με τους υπόλοιπους.



Σχήμα 5.14: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών d-πυκνότητας γόμωσης για την μέθοδο απαλής ανατίναξης βάσει πινάκων 5.13 ως και 5.15.

### 3) Διάγραμμα σύγκρισης φορτίου B συναρτήσει διαμέτρου διατρημάτων d.

Οι μέσες τιμές της διαμέτρου διατρήματος απαλής ανατίναξης d και του φορτίου B από τους πίνακες 5.13 έως 5.15 συμπίπτουν απόλυτα, όπως παρατηρείται και στο σχήμα 5.15, εκτός από την τιμή του φορτίου του πίνακα 5.15 για εύρος διαμέτρου διάτρησης 150-162 mm που παρατηρείται μια απόκλιση της τάξης του 0,5 m σε σύγκριση με τους άλλους δύο.



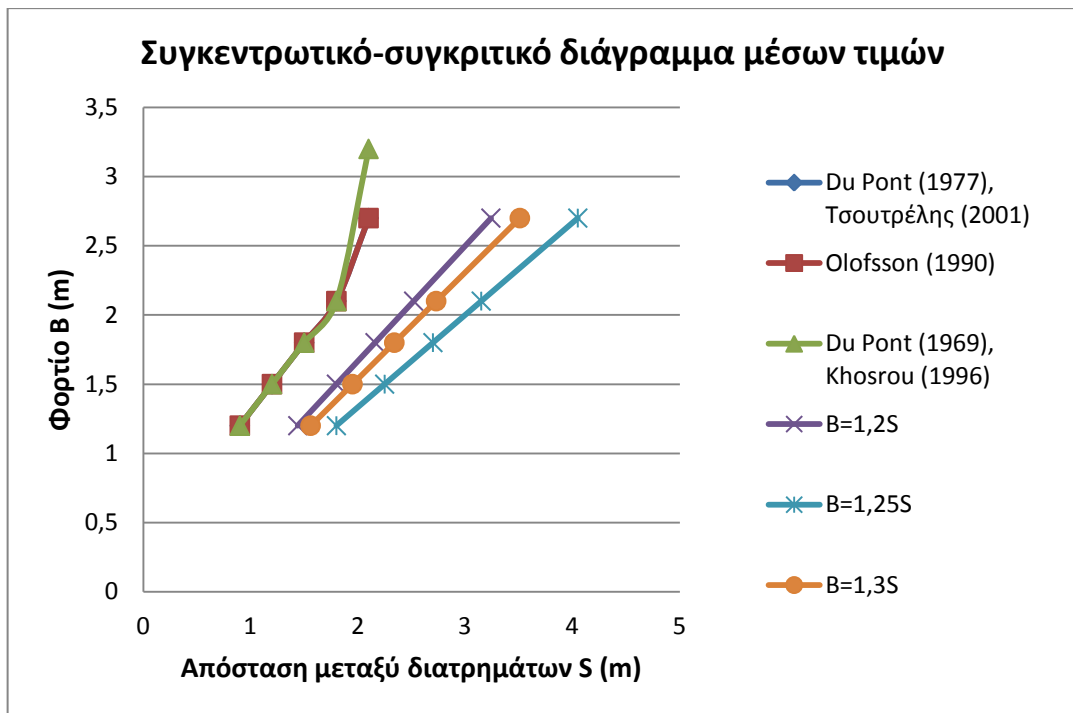
Σχήμα 5.15: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών διαμέτρου διατρήματος και φορτίου για την μέθοδο απαλής ανατίναξης βάσει πινάκων 5.13 ως και 5.15.

#### 4) Διάγραμμα σύγκρισης φορτίου B συναρτήσει απόστασης μεταξύ των διατρημάτων S.

Σε προηγούμενη ενότητα, που περιγράφεται η μέθοδος απαλής ανατίναξης έχει αναφερθεί η σχέση μεταξύ απόστασης και φορτίου  $[B=(1,2-1,3) \cdot S]$ . Βάσει λοιπόν αυτής της σχέσης δημιουργήθηκε ο πίνακας 5.16 με τιμές φορτίου ίδιες με αυτές που εμφανίστηκαν στους παραπάνω πίνακες.

Πίνακας 5.16: Τιμές φορτίου και αποστάσεων βάσει της σχέσης  $S=(1,2-1,3) \cdot B$ .

Φορτίο B(m)	Απόσταση S(m)=1,2B	Απόσταση S(m)= 1,25B	Απόσταση S(m)=1,3B
1,2	1,44	1,8	1,56
1,5	1,8	2,25	1,95
1,8	2,16	2,7	2,34
2,1	2,52	3,15	2,73
2,7	3,24	4,05	3,51



Σχήμα 5.16: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόστασης φορτίου για την μέθοδο απαλής ανατίναξης βάσει πινάκων 5.13ως και 5.16.

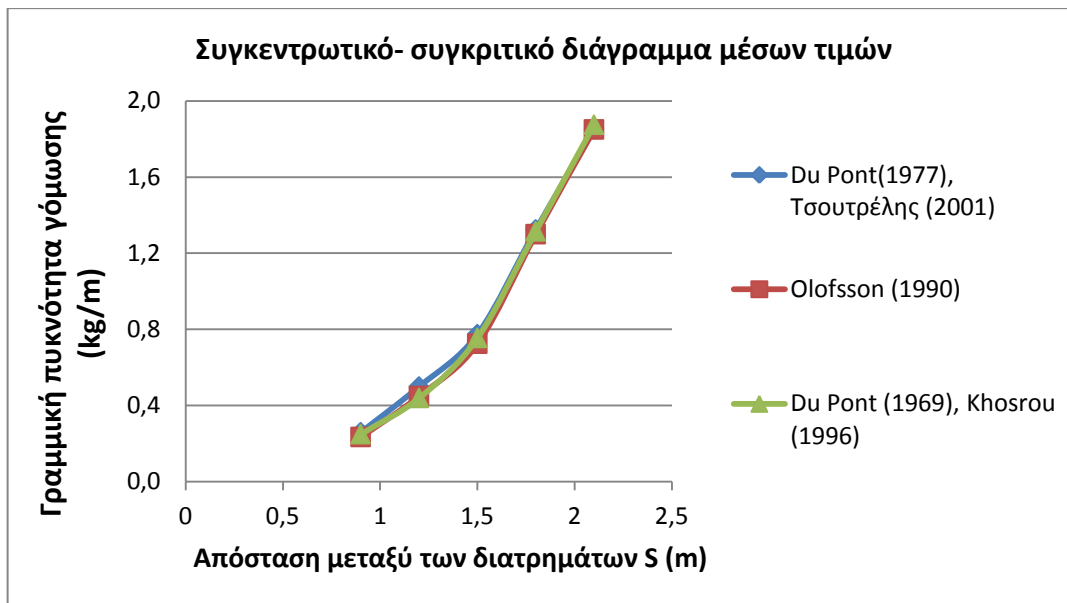
Από το παραπάνω γράφημα (Σχήμα 5.16) είναι σαφές ότι:

- οι τιμές συμπίπτουν εκτός από την τιμή του φορτίου των 3,2 m που αποκλίνει από τους άλλους δύο πίνακες.
- Οι τιμές των πινάκων αποκλίνουν κατά πολύ από τις αντίστοιχες θεωρητικές που βασίζονται στην σχέση που αναφέρθηκε προηγουμένως.

### 5) Διάγραμμα σύγκρισης γραμμικής πυκνότητας γόμωσης συναρτήσει απόστασης μεταξύ των διατηρημάτων S.

Από το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 5.17) παρατηρείται ότι:

- οι τιμές των πινάκων 5.13 ως και 5.15 συμπίπτουν απόλυτα,
- η γραμμική πυκνότητα γόμωσης αυξάνεται παράλληλα με την απόσταση S
- και για τις μέσες τιμές γόμωσης οι πίνακες δίνουν την ίδια απαιτούμενη απόσταση S.



Σχήμα 5.17: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα γραμμικής πυκνότητας γόμωσης και απόστασης S για την μέθοδο απαλής ανατίναξης με βάση τους πίνακες 5.13 ως 5.15.

#### 5.1.4 Μέθοδος ελαφρού φορτίου (trim blasting)

Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι και τόσο διαδεδομένη με αποτέλεσμα να μην αναφέρεται εκτενώς στη βιβλιογραφία. Παρά το γεγονός αυτό, εντοπίστηκαν οι εξής διαφορές:

- Η μέθοδος ελαφρού φορτίου θεωρήθηκε παρεμφερή με την μέθοδο λείων τοιχωμάτων. Όμως η ουσιαστική τους διαφορά είναι ότι η διάταξη της μεθόδου ελαφρού φορτίου ξεκινά από την πραγματική περίμετρο της εκσκαφής και προχωράει προς το επιθυμητό τελικό όριο εκσκαφής και όχι το αντίθετο.
- Στο εύρος διαμέτρου διατρήματος (64-100 mm, 63,5-102 mm, 51-102 mm).

#### 5.1.5 Μέθοδος λείων τοιχωμάτων-επιφανειακά (smooth blasting)

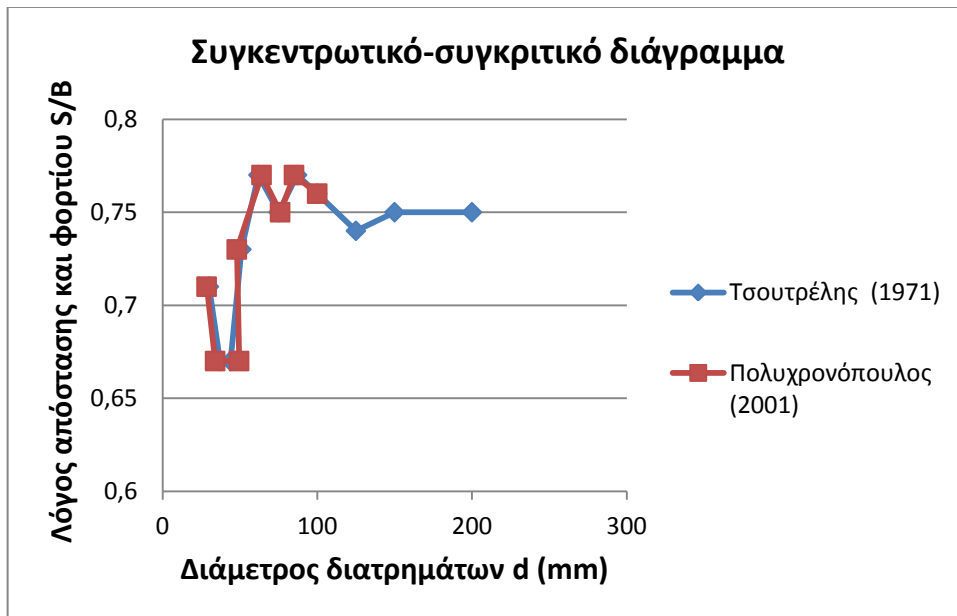
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η μέθοδος λείων τοιχωμάτων εφαρμόζεται και σε επιφανειακά μέτωπα. Στην ενότητα αυτή θα συγκριθούν πίνακες με δεδομένα που αναφέρονται σε συνθήκες επιφανειακής ελεγχόμενης ανατίναξης. Να σημειωθεί βέβαια ότι για ορισμένες τιμές διαμέτρων τα δεδομένα των παρακάτω πινάκων

μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε υπόγεια ανατίναξη (τα διατρήματα στα υπόγεια είναι μικρότερης διαμέτρου από αυτά των επιφανειακών).

**1) Διάγραμμα σύγκρισης λόγου απόστασης-φορτίου S/B συναρτήσει διαμέτρου διατρημάτων d.**

Από το γράφημα του παρακάτω σχήματος 5.18 παρατηρείται ότι:

- Ο λόγος απόστασης - φορτίου για την αντίστοιχη διάμετρο διατρήματος είναι ίδιος και για τους δύο πίνακες.
- Παρατηρείται μια μείωση του λόγου απόστασης - φορτίου στις διαμέτρους 37-51 mm.



Σχήμα 5.18: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα μέσω τιμών d-S για την μέθοδο λείων τοιχωμάτων επιφανειακά βάσει πινάκων 5.17 και 5.18.



Πίνακας 5.17: Τιμές παραμέτρων στην μέθοδο λείων τοιχωμάτων (Τσουτρέλης, 1971).

Διάμετρος διατρήματος d		Πυκνότητα γόμωσης *		Είδος εκρηκτικής ύλης και χρησιμοποιούμενη διάμετρος (mm)		Σχέση διαμέτρων d/Δ	Smoothwall blasting			Pre-split blasting S(m)
mm	In	kg/m	lb/ft				S (m)	B (m)	S/B	
30	1 ¼	0,07	0,05	Gurit**	11	37%	0,5	0,7	0,71	0,25-0,30
37	1 ½	0,12	0,08	Gurit	17	46%	0,6	0,9	0,67	0,30-0,50
44	1 ¾	0,17	0,11	Gurit	17	39%	0,6	0,9	0,67	0,30-0,50
51	2	0,25	0,17	Gurit	22	43%	0,8	1,1	0,73	0,45-0,70
62	2 ½	0,35	0,23	Nabit***	22	35%	1,0	1,3	0,77	0,55-0,80
75	3	0,50	0,34	Nabit	25	33%	1,2	1,6	0,75	0,60-0,90
87	3 ½	0,70	0,5	Dynamex B	25	29%	1,4	1,9	0,77	0,70-1,00
100	4	0,90	0,6	Dynamex B	29	29%	1,6	2,1	0,76	0,80-1,00
125	4 9/10	1,40	0,94	Nabit	40	32%	2,0	2,7	0,74	1,00-1,50
150	5 9/10	2,00	1,34	Nabit	50	30%	2,4	3,2	0,75	1,20-1,80
200	7 9/10	3,00	2,02	Dynamite	52	26%	3,0	4,0	0,75	1,50-2,10

\*Αναφέρεται σε εκρηκτική ύλη Dynamex πυκνότητας 1,4 kg/l και ταχύτητας έκρηξης 6300m/s.

\*\* Gurit: Ζελατοδυναμίτιδα που περιέχει νιτρογλυκερίνη, νιτροβάμβακα, νιτρικό νάτριο, κόνιν αλουμινίου και ανθρακούχα συστατικά. Αυτή έχει πυκνότητα 1,1 kg/l και ταχύτητα έκρηξης 3800 m/s.

\*\*\*Nabit: Αμμωνιοδυναμίτιδα που περιέχει νιτρογλυκερίνη, νιτροβάμβακα, νιτρικό νάτριο, κόνιν αλουμινίου και ανθρακούχα συστατικά. Αυτή έχει πυκνότητα 1,1kg/l και ταχύτητα έκρηξης 4000 m/s.

Πίνακας 5.18: Τιμές παραμέτρων για την μέθοδο λείων τοιχωμάτων (Πολυχρονόπουλος, 2001).

Διάμετρος διατρήματος $\phi$ (mm)	Γραμμική πυκνότητα γόμεσης (kg/m)	Εκρηκτική ύλη		Σχέση διαμέτρων $d/\phi$ (%)	Φορτίο B (m)	Απόσταση S (m)	Σχέση S/B
		Είδος	d φυσιγγίου (mm)				
25-32	0,07	Gurit (2)	11	44-34	0,45	0,35	0,71
25-43	0,16	Gurit (2)	17	68-40	0,70-0,80	0,50-0,60	0,67
48-51	0,16	Gurit (2)	17	35-33	0,80-0,90	0,60-0,70	0,67
48	0,30	Gurit (2)	22	45	1,0	0,80	0,73
64	0,36	Nabit (3)	22	34	1,4	0,77	0,77
76	0,50	Nabit (3)	25	33	1,6	0,75	0,75
85	0,70	Dynamex (1)	25	29	1,9	0,77	0,77
100	0,90	Dynamex	25	29	2,1	0,76	0,76

(1) Αναφέρεται σε εκρηκτική ύλη Dynamex με πυκνότητα 1,4 kg/l και ταχύτητα εκρήξεως 6.300 m/s.

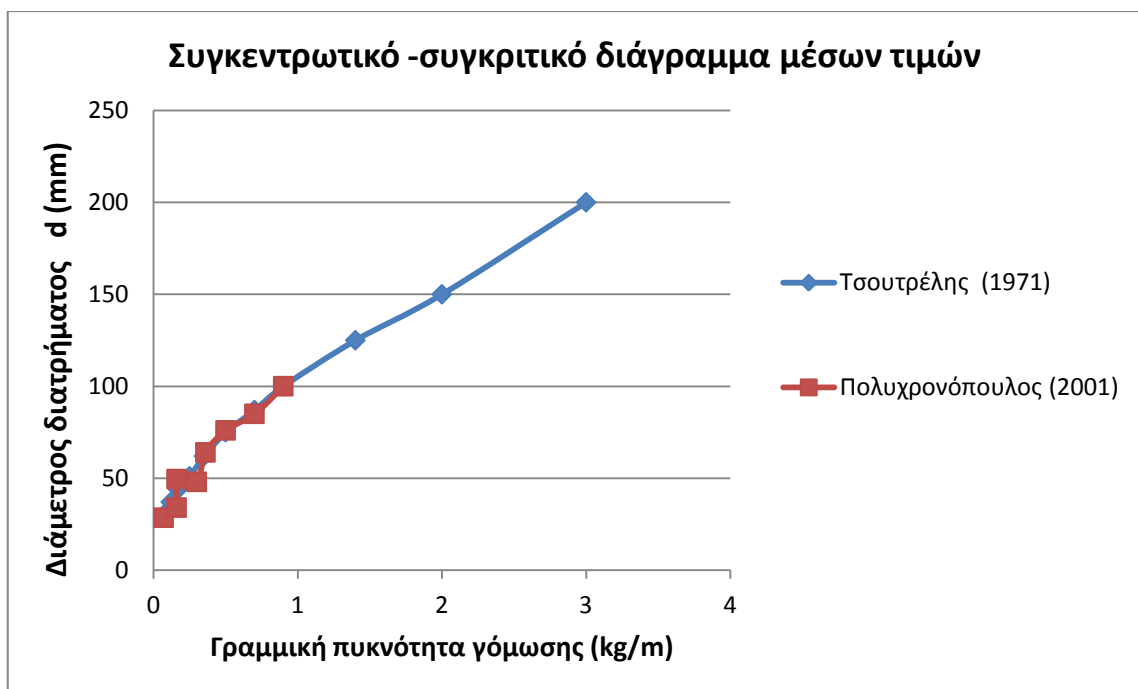
(2) Gurit: Δυναμίτης που περιέχει νιτρογλυκερίνη, νιτροβάμβακα, νιτρικό νάτριο, σκόνη αλουμινίου και ανθρακούχα συστατικά. Έχει πυκνότητα 1,1 kg/l και ταχύτητα εκρήξεως 3.800 m/s.

(3) Nabit Αμμωνιοδυναμίτης που περιέχει νιτρογλυκερίνη, νιτροβάμβακα, νιτρικό νάτριο, σκόνη αλουμινίου και ανθρακούχα συστατικά. Έχει πυκνότητα 1,1kg/l και ταχύτητα εκρήξεως 4.000m/s.

## 2) Διάγραμμα σύγκρισης διαμέτρου διατρημάτων $d$ συναρτήσει γραμμικής πυκνότητας γόμωσης.

Για την σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες 5.17 και 5.18. Με βάση το παρακάτω συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 5.19) παρατηρούνται τα εξής:

- Για μέση τιμή διαμέτρου 49,5 mm οι δύο πίνακες έχουν μια ελάχιστη απόκλιση.
- Από 49,5 mm και άνω οι τιμές τους συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό παρόλο που ο πίνακας 5.17 αναφέρεται σε σκληρό πέτρωμα.
- Ο πίνακας 5.17 δίνει δεδομένα για διαμέτρους μεγαλύτερες των 100 mm όπου παρατηρείται αύξηση της γόμωσης παράλληλα με την αύξηση της διαμέτρου.
- Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι το είδος της εκρηκτικής ύλης και η διάμετρος των φυσισγγίων είναι ίδια και για τους δύο πίνακες.



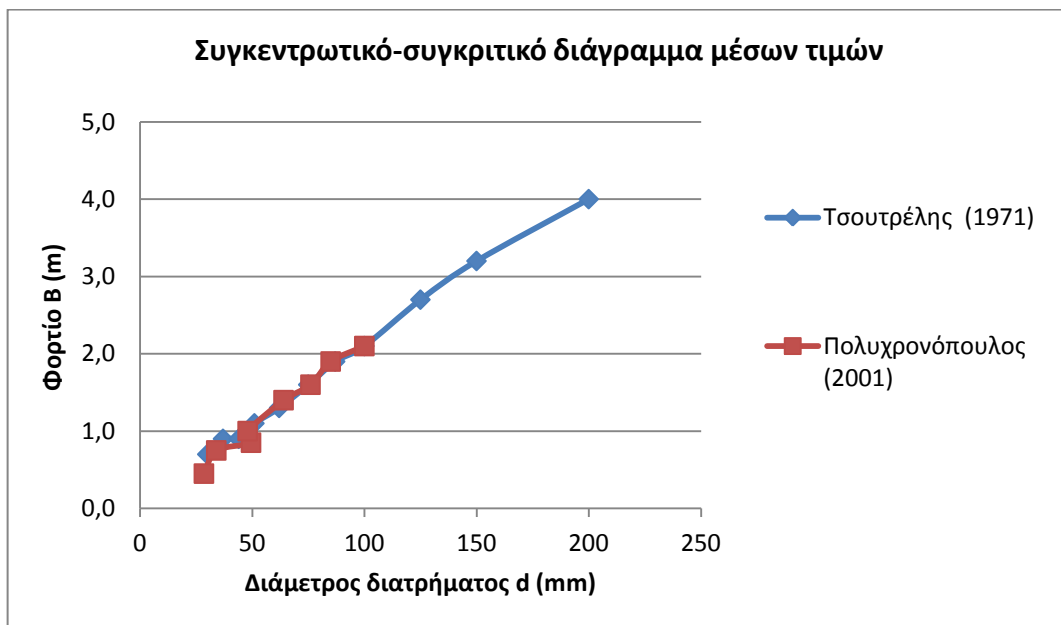
Σχήμα 5.19: Συγκεντρωτικό συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών γραμμικής πυκνότητας γόμωσης συναρτήσει της διαμέτρου για την μέθοδο λείων τοιχωμάτων επιφανειακά με βάσει τους πίνακες 5.17 και 5.18.

### 3) Διάγραμμα σύγκρισης φορτίου B συναρτήσει διαμέτρου διατρημάτων d

Για την σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι πίνακες που αναφέρθηκαν και παραπάνω.

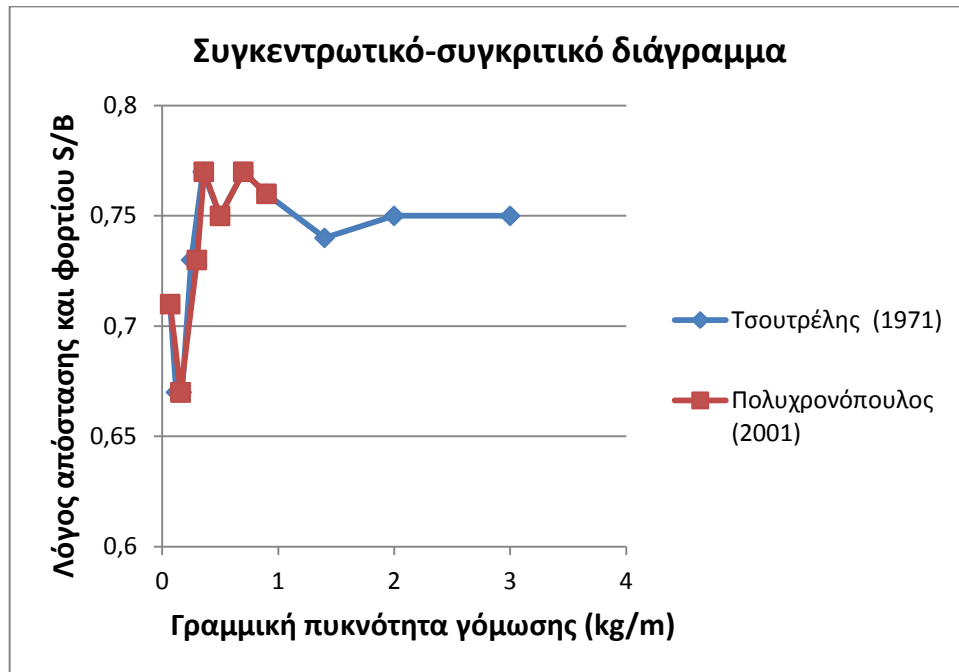
Από το σχήμα 5.20 που αναφέρεται στο διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της διαμέτρου διάτρησης στην μέθοδο λείων τοιχωμάτων παρατηρείται ότι:

- τα δεδομένα των δύο πινάκων συμπίπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό, με μια μικρή απόκλιση για μέσες τιμές διαμέτρων μικρότερες από 49,5 mm παρόλο που ο πίνακας 5.16 αναφέρεται σε γρανίτη.
- Να σημειωθεί επίσης ότι ο πίνακας 5.17 δίνει τιμές φορτίου για διαμέτρους μεγαλύτερες των 100 mm, όπου με αύξηση του φορτίου αυξάνεται και η διάμετρος των διατρημάτων.



Σχήμα 5.20: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών διαμέτρου διατρήματος συναρτήσει του φορτίου για την μέθοδο λείων τοιχωμάτων επιφανειακά (από πίνακες 5.17 και 5.18).

#### 4) Διάγραμμα σύγκρισης λόγου S/B συναρτήσει γραμμικής πυκνότητας γόμωσης.



Σχήμα 5.21: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα μέσω των τιμών γραμμικής γόμωσης και λόγου S/B (από τα δεδομένα των πινάκων 5.17 και 5.18).

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι για την ίδια ποσότητα γόμωσης χρησιμοποιείται ο ίδιος λόγος απόστασης-φορτίου S/B και στους δύο πίνακες.

#### 5.1.6 Μέθοδος λείων τοιχωμάτων-υπόγεια (smooth blasting)

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται ευρύτατα σε υπόγειες ανατινάξεις, παρά το γεγονός ότι είναι διαδεδομένη μέθοδος εντοπίστηκαν οι παρακάτω διαφορές από ερευνητές που δίνουν περιγραφικά στοιχεία για την μέθοδο.

- Στην μαθηματική σχέση που συνδέει την απόσταση μεταξύ των διατρημάτων S και την διάμετρο των διατρημάτων της μεθόδου. Από κάποιες βιβλιογραφίες δόθηκε σχέση ανεξάρτητα από τον τύπο του πετρώματος και από άλλες διαφορετικός για μαλακά και σκληρά πετρώματα.

- Στο φορτίο B, δόθηκε διαφορετικό ποσοστό της τιμής το σε σχέση με την απόσταση S.

Παρακάτω θα χρησιμοποιηθούν κάποιοι πίνακες για την κατασκευή διαγραμμάτων ώστε να γίνει σύγκριση στις τιμές των παραμέτρων που δίνουν για την συγκεκριμένη μέθοδο.

### 1) Διάγραμμα σύγκρισης απόστασης S συναρτήσει διαμέτρου διατρημάτων d

Πίνακας 5.19: Τιμές παραμέτρων της μεθόδου λείων τοιχωμάτων σε σήραγγα (Gustafsson, 1981, Bhandari, 1997, Τσουτρέλης, 2001).

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

Πίνακας 5.20: Τιμές παραμέτρων για την μέθοδο λείων τοιχωμάτων (Berta 1990, Τσουτρέλης 2001).

d(mm)	Φορτίο B (m)	Απόσταση S (m)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)
32	0,55-0,75	0,40-0,60	0,22
51	0,80-1,20	0,65-0,90	0,5

Πίνακας 5.21: Πίνακας τιμών για την μέθοδο λείων τοιχωμάτων σε σήραγγα (Du Pont 1977, Τσουτρέλης 2001).

d(mm)	Φορτίο B (m)	Απόσταση S (m)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)
32	0,90	0,60	0,18-0,38
51	1,05	0,75	0,18-0,38

Πίνακας 5.22: Τυπικές τιμές παραμέτρων (Brown 1980, Khosrou 1996).

d (mm)	Φορτίο B (m)	Απόσταση S (m)	Πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	Διάμετρος φυσιγγίου (mm)
25-32	0,30-0,45	0,25-0,35	0,08	11
25-48	0,70-0,90	0,50-0,70	0,2	17
51-64	1,00-1,10	0,80-0,90	0,44	22

Πίνακας 5.23: Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού μεθόδων λείων τοιχωμάτων (Τσουτρέλης, 2001).

Διάμετρος διατρήματος (mm)	Γραμμική πυκνότητα γόμωσης σε ANFO (kg/m)	Είδος εκρηκτικής ύλης και διάμετρος	Φορτίο B (m)	Απόσταση S (m)
25-32	0,08	11mm Gurit	0,20-0,95	0,25-0,35
25-48	0,20	17 mm Gurit	0,70-0,90	0,50-0,70
51-64	0,44	22mm Gurit	1,00-1,10	0,80-0,90

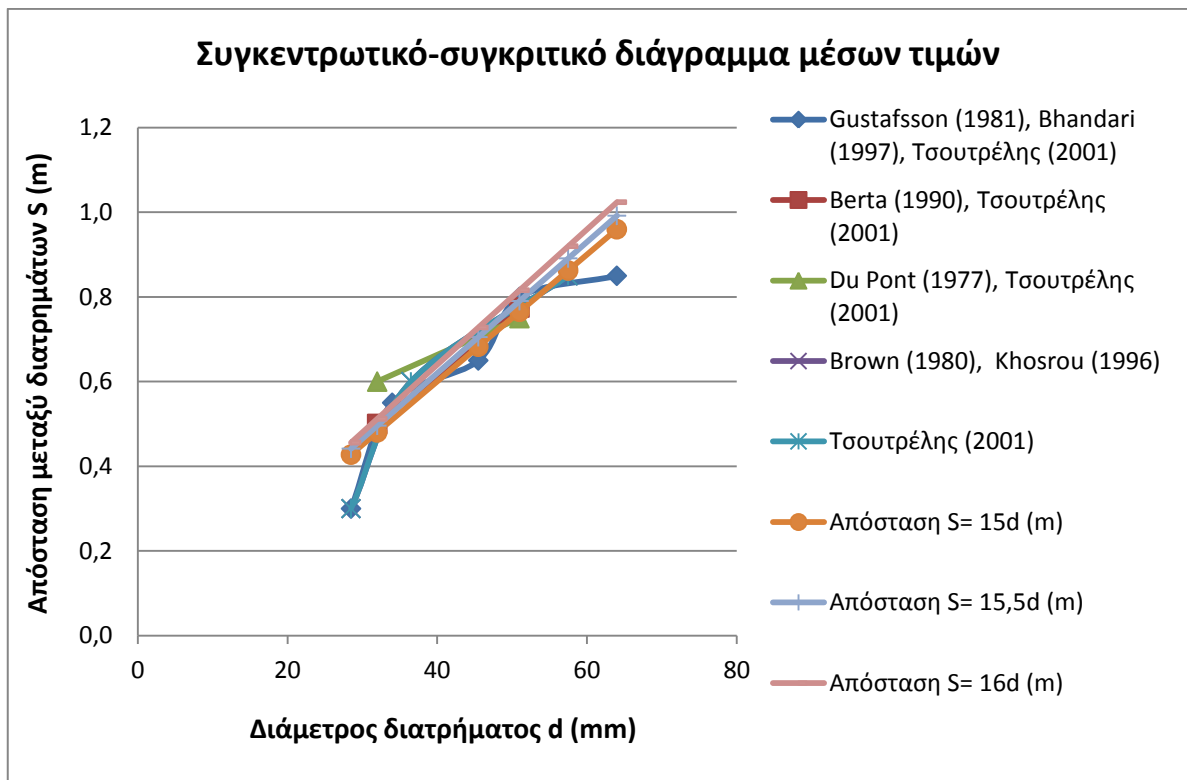
Με βάση τον τύπο που δόθηκε στην ενότητα 4.6.6 από τον Τσουτρέλη (2001)  $S = (15-16) \cdot d$ , δημιουργήθηκε ο πίνακας 5.24. Οι διάμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι μέσες τιμές των διαμέτρων από τους προηγούμενους πίνακες.

Πίνακας 5.24: Τιμές απόστασης S με βάση την εξίσωση.

d (mm)	Απόσταση $S = 15 \cdot d$ (m)	Απόσταση $S = 15,5 \cdot d$ (m)	Απόσταση $S = 16 \cdot d$ (m)
28,5	0,43	0,44	0,46
32	0,48	0,50	0,51
45,5	0,68	0,71	0,73
51	0,77	0,79	0,82
57,5	0,86	0,89	0,92
64	0,96	0,99	1,02

Από το σχήμα 5.23 και από τους πίνακες 5.19-5.24 είναι σαφές ότι:

- Τα δεδομένα των πινάκων που χρησιμοποιήθηκαν στο παραπάνω διάγραμμα ταυτίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.25.
- Οι πίνακες που παρουσιάζουν μια εμφανή απόκλιση από τους υπόλοιπους είναι ο 5.19, 5.21 και 5.23. Για την απόκλιση των πινάκων 5.19 και 5.23 σε σχέση με τους άλλους πίνακες μπορεί να οφείλεται στο είδος της γόμωσης αλλά αυτό δεν δικαιολογεί την απόκλιση που παρουσιάζουν οι δύο πίνακες μεταξύ τους.
- Από την σχέση που δόθηκε παραπάνω,  $S = (15-16) \cdot d$ , οι τιμές των πινάκων αποκλίνουν λιγότερο με την τιμή 15 ενώ με τις υπόλοιπες αυξάνεται η απόκλιση.
- Επίσης ο συντελεστής συσχέτισης είναι 94,5%, το οποίο υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.19 ως 5.24, έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.

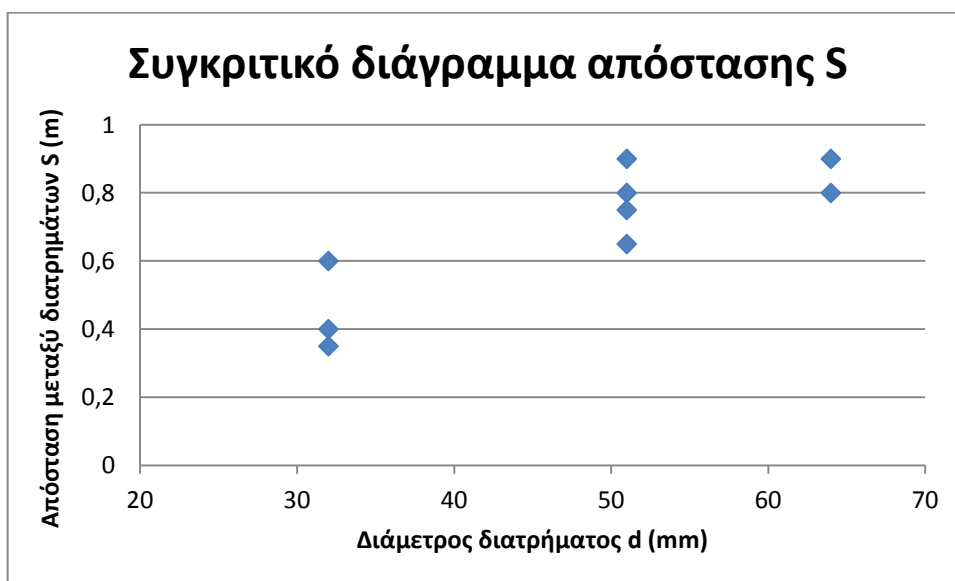


Σχήμα 5.23: Συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα μέσω τιμών d-S για την υπόγεια εφαρμογή της μεθόδου λείων τοιχωμάτων με βάση τους πίνακες 5.19 ως 5.24.



Πίνακας 5.25: Συγκριτικός πίνακας απεικόνισης απόστασης S για συγκεκριμένες τιμές διαμέτρων διατρημάτων .

A/A	Διάμετρος Διατρήματος d (mm)	Απόσταση S (m)
Πίνακας 5.19, 5.22 και 5.23	32	0,35
Πίνακας 5.20		0,40-0,60
Πίνακας 5.21		0,6
Πίνακας 5.19, 5.22 και 5.23	51	0,8
Πίνακας 5.20		0,65-0,90
Πίνακας 5.21		0,75
Πίνακας 5.19	64	0,80-0,90
Πίνακας 5.22 και 5.23		0,9



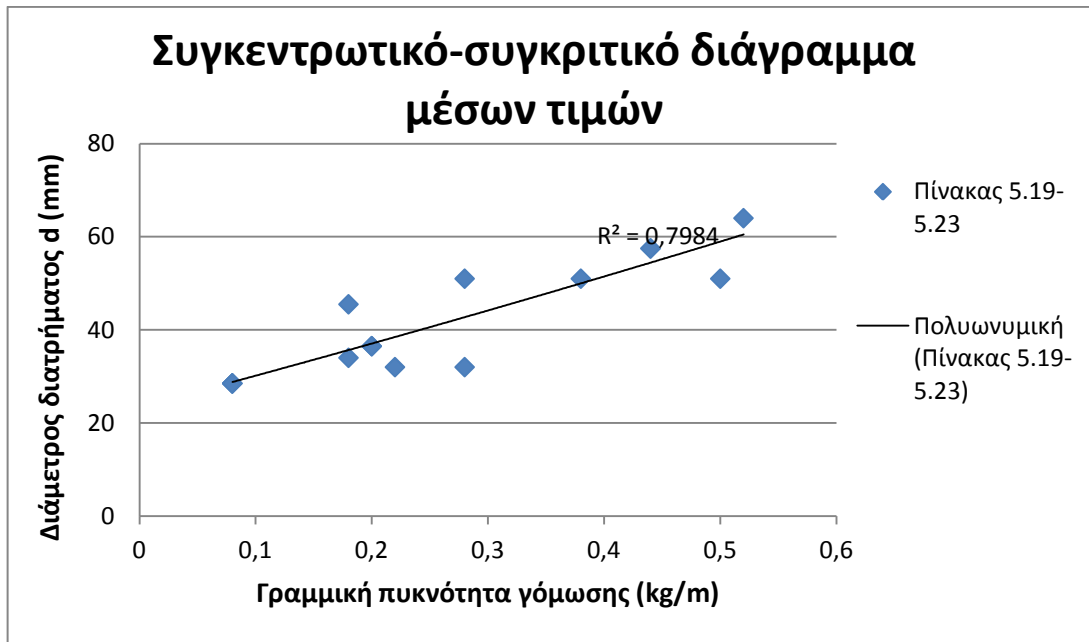
Σχήμα 5.24: Συγκριτικό διάγραμμα απόστασης S για συγκεκριμένη τιμή διαμέτρου διατρήματος με βάση τον πίνακα 5.25.

## 2) Διάγραμμα σύγκρισης διαμέτρου διατρημάτων d συναρτήσει γραμμικής πυκνότητας γόμωσης.

Για την σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες 5.19 έως και 5.23 και το γράφημα του παραπάνω σχήματος 5.25, όπου παρατηρούνται τα εξής:

- Τα δεδομένα των πινάκων 5.22 και 5.23 συμπίπτουν απόλυτα.
- Οι πίνακες 5.19, 5.22 και 5.23 συμπίπτουν αρκετά με μια απόκλιση στο σημείο των 45,5 mm διάμετρο του πίνακα 5.19.

- Επίσης ο συντελεστής συσχέτισης είναι 80%, το οποίο υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.19 ως 5.23, έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.
- Στο σύνολο των δεδομένων παρουσιάζεται μια απόκλιση με την μεγαλύτερη να βρίσκεται στον πίνακα 5.21.

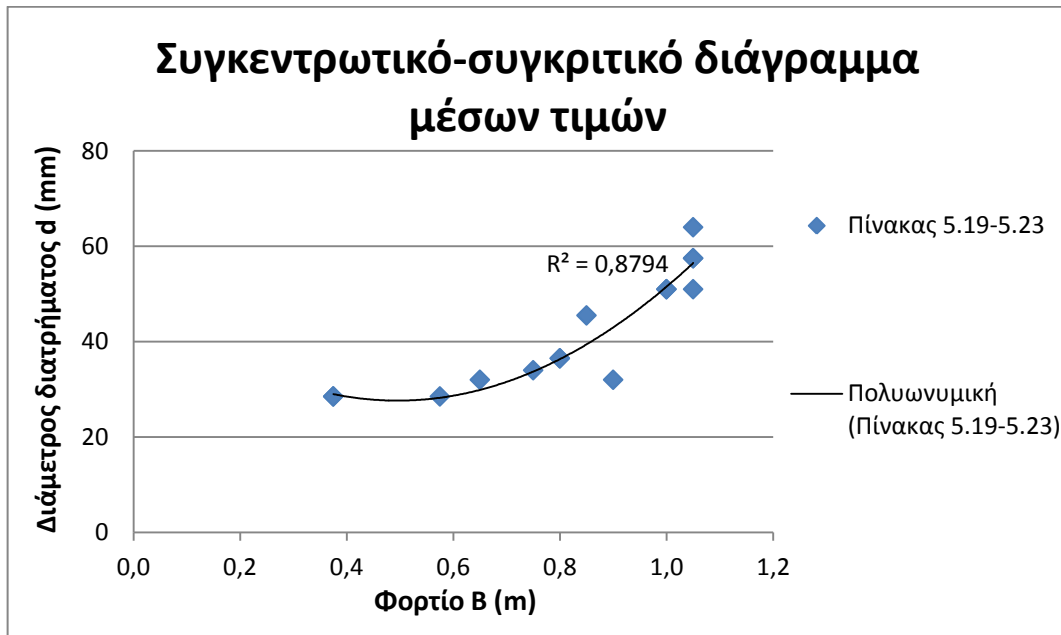


Σχήμα 5.25: Συγκεντρωτικό συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών πυκνότητας γόμωσης συναρτήσει διαμέτρου με βάση του πίνακες από 5.19 ως και 5.23.

### 3) Διάγραμμα σύγκρισης διαμέτρου διατρημάτων d συναρτήσει φορτίου B.

Η σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκε με τους ίδιους πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν και πριν και με το σχήμα 5.26 όπου αξίζει να σημειωθεί ότι:

- οι μέσες τιμές των παραμέτρων των πινάκων ταυτίζονται ικανοποιητικά μεταξύ τους εκτός από την απόκλιση που παρουσιάζει ο πίνακας 5.21 σε σχέση με τους άλλους.
- Επίσης ο συντελεστής συσχέτισης είναι 88%, το οποίο υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.19 ως 5.23, έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση



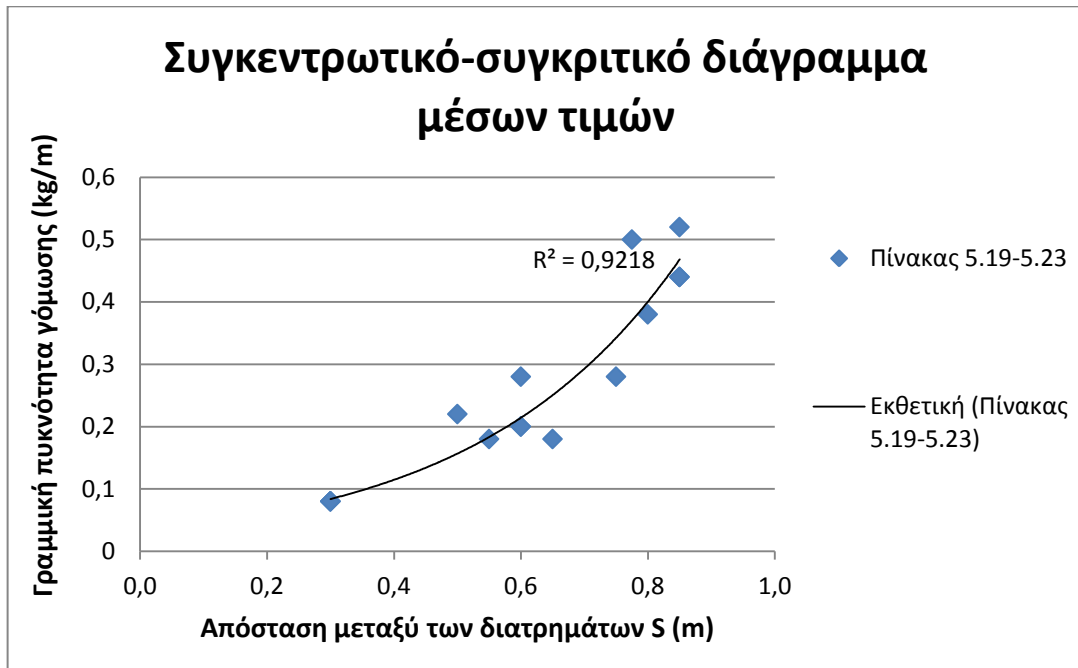
Σχήμα 5.26: Συγκεντρωτικό συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών φορτίου συναρτήσει διαμέτρου για την μέθοδο λείων τοιχωμάτων σε υπόγεια με βάση του πίνακες από 5.19 ως και 5.23.

#### 4) Διάγραμμα σύγκρισης γραμμικής πυκνότητας γόμωσης συναρτήσει απόστασης μεταξύ των διατρημάτων S.

Για την σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες 5.19 έως και 5.23 και το γράφημα του σχήματος 5.27 παρατηρούνται τα εξής:

- Οι πίνακες 5.20 και 5.21 παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση στις μέσες τιμές των γομώσεων για αντίστοιχες μέσες τιμές αποστάσεων S. Από τους συγκεκριμένους δύο πίνακες δεν προτείνεται είδος γόμωσης γεγονός που μπορεί να ευθύνεται στην απόκλιση που παρουσιάζουν σε σχέση με τους άλλους.
- Ο πίνακας 5.22 με τον πίνακα 5.23 συμπίπτουν απόλυτα στα δεδομένα που δίνουν για τον σχεδιασμό μιας ελεγχόμενης ανατίναξης λείων τοιχωμάτων.
- Σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τους πίνακες 5.20 και 5.21, ο πίνακας 5.19 αποκλίνει από τις μέσες τιμές των 5.22 και 5.23. Ο λόγος που αποκλίνει δεν οφείλεται στην εκρηκτική ύλη και στον τύπο γόμωσης, διότι προτείνει περίπου τα ίδια.

- Επίσης ο συντελεστής συσχέτισης είναι 92%, το οποίο υποδηλώνει ότι συνολικά οι παράμετροι σχεδιασμού που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.19 ως 5.23, έχουν μια γενική τάση η οποία μπορεί να εκφραστεί από μια πολυωνυμική σχέση.



Σχήμα 5.27: Συγκεντρωτικό συγκριτικό διάγραμμα μέσων τιμών γόμωσης συναρτήσει απόστασης για μέθοδο λείων τοιχωμάτων υπόγεια με βάση του πίνακες από 5.19 ως και 5.23.

## 5.2 Αναλυτική σύγκριση των παραμέτρων μεταξύ των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης

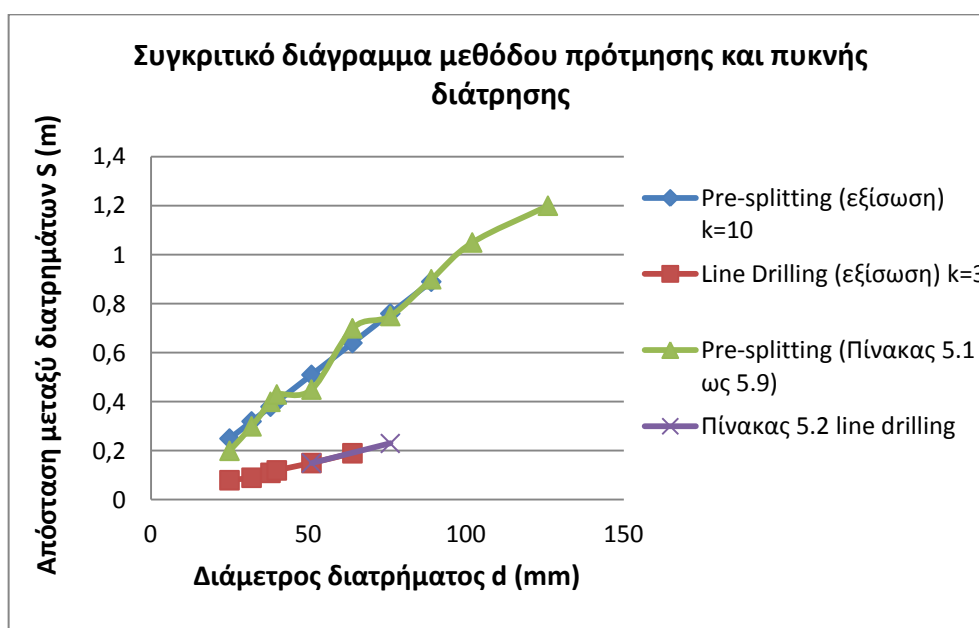
### 5.2.1 Μέθοδος πυκνής διάτρησης (line drilling)- Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting)

Για την σύγκριση των μεθόδων πυκνής διάτρησης και πρότμησης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους πίνακες 5.1 ως 5.10 για την κατασκευή του διαγράμματος (σχήμα 5.24). Μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρούνται οι εξής διαφορές:

- Στην μέθοδο πυκνής διάτρησης ορύσσονται με μεγάλη ακρίβεια πυκνά διατρήματα κατά μήκος της οριογραμμής εξόρυξης, ενώ η διάτρηση στην μέθοδο πρότμησης πραγματοποιείται πιο αραιά. Αυτό διακρίνεται και από το γράφημα του σχήματος 5.28 διότι οι αποστάσεις μεταξύ των διατρημάτων S

της μεθόδου πρότμησης είναι μεγαλύτερες από αυτές της πυκνής διάτρησης. Το γεγονός αυτό μειώνει το κόστος διάτρησης για την μέθοδο της πρότμησης.

- Η διάμετρος των διατρημάτων πυκνής διάτρησης έχουν εύρος 25-76 mm ενώ στην μέθοδο πρότμησης έχουν 30-150 mm (σε πίνακες 25-127 mm), η διαφορά αυτή παρατηρείται και στο σχήμα 5.28.
- Στην ελεγχόμενη μέθοδο πυκνής διάτρησης τα διατρήματα είναι αγόμενα, εκτός από περιπτώσεις που γομώνεται κάθε δεύτερο ή τέταρτο διάτρημα και εκρήγνυνται 25 ms τουλάχιστον πριν από την κύρια ανατίναξη. Αντίθετα τα διατρήματα πρότμησης γομώνονται όλα κανονικά και εκρήγνυνται είτε πριν από την κύρια ανατίναξη ως ανεξάρτητη φάση είτε πρώτα με ελάχιστη επιβράδυνση 50 ms από την κύρια εκσκαφή.
- Η μέθοδος πυκνής διάτρησης θα επιφέρει σημαντική μείωση των δονήσεων και θα έχει μικρότερο κόστος εκρηκτικών σε σχέση με την μέθοδο πρότμησης λόγω ότι τα διατρήματα της είναι αγόμενα ως επί το πλείστον.
- Ο μέγιστος περιορισμός για το βάθος διάτρησης στην μέθοδο πρότμησης είναι τα 16 m σε αντίθεση με την πυκνή διάτρηση που είναι στα 12 m.
- Βάσει του διαγράμματος (σχήμα 5.28) παρατηρείται επιπλέον ότι οι τιμές της εξίσωσης για την μέθοδο πρότμησης και οι τιμές με βάση τα στοιχεία που έδωσαν οι πίνακες συμπίπτουν.



Σχήμα 5.28: Συγκριτικό διάγραμμα ελεγχόμενων ανατινάξεων μεταξύ της μεθόδου πρότμησης και πυκνής διάτρησης.

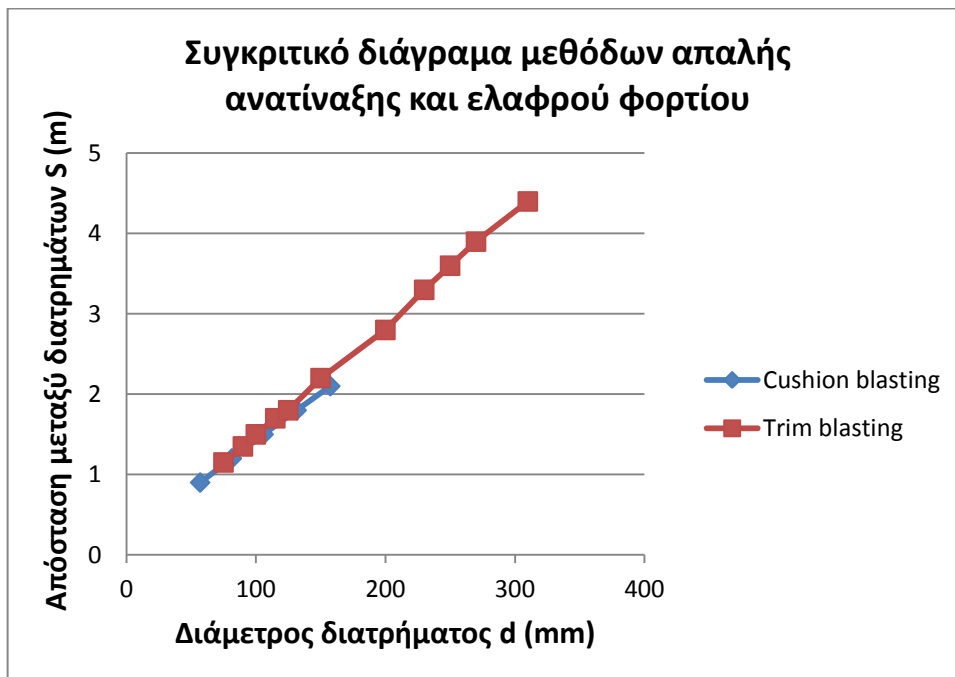
### 5.2.2 Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting)- Μέθοδος ελαφρού φορτίου (trim blasting)

Η μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting) και ελαφρού φορτίου (trim blasting) θεωρούνται από αρκετούς ερευνητές πανομοιότυπες. Στην συνέχεια της ενότητας αυτής θα γίνει μια σύγκριση των μεθόδων ώστε να τονιστούν οι διαφορές τους τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και με την βοήθεια διαγραμμάτων. Έτσι λοιπόν παρατηρούνται οι εξής διαφορές:

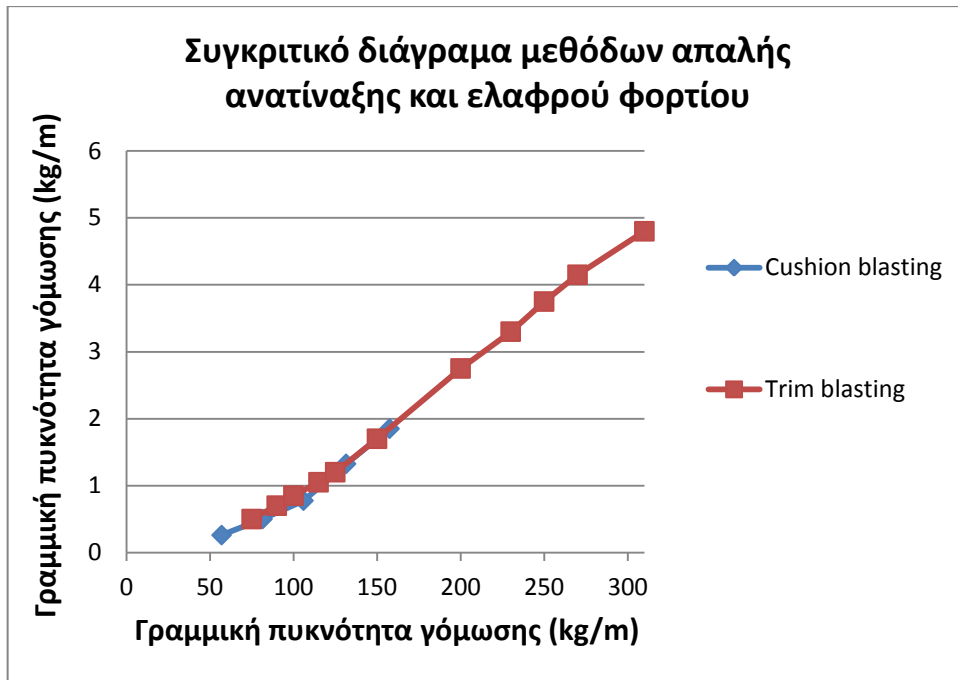
- Στην μέθοδο ελαφρού φορτίου (trim blasting) τα διατρήματα που ορύσσονται έχουν την ίδια διάμετρο μεταξύ τους ενώ στην μέθοδο απαλής ανατίναξης (cushion blasting) κάθε τρίτο ή τέταρτο διάτρημα ορύσσεται με μεγαλύτερη διάμετρο.
- Η διάμετρος των διατρημάτων για την μέθοδο ελαφρού φορτίου κυμαίνεται από 51-102 mm ενώ υπάρχουν περιπτώσεις που φτάνει τα 310 mm. Όμως στην μέθοδο απαλής ανατίναξης η διάμετρο κυμαίνεται από 50-165 mm.
- Όσον αφορά την γόμωση των διατρημάτων, στην μέθοδο ελαφρού φορτίου είναι ασθενής σε όλα τα διατρήματα, ενώ στην μέθοδο απαλής ανατίναξης δεν γομώνονται όλα τα διατρήματα αλλά μόνο αυτά που έχουν μεγαλύτερη διάμετρο (με ασθενή γόμωση). Έτσι η μέθοδος απαλής ανατίναξης έχει μικρότερο κόστος εκρηκτικών από την μέθοδο ελαφρού φορτίου.
- Από το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 5.29) όπου κατασκευάστηκε με βάση τον πίνακα 5.26, παρατηρείται ότι χρησιμοποιείται η ίδια απόσταση S και για τις δύο μεθόδους (παρόλο που οι τιμές των διαμέτρων δεν είναι ακριβώς ίδιες) με την διαφορά ότι στην μέθοδο ελαφρού φορτίου δίνονται και τιμές απόστασης για μεγαλύτερη διάμετρο.
- Από το σχήμα 5.29 είναι σαφές ότι η μέθοδος απαλής ανατίναξης χρησιμοποιεί μικρότερες τιμές διαμέτρων και δίνει αποστάσεις S όπου η μέθοδος ελαφρού φορτίου της δίνει για μεγαλύτερες τιμές διαμέτρων. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι μειονέκτημα για την μέθοδο απαλής ανατίναξης από την άποψη κόστους διάτρησης, μεγαλύτερο από την άλλη μέθοδο.

Πίνακας 5.26: Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού της μεθόδου ελαφρού φορτίου (Dessureault, 2006).

d (mm)	γραμμική πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	d φυσιγγίου (mm)	Απόσταση S (m)	Φορτίο B (m)
75	0,50	22	1,15	1,55
90	0,70	25	1,35	1,80
100	0,85	29	1,50	2,00
115	1,05	32	1,70	2,20
125	1,20	38	1,80	2,40
150	1,70	55	2,20	2,80
200	2,75	55	2,80	3,70
230	3,30	55	3,30	4,20
250	3,75	80	3,60	4,60
270	4,15	80	3,90	5,00
310	4,80	90	4,40	5,60



Σχήμα 5.29 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων απαλής ανατίναξης και ελαφρού φορτίου για την απόσταση S των διατρημάτων βάσει πινάκων 5.13 και 5.26.



Σχήμα 5.30: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων ελαφρού φορτίου και απαλής ανατίναξης βάσει πινάκων 5.13 και 5.26.

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι:

- Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης είναι ίδια και στις δύο μεθόδους παρόλο που η μέθοδος ελαφρού φορτίου χρησιμοποιεί μεγαλύτερες διαμέτρους.
- Στην μέθοδο απαλής ανατίναξης όμως δεν γομώνονται όλα τα διατρήματα της, επομένως θα έχει και μικρότερο κόστος εκρηκτικών από την μέθοδο ελαφρού φορτίου.

### 5.2.3 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) – Μέθοδος λείων τοιχωμάτων (smooth blasting).

Για την σύγκριση των μεθόδων πρότμησης (pre-splitting) και λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) σε επιφανειακή ανατίναξη θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω πίνακας 5.27 για την δημιουργία διαγραμμάτων, ο οποίος αναφέρεται σε γρανίτη (σκληρό πέτρωμα) και βάσει βιβλιογραφίας μπορεί να εφαρμοστεί και σε υπόγεια μέχρι κάποια τιμή διαμέτρου. Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη εφαρμογή των δύο μεθόδων χρησιμοποιείται ίδια διάμετρος διατρημάτων και ίδια γραμμική πυκνότητα γόμωσης με ίδια χρησιμοποιούμενα φυσίγγια. Αρχικά στο πρώτο κομμάτι που



διαφέρουν οι μέθοδοι μεταξύ τους όσον αφορά την περιγραφή που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι:

- Η μέθοδος λείων τοιχωμάτων έχει εφαρμογή και σε υπόγεια μέτωπα.
- Στην έναυση των διατρημάτων. Στην μέθοδο πρότμησης εναύονται πριν από την κύρια ανατίναξη ενώ στην μέθοδο λείων τοιχωμάτων εναύονται μετά από την κύρια ανατίναξη. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η μέθοδος πρότμησης δεν επιτρέπει στο κρουστικό κύμα της κύριας ανατίναξης να μεταδοθεί στο παραμένον πέτρωμα και να προκαλέσει ρωγμές.
- Στο επιτρεπόμενο εύρος τιμών που δίνονται για την διάμετρο στην κάθε μέθοδο.
- Η μέθοδος λείων τοιχωμάτων δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε ρωγματωμένα πετρώματα σε σχέση με την μέθοδο πρότμησης.

Πίνακας 5.27: Διάφορα στοιχεία για την εφαρμογή των μεθόδων λείων τοιχωμάτων και της πρότμησης σε γρανίτη (Τσουτρέλης, 1971).

d	Πυκνότητα γόμωσης *	Είδος εκρηκτικής ύλης και χρησιμοποιούμενη διάμετρος (mm)		Σχέση διαμέτρων d/Δ	Smoothwall blasting			Pre-split blasting S(m)
					S (m)	B (m)	S/B	
mm	kg/m							
30	0,07	Gurit**	11	37%	0,5	0,7	0,71	0,25-0,30
37	0,12	Gurit	17	46%	0,6	0,9	0,67	0,30-0,50
44	0,17	Gurit	17	39%	0,6	0,9	0,67	0,30-0,50
51	0,25	Gurit	22	43%	0,8	1,1	0,73	0,45-0,70
62	0,35	Nabit***	22	35%	1,0	1,3	0,77	0,55-0,80
75	0,50	Nabit	25	33%	1,2	1,6	0,75	0,60-0,90
87	0,70	Dynamex B	25	29%	1,4	1,9	0,77	0,70-1,00
100	0,90	Dynamex B	29	29%	1,6	2,1	0,76	0,80-1,00
125	1,40	Nabit	40	32%	2,0	2,7	0,74	1,00-1,50
150	2,00	Nabit	50	30%	2,4	3,2	0,75	1,20-1,80
200	3,00	Dynamite	52	26%	3,0	4,0	0,75	1,50-2,10

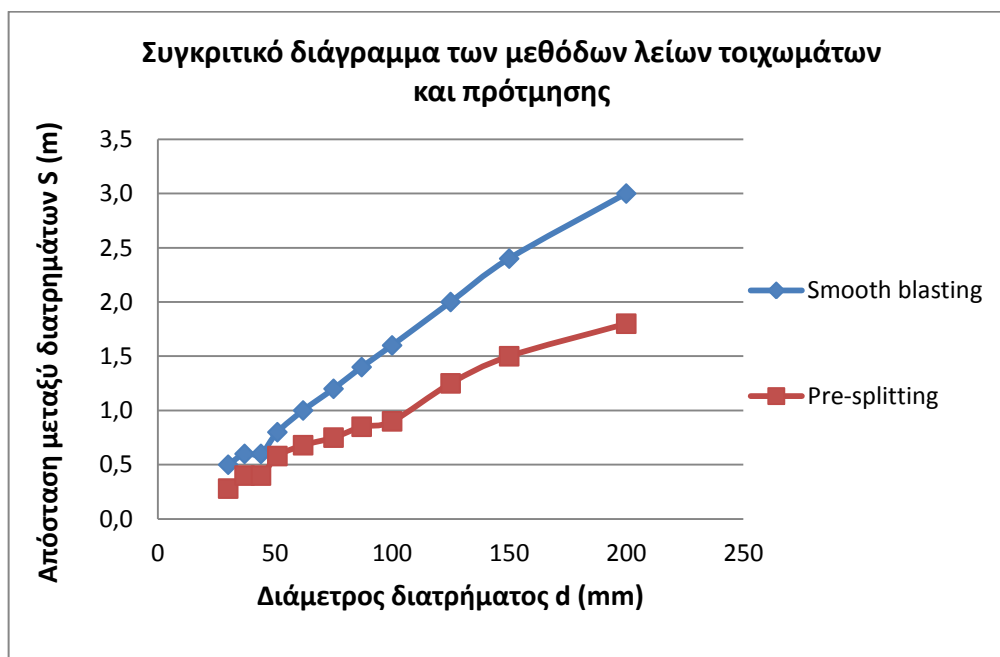
\*Αναφέρεται σε εκρηκτική ύλη Dynamex πυκνότητας 1,4kg/l και ταχύτητας έκρηξης 6300m/s.

\*\* Gurit: Ζελατοδυναμίτιδα που περιέχει νιτρογλυκερίνη, νιτροβάμβακα, νιτρικό νάτριο, κόνιν αλουμινίου και ανθρακούχα συστατικά. Αυτή έχει πυκνότητα 1,1 kg/l και ταχύτητα έκρηξης 3800 m/s.

\*\*\*Nabit: Αμμωνιοδυναμίτιδα που περιέχει νιτρογλυκερίνη, νιτροβάμβακα, νιτρικό νάτριο, κόνιν αλουμινίου και ανθρακούχα συστατικά. Αυτή έχει πυκνότητα 1,1kg/l και ταχύτητα έκρηξης 4000m/s.

Από το παρακάτω γράφημα (σχήμα 5.31) παρατηρείται ότι:

- Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορά όσον αφορά τις τιμές των αποστάσεων.
- Οι αποστάσεις που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο πρότμησης για ίδια διάμετρο είναι μικρότερες από αυτές που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο λείων τοιχωμάτων. Για την μέθοδο πρότμησης οι αποστάσεις  $S$  φτάνουν μέχρι το 1 m ενώ στην λείων τοιχωμάτων φτάνουν μέχρι και 1,6 m.
- Η μέθοδος λείων τοιχωμάτων αφού χρησιμοποιεί μεγαλύτερες αποστάσεις, πλεονεκτεί από την άποψη του κόστους διάτρησης των διατρημάτων διότι θα απαιτεί και λιγότερα διατρήματα.



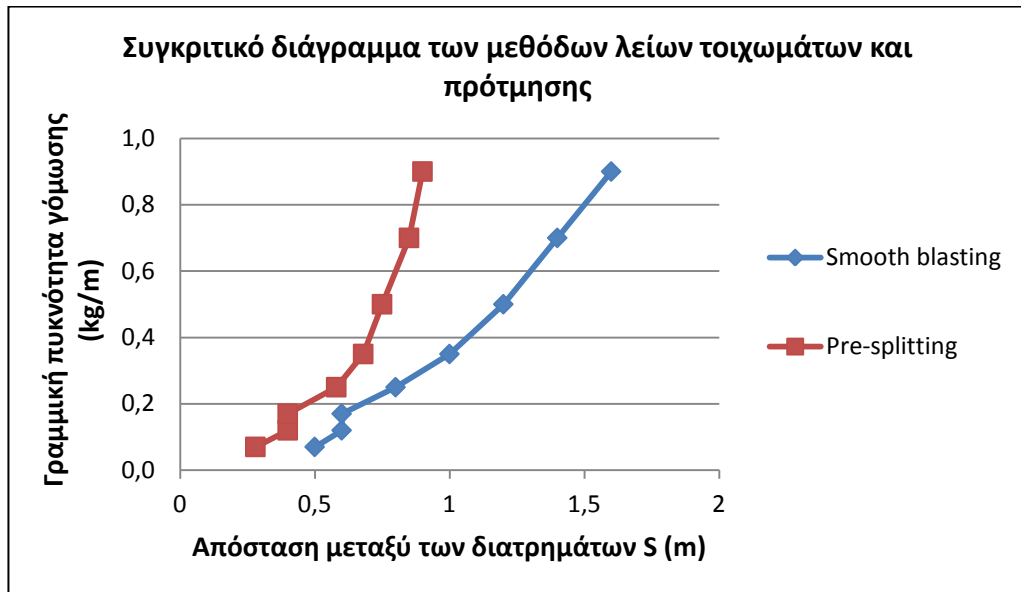
Σχήμα 5.31: Συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στις μεθόδους λείων τοιχωμάτων και πρότμησης σε γρανίτη (σκληρό πέτρωμα) βάσει πίνακα 5.27.

Από το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 5.32) παρατηρείται ότι:

- Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορά όσον αφορά τις τιμές των αποστάσεων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.
- Οι αποστάσεις που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο πρότμησης για ίδια τιμή γόμωσης είναι μικρότερες από αυτές που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο

λείων τοιχωμάτων. Για την μέθοδο πρότμησης οι αποστάσεις  $S$  φτάνουν μέχρι το 1 m ενώ στην λείων τοιχωμάτων φτάνουν μέχρι και 1,6 m.

- Και στις δύο μεθόδους χρησιμοποιήθηκε η ίδια γόμωση αλλά η μέθοδος λείων τοιχωμάτων είχε μεγαλύτερες αποστάσεις, με αποτέλεσμα η μέθοδος αυτή να ήταν πιο ικανοποιητική από την άποψη του κόστους εκρηκτικών.



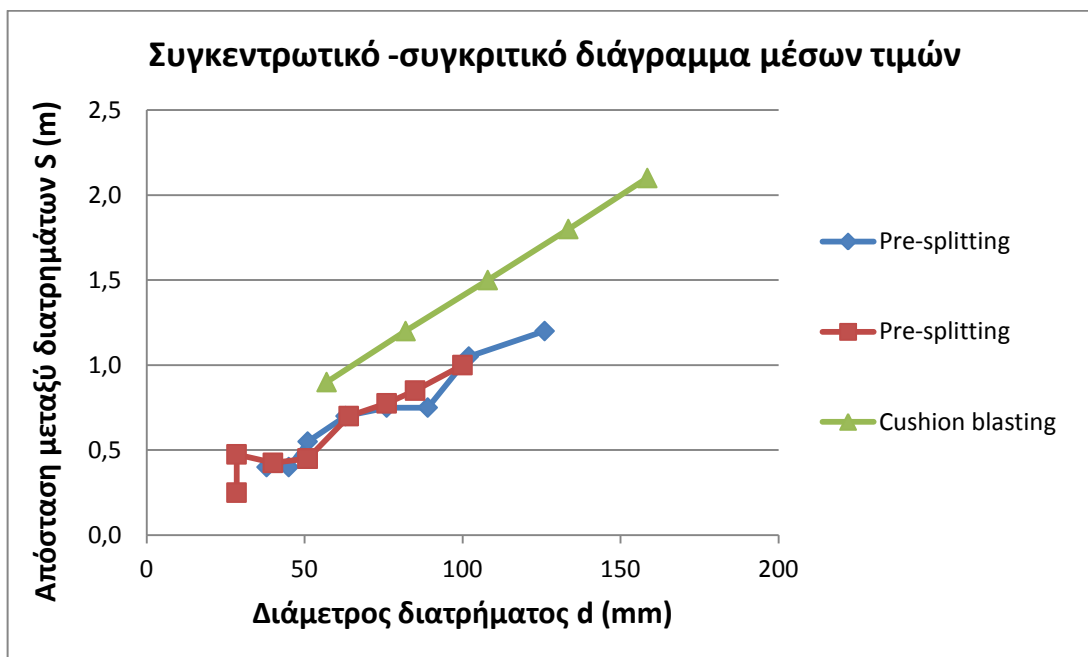
Σχήμα 5.32: Συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στις μεθόδους λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) και πρότμησης (pre-splitting) σε σκληρό πέτρωμα βάσει πίνακα 5.27.

#### 5.2.4 Μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) – Μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting).

Στην υποενότητα αυτή, συγκρίνονται η μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) και η μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting) τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και με την βοήθεια διαγραμμάτων. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν κατά την περιγραφή των μεθόδων είναι:

- Τα διατρήματα της μεθόδου πρότμησης εναύονται ανεξάρτητα από την κύρια ανατίναξη ή πριν με επιβράδυνση ενώ στην μέθοδο απαλής ανατίναξης εναύονται ταυτόχρονα ή με επιβράδυνση μετά από την κύρια ανατίναξη.

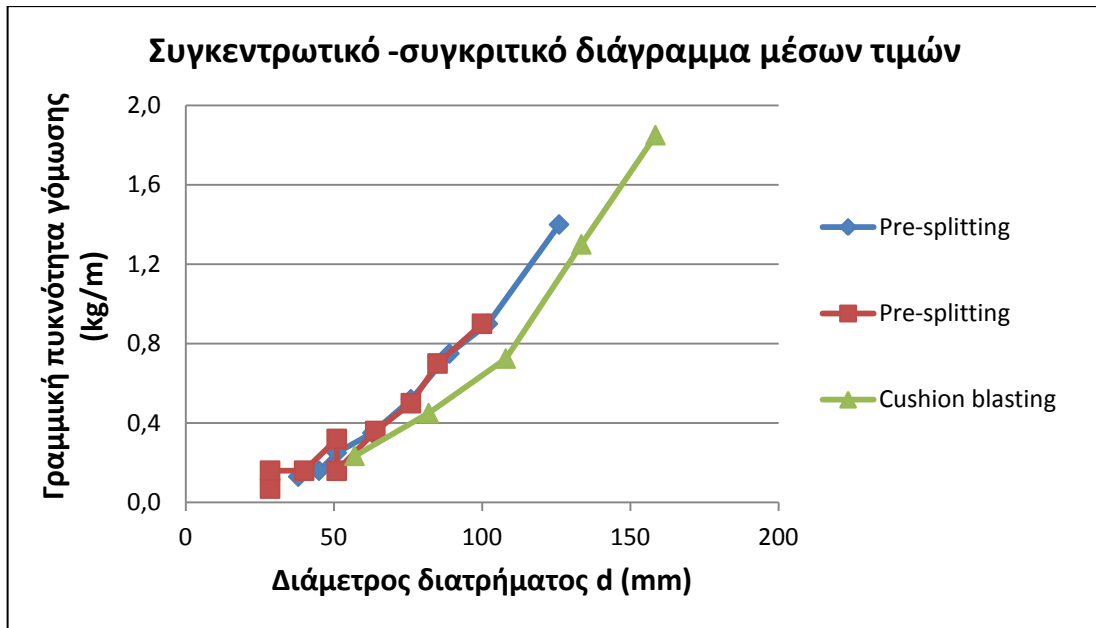
- Τα διατρήματα πρότμησης έχουν όλα την ίδια διάμετρο σε αντίθεση με τα διατρήματα της απαλής ανατίναξης όπου κάθε τρίτο ή τέταρτο διάτρημα έχει μεγαλύτερη διάμετρο από τα υπόλοιπα.
- Στην προτεινόμενη διάμετρο των διατρημάτων της κάθε μεθόδου. Στην μέθοδο πρότμησης δίνονται 30-64 mm και 50-150 mm σύμφωνα ερευνητές ενώ σε πίνακες από 25-126 mm. Αντίθετα στην μέθοδο απαλής ανατίναξης η προτεινόμενη διάμετρος από ερευνητές είναι 100-175 mm ενώ από πίνακες 50-165 mm. Γενικότερα η μέθοδος απαλής ανατίναξης χρησιμοποιεί μεγαλύτερες διαμέτρους.
- Στο μέγιστο βάθος διάτρησης διατρημάτων, για την πρότμηση δίνεται μέγιστο τα 18 m ενώ για την απαλή ανατίναξη τα 30 m.
- Όσον αφορά την γόμωση στις δύο μεθόδους, παρατηρήθηκε ότι δεν κρίνεται απαραίτητη η υποδιάτρηση και η ποσότητα γόμωσης στον πυθμένα έχει το ίδιο ποσοστό σε σχέση με την γόμωση στήλης. Όμως, στην μέθοδο απαλής ανατίναξης γομώνονται μόνο τα διατρήματα με μεγαλύτερη διάμετρο (κάθε τρίτο ή τέταρτο) και κρίνεται απαραίτητη η χρήση σφηνών ώστε η εκρηκτική ύλη μέσα στο διάτρημα να είναι προς το μέρος του προς εξόρυξη πετρώματος.



Σχήμα 5.33: Συγκριτικό διάγραμμα μέσω τιμών της μεθόδου πρότμησης (pre-splitting) και απαλής ανατίναξης (cushion blasting) με βάση τους πίνακες 5.3, 5.9 και 5.14.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι:

- Η μέθοδος απαλής ανατίναξης χρησιμοποιεί μεγαλύτερες αποστάσεις  $S$  από ότι η μέθοδος της πρότμησης, επομένως στην πρώτη μέθοδο πραγματοποιείται όρυξη λιγότερων διατρημάτων με αποτέλεσμα της μείωσης του κόστους διάτρησης.
- Η τιμή της διαμέτρου των διατρημάτων πρότμησης ξεκινάει από τα 28 mm περίπου και φτάνει μέχρι τα 126 mm. Σε αντίθεση με τις τιμές για την απαλή ανατίναξη που αρχίζουν από 58 mm και καταλήγουν στα 159 mm περίπου, γεγονός που αναφέρθηκε και προηγουμένως.



Σχήμα 5.34: Συγκριτικό διάγραμμα μέσω τιμών των μεθόδων πρότμησης (pre-splitting) και απαλής ανατίναξης (cushion blasting) με βάση τους πίνακες 5.3, 5.10 και 5.14.

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι:

- Χρησιμοποιείται η ίδια περίπου γραμμική πυκνότητα γόμωσης για τις δύο μεθόδους αλλά σε διαφορετική διάμετρο.
- Η μέθοδος απαλής ανατίναξης χρησιμοποιεί μεγαλύτερες τιμές διαμέτρων αλλά με περίπου ίδια γόμωση, γεγονός που μπορεί να οδηγεί σε πιο ικανοποιητική μείωση του κόστους εκρηκτικής ύλης σε σχέση με την μέθοδο πρότμησης (και λόγω του τρόπου γόμωσης στην συγκεκριμένη μέθοδο).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η συγκριτική ανάλυση των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης σε επιφανειακά και υπόγεια μέτωπα. Σύμφωνα με την περιγραφή των μεθόδων και με την σύγκριση που πραγματοποιήθηκε με βάση το θεωρητικό τους υπόβαθρο αλλά και με την βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μέθοδος πυκνής διάτρησης (line drilling) παρέχει σημαντικές μειώσεις των δονήσεων και μειωμένο κόστος εκρηκτικών λόγω της μηδαμινής έως και ελάχιστης, σε μερικές περιπτώσεις, ποσότητας εκρηκτικών που απαιτεί. Όμως είναι χρονοβόρα μέθοδος με αυξημένο κόστος διάτρησης.
- Η μέθοδος πυκνής διάτρησης σε σχέση με την μέθοδο πρότμησης (pre-splitting) και την μέθοδο ελαφρού φορτίου (cushion blasting) παρέχει πιο ομαλά πρανή με λιγότερες ρωγμές.
- Οι τιμές που δόθηκαν από τους πίνακες για την μέθοδο πυκνής διάτρησης συμπίπτουν με τις τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση  $S = k \cdot d$  για  $k = 3$ .
- Από την σύγκριση της μεθόδου πυκνής διάτρησης και πρότμησης προκύπτει ότι η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί μικρότερης διαμέτρου διατρήματα σε σχέση με την δεύτερη και η μέθοδος πρότμησης είναι οικονομικότερη από άποψη διάτρησης λόγω της μεγαλύτερης απόστασης  $S$  που χρησιμοποιεί μεταξύ των διατρημάτων σε σχέση με την πυκνή διάτρηση.
- Στην μέθοδο πρότμησης παρατηρήθηκαν αποκλίσεις στις προτεινόμενες τιμές των διαμέτρων των διατρημάτων πρότμησης της τάξεως των 25 mm καθώς και στις προτεινόμενες αποστάσεις για δεδομένη διάμετρο της τάξεως των 30 cm από τους πίνακες που εξετάστηκαν.
- Οι πίνακες που εξετάστηκαν για την μέθοδο πρότμησης παρουσίαζαν μικρές αποκλίσεις στις τιμές των γομώσεων για κάθε τιμή διαμέτρου εκτός από έναν. Η μεγαλύτερη διαφορά για τις προτεινόμενες τιμές γόμωσης παρατηρήθηκαν στις αποστάσεις  $S = 0,40-0,50$  m. Επίσης οι πίνακες που αναφέρονται σε

αποστάσεις άνω των 0,75 m παρουσιάζουν αποκλίσεις στις προτεινόμενες τιμές γραμμικής πυκνότητας γόμωσης.


- Στην μέθοδο πρότμησης παρατηρήθηκε ότι οι τιμές της εξίσωσης απόσταση συναρτήσει διαμέτρου ( $S = k \cdot d$ ) για τιμή  $k=10$  αποκλίνει λιγότερο με τα δεδομένα που δόθηκαν από τους αντίστοιχους πίνακες.
- Από την σύγκριση της μεθόδου πρότμησης με την μέθοδο λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) σε επιφανειακό μέτωπο παρατηρήθηκε ότι χρησιμοποιεί μικρότερες αποστάσεις  $S$  με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος διάτρησης της σε σχέση με την άλλη μέθοδο.
- Η μέθοδος πρότμησης χρησιμοποιεί μικρότερης διαμέτρου διατρήματα σε σύγκριση με την μέθοδο απαλής ανατίναξης (cushion blasting).
- Με την μέθοδο πρότμησης εξαλείφονται οι πίσω ζώνες με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται ενιαίο φορτίο για τον επόμενο κύκλο ανατινάξεων και καλύτερος κατακερματισμός του πετρώματος από τις επόμενες ανατινάξεις.
- Η μέθοδος πρότμησης δημιουργεί περισσότερο θόρυβο και εδαφικές δονήσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης, με αποτέλεσμα να μην συνιστάται η χρήση της σε περιοχές πλησίον κατασκευών.
- Η μέθοδος πρότμησης δεν παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε στοές και σήραγγες λόγω των κατακόρυφων πιέσεων που ασκούνται και εμποδίζουν τον σχηματισμό της οριζόντιας ζώνης πρότμησης.
- Η μέθοδος ελαφρού φορτίου (trim blasting) είναι απλούστερη και οικονομικότερη από την μέθοδο πυκνής διάτρησης λόγω της αυξημένης απόστασης  $S$  μεταξύ των διατρημάτων.
- Η μέθοδος ελαφρού φορτίου δίνει καλύτερη τελική επιφάνεια πρανούς σε σύγκριση με την μέθοδο πρότμησης σε κατακερματισμένα πετρώματα λόγω της ταχύτερης εκτόνωσης των αερίων έκρηξης που παρέχει η μέθοδος αυτή.
- Η μέθοδος ελεγχόμενης ανατίναξης ελαφρού φορτίου θεωρείται παρεμφερής με την μέθοδο λείων τοιχωμάτων από διάφορους ερευνητές αλλά η ουσιαστική διαφορά είναι στην διάταξη των διατρημάτων που ξεκινά από την πραγματική περίμετρο και προχωράει προς το τελικό όριο της εκσκαφής και όχι το αντίθετο.




- Η μέθοδος ελαφρού φορτίου και η μέθοδος απαλής ανατίναξης (cushion blasting) θεωρείται από ξένους ερευνητές ότι είναι αυτούσιες όμως παρατηρήθηκαν αρκετές διαφορές. Αρχικά στην διάτρηση των διατρημάτων, στην πρώτη μέθοδο όλα τα διατρήματα έχουν την ίδια διάμετρο ενώ στην δεύτερη κάθε τρίτο ή τέταρτο έχει μεγαλύτερη διάμετρο από τα υπόλοιπα και στην γόμωση τους αφού στην ελαφρού φορτίου γομώνονται όλα ενώ στην απαλή ανατίναξη μόνο αυτά με την μεγαλύτερη διάμετρο (με την χρήση σφηνών). Επίσης από την σύγκριση παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος ελαφρού φορτίου έχει μικρότερο κόστος διάτρησης από την μέθοδο απαλής ανατίναξης.
- Απόκλιση παρατηρήθηκε στις προτεινόμενες τιμές των διαμέτρων των διατρημάτων της μεθόδου ελαφρού φορτίου της τάξεως των 12 mm από τους διάφορους ερευνητές, η μικρότερη απόκλιση σε σχέση με τις άλλες μεθόδους.
- Η μέθοδος απαλής ανατίναξης χρησιμοποιεί μεγαλύτερη διάμετρο διατρημάτων από τις υπόλοιπες μεθόδους και γενικά συνιστάται χρήση ίδιας διαμέτρου με τα διατρήματα της κύριας ανατίναξης. Επίσης προτείνεται το μεγαλύτερο βάθος διάτρησης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους.
- Οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων ανατίναξης που δόθηκαν από τους πίνακες για την μέθοδο απαλής ανατίναξης παρουσίαζαν ελάχιστες αποκλίσεις. Παρατηρήθηκε όμως απόκλιση στην προτεινόμενη διάμετρο των διατρημάτων της τάξεως των 50 mm από τους διάφορους ερευνητές.
- Οι τιμές που δίνει η σχέση απόστασης  $S$  συναρτήσεως φορτίου  $B$  ( $S=1,2-1,3 \cdot B$ ) αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από τις αντίστοιχες προτεινόμενες τιμές των πινάκων.
- Σε σύγκριση με την μέθοδο πυκνής διάτρησης, η μέθοδος απαλής ανατίναξης είναι απλούστερη και οικονομικότερη από άποψη διάτρησης λόγω της αυξημένης απόστασης  $S$ .
- Στην σύγκριση της απαλής ανατίναξης με την μέθοδο της πρότμησης παρατηρήθηκε ότι απαιτεί λιγότερα διατρήματα από την πρότμηση, λόγω της μεγαλύτερης απόστασης  $S$  που χρησιμοποιεί με αποτέλεσμα να έχει και μικρότερο κόστος διάτρησης από την άλλη.

- Η μέθοδος απαλής ανατίναξης έχει μικρότερο κόστος εκρηκτικών από την μέθοδο ελαφρού φορτίου (trim blasting) και της μεθόδου πρότμησης (pre-splitting).
- Η ανατίναξη διαμόρφωσης (buffer blasting) εφαρμόζεται σπανιότερα και κυρίως σε συνδυασμό με κάποια άλλη όπως την μέθοδο πρότμησης ή την μέθοδο διάτρησης, γεγονός που την καθιστά πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα.
- Η μέθοδος λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) εφαρμόζεται και σε επιφανειακά μέτωπα αλλά κυρίως σε υπόγεια. Στην υπόγεια εφαρμογή της μεθόδου εκτός από την μείωση των δονήσεων επιφέρει και σημαντική μείωση στην απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος για την επένδυση της σήραγγας.
- Στην επιφανειακή εφαρμογή της μεθόδου λείων τοιχωμάτων παρατηρήθηκε από τους πίνακες που δόθηκαν ότι οι τιμές συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό εκτός από την διάμετρο που παρατηρήθηκε μια μικρή απόκλιση.
- Στην μέθοδο λείων τοιχωμάτων σε υπόγεια μέτωπα, οι προτεινόμενες αποστάσεις  $S$  για συγκεκριμένες διαμέτρους παρατηρήθηκε απόκλιση της τάξεως των 10 cm μεταξύ των τιμών των πινάκων.
- Στην υπόγεια εφαρμογή της μεθόδου λείων τοιχωμάτων οι τιμές που προκύπτουν από την σχέση της απόστασης συναρτήσει της διαμέτρου και οι τιμές που δίνουν οι πίνακες συμπίπτουν ικανοποιητικά, ειδικά για τιμές  $S=15 \cdot d$ .
- Στους παρακάτω πίνακες 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται οι μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης που εφαρμόζονται σε επιφανειακό μέτωπο κατά αύξουσα σειρά όσον αφορά το συγκριτικό κόστος διάτρησης και το κόστος εκρηκτικών που επιφέρει η κάθε μια.
- Τέλος παραθέεται ο πίνακας 6.3 που αναφέρει συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα για την κάθε μέθοδο ελεγχόμενης ανατίναξης ξεχωριστά.

Πίνακας 6.1: Κατάταξη μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης σε επιφανειακό μέτωπο ανάλογα το κόστος διάτρησης.

Μεταβολή κόστους διάτρησης	Μέθοδος ελεγχόμενης ανατίναξης
<b>Αύξηση</b> 	Ελαφρού φορτίου
	Λείων τοιχωμάτων
	Απαλής ανατίναξης
	Πρότμησης
	Πυκνής διάτρησης

Πίνακας 6.2: Κατάταξη μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης σε επιφανειακό μέτωπο ανάλογα με το κόστος εκρηκτικών.

Μεταβολή κόστους εκρηκτικών	Μέθοδος ελεγχόμενης ανατίναξης
<b>Αύξηση</b> 	Πυκνής διάτρησης
	Απαλής ανατίναξης
	Ελαφρού φορτίου
	Λείων τοιχωμάτων
	Πρότμησης

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας συμπερασμάτων για την κάθε μέθοδο ελεγχόμενης ανατίναξης ξεχωριστά.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΟΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ S	ΦΟΡΤΙΟ B	ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<b>ΠΥΚΝΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ</b>	επιφανειακά	2	1	-	ομοιογενή και συνεκτικά	μείωση δονήσεων και ομαλότερα πρηνή με λιγότερες ρωγμές	$S=k*d$ για $k=3$ ταύτιση των τιμών που δόθηκαν από τους πίνακες	Χρονοβόρα και δυσκολία στην απαίτηση ευθυγράμμισης
<b>ΠΡΟΤΜΗΣΗΣ</b>	επιφανειακά	3	3	-	ομοιογενή	μείωση του κατακερματισμού του πετρώματος	$S=k*d$ για $k=10$ ταύτιση των τιμών που δόθηκαν από τους πίνακες	Αυξημένες δονήσεις σε σχέση με τις μεθόδους
<b>ΕΛΑΦΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ</b>	επιφανειακά	6	6	4	ομοιογενή και κατακερματισμένα	καλύτερη τελική επιφάνεια πρηνούς (πιο λεία)	-	Περισσότερο διατρητικό εξοπλισμό και όχι καλά αποτελέσματα σε ανομοιογενή πετρώματα
<b>ΑΠΑΛΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ</b>	επιφανειακά	4	4	2	ομοιογενή και αποσαθρωμένα	καλύτερη τελική επιφάνεια πρηνούς	$B= (1,2-1,3)S$ και $B>1,3S$ μη ταύτιση των τιμών που δόθηκαν από τους πίνακες	Καθυστερήσεις στην παραγωγή και ιδιαίτερη προσοχή σε φορτίο και επιγώμωση
<b>ΛΕΙΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ-ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ</b>	επιφανειακά	5	5	3	ομοιογενή, συμπαγή και διαβρωμένα	μείωση υπέρθραυσης του πετρώματος	-	Καθυστερήσεις στην παραγωγή
<b>ΛΕΙΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ-ΥΠΟΓΕΙΑ</b>	υπόγεια	1	2	1	ομοιογενή, συμπαγή και διαβρωμένα	μείωση υπέρθραυσης του πετρώματος και μείωση δαπανών για επένδυση σήραγγας	$S = (15-16)d$ ταύτιση τιμών που δόθηκαν από τους πίνακες	Υπέρθραυση σε λεπτοπλακώδη διάστρωση πετρώματος η οποία τέμνει το επίπεδο σήραγγας

Η κλίμακα 1 ως 6 δηλώνει την μικρότερη και την μεγαλύτερη τιμή αντίστοιχα.

## 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

- Για την ουσιαστικότερη αντίληψη της αποτελεσματικότητας της κάθε μεθόδου ελεγχόμενης ανατίναξης θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή της σε μέτωπο εξόρυξης.
- Σε κάθε μέθοδο θα πρέπει να πραγματοποιηθεί συσχέτιση με το πεδίο εφαρμογής της όσον αφορά τις ιδιότητες του πετρώματος λόγω της μεταβολής αυτών κατά την διάρκεια των εργασιών εξόρυξης.
- Να δοθούν στοιχεία σε κάθε μέθοδο ξεχωριστά ώστε να υπολογίζεται προσεγγιστικά το συνολικό της κόστος, για να μπορεί περαιτέρω να γίνει αξιολόγηση και συσχέτιση της αποτελεσματικότητας της κάθε μεθόδου με το κόστος της.
- Να πραγματοποιηθούν τροποποιήσεις των μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης στο σχεδιασμό τους σε περιπτώσεις εφαρμογής τους σε ανομοιογενή πετρώματα για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.
- Να επισημανθούν τυχόν περισσότερα παραδείγματα της μεθόδου πυκνής διάτρησης ώστε να δοθεί μια πιο σαφή εικόνα των περιπτώσεων που χρήζεται αναγκαία η εφαρμογή της.
- Να διευκρινιστεί αν ο λόγος που παρατηρήθηκαν αποκλίσεις στην διάμετρο των διατρημάτων, στην γραμμική πυκνότητα γόμωσης και στις υπόλοιπες παραμέτρους των ανατινάξεων οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες εξόρυξης.

- Να αναφερθούν περισσότερα στοιχεία καθώς και περιπτώσεις εφαρμογής της ανατίναξης διαμόρφωσης (buffer blasting) και να διευκρινιστεί υπό ποιες συνθήκες απαιτείται να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο.
- Να διευκρινιστεί ο λόγος που η μέθοδος πρότμησης (pre-splitting) παρέχει περισσότερες δονήσεις και θόρυβο από τις υπόλοιπες μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης και να πραγματοποιηθεί κάποια τροποποίηση στον σχεδιασμό της για την μείωση αυτών.
- Συνιστάται η κατασκευή διαγράμματος ροής το οποίο να περιλαμβάνει τις μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης καθώς και τις βασικές παραμέτρους τους, το οποίο είναι σημαντικό να υλοποιηθεί σε μορφή έμπειρου συστήματος.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική**

- Αγιουτάντης, Ζ. Γ. Στοιχεία Διάτρησης και Ανατίναξης, Εκδόσεις Ίων, σελ 229, Αθήνα, 2009.
- Πολυχρονόπουλος, Ι. Γ. Εκρηκτικές Ύλες - Τεχνική Εξορύξεως των Πετρωμάτων – Καθαίρεση Κατασκευών, Εκδόσεις Σελλούντος, σελ. 589, Αθήνα, 1979.
- Πολυχρονόπουλος, Ι. Γ. Εκρηκτικές Ύλες - Τεχνική Εξορύξεως των Πετρωμάτων – Καθαίρεση Κατασκευών, Εκδόσεις Σέλκα, σελ. 624, Αθήνα, 2001.
- Τσουτρέλης, Χ.Ε., "Μέθοδοι ελεγχόμενης εξορύξεως", Μεταλλειολογικά και Μεταλλουργικά Χρονικά, Τόμος 1, Νο 2, σελ. 19-26, Αθήνα, 1971.
- Τσουτρέλης, Χ. Ε. Εκρηκτικές ύλες και τεχνική των ανατινάξεων, Τόμος 1, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., σελ. 285, Αθήνα, 1997.
- Τσουτρέλης, Χ. Ε. Εκρηκτικές ύλες και τεχνική των ανατινάξεων, Τόμος 2, σελ. 418, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001.

### **Διεθνής**

- Bhandari, S., "Engineering rock blasting operations", 370p, Balkema, 1997.
- Clark, G.B., Principles of Rock Fragmentation, John Wiley and Sons, New York, 595p, 1987.
- Bureau of Mines Information Circular 8925, Explosives & Blasting Procedures Manual, (1986).

- Dessureault, S., "Rock Excavation" Course Notes, University of Arizona, Mining and Geological Engineering, 214p, Spring 2006.
- Dick, R.A. and Gletcher L.R., A study on fragmentation from bench blasting in limestone at a reduced scale, U.S. Bureau of Mines, RI 7704, Washington D.C., 1973.
- Dick, R.A., L.R. Fletcher and D.V. D' Andrea, "Explosives and Blasting Manual", Information Circular 8405, US Bureau of Mines, Washington, DC, 1983.
- Du Pont, "Blaster's Handbook", 15<sup>η</sup> έκδοση, Wilmington, Delaware, Η.Π.Α, 1967.
- Hartman, H.L., "Introductory mining engineering", Wiley Interscience Publications, 633p, 1987.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P., "Engineering Rock Mechanics, an introduction to the principles", Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London, Pergamon Press, pp 248-255, 1997
- Hustrulid, W., Blasting Principles for Open Pit Mining, Vol. 1, General Design Concepts, A.A. Balkema, Rotterdam, 382p, 1999.
- Jimeno, C.L., and E.L. Jimeno and F.J.A. Carcedo, "Drilling and Blasting of rocks", Balkema, 391p, 1995.
- Khosrou S. H., "Theoretical and experimental investigation of wall-control blasting methods", Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill, University Montreal, Canada, 1996.



- Konya, C.J. and Walter, E.J., Blasting and Overbreak Control, U.S., Department of Transportation, Federal Highway Administration, Nation Highway Institute, Publication No FHWA-HI-92-001, Virginia 22101, 415p, 1991.
- Konya, C.J., Blast Design, International Development, Montville, 230p, 1995.
- Kutter, H.K. and Fairhurst, C., On the fracture process in blasting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr, No 8, No 3, 181-202, 1971.
- Mohd Lip M., Blasting Lecture Notes, School of Materials and Mineral Resources Engineering, Univ Sains Malaysia (2012)  
([http://material.eng.usm.my/v3/index.php?option=com\\_jdownloads&Itemid=183&view=viewcategory&catid=6&limitstart=10](http://material.eng.usm.my/v3/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=183&view=viewcategory&catid=6&limitstart=10))
- Olofsson, S.O., Applied Explosives Technology for Construction and Mining. Applex Applied Explosives Technology, Ärla, Sweden, 489p, 1988.
- Pearse, G.E., Rock Blasting - some aspects on the theory and practice, Mine and Quarry Engineering, V. 21, No1, 1955.
- Persson, P.A., R. Holmberg and J. Lee, "Rock Blasting and Explosives engineering", CRC Press, New York, 540p, 1994.
- Pilshaw, S.R., "Pre-splitting has arrived", Rock Products, v.94, n.6, p.p 53-59, 1991
- Roberts, A., "Applied geotechnology a text for students and engineers on rock excavation and related topics", Mackay School of mines, University of Nevada, Pergamon Pres, 344p, 1981.

- Sharma, P.D., “Controlled Blasting Techniques – Means to mitigate adverse impact of blasting in Open pits, Quarry, Tunnel, UG metal mines and construction workings”, Mining Engineers’ Journal, pp. 1-19, January 2008.
- Zhang Y. and J. Huang, “Study on theoretical analysis of buffer blasting”, Procedia Engineering, 7, pp. 342-344, 2010.