

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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ**  
**ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΚΡΗΞΗΣ ΕΝΤΟΣ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΩΝ**  
**ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΩΝ**



**ΚΟΥΛΑΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)**

**ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ**

**ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Κ. ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ**

**ΧΑΝΙΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2003**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση της προσφοράς της ταχύτητας έκρηξης των εκρηκτικών και του χρόνου επιβράδυνσης στην κατανόηση των ανατινάξεων.

Στην εργασία παρατίθενται οι κανόνες που διέπουν την έκρηξη καθώς και οι κυριότεροι τύποι εκρηκτικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στο εμπόριο. Παράλληλα αναφέρονται τα κυριότερα μέσα έναυσης και συστήματα επιβράδυνσης χρόνου.

Κατόπιν παρουσιάζονται οι τεχνολογίες μέτρησης των ιδιοτήτων των εκρηκτικών υλών. Αυτές συνίστανται στις δοκιμές μέτρησης ισχύος, ευαισθησίας, πίεσης και ταχύτητας έκρηξης. Εκτενέστερη αναφορά γίνεται στις δοκιμές μέτρησης ταχύτητας έκρηξης και ιδιαίτερα της μεθόδου αντίστασης καλωδίου η οποία και χρησιμοποιήθηκε. Κατά την μέθοδο αυτή το καλώδιο μέτρησης τοποθετείται κατά μήκος του εξεταζόμενου διατρήματος και από τον ρυθμό καταστροφής του υπολογίζεται η ταχύτητα έκρηξης του εκρηκτικού.

Στη συνέχεια παρατίθεται ο τρόπος λειτουργίας του οργάνου μέτρησης VODMate της Instantel που χρησιμοποιήθηκε και δίνονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν.

Τέλος πραγματοποιήθηκε ανάλυση των μετρήσεων ταχύτητας έκρηξης σε επιφανειακές ανατινάξεις με το λειτουργικό πακέτο Blastware Analysis της Instantel. Το πρόγραμμα αυτό μετατρέπει τα δεδομένα σε γραμμική μορφή, που στον ένα άξονα μεταφέρεται ο χρόνος και στον άλλο το μήκος του καλωδίου και από την κλίση μετράται η ταχύτητα έκρηξης.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου για την υποστήριξη που μου παρείχαν και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν κατά την φοίτηση μου στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θερμές ευχαριστίες δίνονται στην εξεταστική επιτροπή κ. Ζ. Αγιουτάντη, κ. Κ. Κομνίτσα και κ. Γ. Εξαδάκτυλο για την συνεργασία τους. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου κ. Ζ. Αγιουτάντη για την βοήθεια που μου παρείχε και την αλληλοκατανόηση που υπήρξε κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να είχε γραφτεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του κ. Η. Μπαλικτσή, Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων και Προέδρου του Δ.Σ. της εταιρίας ΕΞΟΡΥΞΗ Α.Ε. καθώς και του επιτελείου της, που μου έδωσε την δυνατότητα να έρθω σε επαφή με όργανα τελευταίας τεχνολογίας.

Χανιά, Νοέμβριος 2003.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2. ΑΠΛΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	2
1.3. ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ, ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	3
1.3.1. Ορισμός εκρηκτικής ύλης.....	3
1.3.2. Σύσταση των εκρηκτικών υλών.....	4
1.3.3. Έναυση και πυροδότηση.....	6
1.3.4. Ανάφλεξη και έκρηξη.....	7
1.3.5. Μετατροπή ανάφλεξης σε έκρηξη και αντίθετα.....	9

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΣΩΝ ΕΝΑΥΣΗΣ

2.1. ΘΕΩΡΙΑ ΕΚΡΗΞΗΣ.....	11
2.1.1. Το μοντέλο της έκρηξης.....	11
2.1.2. Μορφή του μοντέλου της έκρηξης.....	12
2.2. Ιδιότητες εκρηκτικών υλών.....	15
2.2.1. Χημεία.....	16
2.2.2. Ισχύς.....	18
2.2.3. Εκλύομενη ενέργεια.....	20
2.2.4. Πίεση.....	21
2.2.5. Πυκνότητα.....	24
2.2.6. Ανθεκτικότητα στο νερό.....	27
2.2.7. Ευαισθησία.....	29
2.2.8. Ταχύτητα έκρηξης.....	30
2.2.8.1. Τύπος του εκρηκτικού.....	31
2.2.8.2. Διάμετρος της εκρηκτικής στήλης.....	33
2.2.8.3. Βαθμός περιορισμού.....	34
2.2.8.4. Μέγεθος κόκκου.....	36
2.2.8.5. Τρόπος έναυσης του εκρηκτικού.....	37
2.2.8.6. Πυκνότητα γόμωσης.....	38
2.2.8.7. Θερμοκρασία.....	40
2.3. ΕΜΠΟΡΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ.....	41
2.3.1. Κατάταξη των εμπορικών εκρηκτικών υλών.....	42
2.3.2. Βραδύκαυστές εκρηκτικές ύλες – Πυρίτιδες.....	43
2.3.2.1. Κοκκώδης πυρίτιδα.....	45
2.3.2.2. Πεπιεσμένη πυρίτιδα σε φυσίγγια.....	46
2.3.3. Διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες της οικογένειας των δυναμίτιδων.....	47
2.3.3.1. Κοινή δυναμίτιδα.....	48
2.3.3.2. Ζελατίνες.....	49
2.3.3.3. Ζελατινοδυναμίτιδες.....	49
2.3.3.4. Αμμωνιοδυναμίτιδες.....	50
2.3.3.5. Εκρηκτικές ύλες ασφαλείας.....	51



2.3.4. Διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες με βάση το νιτρικό αμμώνιο.....	51
2.3.4.1. ANFO.....	51
2.3.4.2. Slurries.....	61
2.3.4.3. Γαλακτώματα.....	63
2.3.4.4. Βαρύ ANFO.....	65
2.3.4.5. Αργιλούχες εκρηκτικές ύλες.....	67
2.3.5. Ειδικοί τύποι εκρηκτικών υλών.....	69
2.3.5.1. Cardox.....	69
2.3.5.2. Μορφοποιημένες εκρηκτικές ύλες.....	71
2.4. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ.....	72
2.4.1. Ταξινόμηση ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής.....	72
2.4.2. Ταξινόμηση ανάλογα με την ταχύτητα έκρηξης και την ευαισθησία....	72
2.4.3. Ταξινόμηση ανάλογα με την ασφάλεια κατά την μεταφορά.....	73
2.4.4. Ταξινόμηση ανάλογα με τα αέρια προϊόντα έκρηξης.....	74
2.5. ΜΕΣΑ ΕΝΑΥΣΗΣ.....	75
2.5.1. Μη Ηλεκτρικά μέσα.....	76
2.5.1.1. Κοινά καψύλλια δυναμίτιδας.....	76
2.5.1.2. Θρυαλλίδα ασφαλείας.....	78
2.5.1.3. Θρυαλλίδα ομαδικής πυροδότησης.....	79
2.5.1.4. Ακαριαία θρυαλλίδα.....	80
2.5.1.5. Σύστημα NONEL.....	83
2.5.2. Ηλεκτρικά μέσα.....	94
2.5.2.1. Ηλεκτρικά καψύλλια πυρίτιδας.....	94
2.5.2.2. Ηλεκτρικά καψύλλια των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών.....	95
2.5.2.3. Ηλεκτρονικά καψύλλια.....	101
2.6. ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΕΚΡΗΞΗΣ – ΚΑΠΝΟΙ.....	103
2.6.1. Μέθοδοι δοκιμής αναθυμιάσεων.....	105

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ**

3.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	106
3.1.1. Δοκιμή Trauzl.....	106
3.1.2. Δοκιμή βαλλιστικού εκκρεμούς.....	108
3.1.3. Δοκιμή Hess.....	108
3.1.4. Δοκιμή κρατήρα.....	109
3.2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....	110
3.2.1. Μέτρηση της λειτουργικής ευαισθησίας.....	110
3.2.2. Μέτρηση της ευαισθησίας σε κρούση και τριβή.....	111
3.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΕΚΡΗΞΗΣ.....	113
3.4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΚΡΗΞΗΣ (VOD).....	114
3.4.1. Ασυνεχείς μέθοδοι μέτρησης.....	115
3.4.1.1. Η μέθοδος D’Autriche.....	116
3.4.1.2. Μέθοδος χρονογράφου.....	117
3.4.2. Συνεχείς μέθοδοι μέτρησης.....	118
3.4.2.1. Κάμερες ταχείας λήψης.....	118

3.4.2.2 Μέθοδος αιχμών ταχύτητας.....	120
3.4.2.3 Μέθοδος αντίστασης καλωδίου.....	121
3.4.2.4 Μέθοδος CORRTEx.....	121
3.4.2.5 Μέθοδος SLIFER.....	122
3.4.3. Περιγραφή οργάνου.....	123
3.4.4 Ρυθμίσεις οργάνου - Διαδικασία μέτρησης.....	126
3.4.4.1 Απαιτούμενα υλικά – αναλώσιμα.....	126
3.4.4.2 Σχεδιασμός της μέτρησης.....	126
3.4.4.3 Τοποθέτηση του καλωδίου μέτρησης ταχύτητας έκρηξης.....	127
3.4.4.4 Εγκατάσταση του οργάνου μέτρησης VODMate.....	128
3.4.4.5 Σύνδεση καλωδίου στο όργανο μέτρησης VODMate.....	128
3.4.4.6 Αρχή μέτρησης.....	129

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

4.1 ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΑΔΡΑΝΩΝ ΜΟΥΛΑΤΗΣ Α.Ε.....	130
4.2 ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ.....	137
4.2.1 Πρώτη μέτρηση.....	137
4.2.2 Δεύτερη μέτρηση.....	143
4.2.3 Τρίτη μέτρηση.....	150
4.2.4 Τέταρτη μέτρηση.....	157
4.3 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΙΚΟΝΙΟΥ.....	160

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

5.1. ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	167
5.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	169

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....</b>	<b>171</b>
-------------------------	------------

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Είναι σαφές ότι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ανατινάξεων δεν μπορεί πλέον να παραμένει αποκλειστικά μια «εμπειρική σχέση ανθρώπου με το βράχο». Η σχέση αυτή διέπεται από επιστημονική γνώση, τεχνογνωσία και τεχνολογικές εξελίξεις. Στην προσπάθεια να γίνει μία ανατίναξη, πιο αποδοτική, παραγωγική, ασφαλής και με λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον, (φυσικό και ανθρωπογενές) είναι αναγκαίο μαζί με την εμπειρία και την πρακτική γνώση να ενσωματώνονται οι τεχνολογικές εξελίξεις και η διαθέσιμη τεχνολογία.

Οι τεχνολογίες οι οποίες εφαρμόζονται σήμερα συνίστανται σε αυτές που λαμβάνουν χώρα πριν, κατά την διάρκεια και μετά την ανατίναξη.

Οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται πριν την ανατίναξη απαιτούν γνώση της γεωλογίας του πετρώματος και της γεωμετρίας του μετώπου. Η γνώση της γεωλογίας δεν είναι κατ' ανάγκη όμοια με τη λεπτομερή περιγραφή των γεω-επιστημονικών μελετών, αλλά είναι γενική αφού ο θρυμματισμός του πετρώματος σχετίζεται με την τη γεωλογία και τεκτονική του. Μεγάλης σημασίας για την ανατίναξης είναι η γνώση της γεωμετρίας του μετώπου, διότι δονήσεις, θόρυβος, θρυμματισμός και εκτινάξεις βράχων εξαρτώνται από το σωστό φορτίο του μετώπου. Επίσης παρόμοιες επιπτώσεις με την ανομοιομορφία του μετώπου, έχει και η απόκλιση διατρημάτων που δημιουργεί μείωση του θρυμματισμού και αύξηση των δονήσεων.

Οι μετρήσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά την ανατίναξη αποτελούνται από μετρήσεις της ταχύτητας έκρηξης της διατρητικής στήλης και από μετρήσεις δονήσεων. Οι μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης γίνονται συνήθως σε πολλά διατρήματα και κατά αυτό τον τρόπο συλλέγονται πληροφορίες για τους χρόνους καθυστέρησης. Οι μετρήσεις δονήσεων αφορούν την επιτάχυνση του εδάφους και όταν γίνονται κοντά στην ανατίναξη σκοπό έχουν την εξέταση των χρόνων επιβράδυνσης, ενώ οι μετρήσεις δονήσεων σε απόσταση από την ανατίναξη πραγματοποιούνται για λόγους ελέγχου και συμμόρφωσης με κανονισμούς που διέπουν την ανατίναξη και στόχο

έχουν την μείωση της ενόχλησης των περιοίκων ή την αποφυγή του κινδύνου πρόκλησης βλαβών και δυσμενών επιπτώσεων.

Τέλος οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται είναι αυτές της μέτρησης θρυμματισμού οι οποίες γίνονται με ανάλυση εικόνας για την μελέτη του θρυμματισμού. Τα στάδια της ανάλυσης είναι, η φωτογράφιση, η μεταφορά εικόνας στον υπολογιστή, ο προσδιορισμός κλίμακας, η αναγνώριση των άκρων των κόκκων από τον υπολογιστή και η δημιουργία δικτύου θραυσμάτων, η επιμέλεια και οι υπολογισμοί.

Η ανατίναξη περιλαμβάνει μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση πολλών μεταβλητών, μερικές από τις οποίες είναι λίγο ως πολύ άγνωστες. Για το λόγο αυτό πολλές φορές έχει θεωρηθεί ως μία διεργασία που ακολουθεί εμπειρικούς κανόνες. Από τους προηγούμενα γίνεται κατανοητό ότι με τον κατάλληλο εξοπλισμό και μεθοδολογία είναι δυνατό να συλλεχθούν στοιχεία και με την κατάλληλη επεξεργασία τους να βελτιωθεί η όλη ανατίναξη.

Η παρούσα εργασία λοιπόν, αποτελεί μία μελέτη σχεδιασμού ανατίναξης η οποία αναφέρεται όμως σε μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης (**Velocity Of Detonation, VOD**) εκρηκτικών εντός της διατρητικής στήλης (Κατσαμπάνης-Μπαλκτσής, 2000).

Η μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης προσφέρει σημαντικά στοιχεία για την απόδοση και την ποιότητα των εκρηκτικών, πληροφορίες για τους χρόνους επιβράδυνσης, πληροφορίες για δυσλειτουργίες ενώ αποτελεί ένα εργαλείο για την κατανόηση των ανατινάξεων. Η μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης βρίσκει επίσης εφαρμογές στη επιλογή – καταλληλότητα έναυσης, στα προβλήματα μίξης με το υλικό επιγόμεσης και στην επίδραση του τρόπου- τεχνικής γόμωσης στην ανατίναξη.

## 1.1 ΑΠΛΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Ορισμένοι απλοί ορισμοί και διάφορες έννοιες που χρησιμοποιούνται δίνονται στη συνέχεια (Τσουτρέλης, 1997):

**Πέτρωμα:** Σύνθετη φυσική ύλη, που αποτελείται από ένα ή περισσότερα συνεκτικά μεταξύ τους συνδεδεμένα ορυκτά. Οι ασβεστόλιθοι, τα μάρμαρα, οι γρανίτες, οι σχιστόλιθοι, οι σερπεντινίτες είναι μερικοί τύποι πετρωμάτων, που συνιστούν τον φλοιό της γης.

**Εξόρυξη:** Η τμηματική απόσπαση του πετρώματος από την φυσική του θέση. Για να πραγματοποιηθεί η εξόρυξη κατά τρόπο συνεχή απαιτείται η απομάκρυνση από τον χώρο εργασίας του εξορυγμένου πετρώματος.

**Ανατίναξη:** Είναι η εξόρυξη εκείνη, που πραγματοποιείται με χρήση εκρηκτικών υλών.

**Μέτωπο εξόρυξης:** Είναι το περιορισμένο τμήμα του πετρώματος εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η εξόρυξή του. Το μέτωπο εξόρυξης μπορεί να είναι μία στοά, ένα φρέαρ, μία υπαίθρια βαθμίδα ή ακόμη μία οποιαδήποτε φυσική επιφάνεια του πετρώματος.

**Διατρήμα:** Κυλινδρική οπή του πετρώματος εντός της οποίας τοποθετείται η προς έκρηξη ποσότητα της εκρηκτικής ύλης. Τα διατρήματα έχουν συνήθως διάμετρο από 32 mm έως 300 mm και μήκη μέχρι 20 m. Σε ορισμένες υπαίθριες και υπόγειες ανατινάξεις χρησιμοποιούνται διατρήματα ακόμη μεγαλύτερου μήκους.

**Γόμωση:** Η εργασία τοποθέτησης της εκρηκτικής ύλης εντός του διατρήματος. Με τον ίδιο όρο καθορίζεται επίσης η τοποθετημένη εντός του διατρήματος ποσότητα εκρηκτικής ύλης.

**Επιγόμωση:** Η εργασία αεροστεγούς έμφραξης του άνω τμήματος του διατρήματος με αδρανές υλικό, που πραγματοποιείται αμέσως μετά την γόμωση. Με τον ίδιο όρο προσδιορίζεται το είδος του υλικού επιγόμωσης (άμμος, άργιλος, προϊόντα διάτρησης κτλ.).

**Υπόνομος:** Το διάτρημα εκείνο, που έχει γομωθεί με εκρηκτική ύλη και επιγομωθεί κατάλληλα και είναι έτοιμο για έκρηξη.

## **1.2 ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ. ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ**

### **1.2.1 Ορισμός εκρηκτικής ύλης**

**Εκρηκτική Ύλη:** Ως εκρηκτική ύλη ορίζεται μία (χημική) ουσία ή μίγμα ουσιών, η οποία όταν ενεργοποιηθεί υπό την επίδραση θερμότητας ή με κρούση, λόγω της θερμοδυναμικής της αστάθειας στις συνθήκες που βρίσκεται, υφίσταται μία ταχύτατη και αυτοδιαδιδόμενη με σταθερή ταχύτητα εξώθερμη αντίδραση (οξειδωση), που καλείται έκρηξη. Κατά την έκρηξη, που αποτελεί την βιαιότερη στην

φύση χημική αντίδραση, η χημική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια των προϊόντων της αντίδρασης, η οποία στην συνέχεια ως "μηχανική ενέργεια" με κρουστικό παλμό προκαλεί την θραύση του πετρώματος. Ανάλογα με την χημική σύνθεση της εκρηκτικής ύλης ο ρυθμός της αντίδρασης μέσα σε μια γόμωση στήλης μπορεί να είναι ταχύτερος (μέχρι 8000 m/s), οπότε έχουμε εκρηκτική αντίδραση (detonation), ή σχετικά βραδύς (μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα το δευτερόλεπτο), οπότε έχουμε ταχεία ανάφλεξη ή αλλιώς κατάκαυση (deflagration) (Τσουτρέλης, 1997).

**Εκρηκτικό Μέσο:** Χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε υλικό ή μίγμα, το οποίο έχει εκρηκτικές ιδιότητες, αλλά του οποίου τα συστατικά δεν χαρακτηρίζονται σαν εκρηκτικές ύλες. Σύμφωνα με τυποποιημένες δοκιμές του Γραφείου Μεταλλείων των ΗΠΑ, εκρηκτικά μέσα θεωρούνται τα υλικά τα οποία δεν είναι αρκετά ευαίσθητα ώστε να μπορεί να εναυθούν με εκρηκτικό καψύλλιο ισχύος No. 8 σε μη περιορισμένη κατάσταση (Dick, 1973) (Αγιουτάντης, 1996).

### 1.2.2 Σύσταση των εκρηκτικών υλών

Οι εκρηκτικές ύλες αποτελούνται κατά κανόνα από τουλάχιστον δύο χημικές ουσίες από τις οποίες η μία είναι καύσιμη ύλη, ουσία ελλιπή σε οξυγόνο (κυρίως ανθρακούχος) και η άλλη οξειδωτική, φορέας οξυγόνου, που είναι συνήθως κάποιο νιτρικό άλας, (π.χ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ). Η χημική αντίδραση των δύο ουσιών καθιστά την εκρηκτική ύλη αυτάρκη σε οξυγόνο. Τα συστατικά όλων των ουσιών αυτών είναι άτομα άνθρακα (C), υδρογόνου (H), οξυγόνου (O) και αζώτου (N) με προσθήκες άλλων στοιχείων. Για τον λόγο αυτό πολλές φορές καλούνται εκρηκτικές ύλες τύπου C-H-N-O. Ορισμένες εκρηκτικές ύλες, που χρησιμοποιούνται κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς, όπως το PETN, το RDX και το TNT αποτελούνται από μία μόνο χημική ουσία, που η ίδια παρέχει το απαραίτητο οξυγόνο για την αντίδραση. Μερικές άλλες εκρηκτικές ύλες περιέχουν μικρές ποσότητες αργιλίου (Al), διοξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$  σε μορφή γυαλιού) ή άλλα στοιχεία ή ενώσεις. Στον Πίνακα 1.1 παρέχονται οι πλέον συνήθεις ουσίες και στοιχεία, που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για την παραγωγή εκρηκτικών υλών.

Πίνακας 1.1: Συνήθεις ουσίες και στοιχεία, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εκρηκτικών υλών (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

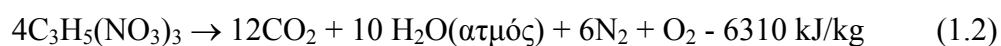
Χημική ουσία		Χημική σύσταση	Ρόλος της στην παρασκευή εκρηκτικών υλών
Νιτρογλυκόλη	Ethylene glycol dinitrate(EGDN)	$C_2H_4(NO_3)_2$	Εκρηκτική ουσία
Νιτροκυτταρίνη <sup>+</sup>	Nitrocellulose	$[C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_n$	Χαμηλώνει σημείο πήξεως Εκρηκτική ουσία. Προσ- δίδει ζελατινώδη υφή
Νιτρογλυκερίνη	Nitroglycerin(NG)	$C_3H_5(NO_3)_3$	Εκρηκτική ουσία
Τρινιτροτολουόλιο ή Τροτύλη	Trinitrotoluene (TNT)	$C_7H_5(NO_2)_3$	Εκρηκτική ουσία
Πεντρίτης ή Τετρανι- τρικός πενταερυθρίτης	Pentaerythrotetra- nitrate (PETN)	$C_5H_8(NO_3)_4$	Εκρηκτική ουσία
Στυφνικός μόλυβδος	Lead styphnate	$C_6H_3N_3O_8Pb$	Εκρηκτική ουσία
Τετράλη	TETRYL	$C_7H_5N_5O_8$	Εκρηκτική ουσία
Αζίδιο του μολύβδου	Lead azide	$Pb(N_3)_2$	Εκρηκτική ουσία
Βροντώδης υδράργυρος	Mercury fulminate	$Hg(ONC)_2$	Εκρηκτική ουσία
Κυκλωνίτης	Cyclonite (RDX)	$C_3H_6N_6O_6$	Εκρηκτική ουσία
Νιτρικό αμμώνιο	Ammonium nitrate	$NH_4NO_3$	Φορέας οξυγόνου
Νιτρικό κάλιο(νίτρο)	Potassium nitrate	$KNO_3$	" "
Νιτρικό νάτριο	Sodium nitrate	$NaNO_3$	" "
Νιτρικό ασβέστιο	Calcium nitrate	$Ca(NO_3)_2$	" "
Πετρέλαιο	Fuel oil	$(CH_3)_2(CH_2)_n$	Καύσιμο
Παραφίνη	Paraffin	$C_{2n+2}H_{4n+6}$	"
Ξυλοπολτός	Wood pulp	$(C_6H_{10}O_5)_n$	"
Άνθρακας	Coal	C	"
Ξυλάνθρακας	Charcoal	C	"
Θείο	Sulphur	S	"
Αργίλιο	Aluminium	Al	"
Οξειδίο του ψευδαρ- γύρου	Zinc oxide	ZnO	Ουδέτερη ουσία
Κιμωλία	Chalk	$CaCO_3$	"
Γη των διατόμων	Diatomeceous earth (Kieselguhr)	$SiO_2$	Ουδέτερη ουσία.
Νερό	Water	$H_2O$	"
Ανθρακικό ασβέστιο	Calcium carbonate	$CaCO_3$	"

Παρακάτω δίνονται οι αυτοτελείς αντιδράσεις διαφόρων χημικών ουσιών (1.1) και (1.2), που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εκρηκτικών υλών.

Η αντίδραση του νιτρικού αμμωνίου είναι:



η αντίδραση της νιτρογλυκερίνης είναι:



Η αντίδραση (1.1) δείχνει ότι η ανάμιξη του νιτρικού αμμωνίου με μία καύσιμη ύλη, όπως είναι το πετρέλαιο, δίνει περισσότερη ενέργεια από ότι η αυτοτελής αντίδραση του νιτρικού αμμωνίου, ενώ η τρίτη αντίδραση (1.3) δείχνει την μεγάλη ποσότητα ενέργειας, που εκλύει η νιτρογλυκερίνη.

Εκείνο που χαρακτηρίζει τις εκρηκτικές ύλες, δεν είναι η ποσότητα της αποδιδόμενης ενέργειας κατά την αντίδραση, αλλά η αναπτυσσόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή η ισχύς της, που είναι πραγματικά τεράστια και οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η χημική αντίδραση της (μέχρι 8000 m/s). Ακριβώς αυτή η ικανότητα της εκρηκτικής ύλης να αποδίδει την ενέργειά της σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα σε περιορισμένο τμήμα του πετρώματος την καθιστά κατάλληλη για την θραύση του (Τσουτρέλης, 1997).

### **1.2.3 Έναυση και πυροδότηση**

Έναυση (initiation) καλείται ο τρόπος με τον οποίο προκαλείται η έναρξη της έκρηξης σε μια εκρηκτική ύλη υπό συνθήκες όμως απολύτου ελέγχου. Η έναυση μπορεί να προκληθεί με δύο τρόπους: Είτε με θερμική επέμβαση (φλόγα, διέλευση ρεύματος σε ηλεκτρική αντίσταση, τριβή), είτε με κρούση. Λόγω της διαφορετικής χημικής σύστασης των εκρηκτικών υλών του εμπορίου, πρέπει να αναμένονται σημαντικές διαφορές ως προς την ευαισθησία έναυσής τους. Έτσι ορισμένες εκρηκτικές ύλες απαιτούν μία ασθενή πηγή ενέργειας για να εναυθούν, όπως είναι μια ελαφρά κρούση και άλλες ένα ισχυρό κρουστικό κύμα, που παρέχεται από την έκρηξη μιας μικρής ποσότητας άλλης εκρηκτικής ενισχυτικής ύλης (primer). Η διαφοροποίηση της ευαισθησίας ως προς την έναυση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, όσο ισχυρότερο είναι το απαιτούμενο κρουστικό κύμα για την έναυση, τόσο ασφαλέστερη είναι η υπόψη εκρηκτική ύλη από πλευράς χειρισμών αλλά παράλληλα και πιο δαπανηρός ο τρόπος έναυσής της.

Ύστερα από το σημείο έναρξης της έναυσης υπάρχει μία μεταβατική ζώνη, βραχύτατου μήκους στο πέρας της οποίας σταθεροποιούνται οι συνθήκες αντίδρασης. Η αντίδραση, μετά την ζώνη αυτή οδεύει αυτοδιαδιδόμενη και με σταθερή ταχύτητα εντός της στήλης.

Άρρηκτα συνδεδεμένη με την έναυση είναι η πυροδότηση, που ορίζεται ως η



επέμβαση (ή η πράξη) εκείνη με την οποία τίθεται σε ενέργεια ο μηχανισμός της έναυσης (τσουτρέλης, 1997).

#### 1.2.4 Ανάφλεξη και έκρηξη.

Η χημική αντίδραση των εκρηκτικών υλών λαμβάνει χώρα κατά δύο τρόπους. Σε λίγες εκρηκτικές ύλες με ανάφλεξη ή αλλιώς κατάκαυση και στις υπόλοιπες με έκρηξη ή καλύτερα με εκρηκτική αντίδραση. Τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη είναι δύο ταχύτατες εξώθερμες χημικές αντιδράσεις, που έχουν όμως διαφορετικά χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικές ταχύτητες.

Στην πρώτη περίπτωση η αντίδραση μέσα σε μια στήλη εκρηκτικής ύλης πραγματοποιείται με ταχύτητα μερικών εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο και στην δεύτερη με ταχύτητες μερικών χιλιάδων μέτρων το δευτερόλεπτο.

Οι διαφορετικές αυτές ταχύτητες αντίδρασης οφείλονται στην διαφορά του μηχανισμού της ανάφλεξης από εκείνο της έκρηξης. Στην περίπτωση της ανάφλεξης η αντίδραση συμβαίνει με βραδύ σχετικά ρυθμό καθώς απαιτείται πρώτα αύξηση της θερμοκρασίας της μάζας της εκρηκτικής ύλης στην θερμοκρασία της αντίδρασης (καύσης). Η αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με αγωγιμότητα των θερμών μορίων της αντίδρασης προς τα μόρια της στερεάς εκρηκτικής ύλης τα οποία βρίσκονται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Πρόκειται, δηλαδή για μια ταχεία καύση, που εάν συμβεί σε ανοιχτό χώρο τα παραγόμενα προϊόντα, λόγω της βραδείας σχετικά έκλυσής τους, δεν θα προκαλέσουν ισχυρή πίεση στον περιβάλλοντα χώρο. Οι πιέσεις που δημιουργούνται στο τέλος της ζώνης αντίδρασης είναι μέχρι 3 kbar.

Η έκρηξη ή καλύτερα η εκρηκτική αντίδραση από την άλλη πλευρά πραγματοποιείται με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα αντίδρασης της εκρηκτικής ύλης για τις εκάστοτε συνθήκες, που βρίσκεται (πυκνότητα, διάμετρος του διατρήματος, βαθμός περιορισμού κλπ.), καθώς διεγείρεται από την διέλευση ενός εκρηκτικού κύματος. Οι πιέσεις που δημιουργούνται στο τέλος της ζώνης αντίδρασης είναι από 5 έως 200 kbar.

Ο πλέον αποδεκτός σήμερα μηχανισμός διέγερσης είναι εκείνος, που βασίζεται στην **θεωρία καύσης του κόκκου** (grain-burning theory) των Eyring και άλλων (1949). Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, που δέχεται ότι η αντίδραση ξεκινά από την επιφάνεια του κόκκου και οδεύει προς το εσωτερικό του, ο χρόνος αντίδρασης

ελαττώνεται ανάλογα με την ακτίνα του κόκκου με συνέπεια να αυξάνεται ο ρυθμός αντίδρασης της μάζας της εκρηκτικής ύλης ανά μονάδα όγκου. Σύμφωνα πάλι με αυτούς η εκρηκτική αντίδραση μίας εκρηκτικής ύλης επιτυγχάνεται μέσω θερμών σημείων (hot points), που δημιουργούνται συνεχώς σε μία στήλη εκρηκτικής ύλης με την διέλευση του κρουστικού κύματος εντός αυτής. Κατά την διέλευση αυτή τα πύρινα μόρια, που παράγονται στην εκάστοτε ζώνη αντίδρασης, καθώς προσκρούουν στην εκρηκτική ύλη η οποία δεν έχει ακόμα αντιδράσει, δημιουργούν θερμούς πυρήνες (θερμά σημεία), που με την σειρά τους αντιδρούν με έκρηξη. Κατά την έκρηξη παράγονται νέα πύρινα μόρια με μεγάλη κινητική ενέργεια από την μετατροπή της χημικής ενέργειας της εκρηκτικής ύλης σε θερμική, τα οποία επαναλαμβάνουν τον κύκλο διέγερσης και εξασφαλίζουν με τον τρόπο αυτό την διατήρηση (αυτοδιάδοση) της έκρηξης. Είναι προφανές ότι, ένα μέρος της διατιθεμένης ενέργειας από την εκρηκτική ύλη, καταναλώνεται για την συνεχή διέγερσή της και διάδοση της έκρηξης εντός της στήλης (Τσουτρέλης, 1997).

Στην περίπτωση της εκρηκτικής αντίδρασης ο Άγγλος D. Chapman (1899) και ο Γάλλος E. Jouguet (1905), εργαζόμενοι ανεξάρτητα, κατέληξαν στο συμπέρασμα κατά την μαθηματική επεξεργασία του θέματος με βάση τις σχέσεις των Riemann και Rankine-Hugoniot ότι, στο πέρας της ζώνης αντίδρασης, πρέπει να ισχύει η σχέση των Chapman και Jouguet (Τσουτρέλης, 1997):

$$D = W + C_p \quad (1.3)$$

όπου:

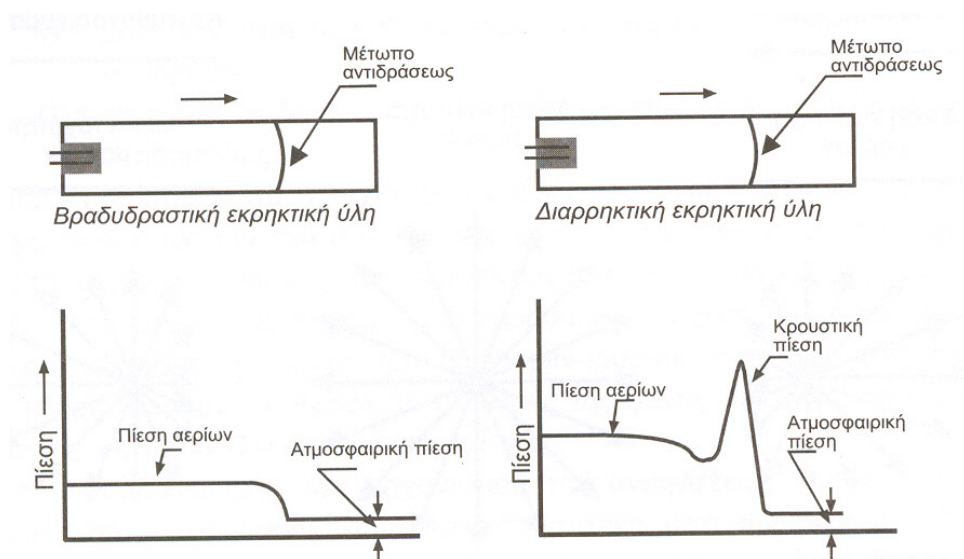
$D$  = ταχύτητα αντίδρασης (ταχύτητα έκρηξης)

$W$  = μέση ταχύτητα των σωματιδίων, που παρήχθησαν κατά την αντίδραση

$C_p$  = ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος εντός της ζώνης της αντίδρασης.

Η σχέση (1.4) δείχνει ότι η ταχύτητα αντίδρασης είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος κατά την ποσότητα  $W$ , που εκφράζει την μέση ταχύτητα κίνησης των προϊόντων της έκρηξης (μόρια των  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  κλπ.) στο πέρας της ζώνης αντίδρασης. Η σχέση (1.4) είναι σήμερα διεθνώς γνωστή και ως αξίωμα των Chapman-Jouguet, γιατί παραμένει ακόμη χωρίς πλήρη θεωρητική εξήγηση, ενώ το πέρας της ζώνης της αντίδρασης είναι γνωστό ως **επίπεδο C-J** από τα αρχικά τους.

Η διαφοροποίηση μεταξύ μίας ανάφλεξης και έκρηξης αντίστοιχα βραδυδραστικής και διαρρηκτικής εκρηκτικής ύλης δίνεται παραστατικά στο Σχ. 1.1.



Σχ. 1.1: Διαφοροποίηση της ανάφλεξης από την έκρηξη (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

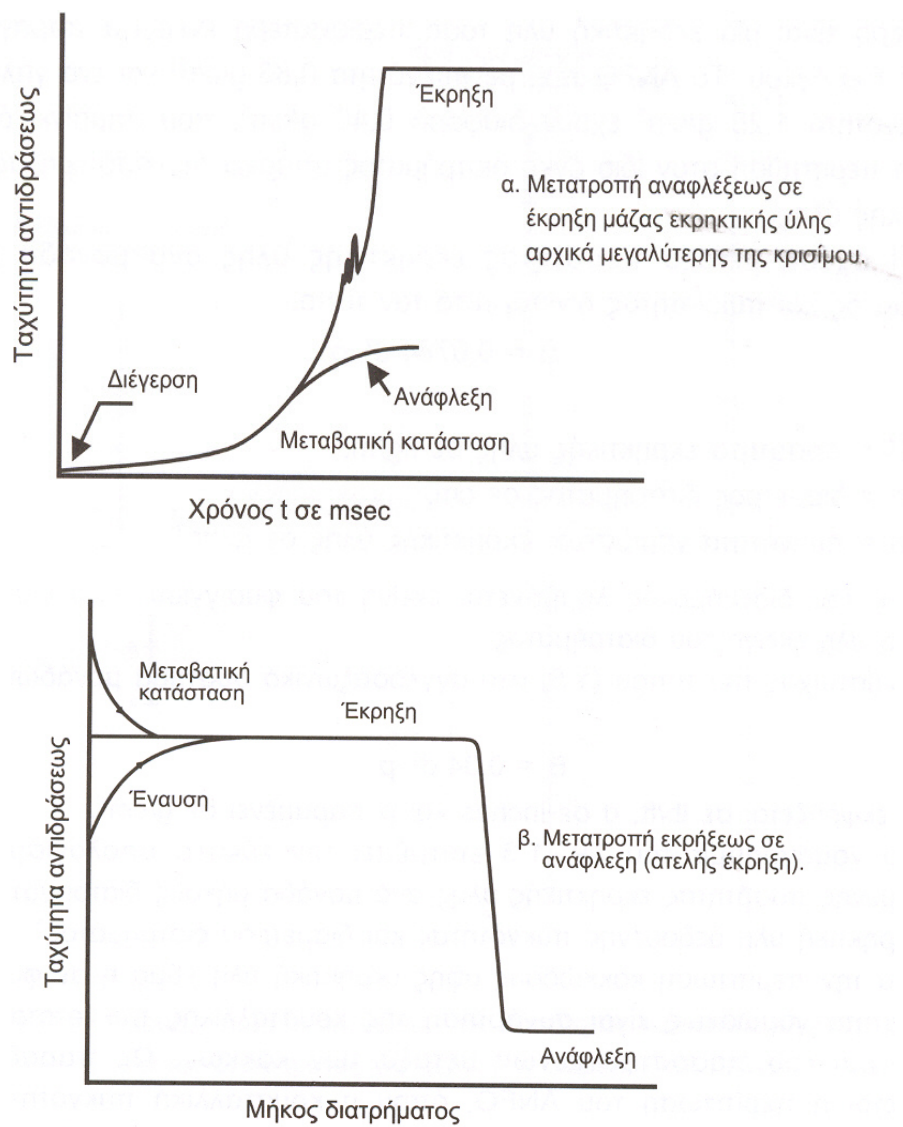
### 1.2.6 Μετατροπή ανάφλεξης σε έκρηξη και αντίθετα

Μία βασική διαφορά ανάμεσα στην έκρηξη και στην ανάφλεξη οφείλεται στις φυσικοχημικές διαδικασίες που ορίζουν την εξώθερμη αντίδραση. Από την παρατήρηση ότι μερικά υλικά είναι δυνατόν να εκραγούν αλλά και να αναφλεγούν, προκύπτει ότι αν η μάζα ενός εκρηκτικού είναι μικρή τότε μία θερμική έναυση είναι δυνατόν να οδηγήσει σε ανάφλεξη, ενώ αν η μάζα του υπερβαίνει μία κρίσιμη ποσότητα, χαρακτηριστική για κάθε εκρηκτική ύλη, είναι δυνατόν η ανάφλεξη να γίνει τόσο ταχεία ώστε να δημιουργηθεί κρουστικό κύμα, που θα μετατρέψει, όπως δείχνει το Σχ.1.2α, την ανάφλεξη σε έκρηξη. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι η κρίσιμη μάζα του αζιδίου του μολύβδου είναι εξαιρετικά μικρή, της TNT είναι περίπου ένας τόνος, ενώ του νιτρικού αμμωνίου υπερβαίνει τον ένα τόνο (Αγιουτάντης, 1996).

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι αυτό ισχύει για όλες τις διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες, αλλά στην περίπτωση των πρωτογενών η ανάφλεξη μετατρέπεται σε έκρηξη σε πολύ μικρή ποσότητα εκρηκτικής ύλης. Ακριβώς η ιδιότητά τους αυτή να εκρήγνυνται σε μικρές ποσότητες, όταν εναυφθούν θερμικά, τις καθιστά κατάλληλες

για χρήση ως μέσων έναυσης (initiating explosives) των δευτερογενών εκρηκτικών υλών.

Αναφέρεται τέλος ότι είναι δυνατόν κάτω από ορισμένες συνθήκες μία έκρηξη να μετατραπεί κατά την πρόοδό της σε ανάφλεξη. Το φαινόμενο αυτό, που δείχνεται στο Σχ.1.2β καλείται ατελής έκρηξη.



Σχ. 1.2: Μετατροπή ανάφλεξης σε έκρηξη (α) και έκρηξης σε ανάφλεξη (β) (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

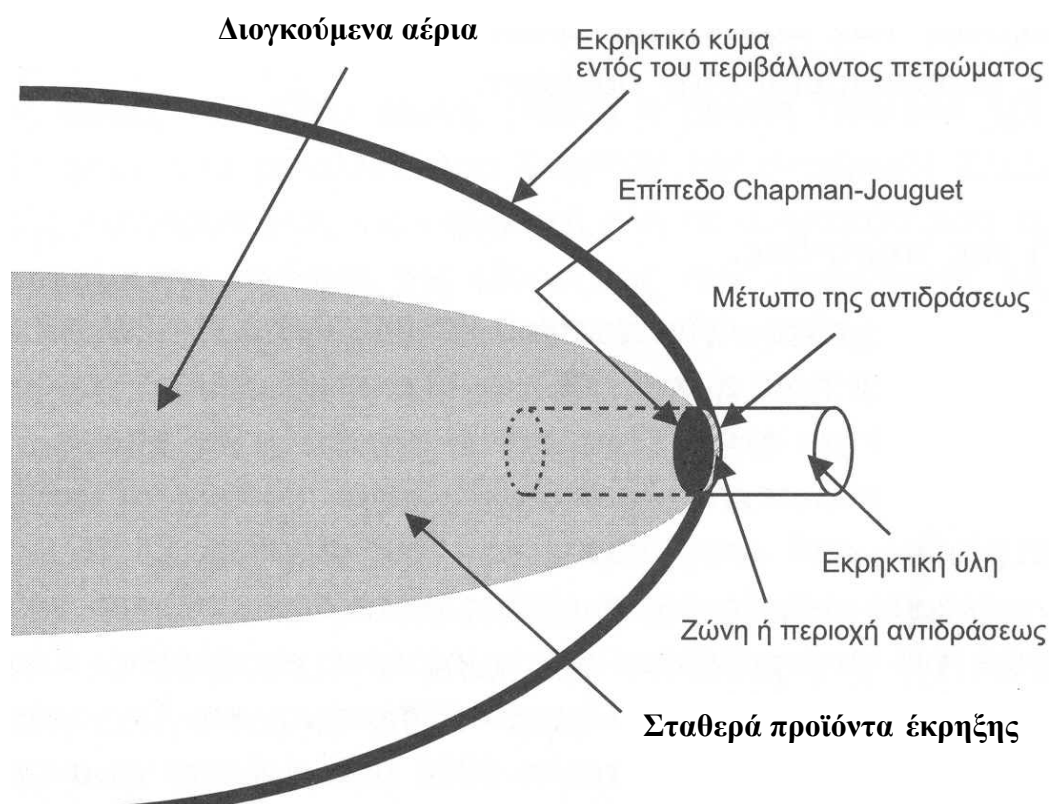
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΣΩΝ ΕΝΑΥΣΗΣ

#### 2.1 ΘΕΩΡΙΑ ΕΚΡΗΞΗΣ

##### 2.1.1 Το μοντέλο της έκρηξης.

Για την παρακολούθηση της έκρηξης χρησιμοποιείται συχνά το εικονιζόμενο στο Σχ.2.1 μοντέλο, που αναφέρεται στην περίπτωση έκρηξης στήλης διαρρηκτικής εκρηκτικής ύλης.



Σχ. 2.1: Το μοντέλο της έκρηξης μιας διαρρηκτικής εκρηκτικής ύλης (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Η έκρηξη στο σχήμα αυτό οδεύει από αριστερά προς τα δεξιά. Στο πίσω μέρος της εκρηκτικής ύλης τα αέρια υψηλής πίεσης διογκώνονται στον περιβάλλοντα χώρο. Καθώς αυτή η διόγκωση λαμβάνει χώρα επιτρέπει σε ένα κύμα αραίωσης να ταξιδέψει πίσω από το εκρηκτικό. Το γεγονός αυτό καθυστερεί το μέτωπο της ανατίναξης (detonation front). Κατ' όμοιο τρόπο στις πλαϊνές επιφάνειες του εκρηκτικού αμέσως μετά το ωστικό κύμα (detonation wave) τα αέρια διογκώνονται στον αέρα. Πάλι δύο κύματα αραίωσης ταξιδεύουν μέσα στο εκρηκτικό. Το μέτωπο ανατίναξης, το πίσω κύμα αραίωσης και τα πλαϊνά κύματα αραίωσης οριοθετούν μία περιοχή, η οποία ονομάζεται κεφαλή ανατίναξης (detonation head). Η κεφαλή ανατίναξης είναι μια περιοχή, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλές πιέσεις και υψηλές πυκνότητες (Katsabanis, 1996)

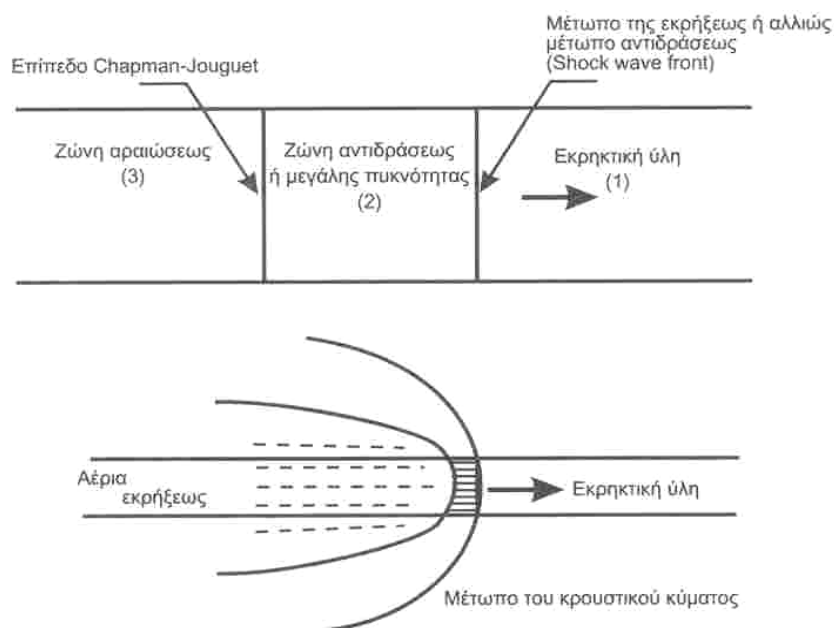
Η όλη χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα εντός της λεγόμενης **πρωτογενούς ζώνης αντίδρασης** (primary reaction zone), η οποία αρχίζει από το **μέτωπο της αντίδρασης** (shock front) και ολοκληρώνεται στο επίπεδο των Chapman and Jouguet, επί του οποίου επικρατεί σταθερή κατάσταση. Η ζώνη αυτή, για την περίπτωση της νιτρογλυκερίνης, έχει πάχος περίπου 0,2 mm και στο τέλος της πίεση περίπου 220 kbar (=22 GPa), θερμοκρασία άνω των 3000 °K και πυκνότητα κατά 30% μεγαλύτερη από ότι είχε αρχικά. Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται το σχηματιζόμενο στο πέτρωμα, που περιβάλλει το διάτρημα, **εκρηκτικό κύμα** (explosive wave) καθώς και η μεταγενέστερα δημιουργούμενη φάση της ωστικής πίεσης από τα σχηματιζόμενα κατά την αντίδραση αέρια προϊόντα (Τσουτρέλης, 1997).

### 2.1.2 Μορφή του μετώπου της έκρηξης

Για την μορφή του μετώπου της έκρηξης μιας διαρρηκτικής εκρηκτικής ύλης έχουν διατυπωθεί δύο μοντέλα. Εκείνο του Langweiler (1938), που θεωρεί το μέτωπο της έκρηξης επίπεδο και εκείνο του Cook (1974), που θεωρεί το μέτωπο κυρτό.

Σύμφωνα με το **μοντέλο του Langweiler**, (όπως δίνεται στον Τσουτρέλη, 1997) που φαίνεται στο Σχ. 2.2 και αναφέρεται στην περίπτωση κυλινδρικής γόμωσης απείρου διαμέτρου ή απόλυτου περιορισμού, ώστε να αποκλείονται πλευρικές απώλειες, στον χώρο της έκρηξης διακρίνονται τρεις περιοχές:

- α) Ζώνη όπου η εκρηκτική ύλη δεν έχει ακόμη αντιδράσει (περιοχή 1).
- β) Ζώνη της εκρηκτικής αντίδρασης (detonation zone ή reaction zone) ή ζώνη μεγάλης πυκνότητας (περιοχή 2). Εντός αυτής πραγματοποιείται η αντίδραση. Αρχίζει από το μέτωπο της αντίδρασης και ολοκληρώνεται στο επίπεδο των Chapman και Jouguet. Η περιοχή αυτή, που είναι πολύ μικρή σε μήκος, χαρακτηρίζεται από μεγάλη αύξηση της πίεσης, θερμοκρασίας και πυκνότητας σε χρόνους  $\mu\text{sec}$ . Για την περίπτωση της νιτρογλυκερίνης έχει μήκος μόλις 0,2 mm, και στο επίπεδο C-J, όπου έχουν σταθεροποιηθεί με την ολοκλήρωση της αντίδρασης τα μεγέθη, η πίεση έκρηξης φθάνει μέχρι  $P_d=220 \text{ kbar}$ , η θερμοκρασία της έκρηξης μέχρι  $T=3000^\circ \text{ K}$  και η πυκνότητα  $\rho$  γίνεται μέχρι 30% μεγαλύτερη από εκείνη της εκρηκτικής ύλης, που είναι  $1,6 \text{ g/cm}^3$ .
- γ) Ζώνη αραιώσεως (περιοχή 3). Χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή πυκνότητα σε σχέση προς εκείνη της ζώνης αντίδρασης. Στην περιοχή αυτή έχει ολοκληρωθεί η χημική αντίδραση και δεν υπάρχουν παρά μόνο μόρια αερίων.



Σχ. 2.2: Μοντέλο του μετώπου της έκρηξης κατά Langweiler (1938) (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997).

Οι τρεις αυτές ζώνες ή περιοχές διαχωρίζονται μεταξύ τους από δύο παράλληλα μέτωπα ή αλλιώς επίπεδα:

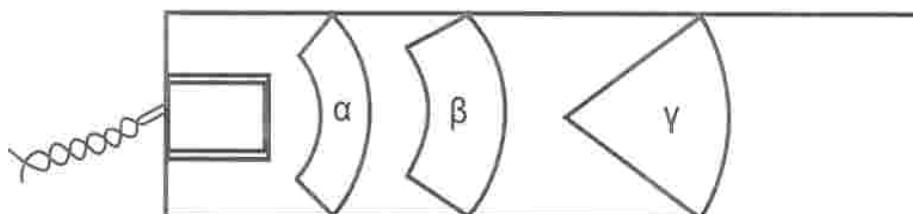
- Το μέτωπο της έκρηξης ή της αντίδρασης (shock wave front). Στο μέτωπο ή επίπεδο αυτό το εκρηκτικό κύμα προσβάλλει την εκρηκτική ύλη.

- Το μέτωπο αραίωσης ή αλλιώς το επίπεδο των Chapman και Jouguet, για το οποίο έγινε ήδη αναφορά στην παραγρ. 1.2.4. Το επίπεδο αυτό χωρίζει την ζώνη της αντίδρασης από εκείνη της αραίωσης, όπου έχει πλέον ολοκληρωθεί η χημική αντίδραση για την περίπτωση ιδανικής έκρηξης.

Κατά τον Cook (1958) επίπεδα μέτωπα δεν υφίστανται τουλάχιστον στην περίπτωση σταθερής κατάστασης έκρηξης, ανεξάρτητα εάν πρόκειται για ιδανική ή μη ιδανική έκρηξη.

Ιδανική έκρηξη είναι εκείνη η οποία επιτυγχάνει ταχύτητα έκρηξης ίση προς την μέγιστη θεωρητική ταχύτητα αντίδρασης την εκάστοτε εκρηκτικής ύλης. Επίσης θεωρείται ότι όλη η αντίδραση έχει ολοκληρωθεί μέσα στη ζώνη αντίδρασης. Μη ιδανική είναι μια έκρηξη στην οποία η ταχύτητα που επιτυγχάνεται, είναι μικρότερη εκείνης της ιδανικής έκρηξης. Στην πράξη όλες οι ανατινάξεις πραγματοποιούνται σε συνθήκες μη ιδανικής έκρηξης, για διάφορους λόγους.

Για την περίπτωση γόμωσης σε συγκεκριμένη διάμετρο χωρίς όμως πλευρικό περιορισμό, ώστε να υπάρχει δυνατότητα πλευρικής αραίωσης, η μορφή του μετώπου της έκρηξης από το σημείο της έναυσης ( $\alpha$ ) μέχρι την σταθερή κατάσταση ( $\gamma$ ) δίνεται στο Σχ. 2.3.



Σχ. 2.3: Το μοντέλο του μετώπου της έκρηξης κατά Cook (1958) καθώς αυτό εξελίσσεται από το σημείο έναυσης μέχρι σταθερής κατάστασης.

Το σχήμα της κεφαλής ανατινάξης εξαρτάται από την γεωμετρία του εκρηκτικού και αλλάζει καθώς απομακρύνεται από το σημείο έναυσης. Αρχικά η μορφή του μετώπου σε τομή είναι ημισφαιρική ( $\alpha$ ) και στην συνέχεια λαμβάνει μορφή κόλουρου κώνου με καμπύλη επιφάνεια εμπρός και πίσω. Καθώς η αντίδραση απομακρύνεται από το σημείο έναυσης η ακτίνα καμπυλότητας του μετώπου αυξάνει και παράλληλα το μήκος του μεγαλώνει. Αυτό οφείλεται στην σχεδόν σταθερή σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του κύματος αραίωσης και της ταχύτητας έκρηξης. Η επίδραση της πλευρικής αραίωσης γίνεται μεγαλύτερη μέχρι τα πλευρικά κύματα να



συναντηθούν στον άξονα γόμωσης, οπότε η αντίδραση σταθεροποιείται στην κωνική μορφή ( $\gamma$ ) του Σχ. 2.3 (Katsabanis, 1996).

Το μήκος της ζώνης πλήρης αντίδρασης, όπως απέδειξαν ραδιογραφήματα, είναι περίπου ίσο προς την διάμετρο του διατρήματος, ενώ απαιτείται για την περίπτωση έκρηξης χωρίς περιορισμό μήκος  $3 \frac{1}{2}$  φορές εκείνου της διαμέτρου του διατρήματος από το σημείο της έναυσης για να λάβει η ζώνη αντίδρασης την τελική κωνική της μορφή. Το μήκος αυτό συνιστά την λεγόμενη μεταβατική ζώνη (transient zone), (βλ και παραγρ. 1.2.3). Η πυκνότητα, εντός της ζώνης αντίδρασης είναι ίση περίπου προς τα  $4/3 \rho$ , όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης, ενώ η καμπυλότητα του μετώπου της αντίδρασης είναι χαρακτηριστική για κάθε εκρηκτική ύλη. Για την περίπτωση ιδανικής έκρηξης κυμαίνεται μεταξύ 2 d και 3,5 d, όπου d η διάμετρος του διατρήματος (Cook, 1958). Σε περιπτώσεις εκρηκτικού κοκκώδους μορφής πχ. ANFO, η αντίδραση ξεκινά από την επιφάνεια του κόκκου και προχωράει ακτινικά προς το εσωτερικό του (Katsabanis, 1996).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η απελευθερωμένη ενέργεια συντηρεί την ανατίναξη. Αν η αντίδραση δεν ολοκληρωθεί μέσα στην κεφαλή ανατίναξης η ενέργεια που ελευθερώνεται είναι μικρότερη από την μέγιστη δυνατή και η ταχύτητα έκρηξης είναι μικρότερη της μέγιστης. (Katsabanis, 1996)

## 2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ

Για να κατανοηθούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά των εκρηκτικών υλών καθώς και οι μεταξύ τους διαφορές, ώστε κατά την χρήση τους να επιτυγχάνεται το καλύτερο αποτέλεσμα, απαιτείται η γνώση ορισμένων βασικών ιδιοτήτων τους. Οι ιδιότητες, που χαρακτηρίζουν τις εκρηκτικές ύλες, είναι η χημεία, η ισχύς, η εκλυόμενη ενέργεια, η πίεση έκρηξης, η πυκνότητα, η αντίσταση στο νερό, η ευαισθησία και τέλος η ταχύτητα έκρηξης. Για τον ίδιο, εξ άλλου, χημικό τύπο εκρηκτικής ύλης είναι ενδεχόμενο οι ιδιότητές τους να διαφέρουν ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης και τον τρόπο μέτρησής τους.

### 2.2.1 Χημεία των εκρηκτικών υλών

Μία εκρηκτική ύλη συνίσταται από **καύσιμες και οξειδωτικές χημικές** ουσίες. Τα συνήθη καύσιμα στις εμπορικές εκρηκτικές ύλες είναι το πετρέλαιο, ο άνθρακας, το αργίλιο, το θειάφι και σπανιότατα η νιτρική μονοθυλαμίνη και η νιτρική αμινομονοαιθανόλη. Ορισμένα από τα καύσιμα παίζουν και ρόλο ευαισθητοποιητή, δηλ. ουσιών που επαυξάνουν την ευαισθησία μιας εκρηκτικής ύλης ως προς την έναυσή της. Άλλοι ευαισθητοποιητές είναι η νιτρογλυκερίνη και η νιτροκυτταρίνη (Τσουτρέλης, 1997).

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1.1, που δίνει τις χημικές συνθέσεις των κυριότερων συστατικών ουσιών των εκρηκτικών υλών, αυτές είναι οργανικές ενώσεις του οξυγόνου, αζώτου, υδρογόνου και άνθρακα, διάφορα στοιχεία όπως αργίλιο (Al), θειάφι (S) και ανόργανες ενώσεις, όπως είναι το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), διάφορα νιτρικά άλατα κτλ.

Για τις εκρηκτικές ύλες, που συνίστανται από μίγμα διαφόρων χημικών ουσιών, η παρεχόμενη ενέργεια μεγιστοποιείται σε συνθήκες στοιχειομετρικής περιεκτικότητας οξυγόνου, δηλαδή από την παρουσία τέτοιας ποσότητας οξυγόνου ώστε να επαρκεί ακριβώς για την οξείδωση του καύσιμου χωρίς όμως περίσσεια για να αντιδράσει με το άζωτο του μίγματος προς σχηματισμό οξειδίων του αζώτου (Τσουτρέλης, 1997).

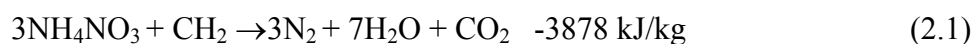
Θεωρητικά σε συνθήκες πλήρους ισορροπίας οξυγόνου τα αέρια προϊόντα της έκρηξης είναι  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  και  $\text{N}_2$ , ενώ στην πράξη σχηματίζονται και μικρές ποσότητες  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  και διάφορα άλλα αέρια. Μερική οξείδωση του άνθρακα προς μονοξείδιο, οφειλόμενη σε έλλειψη οξυγόνου, εκλύει λιγότερη θερμότητα σε σχέση προς την πλήρη οξείδωση του προς διοξείδιο του άνθρακα. Τα οξείδια του αζώτου  $\text{NO}_x$  εξ άλλου, που παράγονται όταν υπάρχει περίσσεια οξυγόνου ή για άλλους λόγους, απορροφούν θερμότητα για να σχηματισθούν.

Επιπλέον τα αέρια προϊόντα, που σχηματίζονται κατά την έκρηξη σε συνθήκες μη ισορροπίας οξυγόνου, είναι όχι μόνο μη αποδοτικά από πλευράς έκλυσης θερμότητας, με βάση την στοιχειομετρία της αντίδρασης, αλλά και δηλητηριώδη. Προσθήκη αργιλίου στην εκρηκτική ύλη δίνει ένα στερεό προϊόν αντί αέριο, απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα θερμότητας, που προστίθεται στην ενέργεια της έκρηξης. Το μαγνήσιο, το οποίο εκλύει μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας από το αργίλιο, είναι πολύ ευαίσθητο και για τον λόγο αυτό δεν χρησιμοποιείται στην

παραγωγή εμπορικών εκρηκτικών υλών (Τσουτρέλης, 1997).

Για να γίνει σαφής η σημασία της στοιχειομετρικής περιεκτικότητας οξυγόνου λαμβάνεται ως παράδειγμα η περίπτωση του ANFO, που είναι εκρηκτική ύλη αποτελούμενη από μίγμα νιτρικού αμμωνίου ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) και πετρελαίου ( $\text{CH}_2$ ). Στην πραγματικότητα το πετρέλαιο είναι μίγμα πολλών υδρογονανθράκων με γενικό τύπο  $(\text{CH}_3)_2(\text{CH}_2)_n$ , αλλά η παραδοχή αυτή απλοποιεί πολύ τις εξισώσεις ενώ παράλληλα προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια. Για την περίπτωση ιδανικής έκρηξης, οι εξισώσεις (2.1), (2.2) και (2.3) παρέχουν την δυνατότητα να περιγραφούν οι σχέσεις μεταξύ ισορροπίας οξυγόνου, προϊόντων έκρηξης και εκλυόμενης θερμότητας, έχοντας υπόψη ότι, η παραγόμενη θερμότητα, είναι ένα μέτρο της παρεχόμενης ενέργειας προς εκτέλεση ωφέλιμου έργου:

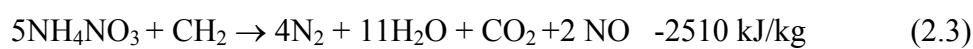
α) μηδενικό ισοζύγιο οξυγόνου (94,5% AN, 5,5% FO)



β) αρνητικό ισοζύγιο οξυγόνου (92% AN, 8% FO)



γ) θετικό ισοζύγιο οξυγόνου (96,6% AN, 3,4% FO)



Η εξίσωση (2.1) δίνει την αντίδραση για ισοζυγισμένο σε οξυγόνο μίγμα που περιέχει 94,5% AN και 5,5% FO. Κανένα από τα παραγόμενα προϊόντα δεν είναι τοξικό, ενώ η εκλυόμενη ενέργεια ανέρχεται σε 3878 kJ ανά kg ANFO.

Στην περίπτωση της εξίσωσης (2.2) η περίσσεια καυσίμου δημιουργεί έλλειμμα οξυγόνου. Έτσι ο άνθρακας οξειδώνεται μόνο προς CO και απελευθερώνονται μόνο 3390 kJ θερμότητας για κάθε kg εκρηκτικής ύλης.

Στην εξίσωση (2.3) το μίγμα με 96,6% AN και 3,4% FO είναι ελλειπές σε καύσιμο συνεπεία του οποίου είναι η περίσσεια οξυγόνου. Στην περίπτωση αυτή κάποια ποσότητα αζώτου από το νιτρικό αμμώνιο ενώνεται με το επί πλέον οξυγόνο και σχηματίζει NO. Η απορροφούμενη θερμότητα για τον σχηματισμό του NO περιορίζει την εκλυόμενη θερμότητα της αντίδρασης σε μόνο 2510 kJ ανά kg εκρηκτικής ύλης. Με βάση όλα τα παραπάνω είναι προτιμότερο να υπάρχει μικρή έλλειψη οξυγόνου και το σύνηθες εμπορικό μίγμα του ANFO περιέχει 94% AN και 6% FO.

### 2.2.2 Ισχύς

Η ισχύς (strength) ενός εκρηκτικού είναι ένα μέτρο της ενέργειας που εκλύεται κατά την έκρηξη. Εκφράζει ποσοτικά την εκλυόμενη ενέργεια κατά την έκρηξη μιας εκρηκτικής ύλης. Κατά την έκρηξη η συσσωρευμένη χημική ενέργεια στο εκρηκτικό μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης που κατά ένα μέρος της καταναλώνεται για τη θραύση του πετρώματος ως κρουστικός παλμός ενώ το υπόλοιπο για την μετακίνηση του πετρώματος από την αρχική του θέση (Cook, 1974).

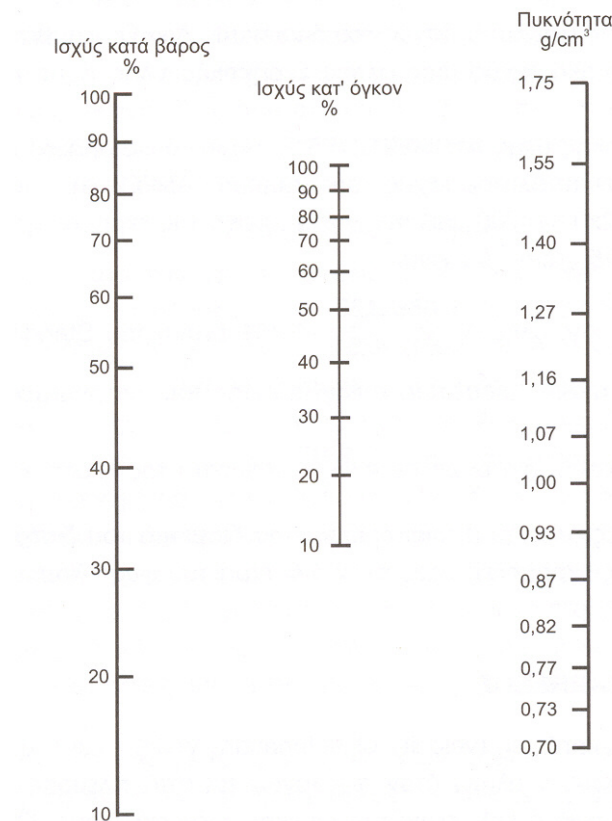
Είναι προφανές ότι, όσο περισσότερη είναι η διαθέσιμη ενέργεια μιας εκρηκτικής ύλης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ικανότητά της για να πραγματοποιήσει ωφέλιμο έργο στο πέτρωμα, χωρίς όμως η σχέση τους να είναι ευθέως ανάλογη, λόγω των απωλειών ενέργειας, του μηχανισμού θραύσεως του πετρώματος και της συμπεριφοράς του πετρώματος. Η εκτίμηση της παραμέτρου αυτής είναι σημαντική διότι αφενός μεν χρειάζεται μεγάλη ισχύς για τον θρυμματισμό σκληρών πετρωμάτων αφετέρου υπάρχουν σημαντικές απώλειες ενέργειας από την εφαρμογή ισχυρών εκρηκτικών σε μαλακά ή θρυμματισμένα πετρώματα (Τσουτρέλης, 1997).

Οι ισχείς των διαφόρων εκρηκτικών μπορούν να εκφρασθούν με τους εξής 4 τρόπους :

- Η **απόλυτη ισχύς κατά βάρος** (Absolute Weight Strength-AWS) εκφράζει την ποσότητα ενέργειας (σε θερμίδες), που διαθέτει κάθε γραμμάριο εκρηκτικής ύλης. Το ANFO π.χ. διαθέτει 930 cal/g, μια συγκεκριμένη αμμωνιοδυναμίτιδα 1080 cal/g και ένα γαλάκτωμα 770 cal/g.
- Η **απόλυτη ισχύς κατ' όγκον** (Absolute Bulk Strength-ABS) εκφράζει την ποσότητα ενέργειας (σε θερμίδες), που διαθέτει κάθε κυβικό εκατοστό της εκρηκτικής ύλης. Η ABS προκύπτει με πολλαπλασιασμό της AWS με την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης. Για ANFO πυκνότητας  $0,81 \text{ g/cm}^3$  θα είναι  $930 \times 0,81 = 753 \text{ cal/cm}^3$ . Για την προηγούμενη αμμωνιοδυναμίτιδα πυκνότητας  $1,36 \text{ g/cm}^3$  θα είναι:  $1080 \times 1,36 = 1460 \text{ cal/cm}^3$  και για το υπόψη γαλάκτωμα  $770 \times 1,25 = 963 \text{ cal/cm}^3$ .
- Από πλευράς σχετικής ισχύος διακρίνεται η **κατά βάρος σχετική ισχύς** (Relative Weight Strength-RWS) και η **κατ' όγκον σχετική ισχύς** (Relative Bulk Strength-RBS ή αλλιώς cartridge strength).

Άλλες μέθοδοι εκτίμησης της, ισχύος ενός εκρηκτικού περιλαμβάνουν:

- τον θεωρητικό υπολογισμό της εκλυόμενης ενέργειας,
- τον θεωρητικό υπολογισμό του έργου εκτόνωσης,
- την μέτρηση του κρουστικού παλμού και της ενέργειας των εκλυόμενων αερίων σε πειράματα κάτω από νερό, (underwater shock and bubble energy),
- την μέτρηση του κρουστικού κύματος και του τασικού παλμού σε στερεά (shock wave impulse and stress waves),
- δοκιμές κρατήρα (crater tests),
- δοκιμές σε σώματα από μόλυβδο (πχ. Trauzl lead block test, Crucher test, Gutmann test), κλπ.



Σχ. 2.4: Νομόγραμμα μετατροπής της κατά βάρος ισχύς σε κατ' όγκον και αντιστρόφως δεδομένης της πυκνότητας (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Η σχέση μεταξύ της κατά βάρος και της κατ' όγκον ισχύς εξαρτάται από την πυκνότητα του εκρηκτικού. Το νομόγραμμα του Σχ. 2.4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή της μιας ισχύς στην άλλη, όταν βέβαια είναι γνωστή η πυκνότητα (Τσουτρέλης, 1997).

### 2.2.3 Εκλυόμενη ενέργεια

Η ενέργεια που εκλύεται κατά την αποσύνθεση μίας εκρηκτικής ύλης είναι συνάρτηση της χημικής σύστασης του υλικού και των αντιδράσεων που γίνονται στις επιτόπου συνθήκες. Η απόδοση ενός εκρηκτικού δεν εξαρτάται μόνο από την συνολική ενέργεια που εκλύεται, αλλά από τον ρυθμό έκλυσης της ενέργειας και τον τρόπο χρησιμοποίησης της ενέργειας αυτής για την θραύση ή/και μετατόπιση του πετρώματος. Επομένως, το μέγεθος της εκλυόμενης ενέργειας αποτελεί ένα επιπλέον κριτήριο εκτίμησης της ισχύος ενός εκρηκτικού που ενδεχομένως είναι καλύτερο από τους αντίστοιχους συντελεστές βάρους. Η ενέργεια που εκλύεται από την αποσύνθεση ενός εκρηκτικού μπορεί να προσδιορισθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- **Δοκιμές κάτω από νερό:** Οι δοκιμές αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η, κρουστική ενέργεια (shock energy) που εκλύεται λόγω έκρηξης που γίνεται κάτω από νερό αποτελεί μέτρο της διαρρηκτικής ικανότητας (shattering action) ενός εκρηκτικού, ενώ η αντίστοιχη ενέργεια ώθησης (bubble energy) αποτελεί μέτρο της ικανότητας του εκρηκτικού να μετατοπίσει το θραυσμένο υλικό (heaving). Η κρουστική ενέργεια προκύπτει από τον υπολογισμό της επιφάνειας σε ένα διάγραμμα πίεσης-τετράγωνο του χρόνου που μετρείται σε δεδομένη απόσταση από το σημείο της έκρηξης. (Αγιουτάντης, 1996).

- **Θεωρητικά εκλυόμενη ενέργεια:** Είναι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που απαιτείται για την σύνθεση των προϊόντων της έκρηξης και της ενέργειας που απαιτείται για την σύνθεση του εκρηκτικού υλικού. Σημειώνεται ότι η ενέργεια αυτή υπολογίζεται σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Όταν εξετάζεται η ενέργεια που εκλύεται την στιγμή της έκρηξης, τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη το έργο που παράγουν τα αέρια προϊόντα καθώς εκτονώνονται από την πίεση και θερμοκρασία της έκρηξης σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (Αγιουτάντης, 1996).

Οι ενεργειακές μέθοδοι εκτίμησης της ισχύος ενός εκρηκτικού μειονεκτούν στο ότι δεν περιλαμβάνουν ένα μέτρο της διαρρηκτικής ικανότητας ή "θραυστικότητας" (brisance) του εκρηκτικού που συνδέεται με την πίεση έκρηξης.

#### 2.2.4 Πίεση

Η πίεση έκρηξης (detonation pressure) είναι μια σπουδαία ιδιότητα των εκρηκτικών υλών, επειδή το μέγεθος της επηρεάζει τόσο το αποδιδόμενο ωφέλιμο έργο, όσο και την επιλογή της εκρηκτικής ύλης για δεδομένη εφαρμογή. Η πίεση έκρηξης είναι η πίεση του κρουστικού κύματος που προηγείται από την ζώνη χημικής αντίδρασης στο επίπεδο των Chapman and Jouguet, όπως δείχνει το Σχ. 2.2. Το μέγεθος της παραμέτρου αυτής, που κυμαίνεται από 5 έως 150 kbar (Hartman, 1987) με συνηθέστερες τιμές μεταξύ 20-120 kbar είναι καθοριστικό για την αποτελεσματικότητα του εκρηκτικού υλικού και τον τρόπο θραύσης του πετρώματος. Σημειώνεται ότι η πίεση έκρηξης είναι συνάρτηση της πυκνότητας του εκρηκτικού, της ταχύτητας έκρηξης και της μοριακής ταχύτητας του υλικού (particle velocity).

Θεωρητικά η πίεση έκρηξης για μία ιδανική έκρηξη μπορεί να υπολογιστεί από την θερμοδυναμική θεωρία της έκρηξης βάσει πολύπλοκων σχέσεων όπως είναι εκείνη του Paterson (1951). Μπορεί επίσης να προκύψει από τα προϊόντα της έκρηξης και την ποσότητα της εκλυόμενης θερμότητας από την εμπειρική σχέση των Kamlet and Jacobs (1968), που ισχύει όμως μόνο για εκρηκτικές ύλες του τύπου C-H-N-O με πυκνότητα μεγαλύτερη του 1 g/cm<sup>3</sup> (Τσουτρέλης, 1997):

$$P_d = 15,58 \cdot \rho_1^2 \cdot N \cdot M^{1/2} \cdot Q^{1/2} \quad (2.4)$$

όπου:

$P_d$  = πίεση έκρηξης σε kbar

$\rho_1$  = πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (πυκνότητα γόμωσης)

$N$  = αριθμός των γραμμομορίων αερίων προϊόντων, που παράγονται κατά την έκρηξη ενός γραμμαρίου εκρηκτικής ύλης

$M$  = μέσο μοριακό βάρος των αερίων προϊόντων της έκρηξης σε g/mol.

$Q$  = ποσότητα της παραγόμενης χημικής ενέργειας κατά την έκρηξη σε cal/g.

- Από πλευράς υδροδυναμικής θεωρίας η πίεση έκρηξης δίνεται από την σχέση:

$$P_d = \rho_1 \cdot D \cdot W + P_a \quad (2.5)$$

όπου:

$\rho_1$  = πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (πυκνότητα γόμωσης)

$D$  = ταχύτητα έκρηξης

$W$  = μέση ταχύτητα ταλάντωσης των προϊόντων της έκρηξης στο τέλος της ζώνης αντίδρασης

$P_a$  = ατμοσφαιρική πίεση, η οποία μπορεί να παραληφθεί από την σχέση (2.5) χωρίς αισθητό λάθος.

- Για την περίπτωση ιδανικής έκρηξης η σχέση (2.5) λαμβάνει την μορφή:

$$P_d = 0,0097 \rho_1 \cdot D^* \cdot (0.38 - 1270 \frac{\rho_1}{D} \cdot P_c) \quad (2.6)$$

όπου:

$P_c$  = κρυσταλλική πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.

$D^*$  = ιδανική ταχύτητα έκρηξης

όπου  $P_d$  εκφράζεται σε atm,  $D^*$  σε m/s και  $\rho_1$  σε g/cm<sup>3</sup>.

- Στην πράξη όμως, όπου υπάρχει περίπτωση μη ιδανικής έκρηξης, θεωρείται προσεγγιστικά ότι  $\rho_1/\rho_2=3/4$ , οπότε η σχέση (2.6) γράφεται  $W=D/4$  και η πίεση έκρηξης υπολογίζεται από την σχέση (Clark, 1987).

$$P_d = 0.00987 \cdot \rho_1 \cdot D^2 / 4 \quad (2.7)$$

όπου  $P_d$  σε atm,  $\rho_1$  σε g/cm<sup>3</sup> και  $D$  σε m/sec.

- Οι Johansson και Persson (1970) για τον υπολογισμό της πίεσης έκρηξης δίνουν την εμπειρική σχέση:

$$P_d = 2,1 \cdot (0.36 + \rho_1) \cdot D^2 \quad (2.8)$$

- ο δε Brown (1956) την σχέση:

$$P_d = 4.18 \cdot 10^{-7} \cdot C^2 \cdot \frac{\rho_1}{1 + 0.80 \cdot \rho_1} \quad (2.9)$$

όπου  $P_d$  σε kbar και  $D$  σε ft/sec.



- Ο οίκος Atlas Powder Co (1987) προτείνει την σχέση:

$$P_d = 2.325 \cdot 10^{-7} \cdot D^2 \cdot \rho_1 \quad (2.10)$$

όπου  $P_d$  σε kbar,  $\rho_1$  σε  $\text{g/cm}^3$  and  $D$  σε ft/sec.

- Ο Brinkmann (1990) προτείνει την απλή σχέση

$$P_d = 0.25 \cdot \rho_1 \cdot D^2 \quad (2.11)$$

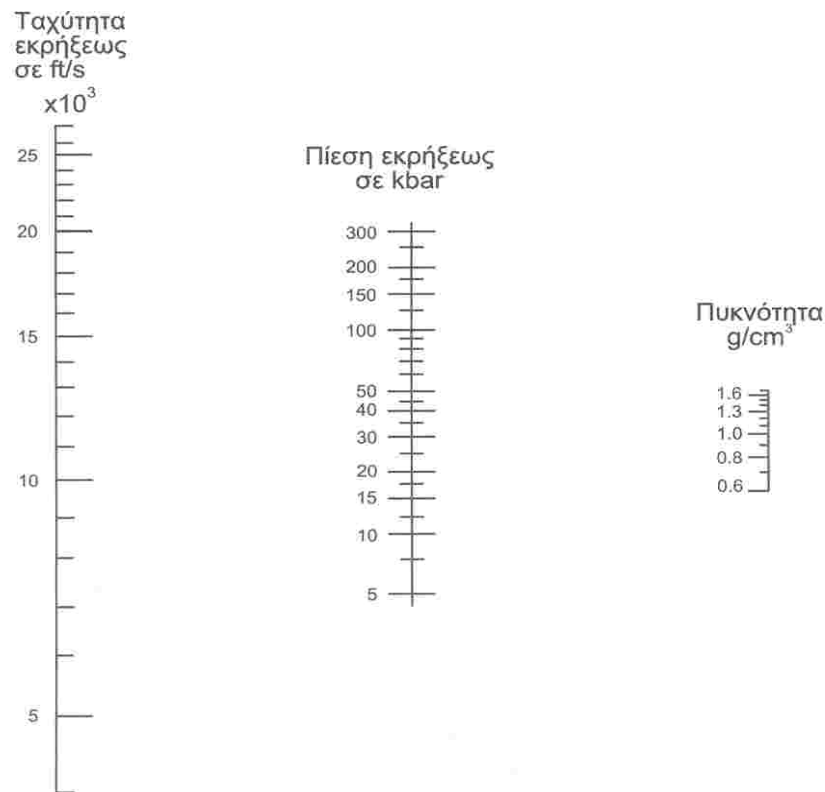
όπου  $P_d$  σε Pa,  $\rho_1$  σε  $\text{kg/m}^3$  and  $D$  σε m/sec.

- Οι Mainardi και Robinson (1996) προτείνουν την σχέση:

$$P_d = 2,5 \cdot \rho_1 \cdot D^2 \cdot 10^{-6} \quad (2.12)$$

όπου  $P_d$  σε Kbar,  $\rho_1$  σε  $\text{g/cm}^3$  και  $D$  σε m/s, που είναι παρόμοια εκείνης του Brinkmann.

Το νομόγραμμα, εξ άλλου, του Σχ. 2.5 παρέχει έναν εύκολο τρόπο προσδιορισμού κατά προσέγγιση της πίεσης έκρηξης, όταν η ταχύτητα έκρηξης και η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης είναι γνωστά μεγέθη.



Σχ. 2.5: Νομόγραμμα προσδιορισμού της πίεσης έκρηξης  $P_d$  από την ταχύτητα έκρηξης και την πυκνότητα γόμωσης (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Η πίεση έκρηξης δεν πρέπει να συγχέεται με την πίεση που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του διατρήματος (explosion pressure, borehole pressure), από τα αέρια τα οποία εκλύονται μετά την αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης. Η πίεση στο διάτρημα είναι μικρότερη από την πίεση έκρηξης, είναι συνάρτηση του βαθμού περιορισμού του εκρηκτικού και της θερμοκρασίας των αερίων της έκρηξης και μπορεί να προσδιορισθεί από την ακόλουθη εμπειρική σχέση (Karfakis, 1987):

$$P_b = 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot C^2 \cdot \left[ \sqrt{c} \frac{de}{dh} \right]^{2.6} \quad (2.13)$$

όπου

$P_b$  = η πίεση στο διάτρημα [psi]

$P$  = η πυκνότητα του εκρηκτικού [g/cm<sup>3</sup>]

$C$  = η ταχύτητα έκρηξης [ft/sec]

$c$  = το ποσοστό του διατρήματος που γομώθηκε [%]

$de$  = η διάμετρος του εκρηκτικού [in]

$dh$  = η διάμετρος του διατρήματος [in]

Η πίεση στο διάτρημα κυμαίνεται από 10 έως 60 kbar (1000 έως 6000 MPa) και καθορίζει την ικανότητα της εκρηκτικής ύλης να θρυμματίσει μαλακά πετρώματα καθώς και να μετατοπίσει το θραυσμένο πέτρωμα.

### 2.2.5 Πυκνότητα

Ο όρος πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (density of explosive) αναφέρεται στην πυκνότητα του μίγματος ή της χημικής ένωσης όπως παρασκευάζεται από τον κατασκευαστή. Η παράμετρος αυτή επομένως καθορίζει την θεωρητική ποσότητα του εκρηκτικού που τοποθετείται σε ένα δεδομένο διάτρημα. Σε εκρηκτικά υλικά που διατίθενται χύδην διακρίνεται η πυκνότητα γόμωσης (bulk, loading density) που είναι η τελική πυκνότητα του υλικού μετά την γόμωση του διατρήματος. Η πυκνότητα γόμωσης εξαρτάται από τον τρόπο γόμωσης (πχ. χύδην, πνευματικά, με την βαρύτητα, κλπ), είναι συνήθως διαφορετική από την θεωρητική πυκνότητα του εκρηκτικού. Η εκτίμηση των ιδιοτήτων του εκρηκτικού σαν συνάρτηση της πυκνότητάς του γίνεται με βάση την πραγματική του πυκνότητα στο διάτρημα,

δηλαδή την πυκνότητα γόμωσης. Η πυκνότητα γόμωσης παραμένει σταθερή όταν η εκρηκτική ύλη γομώνεται σε φυσίγγια (Αγιουτάντης, 1996).

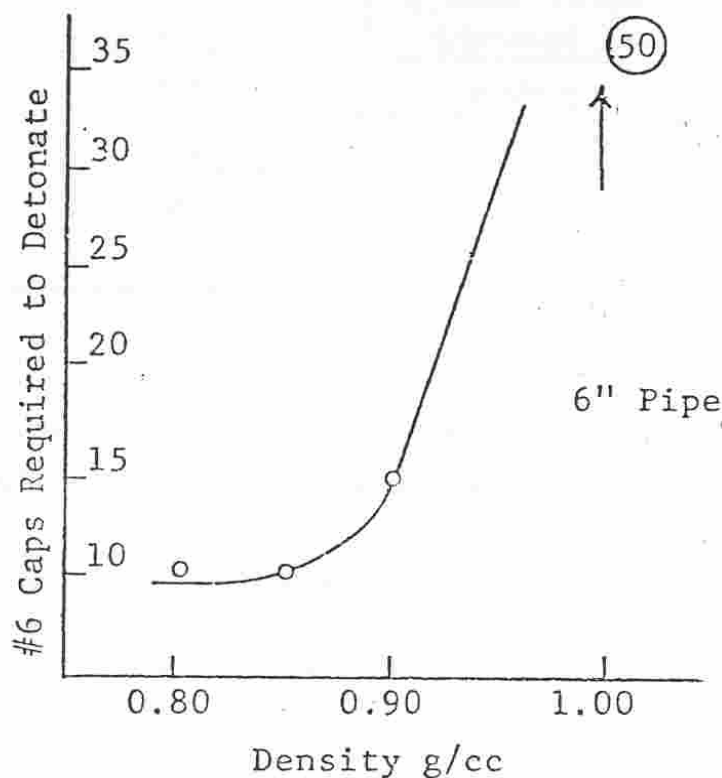
Για την καλύτερη θραύση του πετρώματος όταν το φορτίο είναι μεγάλο, απαιτείται η χρήση εκρηκτικών με μεγάλη πυκνότητα, ενώ όταν το πέτρωμα είναι μαλακό ή προτιμάται μία ομαλότερη κατανομή της ενέργειας του εκρηκτικού συνιστάται η χρήση εκρηκτικών με χαμηλή πυκνότητα. Η πυκνότητα των εκρηκτικών κυμαίνεται από 0,8 έως 1,6 g/m<sup>3</sup>. Αν το εκρηκτικό έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το νερό (1 g/cm<sup>3</sup>), τότε επιπλέει με συνέπεια να είναι δύσκολη η γόμωση του σε υγρά διατρήματα.

Στην περίπτωση των δυναμίτιδων, αύξηση της πυκνότητας συνεπάγεται και αύξηση της προσφερόμενης ενέργειας το οποίο όμως δεν συμβαίνει στην περίπτωση εκρηκτικών υγρής φάσης. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τυπικές τιμές πυκνότητας για μερικές εκρηκτικές ύλες οι οποίες γομώνονται χύδην ή σε φυσίγγια.

Πίνακας 2.1: Πυκνότητες μερικών εκρηκτικών υλικών (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

Εκρηκτικό υλικό	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
Δυναμίτιδα	0.8 – 1.4
Ζελατίνη	1.0 – 1.7
Εκρηκτικά υγρής φάσης (φυσίγγια)	1.1 – 1.3
Εκρηκτικά υγρής φάσης (χύδην)	1.1 – 1.6
ANFO (πνευματική γόμωση)	0.8 – 0.85
ANFO (χύδην)	0.8 – 0.85
ANFO (φυσίγγια)	1.1 – 1.2

Υπερβολική αύξηση της πυκνότητας ενός εκρηκτικού επιφέρει σημαντική μείωση της ευαισθησίας του. Όταν ένα εκρηκτικό φθάσει ή υπερβεί την κρίσιμη πυκνότητα (critical density), τότε δεν είναι δυνατόν να εναυθεί ακόμα και με ισχυρά ενισχυτικά εναύσματα. Η κατάσταση της υπερσυμπίεσης των εκρηκτικών είναι μεν ανεπιθύμητη αλλά μπορεί όμως να δημιουργηθεί σε όλα τα εκρηκτικά που αποτελούνται από κόκκους (κοκκώδη, granular explosives). Πρακτικά αυτό μπορεί να συμβεί σε μίγματα ANFO όταν οι υπερβολικές πιέσεις που δημιουργούνται σε γειτονικά διατρήματα συμπακνώσουν το ANFO που βρίσκεται σε μη ενεργοποιημένα διατρήματα, τόσο ώστε να μην είναι δυνατή η έναυσή του (Αγιουτάντης, 1996).

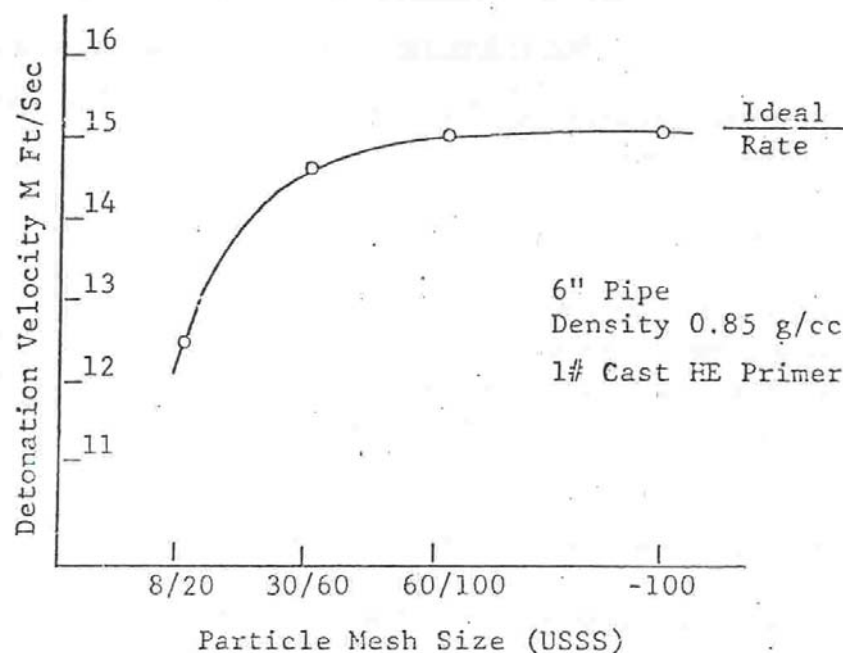


Σχ. 2.6: Μεταβολή της ευαισθησίας του ANFO με την πυκνότητα του εκρηκτικού μίγματος (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

Στο Σχ 2.6 παρουσιάζεται η μείωση της ευαισθησίας έναυσης του ANFO σαν συνάρτηση της πυκνότητας του. Το μίγμα μετά την παρασκευή του έχει πυκνότητα  $0,85 \text{ g/cm}^3$ , αλλά με την πνευματική γόμωση που χρησιμοποιείται στα περισσότερα εργοτάξια έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του μέχρι  $0,95 \text{ g/cm}^3$ .

Σημειώνεται ότι για πυκνότητες μεγαλύτερες από  $1,20 \text{ g/cm}^3$ , το ANFO δεν μπορεί να συντηρήσει ένα σταθερό μέτωπο έκρηξης.

Η κοκκομετρία του υλικού (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μιγμάτων όπως το ANFO) συνδέεται με την διαμόρφωση της πυκνότητας του εκρηκτικού. Το Σχ 2.7 παρουσιάζει την μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης του ANFO σαν συνάρτηση της κοκκομετρίας του νιτρικού αμμωνίου που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του. Είναι φανερό ότι όταν το μέγεθος των κόκκων μειώνεται, τότε αυξάνεται η ταχύτητα έκρηξης και επομένως είναι δυνατόν να προκύψουν ευαίσθητα μίγματα τα οποία να εναύονται με εκρηκτικά καψύλλια (Αγιουτάντης, 1996).



Σχ. 2.7: Μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης του ANFO σε συνάρτηση με την κοκκομετρία του εκρηκτικού μίγματος (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

### 2.2.6 Ανθεκτικότητα στο νερό

Η ανθεκτικότητα στο νερό (water resistance) ενός εκρηκτικού εκφράζει την δυνατότητά του να εκραγεί κάτω από υγρές συνθήκες, ή ισοδύναμα, την ικανότητά του να εμποδίσει την είσοδο του νερού μέσα στην μάζα του. Η ανθεκτικότητα στο νερό εκφράζεται από τον αριθμό των ωρών που το εκρηκτικό μπορεί να παραμείνει μέσα σε νερό χωρίς να χάσει την ικανότητα να διεγερθεί και εκραγεί από εκρηκτικό καψύλλιο ισχύος No. 6.

Μία εκρηκτική ύλη, που χαρακτηρίζεται ως "καλής ανθεκτικότητας στο νερό" μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε υγρό διάτρημα για σύντομο χρονικό διάστημα και να εκραγεί επιτυχώς. Για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα απαιτείται εκρηκτική ύλη με χαρακτηρισμό "εξαιρετικό" (excellent). Τέτοιο χαρακτηρισμό φέρουν οι ζελατίνες και ορισμένα slurries. Γενικά αναφέρεται ότι, εκρηκτικές ύλες με μεγάλη πυκνότητα, έχουν καλή ως ικανοποιητική ανθεκτικότητα στο νερό, ενώ εκρηκτικές ύλες με χαμηλή πυκνότητα έχουν μικρή ή καθόλου ανθεκτικότητα στο νερό.

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση εκρηκτικών ανάλογα με την ανθεκτικότητα τους στο νερό

<b>Κλάση</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Διάρκεια παραμονής στο νερό (ώρες)	>71	32-71	16-31	8-15	4-7	1-3	<1

Ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει μία ταξινόμηση των εκρηκτικών σε κλάσεις ανάλογα με την ανθεκτικότητα τους στο νερό, ενώ ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει ποιοτικά την ανθεκτικότητα μερικών εκρηκτικών.

Πίνακας 2.3: Ανθεκτικότητα στο νερό μερικών εκρηκτικών υλών (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

<b>Εκρηκτικό υλικό</b>	<b>Συμπεριφορά κάτω από υγρές συνθήκες</b>
Δυναμίτιδα	Μέτρια – καλή
Ζελατίνη	Καλή – άριστη
Εκρηκτικά υγρής φάσης (φυσίγγια)	Πολύ καλή
Εκρηκτικά υγρής φάσης (χύδην)	Πολύ καλή
ANFO (πνευματική γόμωση)	Μέτρια
ANFO (χύδην)	Μέτρια
ANFO (φυσίγγια)	Πολύ καλή

Όταν το νερό εμποτίζεται στη μάζα ενός εκρηκτικού τότε η ευαισθησία του εκρηκτικού μεταβάλλεται με συνέπεια να μην εκρήγνυται ή στην χειρότερη περίπτωση να εκρήγνυται ανεξέλεγκτα. Ορισμένες δυναμίτιδες και τα εκρηκτικά υγρής φάσης έχουν πολύ καλή ανθεκτικότητα στο νερό, ενώ τα εκρηκτικά που περιέχουν νιτρικό αμμώνιο έχουν μικρή έως μηδενική ανθεκτικότητα στο νερό, καθότι το νιτρικό αμμώνιο είναι υγροσκοπικό.

Για την αποφυγή των προβλημάτων αυτών συνιστάται (Αγιουτάντης, 1996)

- α) η πυροδότηση των λιγότερο ανθεκτικών στο νερό εκρηκτικών αμέσως μετά την γόμωση,
- β) η χρήση ισχυρότερων ενισχυτικών

### 2.2.7 Ευαισθησία

Ο όρος ευαισθησία χρησιμοποιείται κατά δύο τρόπους: Ο πρώτος αναφέρεται κυρίως στην ευαισθησία έναυσης της εκρηκτικής ύλης και ο δεύτερος αναφέρεται στο βαθμό επικινδυνότητας του εκρηκτικού όσον αφορά την παρασκευή, μεταφορά, αποθήκευση, κλπ.

Η ευαισθησία (sensitivity) ως προς την έναυση μιας εκρηκτικής ύλης καθορίζεται από την ελάχιστη ποσότητα ενέργειας, που απαιτείται για να προκληθεί με σταθερό ρυθμό εκρηκτική αντίδραση. Στην πράξη χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί τρόποι μέσω των οποίων προσδιορίζεται η ευαισθησία έναυσης.

Ο πρώτος, που είναι άμεσος, αναφέρεται στην ελάχιστη ποσότητα εναύσματος (minimum booster) σε επαφή με την εκρηκτική ύλη, που απαιτείται για την έναυσή της. Για τον προσδιορισμό αυτής δοκιμάζεται η έναυση της εκρηκτικής ύλης με μία σειρά διαρκώς ισχυρότερων εναυσμάτων μέχρις ότου επιτευχθεί ικανοποιητική έκρηξη. Το μικρότερο από πλευράς ισχύος έναυσμα καθορίζει την ελάχιστη ενέργεια, που απαιτείται για την υπόψη εκρηκτική ύλη. Στην πράξη τα εναύσματα που ενδείκνυνται να χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι κατά 4 περίπου φορές ισχυρότερα του ελάχιστου εναύσματος. (Τσουτρέλης, 1997).

Ο δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της ευαισθησίας ως προς την έναυση μιας εκρηκτικής ύλης αναφέρεται στην ικανότητά της να εναυθεί μέσω παρεμβαλλόμενου διάκενου αέρα (air gap sensitivity) (Τσουτρέλης, 1997).

Όταν μία εκρηκτική ύλη είναι χαμηλής ευαισθησίας, τότε η έκρηξή της εντός του διατρήματος μπορεί να διακοπεί, εάν για οποιονδήποτε λόγο υπάρχει διάκενο μεταξύ των φυσιγγίων της στήλης. Αντίθετα, μία εκρηκτική ύλη μεγάλης ευαισθησίας μπορεί να εκραγεί από την έκρηξη μίας υπονόμου η οποία εκρήγνυται κοντά σε αυτή. Μία τέτοια έκρηξη μεταξύ γειτονικών υπονόμων καλείται **συμπαθητική**.

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

Η επικινδυνότητα ενός εκρηκτικού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλες τις περιπτώσεις όπου απαιτείται μετακίνηση ή χειρισμός του, οπότε πρέπει να λαμβάνονται τα δέοντα μέτρα.

Ο Πίνακας 2.4 παρουσιάζει μία ποιοτική εκτίμηση της ευαισθησίας μερικών εκρηκτικών υλών. Συγκεκριμένα συγκρίνεται η ευαισθησία ενός εκρηκτικού σε τυχαία έναυση (επικινδυνότητα) με την ευαισθησία ενεργοποίησης του εκρηκτικού σε ένα διάτρημα.

Πίνακας 2.4: Επικινδυνότητα και ευαισθησία έναυσης για μερικά εκρηκτικά υλικά (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

Εκρηκτικό υλικό	Επικινδυνότητα	Ευαισθησία έναυσης
Δυναμίτιδα	Μέτρια - υψηλή	Άριστη
Ζελατίνη	Μέτρια	Άριστη
Εκρηκτικά υγρής φάσης (φυσίγγια)	Χαμηλή	Καλή – πολύ καλή
Εκρηκτικά υγρής φάσης (χύδην)	Χαμηλή	Καλή – πολύ καλή
ANFO (πνευματική γόμωση)	Χαμηλή	Μέτρια - καλή
ANFO (χύδην)	Χαμηλή	Μέτρια - καλή
ANFO (φυσίγγια)	Χαμηλή	Καλή – πολύ καλή

## 2.2.8 Ταχύτητα έκρηξης

Η ταχύτητα έκρηξης είναι η σπουδαιότερη ιδιότητα των εκρηκτικών, όταν αξιολογούνται από πλευράς απόδοσης, διότι εκφράζει τον ρυθμό εκλύσεως της χημικής ενέργειάς τους. Ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει ο κρουστικός παλμός κατά μήκος μίας κυλινδρικής στήλης εκρηκτικού ή η ταχύτητα της χημικής αντίδρασης.

Η ταχύτητα έκρηξης των συνήθων εμπορικών εκρηκτικών υλών κυμαίνεται από 3000-7000 m/s. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έκρηξης μιας εκρηκτικής ύλης τόσο ταχύτερη είναι η έκλυση της συνολικής ενέργειάς της και επομένως βραχύτερη σε διάρκεια η ωστική φάση της έκρηξης και αντιστρόφως. Για τον λόγο αυτό εκρηκτικές ύλες που δίνουν χαμηλές ταχύτητες έκρηξης δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε ημίσκληρα πετρώματα.

Σε κάθε εκρηκτική ύλη διακρίνονται τρεις ταχύτητες έκρηξης. Εκείνη ( $D_c$ ), που αναφέρεται σε έκρηξη στις περιορισμένες συνθήκες του διατρήματος (confined VOD), εκείνη ( $D_u$ ), που αναφέρεται σε έκρηξη σε ελεύθερες συνθήκες (unconfined



VOD) και τέλος εκείνη  $D^*$ , που αναφέρεται στην ιδανική έκρηξη (ideal VOD). Η εμπειρική σχέση μεταξύ των δύο πρώτων είναι:

$$D_u = (0,70 \text{ έως } 0,80) D_c$$

Δεδομένου ότι, κατά κανόνα οι εκρήξεις λαμβάνουν χώρα σε περιορισμένες συνθήκες (εντός διατρήματος), το ενδιαφέρον περιορίζεται στην αντίστοιχη ταχύτητα έκρηξης  $D_c$ . Εν τούτοις, οι κατασκευαστές εκρηκτικών υλών δεν ακολουθούν μέχρι σήμερα τυποποιημένη μέθοδο έκφρασης της ταχύτητας έκρηξης (Τσουτρέλης. 1997).

Η ταχύτητα έκρηξης, μετά την εμφάνιση πλησίον του σημείου έναυσης μιας ασταθούς κατάστασης, σταθεροποιείται στην συνέχεια και οδεύει σε όλο το υπόλοιπο μήκος της γόμωσης με υπερηχητική ταχύτητα. Η ταχύτητα έκρηξης είναι μία σημαντική μεταβλητή η οποία χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της πίεσης έκρηξης ενός εκρηκτικού. Η ταχύτητα έκρηξης μετράται σε πόδια ανά δευτερόλεπτο (fps) ή σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s). Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ταχύτητα έκρηξης είναι :

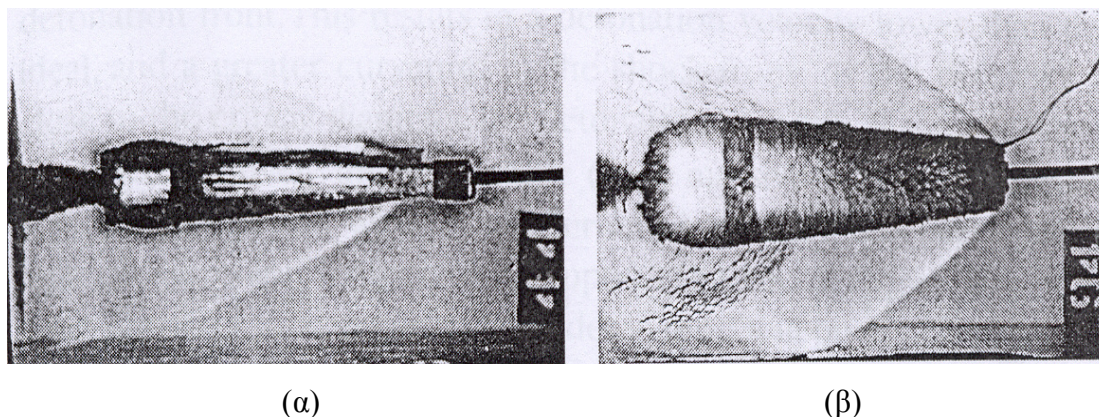
- ο τύπος του εκρηκτικού
- η διάμετρος της εκρηκτικής στήλης
- ο βαθμός περιορισμού
- το μέγεθος κόκκου
- ο τρόπος έναυσης του εκρηκτικού
- η πυκνότητα γόμωσης και
- η θερμοκρασία.

#### 2.2.8.1 Τύπος εκρηκτικού

Κάθε εκρηκτικό έχει μία δική του μέγιστη ή ιδανική ταχύτητα η οποία εξαρτάται από την σύνθεση και την πυκνότητά του. Έτσι για ένα συγκεκριμένο εκρηκτικό η ιδανική ταχύτητα έκρηξης είναι η μέγιστη ταχύτητα έκρηξής του εκρηκτικού για την δεδομένη πυκνότητα (ISEE, 1998).

Η ταχύτητα έκρηξης των εκρηκτικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στην βιομηχανία κυμαίνονται από 1500 m/s - σε περιπτώσεις εξόρυξης γαιάνθρακα - έως και 7600 m/s σε περιπτώσεις χυτών ενισχυτικών. Τα περισσότερα βιομηχανικά εκρηκτικά που χρησιμοποιούνται σήμερα δίνουν ταχύτητες έκρηξης της τάξης των 3000 m/s -5500 m/s.

Οι φωτογραφίες υψηλών ταχυτήτων, 2.8α, β δείχνουν τη διαφορά μεταξύ ενός εκρηκτικού υψηλής ταχύτητας έκρηξης και ενός χαμηλής ταχύτητας τα οποία έχουν εναυθεί κάτω από το νερό.



Σχ. 2.8: Φωτογραφία ενός εκρηκτικού (α) υψηλής ταχύτητας έκρηξης και (β) ενός χαμηλής ταχύτητας έκρηξης (Πηγή: ISEE, 1998).

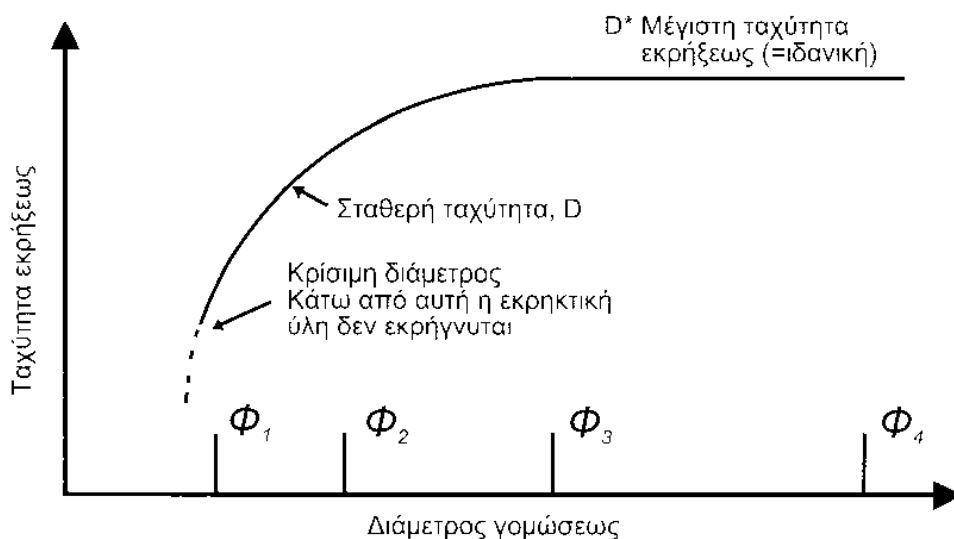
Η πιο εύκολα παρατηρήσιμη διαφορά είναι η γωνία του κρουστικού παλμού που δημιουργείται από την έκρηξη. Αυτή η γωνία εξαρτάται από την διαφορά στην ταχύτητα έκρηξης του εκρηκτικού και την ταχύτητα του παλμού στο νερό. Μία παρόμοια κατάσταση δημιουργείται και σε εκρήξεις πετρωμάτων. Στον Πίνακα 2.5 δίνονται οι ταχύτητες έκρηξης ορισμένων εκρηκτικών (ISEE, 1998).

Πίνακας 2.5: Στοιχεία σύγκρισης μερικών εκρηκτικών (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

Εκρηκτικό υλικό	Ποκνότητα ( $\text{g/cm}^3$ )	Ταχύτητα έκρηξης (m/s)
ANFO 94%AN, 6%FO	0,86	4400
Slurry 49%AN, 20%TNT	1,40	5000
Αμμωνιοδυναμίτιδα 24%AN, 26%NG	1,50	6000
Slurry 48%AN, 15%AL	1,27	5000
TNT	1,56	6700
PETN	1,76	7600
RDX	1,70	8200
Composition B	1,65	7600

### 2.2.8.2 Διάμετρος εκρηκτικής στήλης

Επειδή τα εκρηκτικά υλικά τοποθετούνται σε διατρήματα, η διάμετρος του εκρηκτικού συνήθως αντιστοιχεί στην διάμετρο της εκρηκτικής στήλης που είναι ίση ή μικρότερη από την διάμετρο του διατρήματος. Ανάλογα τον τύπο του εκρηκτικού η διάμετρός του θα επηρεάσει την ταχύτητα έκρηξής του, μέχρι μία συγκεκριμένη διάμετρο.



Σχ. 2.9: Μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης σε συνάρτηση με την αύξηση της διαμέτρου γόμωσης (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Η αύξηση του διατρήματος μετά από μία κάποια οριακή τιμή δεν επηρεάζει την ταχύτητα έκρηξης. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του εκρηκτικού τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έκρηξής του. Αυτό ισχύει μέχρι να επιτευχθούν υδροδυναμικές συνθήκες, οπότε επιτυγχάνεται η μέγιστη ταχύτητα έκρηξης για δεδομένη πυκνότητα εκρηκτικού. Στο Σχ. 2.9 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης διαφόρων εκρηκτικών υλών που υπάρχουν στο εμπόριο σαν συνάρτηση της διαμέτρου του διατρήματος (Τσουτρέλης, 1997)

Κάθε εκρηκτικό έχει μία **κρίσιμη διάμετρο**, η οποία είναι η ελάχιστη διάμετρος για την οποία είναι δυνατόν να διατηρηθεί η διαδικασία έκρηξης μέσα στο εκρηκτικό. Αν η διάμετρος του εκρηκτικού είναι μικρότερη από την κρίσιμη διάμετρο, τότε είναι δυνατόν να σταματήσει η διαδικασία της έκρηξης. Η ταχύτητα της χημικής αντίδρασης εξαρτάται έντονα από την πίεση και μειώνεται δραστικά καθώς τα αντιδρώντα υλικά διογκώνονται η ταχύτητα έκρηξης ελαττώνεται με μείωση της

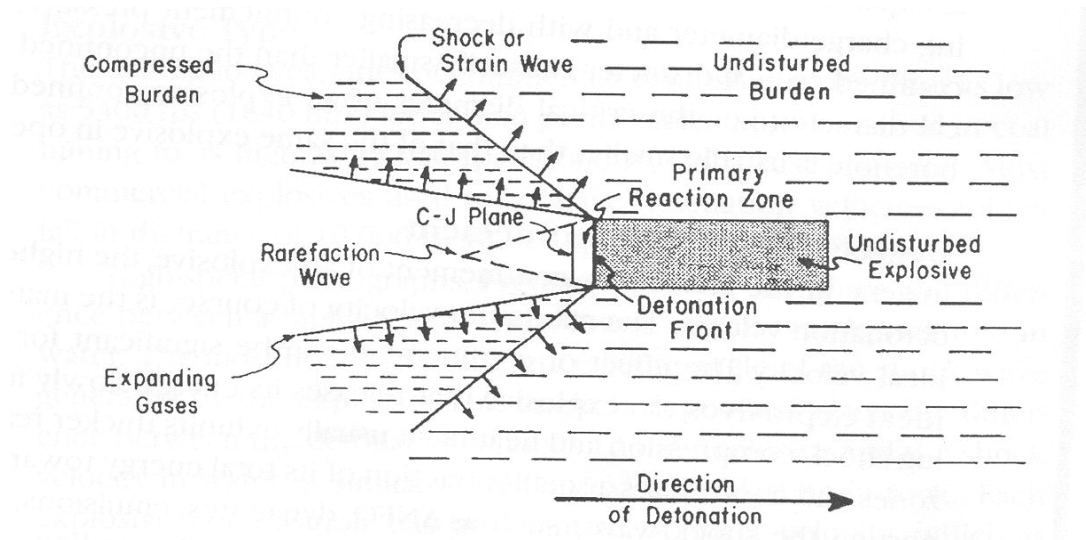
διαμέτρου του εκρηκτικού. Η κρίσιμη διάμετρος για ένα εκρηκτικό που είναι πλευρικά περιορισμένο είναι μικρότερη από αυτήν που χαρακτηρίζει το ίδιο εκρηκτικό σε μη περιορισμένες συνθήκες (ISEE, 1998).

### 2.2.8.3 Βαθμός περιορισμού

Ο βαθμός περιορισμού αναφέρεται στο πόσο περιορισμένη είναι μία ποσότητα εκρηκτικού από πλευρικές πιέσεις (π.χ. βάρος υπερκείμενης στήλης, τρόπος γόμωσης, κλπ.). Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός περιορισμού του εκρηκτικού τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έκρηξής του. Η επίδραση που έχει ο βαθμός περιορισμού είναι σημαντικός για μη ιδανικά εκρηκτικά (εκρηκτικά τα οποία απελευθερώνουν την ενέργειά τους αργά συμπιεζόμενα από το κρουστικό κύμα και από την θερμοκρασία. Συνήθως επιδεικνύουν πυκνότερες ζώνες αντίδρασης και αποδίδουν μικρότερο ποσοστό από την συνολική τους ενέργεια για την διατήρηση του μετώπου της έκρηξης) όπως το ANFO, δυναμίτιδες, γαλακτώματα, Heavy ANFO και εκρηκτικά υγρής φάσης σε μικρής διαμέτρου διατρήματα. Ανάλογα με τον τύπο του εκρηκτικού, ο βαθμός περιορισμού του έχει συνήθως μικρότερη επίδραση στην ταχύτητα έκρηξής του, όσο η διάμετρος του αυξάνει (ISEE, 1998).

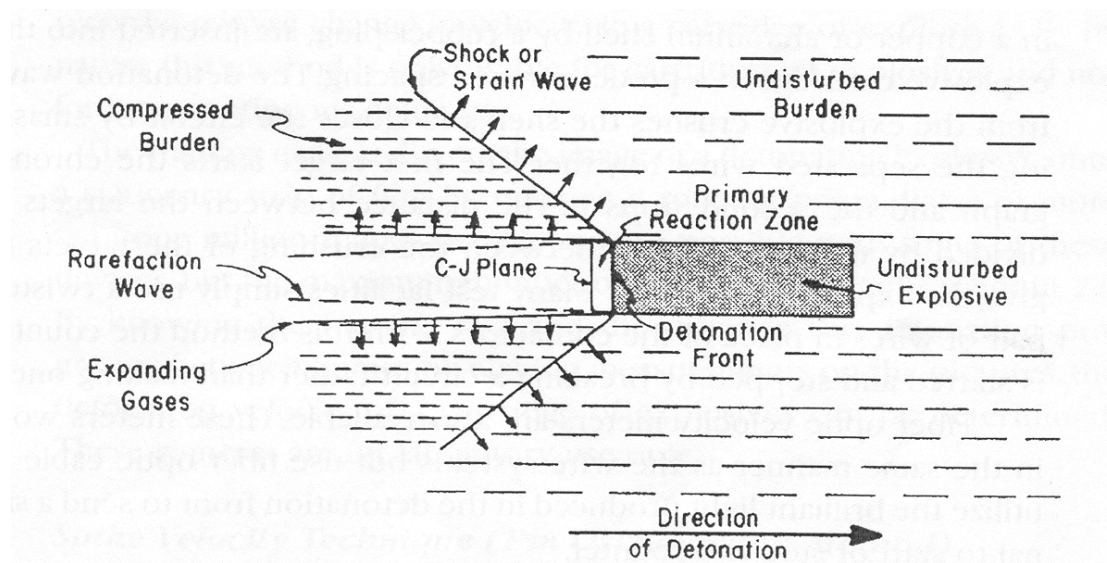
Με την αύξηση του βαθμού περιορισμού εμποδίζεται σημαντικά ο ρυθμός πλευρικής διόγκωσης των αερίων με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερο μήκος μεταβατικής περιοχής που φθάνει τις 4,5 με 5,5 φορές την διάμετρο του διατρήματος έναντι 3,5 φορές χωρίς περιορισμό, για την επίτευξη σταθερών συνθηκών έκρηξης. Παράλληλα αυξάνεται το μήκος της ζώνης αντίδρασης από  $d$  σε περίπου  $4/3d$ , όπου  $d$  είναι η διάμετρος του διατρήματος. Αυτό σημαίνει ότι εάν για συγκεκριμένη διάμετρο γόμωσης η αντίδραση δεν είχε χρόνο να ολοκληρωθεί, με την αύξηση του βαθμού περιορισμού επιτυγχάνεται πληρέστερη αντίδραση και επομένως μεγαλύτερη ταχύτητα έκρηξης στην ίδια διάμετρο, ενώ ταυτόχρονα η κρίσιμη διάμετρος μειώνεται (ISEE, 1998).

Τα Σχ. 2.10 και 2.11 δείχνουν πώς ο βαθμός περιορισμού επηρεάζει την ταχύτητα έκρηξης.



Σχ. 2.10: Έκρηξη σε ένα εύκολα συμπιέσιμο υλικό όπως αέρας νερό, μαλακό πέτρωμα, πορώδες πέτρωμα (Πηγή: ISEE, 1998)

Καθώς τα διογκωμένα αέρια της έκρηξης συμπιέζουν τέτοιο υλικό, χάνεται γρήγορα ενέργεια και η τιμή της πίεσης και της θερμοκρασίας μειώνεται στα προϊόντα της αντίδρασης. Αυτές οι απώλειες μεταδίδονται στο εσωτερικό της ζώνης αντίδρασης σαν ένα κύμα αραιώσης, χαμηλώνοντας την πίεση και τον βαθμό αντίδρασης, συντελώντας τελικά στην ελάττωση της διάδοσης του μετώπου έκρηξης. Αυτό οδηγεί σε μία ταχύτητα έκρηξης μικρότερη της ιδανικής και σε μία κυρτότητα του κρουστικού παλμού. Αν η διάμετρος του εκρηκτικού είναι κοντά στην κρίσιμη διάμετρο η έκρηξη μπορεί να αποτύχει (ISEE, 1998).

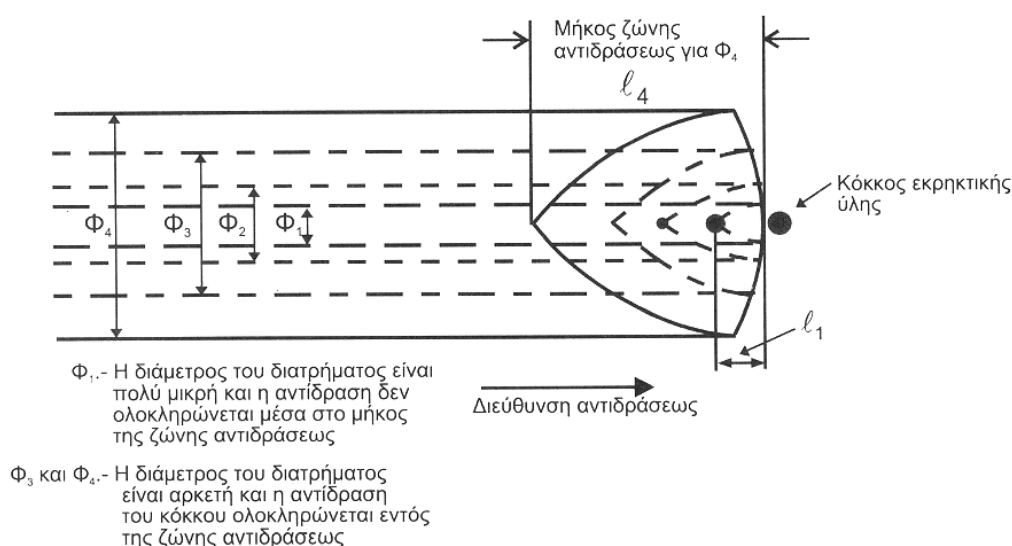


Σχ. 2.11: Έκρηξη σε ένα δύσκολα συμπιέσιμο υλικό όπως σκληρό συμπαγές πέτρωμα (Πηγή: ISEE, 1998).

Το κύμα αραίωσης είναι τώρα πιο αδύναμο και η πρωτεύουσα ζώνη αντίδρασης είναι σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία και μπορεί να συντηρήσει το μέτωπο έκρηξης. Η ελάχιστη διάμετρος για την διατήρηση σταθερού μετώπου έκρηξης θα είναι προφανώς μικρότερη κάτω από τέτοιες συνθήκες περιορισμού (ISEE, 1998).

#### 2.2.8.4 Μέγεθος κόκκου

Από το Σχ. 2.12 προκύπτει εμμέσως, ότι για τις ίδιες συνθήκες έκρηξης όσο μειώνεται το μέγεθος του κόκκου της εκρηκτικής ύλης για δοθείσα διάμετρο γόμωσης, τόσο ταχύτερα ολοκληρώνεται η αντίδραση διότι αυξάνεται η επιφάνεια αντίδρασης. Επιπρόσθετα αφού οι κόκκοι είναι μικρότεροι, αντιδρούν πολύ γρηγορότερα. Επομένως η μείωση του μεγέθους του κόκκου οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας έκρηξης καθώς και σε μείωση της κρίσιμης διαμέτρου (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 2.12: Χημική αντίδραση ενός κόκκου εκρηκτικής ύλης σε συνάρτηση με το μήκος της ζώνης αντίδρασης για διάφορες διαμέτρους  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ ,  $\Phi_4$  (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

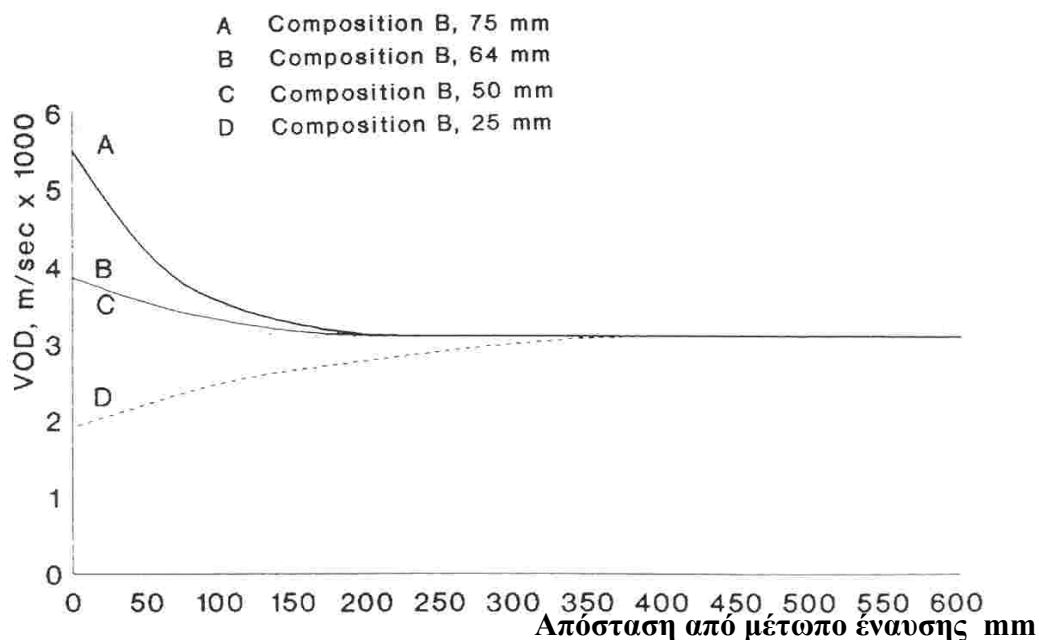
Το σχήμα 2.12 εξηγεί τι συμβαίνει όταν ένας κόκκος εκρηκτικής ύλης συναντήσει το μέτωπο της έκρηξης σε διάφορες διαμέτρους  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ ,  $\Phi_4$  γόμωσης. Για την μικρή διάμετρο γόμωσης και διατρήματος  $\Phi_1$  η αντίδραση δεν προλαμβάνει

να ολοκληρωθεί, λόγω του μικρού μήκους της ζώνης αντίδρασης  $I_1$  και η απελευθερούμενη ενέργεια δεν είναι αρκετή για να διατηρήσει την έκρηξη.

Καθώς η διάμετρος αυξάνεται και το μήκος της ζώνης αντίδρασης γίνεται μεγαλύτερο, το ποσοστό αντίδρασης του ίδιου κόκκου αυξάνει. Σε κάποια ελάχιστη διάμετρο γόμωσης, ενώ ακόμη ο κόκκος δεν έχει αντιδράσει κατά 100%, εν τούτοις, η απελευθερούμενη ενέργεια είναι πλέον ικανή για να διατηρήσει την Αυτόδιάδοση της έκρηξης. Η διάμετρος γόμωσης στην οποία συμβαίνει αυτό καλείται κρίσιμη διάμετρος (critical diameter) και είναι χαρακτηριστική για κάθε εκρηκτική ύλη για δεδομένη κοκκομετρία και πυκνότητα γόμωσής της (Τσουτρέλης, 1997).

#### 2.2.8.5 Τρόπος έναυσης του εκρηκτικού

Η επιλογή του κατάλληλου ενισχυτικού εναύσματος συνεπάγεται την γρηγορότερη ανάπτυξη της μέγιστης ταχύτητας έκρηξης για τις δεδομένες συνθήκες. Ο αρχικός κρουστικός παλμός πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός έτσι ώστε η έκρηξη να μην σταματήσει αλλά ούτε να εκφυλισθεί σε ανάφλεξη.



Σχ. 2.13: Επίδραση της διαμέτρου ενισχυτικού στην αρχική ταχύτητα έκρηξης του ANFO (Πηγή: Stig O Olofsson, 1997)

Μια σημαντική παράμετρος της αρχικής ταχύτητας του εκρηκτικού είναι η διάμετρος του ενισχυτικού έναυσης. Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.13 η αρχική

ταχύτητα του ANFO μειώνεται όταν η διάμετρος του ενισχυτικού μειώνεται. Η δραστική μείωση της αρχικής ταχύτητας όταν χρησιμοποιείται καψύλλιο 25mm είναι εμφανής. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού δίνεται στο φυλλάδιο της εταιρίας Atlas Powder Company of U.S.A., “Οι Βασικές αρχές γόμωσης του ANFO”. Η έναυση του ANFO είναι αποτέλεσμα μεταφοράς πίεσης έκρηξης από το ενισχυτικό στην επιφάνεια του ANFO. Στην περίπτωση όπου υπάρχει ταύτιση διαμέτρου ενισχυτικού και ANFO, η πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα πάνω σε όλη την επιφάνεια του ANFO. Αν η πίεση έκρηξης είναι αρκετά ισχυρή, το αποτέλεσμα θα είναι ικανοποιητική έναυση του ANFO ίσως με ταχύτητα μεγαλύτερης της απαιτούμενης. Ωστόσο, αν το ενισχυτικό είναι μικρό σε σχέση με την διάμετρο της στήλης, η περιοχή μεταφοράς πίεσης μειώνεται σημαντικά. Συνεπώς, μόνο μια ισοδύναμη περιοχή του ANFO (ίση με την διάμετρο του ενισχυτικού) θα λάβει το ωστικό κύμα. Για παράδειγμα, όταν η στήλη ANFO των 75mm εναυθεί με ένα ενισχυτικό διαμέτρου των 25 mm, η αρχική ταχύτητα έκρηξής του ANFO θα είναι ίση με εκείνης μίας στήλης ANFO των 25 mm. Καθώς η ανατίναξη αναπτύσσεται κατά μήκος της στήλης, βαθμιαία θα εξαπλωθεί στη στήλη ANFO των 75 mm και τότε τελικά θα επικρατήσει κατάσταση σταθερής ταχύτητας. Ο συνδυασμός των χαμηλών πιέσεων έκρηξης και ενισχυτικών μικρής διαμέτρου δίνει αρχικές ταχύτητες της τάξης των 600 m/s (Stig O Olofsson, 1997).

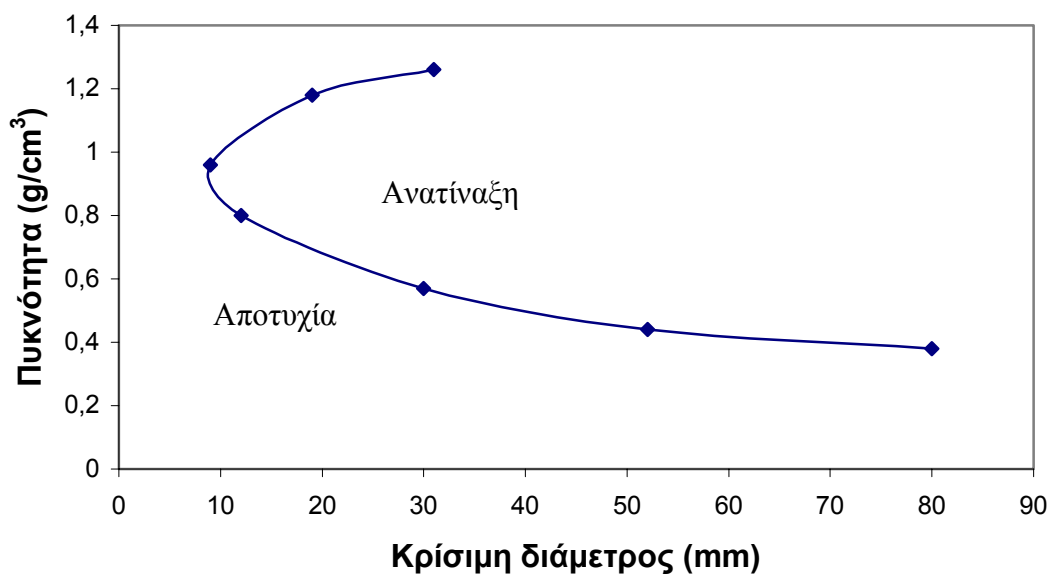
Το μήκος του ενισχυτικού εναύσματος πρέπει για γεωμετρικούς λόγους να είναι πάντα ίσο ή μεγαλύτερο από την διάμετρό του. Κατά προτίμηση τουλάχιστον διπλάσιο της διαμέτρου για να εξασφαλισθεί ένα σταθερό επίπεδο ωστικό κύμα από το ενισχυτικό (Stig O Olofsson, 1997).

#### **2.2.8.6 Πυκνότητα γόμωσης**

Η πυκνότητα γόμωσης επηρεάζει το αποτέλεσμα της έκρηξης, αφού πυκνότερη εκρηκτική ύλη οδηγεί γενικώς σε αύξηση της διαθέσιμης ενέργειας στην μονάδα του όγκου, γεγονός που διαπιστώνεται με την αύξηση της ιδανικής ταχύτητας έκρηξης.

Όπως δείχνει το Σχ. 2.14 η αύξηση της πυκνότητας γόμωσης προκαλεί αύξηση της κρίσιμης διαμέτρου σε συνθήκες με ή χωρίς περιορισμό μέχρι κάποια οριακή τιμή, που αντιστοιχεί σε 1,2 g/cm<sup>3</sup> για το σφαιρόμορφο πορώδες ANFO σε συνθήκες χωρίς περιορισμό.



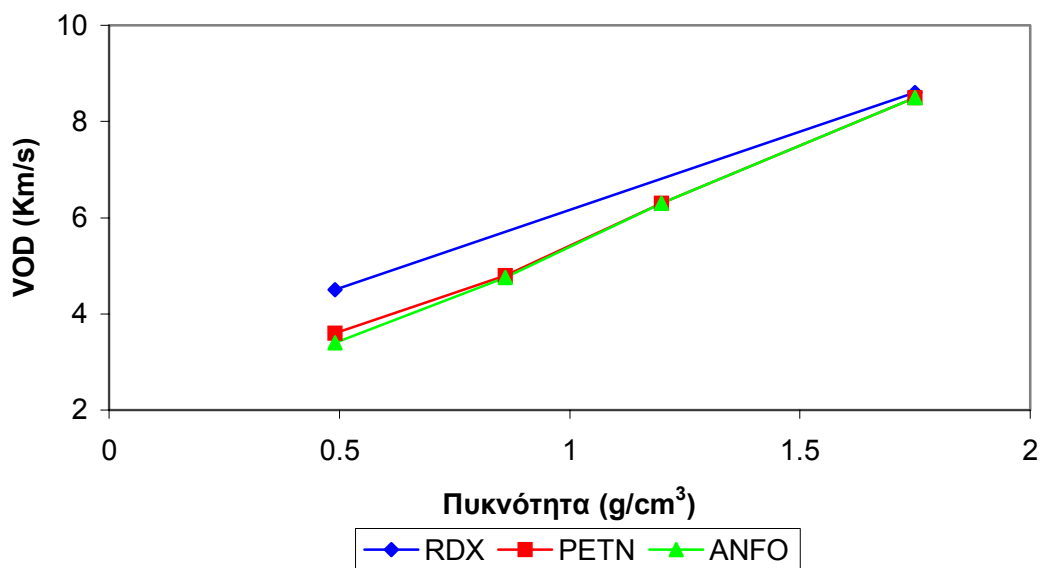


Σχ. 2.14: Κρίσιμη διάμετρος του ANFO σε συνάρτηση της πυκνότητάς του (Πηγή: Katsabanis, 1996)

Για μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή η εκρηκτική ύλη δεν εκρήγνυται, διότι η κρίσιμη διάμετρος γίνεται άπειρη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, ο παγιδευμένος εντός της κοκκώδους εκρηκτικής ύλης αέρας, ο οποίος συμπιεζόμενος κατά την διέλευση του εκρηκτικού κύματος δημιουργεί θερμά σημεία (hot spots) που χρησιμεύουν ως κέντρα έναρξης της αντίδρασης, μειώνεται τόσο πολύ, ώστε δεν μπορεί πλέον να παράγει ικανοποιητικό αριθμό κέντρων αντίδρασης για να διατηρηθεί η έκρηξη (Τσουτρέλης, 1997)

Στην περίπτωση των ρευστών εκρηκτικών υλών (π.χ. γαλακτώματα) ισχύει ότι και για τις κοκκώδεις εκρηκτικές ύλες ως προς την ευαισθησία διατηρήσεως της αντίδρασης, η οποία εξαρτάται από την παρουσία παγιδευμένου αέρα στο υγρό σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη μέσων αερίωσης (gassing agents), που μεταφέρουν εντός αυτών φυσαλίδες αέρα (gas bubbles) (Τσουτρέλης, 1997).

Το Σχ. 2.15 δείχνει ότι η ταχύτητα έκρηξής του εκρηκτικού και της πυκνότητας του σχετίζονται με μία σχέση γραμμική.



Σχ. 2.15: Σχέση της ταχύτητας έκρηξης μερικών εκρηκτικών σε συνάρτηση με την πυκνότητα τους (Πηγή: Katsabanis, 1996)

#### 2.2.8.7 Θερμοκρασία

Ανάλογα με τον τύπο του εκρηκτικού, αλλαγές στη αρχική θερμοκρασία έχουν αντίκτυπο στην ταχύτητα έκρηξής του. Η αρχική θερμοκρασία της εκρηκτικής ύλης έχει μικρή επιρροή στην ταχύτητα έκρηξης σε διαμέτρους μικρότερες της κρίσιμης. Ωστόσο η κρίσιμη διάμετρος του εκρηκτικού εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία.

Σαν γενικός κανόνας αναφέρεται ότι, αλλαγές πρέπει να είναι αναμενόμενες με αλλαγή των φάσεων. Τα slurries αλλάζουν εύκολα φάση διότι η εξωτερική φάση είναι το υδατικό διάλυμα. Στα γαλακτώματα το υδατικό υπερκορεσμένο διάλυμα προστατεύεται από το στρώμα ελαίου, κάνοντας έτσι την αλλαγή φάσης πολύ δύσκολη με την μείωση της θερμοκρασίας. Ωστόσο σε υπερβολικά μικρές θερμοκρασίες μπορούν να δημιουργηθούν κρύσταλλοι - μία μη αναστρέψιμη διαδικασία - που δηλώνει την καταστροφή του προϊόντος (Katsabanis, 1996)

Μείωση της θερμοκρασίας θα μειώσει την ευαισθησία κάθε εκρηκτικής ύλης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δαπανάται επιπλέον κάποιο ποσό ενέργειας για την ανύψωση της θερμοκρασίας στο σημείο το οποίο η αντίδραση λαμβάνει χώρα.

Πορώδη εκρηκτικά σε κανονικές θερμοκρασίες που περιέχουν λίγο ή καθόλου υγρό δεν επηρεάζονται από τις χαμηλές θερμοκρασίες τις οποίες παρατηρούνται στα εμπορικά εκρηκτικά. Τέτοια είναι το ANFO και τα χυτά ενισχυτικά. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτά τα εκρηκτικά περιέχουν πολλά μικρά κενά τα οποία δρουν σαν έντονα **θερμά σημεία** (hot spots) που χρησιμεύουν σαν κέντρα έναυσης της αντίδρασης όταν το ωστικό κύμα φτάσει σ'αυτά. Αντιθέτως, οι νιτρογλυκερινικοί δυναμίτες επηρεάζονται ελάχιστα από τις θερμοκρασιακές διαφορές που συναντούνται στις περισσότερες περιοχές εμπορικών εκρήξεων. Η ταχύτητα έκρηξης λιγότερο ευαίσθητων εκρηκτικών τα οποία περιέχουν υγρά σε αρκετή ποσότητα, όπως εκρηκτικά υγρής φάσης και γαλακτώματα, επηρεάζονται περισσότερο από την θερμοκρασία, παρόλο που ειδικοί τύποι έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιήσουν αυτό το φαινόμενο (ISEE, 1998).

## 2.3 ΕΜΠΟΡΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ

Οι εκρηκτικές ύλες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την χρήση τους:

- 1) Στις εμπορικές εκρηκτικές ύλες (commercial type explosives), που χρησιμοποιούνται στην εξόρυξη των πετρωμάτων και
- 2) Στις στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες (military explosives), που χρησιμοποιούνται για πολεμικούς σκοπούς τόσο ως γομώσεις εκρηκτικών βλημάτων όσο και ως προωθητικά μέσα αυτών.

Στην αγορά διατίθενται με διάφορα εμπορικά ονόματα μία μεγάλη ποικιλία εκρηκτικών υλών. Παρακάτω, μετά από κατάλληλη κατάταξη σε κατηγορίες και τύπους των εκρηκτικών υλών, που διαθέτει η διεθνής αγορά, ακολουθεί περιγραφή των πλέον χαρακτηριστικών τύπων κάθε κατηγορίας. Στην περιγραφή αυτή ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην νεώτερη γενιά των εκρηκτικών υλών, που έχουν ως βάση το νιτρικό αμμώνιο, δηλ στο ANFO, τα slurries και τα γαλακτώματα (emulsions). Τέλος περιγράφεται σύντομα το Cardox, που αποτελεί ιδιόμορφο τύπο εκρηκτικής ύλης και μερικές άλλες εκρηκτικές ύλες, που χρησιμοποιούνται για ειδικούς σκοπούς.

### 2.3.1 Κατάταξη των εμπορικών εκρηκτικών υλών

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες κατατάξεις σε κατηγορίες και τύπους των εμπορικών εκρηκτικών υλών με κριτήρια ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά τους. Με τον τρόπο αυτό περιγράφονται καλύτερα και αποφεύγονται συγχύσεις μεταξύ της πληθώρας εκρηκτικών υλών, που διατίθενται στο εμπόριο.

Η προτεινόμενη κατωτέρω κατάταξη βασίζεται σε διαιρέσεις και υποδιαιρέσεις των εκρηκτικών υλών σε κατηγορίες και τύπους με διάφορα κριτήρια, όπως είναι ο τρόπος και η ταχύτητα αντίδρασής τους, ο τρόπος έναυσής τους και η κύρια εκρηκτική ουσία, που περιέχουν (Τσουτρέλης, 1997).

Με βάση τον τρόπο και την ταχύτητα αντίδρασης τους οι εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1. Στις βραδυδραστικές ή αλλιώς ωστικές εκρηκτικές ύλες (Low Explosives, LE). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι διάφοροι τύποι πυρίτιδων. Στις εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας αυτής η διέγερσή τους γίνεται με θερμότητα, η οποία προκαλεί την ανάφλεξή τους. Η χημική τους αντίδραση προχωρεί στην συνέχεια από μόριο σε μόριο καθώς με αγωγιμότητα επιτυγχάνεται αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι του σημείου ανάφλεξης. Η όλη αντίδραση λαμβάνει χώρα με υποηχητική ταχύτητα.
2. Στις διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες (High Explosives, HE), στις οποίες η διέγερσή τους προκαλείται με την διέλευση ενός κρουστικού κύματος και η όλη αντίδραση πραγματοποιείται με υπερηχητική ταχύτητα.

Οι διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες ανάλογα με τον τρόπο της έναυσης τους χωρίζονται περαιτέρω σε:

- 2.α. Εκείνες που εναύονται με φλόγα. Οι εκρηκτικές αυτές ύλες καλούνται πρωτογενείς εκρηκτικές ύλες (primary explosives). Τέτοιες είναι, π. χ. το αζίδιο του μολύβδου. Η χρήση των εκρηκτικών αυτών υλών περιορίζεται στην κατασκευή ορισμένων μέσων έναυσης.
- 2.β. Εκείνες που απαιτούν κρουστικό κύμα (ασθενές έως ισχυρό) για να εναυφθούν. Αυτές οι εκρηκτικές ύλες ονομάζονται δευτερογενείς (secondary explosives). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι δυναμίτιδες, το ANFO, τα slurries κλπ.

Περαιτέρω οι δευτερογενείς εκρηκτικές ύλες ανάλογα με την κύρια εκρηκτική ουσία (νιτρογλυκερίνη ή νιτρικό αμμώνιο) που περιέχουν, διακρίνονται σε δύο ομάδες:

2.β.1. Με βάση την νιτρογλυκερίνη (NG). Στην ομάδα αυτή ανήκουν οι επόμενοι τύποι εκρηκτικών υλών:

- Κοινή δυναμίτιδα (straight dynamite)
- Ζελατίνη (gelatin dynamite)
- Ζελατινοδυναμίτιδες (semi-gelatins)
- Αμμωνιοδυναμίτιδες (ammonia dynamites)

Οι εκρηκτικές ύλες της ομάδος αυτής φέρουν το συλλογικό όνομα δυναμίτιδες (dynamites).

2.β.2. Με βάση το νιτρικό αμμώνιο (AN): Στην ομάδα αυτή ανήκουν οι επόμενοι τύποι εκρηκτικών υλών:

- ANFO
- Slurries (ή Gels)
- Γαλακτώματα
- Βαρύ ANFO (Heavy ANFO)
- Αργιλούχο ANFO (Aluminized ANFO)

### 2.3.2 Βραδύκαυστες εκρηκτικές ύλες - Πυρίτιδες

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην κατηγορία αυτή ανήκει η μαύρη ή αλλιώς μελανή πυρίτιδα. Στο εμπόριο διατίθενται διάφοροι τύποι ανάλογα με την χημική σύστασή τους και τη μορφή (κοκκώδης ή σε φυσίγγια).

Η μαύρη πυρίτιδα (black powder) είναι η παλαιότερη γνωστή εκρηκτική ύλη. Σήμερα η μαύρη πυρίτιδα χρησιμοποιείται για την κατασκευή της θρυαλλίδας ασφαλείας, ενώ η χρήση της ως εκρηκτικής ύλης περιορίζεται κυρίως στις περιπτώσεις εξόρυξης μεγάλων όγκων πετρώματος για την παραγωγή διακοσμητικών λίθων.

Η μαύρη πυρίτιδα αποτελείται από κονιοποιημένο μίγμα νιτρικού καλίου (saltpeter) ή νατρίου σε αναλογία 62-75%, θείου 20-10% και ξυλάνθρακα 20-10%. Στον Πίνακα 2.6 δίνονται οι τυπικές συστάσεις δύο τύπων πυρίτιδας. Οι πυρίτιδες είναι οι περισσότερο βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες. Η ταχύτητα αντίδρασης (καύσης) τους εξαρτάται από την κοκκομετρική και την χημική τους σύσταση καθώς και τις συνθήκες περιορισμού. Σε συνθήκες περιορισμού εντός σωλήνα η λεπτότερη κοκκομετρία δίνει ταχύτητα καύσης 600-650 m/s και η χονδρότερη 180-200 m/s.

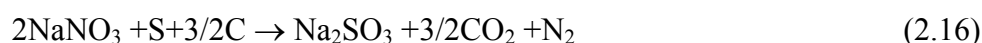
Πίνακας 2.6: Τυπικές συστάσεις μαύρης πυρίτιδας (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Συστατικά	Πυρίτιδα νιτρικού καλίου	Πυρίτιδα νιτρικού νατρίου
Νιτρικό κάλιο	74,0	-
Νιτρικό νάτριο	-	71,0
Ξυλάνθρακας	15,6	16,5
Θειάφι	10,4	12,5

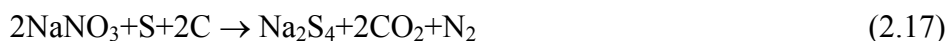
Η εξίσωση αντίδρασης της πυρίτιδας σε απλοποιημένη μορφή με στοιχειομετρική αναλογία οξυγόνου κατά τον Cook (1974) είναι:



και παράγει θερμότητα έκρηξης  $Q = 910 \text{ kcal/kg}$ , αριθμό μορίων αερίων  $n = 4,7 \text{ mole/kg}$  και προϊόντα κατά 50% περίπου στερεά με αποτέλεσμα να δίνει πολλούς καπνούς. Είναι επίσης δυνατόν να συμβούν και άλλες αντιδράσεις όπως οι επόμενες:



με  $Q \rightarrow 620 \text{ kcal/kg}$  και  $n = 6,9$



με  $Q \rightarrow 680 \text{ kcal/kg}$  και  $n = 8,9$



με  $Q \rightarrow 620 \text{ kcal/kg}$  και  $n = 12,6$

Στην πραγματικότητα η αντίδραση που συμβαίνει είναι κάποιος συνδυασμός των τεσσάρων αυτών αντιδράσεων.

Έχοντας υπόψη ότι, το γινόμενο  $n \cdot Q$  μπορεί να θεωρηθεί ότι παρέχει μια χονδρική εκτίμηση της ισχύος της εκρηκτικής αυτής ύλης, προκύπτει ότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται, όταν η αντίδραση λαμβάνει χώρα σε έλλειψη οξυγόνου, μεταξύ των ανωτέρω αντιδράσεων (2.16) και (2.17). Στις συνθήκες αυτές αποδίδει περίπου  $650 \text{ kcal/kg}$  ( $= 2720 \text{ kJ/kg}$ ), 270 λίτρα αερίων ανά  $\text{kg}$  και 0,6  $\text{kg}$  στερεά προϊόντα ανά  $\text{kg}$  πυρίτιδας.

Μεγαλύτερη αναλογία θείου καθιστά την πυρίτιδα πιο εύφλεκτη και λιγότερο υγροσκοπική. Αύξηση της αναλογίας της σε νιτρικό κάλιο προκαλεί τελειότερη καύση με παράλληλη αύξηση της ισχύος της. Ολική αντικατάσταση του νιτρικού καλίου με νιτρικό νάτριο δίνει πυρίτιδες χαμηλότερου κόστους αλλά περισσότερο

υγροσκοπικές. Ο βαθμός ενανθράκωσης του ξυλάνθρακα και το είδος του ξύλου από το οποίο προέρχεται επηρεάζει την αντίδραση (Τσουτρέλης, 1997)

Η πυρίτιδα είναι εξαιρετικά ευαίσθητη ως προς την έναυσή της με φλόγα. Δοκιμές θερμικής διέγερσής της έδειξαν ότι απαιτούνται 5 sec σε θερμοκρασία 427° C για την έναυσή της και 0,5 sec στους 510° C, ενώ δοκιμές έκρηξης της με διάφορα μέσα απέβησαν μέχρι σήμερα άκαρπες. Μέτρηση, εξ άλλου, του ωφέλιμου έργου της πυρίτιδας με την συσκευή Trauzl δίνει 10% εκείνου του TNT, ενώ με την μέθοδο του βαλλιστικού εκκρεμούς δίνει τιμές για πυρίτιδες νιτρικού καλίου 42,5% εκείνων του TNT και 45% για πυρίτιδες νιτρικού νατρίου.

Η χαμηλή σχετικά πίεση έκρηξής της σε συνδυασμό με την βραδεία της αντίδραση καθιστούν την πυρίτιδα ιδανική εκρηκτική ύλη για την εξόρυξη μεγάλων όγκων πετρώματος, γιατί ενεργεί αποκλειστικά ως ωστική δύναμη (Τσουτρέλης, 1997).

Στο εμπόριο η πυρίτιδα διατίθεται σε δύο τύπους, που περιγράφονται στην συνέχεια:

### 2.3.2.1 Κοκκώδης πυρίτιδα

Παρασκευάζεται με κοκκοποίηση και στίλβωση του κονιοποιούμενου μίγματος με προσθήκη ποσότητας γραφίτη στην επιφάνεια των κόκκων για την αποφυγή συσσωματώσεώς τους με την πάροδο του χρόνου. Με το τέλος της κατεργασίας αυτής το προϊόν υφίσταται κοκκομετρική κατάταξη και διαχωρισμό σε διάφορα μεγέθη. Όσο μικρότεροι και περισσότερο λείοι είναι οι κόκκοι τόσο η ταχύτητα έκρηξης είναι μεγαλύτερη.

Η κοκκώδης πυρίτιδα συσκευάζεται σε κατάλληλα αεροστεγή δοχεία ή σάκους, της οποίας η εικόνα δίνεται στο Σχ. 2.16 , ώστε να προφυλάσσεται από την υγρασία. Η πυκνότητα της πυρίτιδας αυτής κυμαίνεται από 1,10 έως 1,20 g/cm<sup>3</sup>.

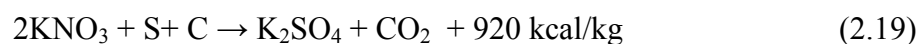
Οι συνήθεις αναλογίες της πυρίτιδας είναι:

KNO <sub>3</sub>	62-75 %
C	15-20 %
S	10-18 %



Σχ. 2.16: Κοκκώδης πυρίτιδα (Πηγή: Dynonobel, 2003)

Η χημική αντίδραση είναι της μορφής:



Η μαύρη πυρίτιδα αναφλέγεται στους 300 °C και ο ρυθμός καύσης εξαρτάται από τον βαθμό περιορισμού και τον βαθμό συμπίεσης του υλικού. Σε μη περιορισμένη κατάσταση ο ρυθμός καύσης της πυρίτιδας είναι της τάξης των δευτερολέπτων ανά μέτρο ενώ σε περιπτώσεις αυξημένου περιορισμού ο ρυθμός καύσης κυμαίνεται από 180-600 m/s. Η χρήση των πυρίτιδων στην σύγχρονη μεταλλευτική βιομηχανία είναι πολύ περιορισμένη και αναφέρεται μόνο σε εφαρμογές που απαιτείται εξόρυξη μεγάλων όγκων αδιατάρακτων πετρωμάτων, πχ. όγκων μαρμάρων σε λατομεία. Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται εκμετάλλευση της ωστικής ενέργειας των αερίων που παράγονται από την ανάφλεξη (Dynonobel, 2003)

### 2.3.2.2 Πεπιεσμένη πυρίτιδα σε φυσίγγια.

Τα φυσίγγια της πεπιεσμένης πυρίτιδας έχουν σχήμα κυλινδρικό και φέρουν αξονικά κεντρική οπή από την οποία διέρχεται η θρυαλλίδα ασφαλείας για την εξασφάλιση καλύτερης επαφής της φλόγας κατά την έναυσή της. Τα φυσίγγια, που είναι συνήθως μήκους 5 cm, περιτυλίσσονται ανά τέσσερα σε χαρτί εμποτισμένο με παραφίνη και σχηματίζουν κύλινδρο μήκους 20 cm. Η διάμετρος του κυλίνδρου



εξαρτάται από εκείνη των φυσιγγίων και κυμαίνεται από 29 mm έως 50 mm.

Η πεπιεσμένη πυρίτιδα έχει πυκνότητα 1,65-1,75 g/cm<sup>3</sup> και πλεονεκτεί ως προς την κοκκώδη, διότι είναι ισχυρότερη και η χρήση της ευκολότερη και ασφαλέστερη (Τσουτρέλης, 1997)

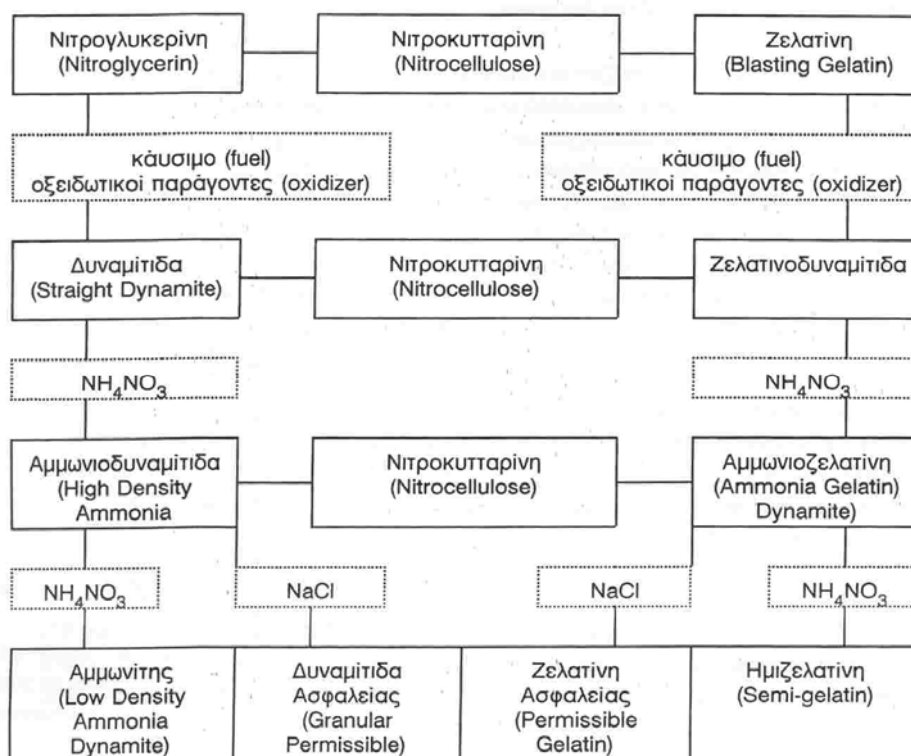
### 2.3.3 Διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες της οικογένειας των δυναμίτιδων

Στην οικογένεια των δυναμίτιδων ανήκει ένα ευρύτατο φάσμα εκρηκτικών υλών, που όλες έχουν ως χαρακτηριστικό ότι περιέχουν μικρή έως μεγάλη ποσότητα νιτρογλυκερίνης (NG). Η νιτρογλυκερίνη είναι ένα ελαιώδες υγρό πυκνότητας 1,6 g/cm<sup>3</sup> κιτρινίζοντας χρώματος με γλυκίζουσα γεύση. Το σημείο στερεοποίησης της είναι 13,2°C και βρασμού 145°C. Η διαλυτότητά της στο νερό σε θερμοκρασία 15° C είναι 1,6 g/lit και η υγροσκοπικότητά της μόλις 0,06 % στους 30° C σε σχετική υγρασία 90% (Τσουτρέλης, 1997).

Η χρήση της NG σε φυσική κατάσταση, λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της σε κρούση (0,02 N.m) και σε τριβή, είναι απαγορευτική. Η στερεή NG έχει μικρότερη ευαισθησία σε κρούση από ότι η υγρή. Εγκλωβισμένες στην μάζα της NG φυσαλίδες αέρα ή αερίων αυξάνουν την ευαισθησία της σε κρούση. Όταν έλθει σε επαφή με φλόγα η NG καίγεται ομαλά χωρίς να εκραγεί υπό την προϋπόθεση ότι είναι σε μικρές ποσότητες και χωρίς περιορισμό. Αλλιώς παρατηρείται μετάπτωση της ανάφλεξής σε έκρηξη (Βλ παραγρ 1.2.6).

Ανάλογα με την φύση των προσμίξεων, που συνίστανται κυρίως από νιτροκυτταρίνες διαφόρων περιεκτικοτήτων σε άζωτο (11%-13,4%) και νιτρικό αμμώνιο, παρασκευάζονται διάφοροι τύποι δυναμίτιδων με ποικίλες ιδιότητες, οι κυριώτεροι από τους οποίους δίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 2.17 και περιγράφονται στην συνέχεια.

Οι διαστάσεις των φυσιγγίων αρχίζουν συνήθως από διάμετρο 26 mm και φθάνουν μέχρι 100 mm ή περισσότερο και από μήκος 20 cm έως 50 cm. Στις αγγλοσαξονικές χώρες το φυσίγγιο της δυναμίτιδας αναφοράς είναι διαμέτρου 1 ¼ in και μήκους 8 in (20,3 cm). Ένα τέτοιο φυσίγγιο περιέχει 170-230 g εκρηκτικής ύλης ανάλογα με το είδος της δυναμίτιδας. Τα φυσίγγια της δυναμίτιδας τοποθετούνται σε χαρτονένια κουτιά και αυτά με την σειρά τους σε ξύλινα κιβώτια μέχρι βάρους 25 kg (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 2.17: Σχηματική παράσταση των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών εκρηκτικών με βάση την νιτρογλυκερίνη (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

### 2.3.3.1 Κοινή δυναμίτιδα

Μοιάζει πολύ με την αρχική δυναμίτιδα, που ανακάλυψε ο Alfred Nobel με μόνη την διαφορά ότι η NG έχει απορροφηθεί από κυτταρινούχες ουσίες, όπως είναι το ροκανίδι και άλλες ουσίες αντί της αδρανούς πυριτικής ουσίας "γη των διατομών", που είχε χρησιμοποιήσει ο Nobel (δυναμίτιδες Guhr). Η κοινή δυναμίτιδα έχει κοκκώδη υφή και παρασκευάζεται με ισχύ από 15% μέχρι 60% κατά βάρος, που αντιστοιχεί στην μέγιστη απορροφητικότητα της NG στο ροκανίδι (60/40). Μια τυπική σύνθεση κοινής δυναμίτιδας 40% είναι:

Νιτρογλυκερίνη	40 %
Νιτρικό νάτριο	44%
Αντιόξινες ουσίες	2 %
Ανθρακούχες ουσίες	14 %

### 2.3.3.2 Ζελατίνες

Στις ζελατίνες αντί να γίνεται απορρόφηση της νιτρογλυκερίνης σε αδρανή ουσία γίνεται ζελατινοποίησή της με προσθήκη μικρών ποσοτήτων ειδικής ποιότητας νιτροκυτταρίνης. Οι ζελατίνες έχουν πολύ μικρότερη ευαισθησία από εκείνη των δυναμίτιδων και παράλληλα παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στο νερό.

Η νιτροκυτταρίνη (NC), που χρησιμοποιείται για την ζελατινοποίηση της NG, είναι ειδικής ποιότητας που διατίθεται στο εμπόριο με το όνομα "νιτροκυτταρίνη δυναμίτιδας". Έχει περιεκτικότητα σε άζωτο 12,2% περίπου και είναι ευδιάλυτη στην νιτρογλυκερίνη δίνοντας σε μικρές αναλογίες σταθερά διαλύματα μεγάλου ιξώδους (πηκτές).

Ανάλογα με τις περιεκτικότητες των δύο συστατικών τους οι ζελατίνες έχουν ισχύ κατά βάρος από 20 μέχρι 92% (βλ παραγρ. 2.2.2). Ο τύπος με ποσότητες 8% νιτροκυτταρίνης και 92% NG αποτελεί την γομμοδυναμίτιδα (blasting gelatin ή Gomme A), που είναι η ισχυρότερη εμπορική εκρηκτική ύλη και ιδιαίτερα κατάλληλη για υποβρύχιες ανατινάξεις. Χρησιμοποιείται επίσης ως εκρηκτική ύλη αναφοράς, λόγω της σταθερότητας της σύνθεσής της (Τσουτρέλης, 1997).

### 2.3.3.3 Ζελατινοδυναμίτιδες

Οι εκρηκτικές αυτές ύλες συνδυάζουν ικανοποιητική αντοχή στο νερό, την πλαστική υφή των ζελατινών και χαμηλότερη από εκείνες τιμή, διότι εκτός της NG περιέχουν και άλλες εκρηκτικές ουσίες όπως νιτρικό αμμώνιο, νιτρικό κάλιο, δινιτροτολουόλη και πολύ μικρές ποσότητες νιτροκυτταρίνης. Παρασκευάζονται με ισχύ κατά βάρος, που ποικίλει από 20% μέχρι 60%.

Σε σύγκριση με την κοινή δυναμίτιδα αντιστοίχου ισχύος οι ζελατινοδυναμίτιδες έχουν μικρότερη ταχύτητα έκρηξης (από 2100-6000 m/s) και αντοχή στο νερό. Υπερτερούν όμως της κοινής δυναμίτιδας ως προς την καλύτερη ποιότητα καπνών, την χαμηλότερη ευαισθησία τους σε κρούση και σε τριβή και ως προς την τιμή. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι ζελατινοδυναμίτιδα με 30% περιεκτικότητα σε NG έχει τα εξής χαρακτηριστικά: πυκνότητα  $\rho = 1,38 \text{ g/cm}^3$ , εκλύομενη θερμότητα  $Q = 1180 \text{ kcal/kg}$  ( $= 4939 \text{ kJ/kg}$ ), θερμοκρασία έκρηξης  $T = 3200^\circ \text{ C}$ , ταχύτητα έκρηξης,  $D = 4000 \text{ m/s}$  και παράγει 870 lt αερίων/kg.

Μια τυπική σύσταση ζελατοδυναμίτιδας ισχύος 40% έχει ως εξής:

Νιτρογλυκερίνη	26,2 %
Νιτροκυτταρίνη	0,4 %
Νιτρικό αμμώνιο	8,5 %
Νιτρικό νάτριο	49,6 %
Θειάφι	5,6 %
Αντιόξινες ουσίες	0,8 %
Ανθρακούχες ουσίες	8,9 %

#### 2.3.3.4 Αμμωνιοδυναμίτιδες

Οι αμμωνιοδυναμίτιδες έχουν ως βασικό εκρηκτικό συστατικό το νιτρικό αμμώνιο και το νιτρικό νάτριο. Περιέχουν επίσης μικρή ποσότητα NG καθώς και προσμίξεις δευτερεύουσων εκρηκτικών ουσιών όπως δινιτροτολουόλη και τροτύλη σε χαμηλές περιεκτικότητες.

Μια τυπική σύνθεση αμμωνιοδυναμίτιδας ισχύος 40% κατά βάρος έχει την ακόλουθη σύσταση:

Νιτρογλυκερίνη	14 %
Νιτρικό αμμώνιο	36 %
Νιτρικό νάτριο	33 %
Ανθρακούχες ουσίες	1 %
Αντιόξινες ουσίες	1 %
Διάφορες ουσίες	6%

Οι αμμωνιοδυναμίτιδες, που είναι πάντοτε κοκκώδους υφής, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε νιτρικό αμμώνιο, έχουν μικρή ευφλεκτικότητα, χαμηλή ευαισθησία σε κρούση, καλή ποιότητα καπνών και μικρό σχετικά κόστος. Είναι επίσης ευαίσθητες στην υγρασία και για τον λόγο αυτό δεν πρέπει να σχίζεται το χάρτινο περίβλημα των φυσιγγίων κατά την διαδικασία της γόμωσης. Η ισχύς των αμμωνιοδυναμίτιδων φθάνει μέχρι 65% κατά βάρος ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε εκρηκτικές ουσίες, η δε ταχύτητα έκρηξής τους κυμαίνεται από 1500 έως 5100 m/s (Τσουτρέλης, 1997).

### 2.3.3.5 Εκρηκτικές ύλες ασφαλείας

Πρόκειται για εκρηκτικές ύλες κοκκώδους ή ζελατινώδους υφής, που χρησιμοποιούνται, όταν υπάρχει εκρηκτικό αέριο στην ατμόσφαιρα του μεταλλείου. Το αέριο αυτό, που είναι μίγμα μεθανίου  $\text{CH}_4$  6-16% με ατμοσφαιρικό αέρα, εκρήγνυται όταν θερμανθεί για διάστημα 10 sec στους  $650^\circ\text{C}$  και για διάστημα 1 sec στους  $1000^\circ\text{C}$ . Οι εκρηκτικές αυτές ύλες περιέχουν κοινό αλάτι ( $\text{NaCl}$ ) στην συνήθη σύνθεσή τους προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της θερμοκρασίας έκρηξης και βράχυνση της αντίδρασης. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται ο προηγούμενος κίνδυνος. Ο ίδιος κίνδυνος δημιουργείται στα ανθρακωρυχεία παρουσία μιγμάτων κόνεως άνθρακα και αέρα με περιεκτικότητα σε άνθρακα  $100\text{-}200\text{ g/cm}^3$ , που συμπεριφέρονται επίσης ως πρωτογενείς αέριες εκρηκτικές ύλες.

### 2.3.4 Διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες με βάση το νιτρικό αμμώνιο

#### 2.3.4.1 ANFO

Τα πλεονεκτήματα της εκρηκτικής αυτής ύλης, που αποτελείται από δύο μη εκρηκτικές ουσίες χαμηλού κόστους και προσφέρει πολύ μεγάλη ασφάλεια στην χρήση της, επανήλθαν στο προσκήνιο το 1955 με τις δοκιμές των Lee και Akre και του Le Clair το 1956, που απέδειξαν την αποτελεσματικότητα της σε διάφορες συνθήκες υπαιθρίων ανατινάξεων. Ακολούθησε έκτοτε ταχεία διάδοση με αποτέλεσμα πέντε χρόνια αργότερα να καταλάβει στις Η.Π.Α. η εκρηκτική αυτή ύλη το 50% της αγοράς εκρηκτικών υλών και το 1994 να υπερβεί το 78%.

Η χρήση πετρελαίου ντίζελ εσωτερικής καύσης για την παρασκευή του ANFO, έχει επικρατήσει διεθνώς, λόγω κυρίως της καλύτερης ανάμιξης και ευκολίας εύρεσης πετρελαίου ντίζελ.

Διευκρινίζεται ότι το νιτρικό αμμώνιο σε ορισμένες συνθήκες (μεγάλη διάμετρος και κατάλληλη κοκκομετρία) μπορεί να εκραγεί μόνο του σύμφωνα με την εξίσωση (1.2) παρέχοντας  $980\text{ lt/kg}$  αέριων προϊόντων.

Είναι προφανές ότι, η καλή ανάμιξη του νιτρικού αμμωνίου με το πετρέλαιο, είναι θέμα πρωταρχικής σημασίας για την καλύτερη απόδοση του ANFO. Για τον λόγο αυτό το νιτρικό αμμώνιο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του ANFO

σήμερα έχει συγκεκριμένες προδιαγραφές με υψηλό πορώδες, ώστε να συγκρατεί το πετρέλαιο στους πόρους του.



Σχ. 2.18: Έτοιμο ANFO σε σάκους των 25 kg του οίκου Dynonobel (Πηγή: Dynonobel, 2003)

Στο εμπόριο κυκλοφορεί και έτοιμο ANFO από διάφορους οίκους σε σάκους των 25 η 30 kg, των οποίων η εικόνα δίνεται στο Σχ. 2.18.

Το ANFO έχει τρία μεγάλα πλεονεκτήματα στα οποία οφείλει την διάδοσή του: Είναι χαμηλού κόστους εκρηκτική ύλη, παρέχει μεγάλη ασφάλεια κατά την χρήση του και έχει ικανοποιητική ισχύ, όταν χρησιμοποιηθεί ορθά. Αντίθετα σημειώνεται ότι δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί σε υγρό περιβάλλον, διότι είναι έντονα υγροσκοπικό. Ακόμη η έναυσή του είναι δυσχερής και απαιτείται μεγάλη σχετικά διάμετρος διατρήματος για να αποδώσει την μέγιστη ισχύ του. Επίσης είναι διαβρωτικό, διότι σε υγρό περιβάλλον δρα ως ασθενές οξύ κατά την εξίσωση:



και είναι δυνατό να προσβάλει το μεταλλικό περίβλημα του μέσου έναυσης.

Η απόδοση του ANFO, όπως αυτή προσδιορίζεται από την εκλυόμενη ενέργεια κατά την έκρηξη, την ταχύτητα και την πίεση έκρηξής του καθώς και την ευαισθησία του ως προς την έναυση, επηρεάζεται:

- α. Από τα φυσικά χαρακτηριστικά του νιτρικού αμμωνίου, την περιεκτικότητα του σε πετρέλαιο καθώς και από την υγρασία του.
- β. Τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιείται η έκρηξη

Η επίδραση των ανωτέρω παραγόντων στην απόδοση του ANFO εξετάζεται στην συνέχεια.

#### α. Ποιότητα νιτρικού αμμωνίου

Το συνηθισμένο νιτρικό αμμώνιο ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), που χρησιμοποιείται ως λίπασμα (Fertilizer Grade Ammonium Nitrate-FGAN), λόγω της χαμηλής απορροφητικότητας του, δεν είναι κατάλληλο για χρήση για παρασκευή του ANFO, επειδή δεν συγκρατεί ικανοποιητικά στην επιφάνεια των κόκκων του το πετρέλαιο. Για την παραγωγή του ANFO ενδείκνυται η χρήση ειδικού τύπου νιτρικού αμμωνίου με πορώδη υφή, υψηλής απορροφητικότητας, ώστε να συγκρατεί το πετρέλαιο στην επιφάνεια κάθε κόκκου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ομοιογενές μίγμα και συνθήκες έκρηξης, που πλησιάζουν τις ιδανικές. Η ποιότητα αυτή συνιστά το λεγόμενο **σφαιρόμορφο πορώδες νιτρικό αμμώνιο** (porous prilled ammonium nitrate ή αλλιώς blasting grade prill), του οποίου η παρασκευή γίνεται με ειδική διαδικασία (Τσουτρέλης, 1997).

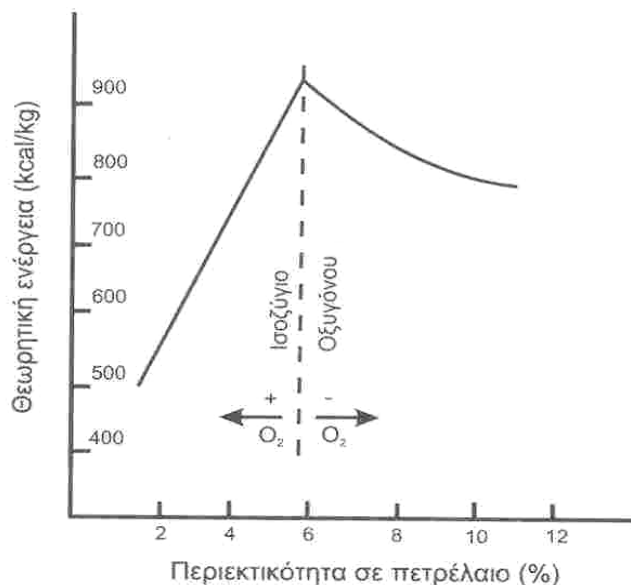
Συγκεκριμένα το νιτρικό οξύ εξουδετερώνεται με αμμωνία και το παραγόμενο προϊόν συμπυκνώνεται. Το προϊόν της συμπύκνωσης το οποίο έχει πολύ υψηλή περιεκτικότητα νιτρικού αμμωνίου ψεκάζεται από την κορυφή υψηλού πύργου σε αντιστροφή με ρεύμα αέρα για τον σχηματισμό πορώδους νιτρικού αμμωνίου.

Το προϊόν στην συνέχεια ξηραίνεται και ψύχεται προς απόκτηση ικανοποιητικής αντοχής. Τέλος, επικαλύπτεται σε αναλογία 0,5-1% με λεπτομερές αδρανές υλικό για να αποφευχθεί η συσσωμάτωση του και να εξασφαλισθεί έτσι ικανοποιητική ροή. Το τελικό προϊόν, ανάλογα με την κοκκομετρική του σύνθεση, που κυμαίνεται από 8 (2,38 mm) έως το πολύ 30 (0,595 mm) mesh (US-Sieve Series), έχει πυκνότητα εντός των φυσιγγίων ή στο διάτρημα, εάν γομωθεί χύμα, μεταξύ 0,75-0,85 g/cm<sup>3</sup> (Τσουτρέλης, 1997).

Οι προδιαγραφές για χρήση του ως εκρηκτικής ουσίας απαιτούν ελάχιστη καθαρότητα 99%, μέγιστη υγρασία 0,3%, θειικά υπολογιζόμενα ως  $\text{H}_2\text{SO}_4$  κάτω του 0,05% και χλωρίοντα, που δεν υπερβαίνουν το 0,05%. (Τσουτρέλης, 1997)

#### β. Περιεκτικότητα σε πετρέλαιο

Το Σχ 2.19 παρουσιάζει την μεταβολή της θεωρητικά εκλυόμενης ενέργειας για διάφορες συνθέσεις μιγμάτων ANFO για πυκνότητα γόμωσης  $\rho=0,80 \text{ g/cm}^3$ . Θεωρητικά η μέγιστη ενέργεια εκλύεται όταν υπάρχει μηδενικό ισοζύγιο οξυγόνου που αντιστοιχεί σε ποσοστιαία αναλογία AN:94.5% και FO:5.5%.



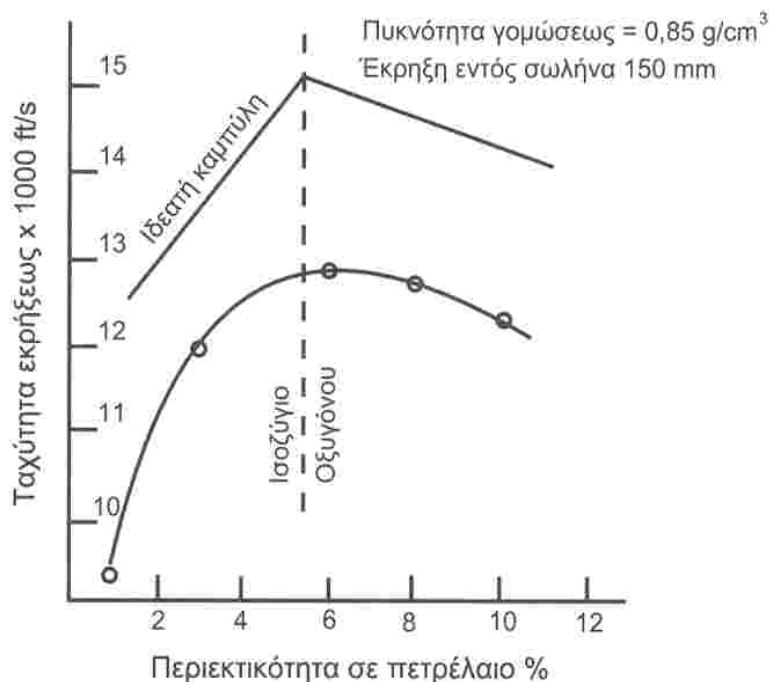
Σχ. 2.19: Θεωρητικά αποδιδόμενη ενέργεια κατά την αντίδραση του νιτρικού αμμωνίου σε διάφορες περιεκτικότητες πετρελαίου (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Από το ίδιο σχήμα προκύπτει ότι επειδή ο ρυθμός ελάττωσης της ενέργειας είναι μεγαλύτερος στα μίγματα με αρνητικό ισοζύγιο οξυγόνου, είναι προτιμότερο από πρακτική άποψη, κατά την προετοιμασία του εκρηκτικού μίγματος να προστίθεται περισσότερο παρά λιγότερο καύσιμο. Η εμφάνιση, κατά την έκρηξη καπνών χρώματος πορτοκαλί ή κίτρινου οφείλεται συνήθως σε ελλειμματική περιεκτικότητα του μίγματος σε πετρέλαιο. Μπορεί όμως να οφείλεται και σε ατελή έκρηξη, λόγω απορρόφησης νερού από το ANFO.

Στο Σχ. 2.20 δίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε πετρέλαιο επί της ιδανικής ταχύτητας έκρηξής του και εκείνης, που σημειώνεται στην πράξη.

Στο Σχ. 2.21 δίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε πετρέλαιο ως προς την ευαισθησία έναυσής του, που εκφράζεται με τον αριθμό των απαιτούμενων καψυλλίων No 6 για επιτυχή έναυση. Όπως προκύπτει από τη σχήμα αυτό η μέγιστη ευαισθησία σημειώνεται σε περιεκτικότητα 2%, παραμένει σταθερή μεταξύ 4-6% και στην συνέχεια ελαττώνεται γρήγορα.





Σχ. 2.20: Επίδραση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο του ANFO επί της ιδανικής και πραγματικής ταχύτητας έκρηξής του (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)



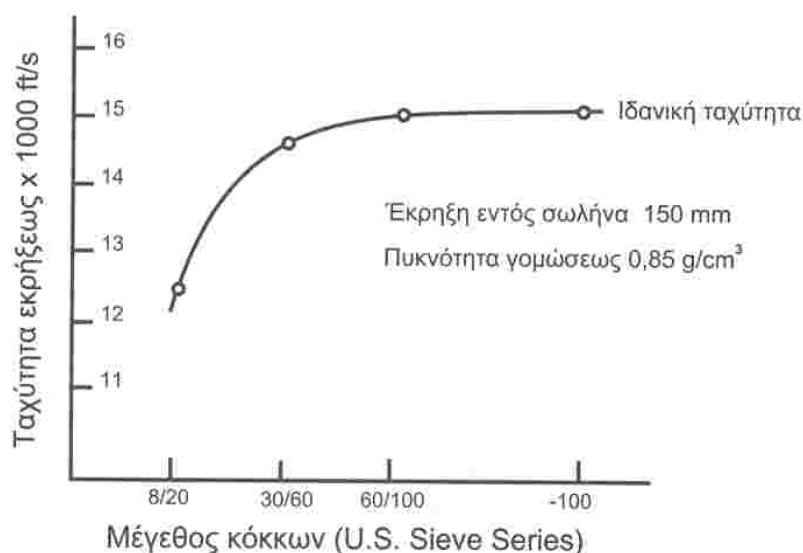
Σχ. 2.21: Επίδραση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο του ANFO στην ευαισθησία έναυσής του (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Επειδή το νιτρικό αμμώνιο τείνει γενικά να αποβάλλει το πετρέλαιο, επιβάλλεται ο χρόνος μεταξύ της ανάμιξης και της χρήσης να είναι όσο το δυνατόν συντομότερος. Παρατεταμένη αποθήκευση του ANFO δεν ενδείκνυται, διότι το πετρέλαιο εξατμίζεται ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Για τον λόγο αυτό συνιστάται

πάντοτε η χρήση σφαιρόμορφου πορώδους νιτρικού αμμωνίου για την παρασκευή του ANFO, ώστε το πετρέλαιο να απορροφάται και να συγκρατείται καλύτερα στους κόκκους του (Τσουτρέλης, 1997)

#### γ. Κοκκομετρική σύνθεση του Νιτρικού αμμωνίου

Στο Σχ. 2.22 δίνεται η σχέση μεταξύ της κοκκομετρίας του νιτρικού αμμωνίου και της ταχύτητας έκρηξης του ANFO. Όπως δείχνει το σχήμα αυτό η μείωση του μεγέθους των κόκκων αυξάνει την ταχύτητα έκρηξης (αυξάνεται ο ρυθμός με τον οποίον αντιδρά η μάζα της εκρηκτικής ύλης) μέχρι να φθάσει στην ιδανική της τιμή για τις συνθήκες έκρηξης, που αναφέρονται στο σχήμα αυτό. Από θεωρητικής πλευράς η εξήγηση δίνεται από την **θεωρία καύσης του κόκκου** (βλ. παράγρ. 1.2.4)



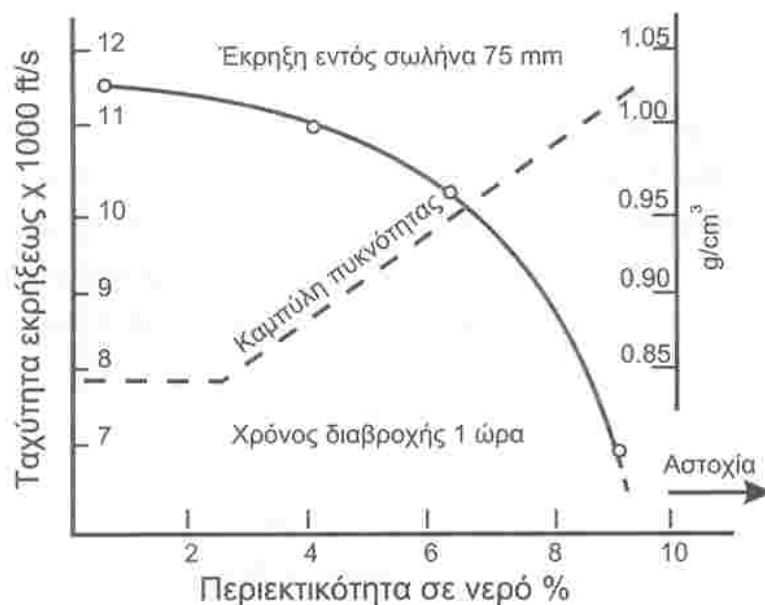
Σχ. 2.22: Επίδραση της κοκκομετρίας του νιτρικού αμμωνίου σε συνάρτηση της ταχύτητας έκρηξής του (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997).

Το σφαιρόμορφο πορώδες νιτρικό αμμώνιο του εμπορίου έχει συνήθως μέγεθος κόκκων μεταξύ -8 +20 mesh. Για να παραχθεί λεπτόκοκκο προϊόν για βελτίωση της ταχύτητας έκρηξης απαιτείται λειοτρίβηση. Όμως αυτή η διαδικασία δίνει γωνιώδη και ακανόνιστου σχήματος τεμάχια. Η μείωση του μεγέθους με τον τρόπο αυτό προκαλεί πολλές φορές αντίθετα αποτελέσματα των επιθυμητών, διότι η πυκνότητα γόμωσης ελαττώνεται με αποτέλεσμα ANFO κοκκομετρίας -100 mesh, το οποίο παρασκευάστηκε με τον παραπάνω τρόπο, να έχει για χύμα γόμωση πυκνότητα γόμωσης μόλις 0,60 g/cm<sup>3</sup> έναντι 0,85 g/cm<sup>3</sup> του -8+20 mesh (Τσουτρέλης, 1997)

#### δ. Περιεκτικότητα σε νερό

Το νιτρικό αμμώνιο αντιδρά με το νερό κατά την εξίσωση (2.20) σχηματίζοντας αραιό νιτρικό οξύ. Η διαλυτότητα του νιτρικού αμμωνίου στο νερό είναι μεγάλη και το κορεσμένο διάλυμα περιέχει περίπου 65%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  με πυκνότητα  $1,31 \text{ g/cm}^3$ . Το νιτρικό αμμώνιο είναι επίσης έντονα υγροσκοπικό. Όταν χύμα νιτρικό αμμώνιο εκτεθεί σε ατμοσφαιρικές συνθήκες με σχετική υγρασία 60% διαλύεται και συσσωματώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η ευαισθησία του ως προς την έναυση.

Στο Σχ. 2.23 δίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε νερό στην ταχύτητα έκρηξής του. Όπως δείχνει το σχήμα αυτό περιεκτικότητα νερού μέχρι 4% ασκεί μικρή επίδραση στην ταχύτητα έκρηξης, ενώ σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες η ταχύτητα μειώνεται έντονα και πέραν του 9% περίπου το ANFO δεν εκρήγνυται.



Σχ. 2.23: Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό του ANFO στην ταχύτητα έκρηξής του (Clark et al, 1962) (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Η αδυναμία αυτή έναυσης του ANFO οφείλεται στην ανάλωση μέρους της θερμότητας της αντίδρασης για την θέρμανση του νερού μέχρι την θερμοκρασία της έκρηξης και στην συνέχεια εξάτμισή του, που έχει ως αποτέλεσμα η διατιθέμενη υπόλοιπη ποσότητα θερμότητας από την αντίδραση να μην επαρκεί για την αυτοδιάδοση της έκρηξης (Clark, 1987).

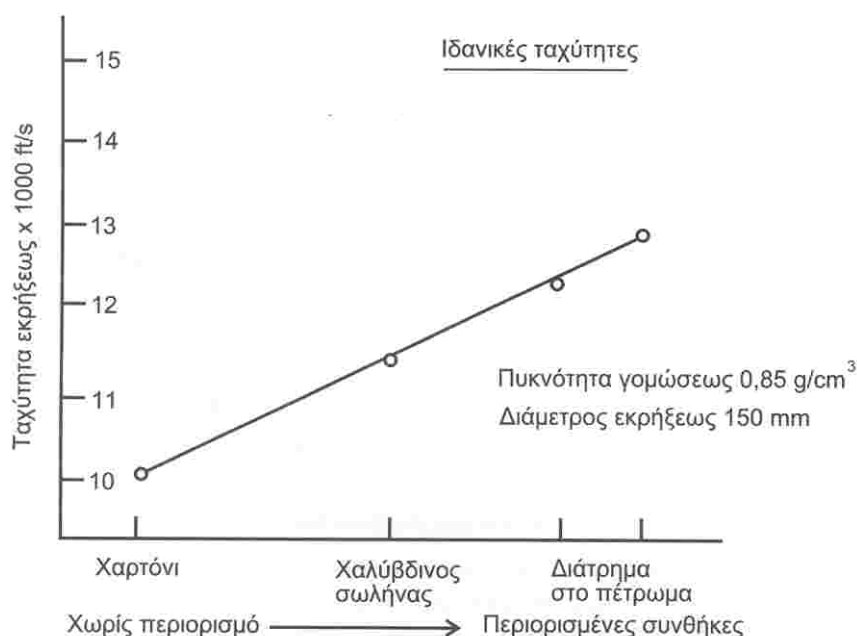
Είναι σαφές από το σχήμα αυτό ότι η ευαισθησία έναυσης του ANFO μειώνεται

με την αύξηση της περιεκτικότητάς του σε νερό. Εάν για κανονική υγρασία 0,3% απαιτούνται 4 καψύλλια Νο 6 για την έναυσή του, ο αριθμός τους αυξάνεται σε 6 για περιεκτικότητα μεταξύ 4% και 8%, ενώ με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό το ANFO δεν εναύεται ανεξάρτητα από τον αριθμό των καψυλλίων.

#### ε. Βαθμός περιορισμού της γόμωσης

Στο Σχ. 2.24 δίνεται η σχέση μεταξύ του βαθμού περιορισμού του ANFO και της ταχύτητας έκρηξής του για πυκνότητα γόμωσης  $0,85 \text{ g/cm}^3$ . Όπως δείχνει το σχήμα αυτό η ταχύτητα έκρηξης αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με την έκρηξη του ANFO μέσα σε χάρτινο κυλινδρικό περίβλημα, σε μεταλλικό σωλήνα και σε διάτρημα στο πέτρωμα.

Η τελευταία περίπτωση παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον, διότι σε ανατινάξεις με επιβράδυνση είναι δυνατόν από κακή επιλογή των χρόνων επιβράδυνσης να μειωθεί νωρίς ο βαθμός περιορισμού της εκρηκτικής ύλης μέσα στο διάτρημα και κατά συνέπεια η απόδοσή της, λόγω προηγούμενων εκρήξεων γειτονικών υπονόμων, που προκαλούν χαλάρωση στο γύρω πέτρωμα (Τσουτρέλης, 1997).



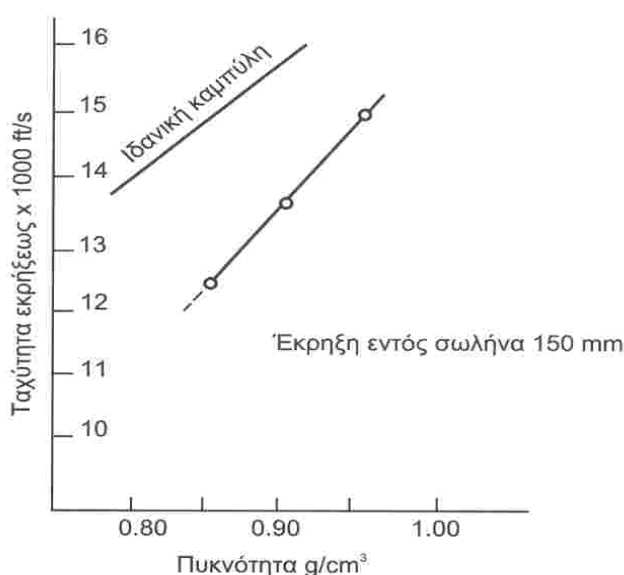
Σχ. 2.24: Μεταβολή της ταχύτητας έκρηξής του ANFO σε συνάρτηση με τον βαθμό περιορισμού της γόμωσης (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Ο βαθμός περιορισμού επιδρά επίσης και στην ευαισθησία έναυσης του ANFO. Η μεγαλύτερη ευαισθησία εμφανίζεται, όταν η έκρηξη πραγματοποιηθεί μέσα σε διάτρημα και η μικρότερη μέσα σε χάρτινο περίβλημα (Τσουτρέλης, 1997).

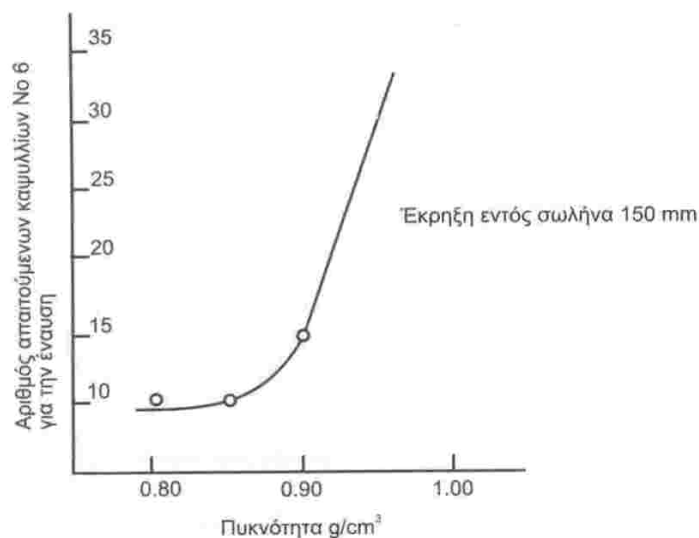
#### στ. Πυκνότητα γόμωσης

Το ANFO, ανάλογα με την κοκκομετρία του και τον τρόπο γόμωσής του, δίνει πυκνότητες γόμωσης σε υπαίθρια διατρήματα για χύμα γόμωση μεταξύ 0,75-0,85 g/cm<sup>3</sup>, έναντι 1,65 g/cm<sup>3</sup> της κρυσταλλικής πυκνότητας του νιτρικού αμμωνίου. Οι χαμηλές αυτές πυκνότητες οφείλονται στην παρουσία σημαντικού ποσοστού κενών μεταξύ των κόκκων του σφαιρόμορφου πορώδους νιτρικού αμμωνίου, που είναι αρκετά ομοιόμορφο σε μέγεθος και σχήμα (Τσουτρέλης, 1997).

Όπως δείχνει το Σχ. 2.25, η σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης και ταχύτητας έκρηξης είναι γραμμική τόσο στην περίπτωση ιδανικής έκρηξης όσο και στην πράξη με βάση πειραματικά δεδομένα. Συνεπώς αύξηση της πυκνότητας του ANFO, που μπορεί να πραγματοποιηθεί με τεχνητή συμπίεση (με την βοήθεια πνευματικού γομωτήρα) ή με μεταβολή του μεγέθους των κόκκων, θραύοντας ένα μέρος αυτών και αναμιγνύοντάς τους με ολόκληρους κόκκους. Όταν συμπιεστεί καλά ένα τέτοιο μίγμα με αναλογία 50/50 μπορεί να φθάσει σε πυκνότητα μέχρι 1,05 g/cm<sup>3</sup>.



Σχ. 2.25: Σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης του ANFO και ταχύτητας έκρηξής του (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)



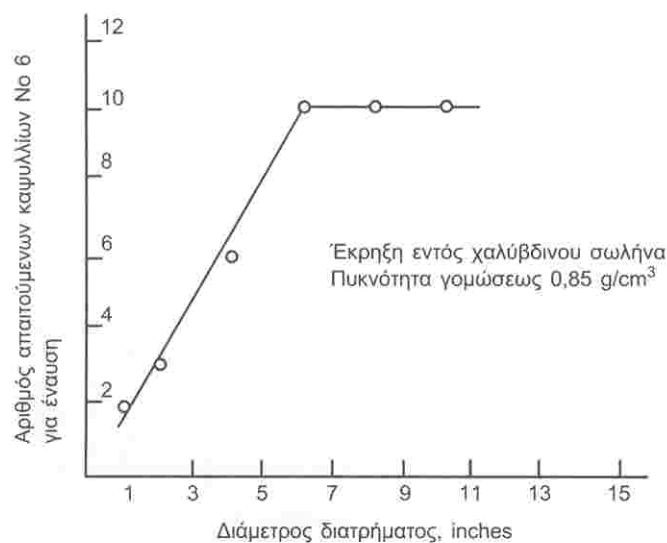
Σχ. 2.26: Σχέση πυκνότητας γόμωσης και ευαισθησίας έναυσης του ANFO (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Στο Σχ. 2.26 δίνεται η σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης και ευαισθησίας έναυσης του ANFO. Όπως δείχνει το σχήμα αυτό, που αναφέρεται σε διάμετρο γόμωσης 6 in (150 mm), η ευαισθησία του ANFO μειώνεται αισθητά καθώς αυξάνει η πυκνότητα γόμωσης του πέραν του 0,90 g/cm<sup>3</sup>, οπότε ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται για πνευματικά γομούμενο ANFO ειδικά σε διατρήματα μικρής διαμέτρου.

#### ζ. Διάμετρος διατρήματος

Η επίδραση της διαμέτρου του διατρήματος στην ταχύτητα έκρηξης είναι πολύ έντονη. Η κρίσιμη διάμετρος, για μεν το καθαρό κρυσταλλικό νιτρικό αμμώνιο σε συνθήκες μη περιορισμού είναι μεταξύ 6-9 in (150-230 mm), για δε το ANFO ποιότητας λιπάσματος για πυκνότητα γόμωσης 0,8 g/cm<sup>3</sup> είναι 4 in (100 mm).

Όπως δείχνει το Σχ. 2.27 αύξηση της διαμέτρου του διατρήματος μέχρι 6 in οδηγεί σε ελάττωση της ευαισθησίας έναυσης. Πέραν αυτής της διαμέτρου η ευαισθησία σταθεροποιείται.



Σχ. 2.27: Μεταβολή της ευαισθησίας έναυσης του ANFO σε σχέση με την διάμετρο του διατρήματος (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

#### η. Ασφάλεια του ANFO

Το ANFO είναι μία πολύ ασφαλής εκρηκτική ύλη, διότι έχει χαμηλή ευαισθησία έναυσης. Η μετατροπή τυχόν ανάφλεξης του ANFO σε έκρηξη, προϋποθέτει την παρουσία πολύ μεγάλων ποσοτήτων του.

Μεταξύ των μέτρων προφύλαξης, που προτείνονται για την αποφυγή προώρων εκρήξεων, είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας του διατρήματος πριν από τη γόμωσή του. Εάν η θερμοκρασία αυτή είναι ανάμεσα στους 32-38 °C ο χρόνος μεταξύ γόμωσης και έκρηξης πρέπει να περιορισθεί σε 4 έως 6 ώρες, εάν όμως είναι μέχρι 43 °C, τότε πρέπει να περιορισθεί σε 2-4 ώρες (Τσουτρέλης, 1997).

#### **2.3.4.1. Slurries**

Ο όρος slurries, έχει πλέον επικρατήσει διεθνώς έναντι των water gels ή απλώς gels και ελληνικά υδραμμωνίτες. Η πρώτη υπαίθρια πειραματική εφαρμογή έγινε από τον M. Cook το 1956 στο μεταλλείο Nob Lake Mine του Labrador της εταιρείας Iron Ore Company of Canada, η δεύτερη έγινε το 1959 πάλι από τον M. Cook στο μεταλλείο Pilotac Mine του Mesabi Range στην Πολιτεία Minnesota των Η.Π.Α. με εντυπωσιακή και τις δύο φορές επιτυχία, που άνοιξε την αγορά τους στις Η.Π.Α. Κατά την 10ετία του 1960 και μετέπειτα, χάρις στις συνεχείς βελτιώσεις των

μιγμάτων των slurries, η χρήση τους επεκτάθηκε και σήμερα προσφέρονται με διάφορα εμπορικά ονόματα σε μεγάλη ποικιλία συστάσεων, πυκνοτήτων, ισχύος καθώς και με διαφορετική ευαισθησία. Οι εκρηκτικές αυτές ύλες χαρακτηρίζονται γενικά από μεγάλη ασφάλεια, ικανοποιητική αντίσταση στο νερό και καλή ισχύ ενώ οι τιμές τους στην αγορά τοποθετούνται μεταξύ εκείνων του ANFO και των δυναμίτιδων.

Τα slurries είναι πολτώδες μίγμα, που αποτελείται από ένα οξειδωτικό μέσο (νιτρικό αμμώνιο ή σε συνδυασμό με νιτρικό νάτριο ή κάλιο), μια καύσιμη ύλη στερεά ή υγρή (TNT, αργίλιο, θείο, νιτρική μεθυλαμίνη, μονονιτρική αιθυλογλυκόλη κλπ.), που παίζει και ρόλο ευαισθητοποιητή (sensitiser), ανάλογα με την σύστασή της, και νερό σε αναλογία 5 έως 30% με μέσο όρο της τάξης του 15%. Μια τέτοια σύσταση σχηματίζει ανόργανο υδατικό νιτρικό διάλυμα (μέσο διασποράς) εντός του οποίου ευρίσκονται σε αιώρηση (διεσπαρμένες ουσίες) η περίσσεια του στερεού ανόργανου οξειδωτικού μέσου και του καύσιμου (κρυσταλλική φάση). Το μίγμα αυτό σταθεροποιείται με μικρή ποσότητα φυτικής κόλλας (π. χ. κόλλα guar), η οποία:

- α) συγκολλά μεταξύ τους τα σωματίδια,
- β) εμποδίζει την είσοδο και έξοδο του νερού από το μίγμα
- γ) δρα ως καύσιμο και
- δ) προσδίδει σε αυτό ζελατινώδη έως ημίρρευστη υφή.

Με την πάροδο του χρόνου και την πληρέστερη γνώση της φυσικοχημείας των κολλοειδών συστημάτων, στα οποία ανήκει το πολτώδες μίγμα των slurries, παρασκευάστηκαν καλύτερα πολτώδη μίγματα με μέσα σταθεροποιήσεως, που έχουν δομή πλέγματος, η οποία επιτυγχάνεται με ανάπτυξη διασταυρωμένων συνδέσεων μεταξύ των μορίων του μέσου διασποράς και του αιωρήματος. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται:

- α) καλύτερη ισορροπία των συστατικών του κολλοειδούς συστήματος,
- β) σταθερότητα του πολτού έναντι προσβολής από εξωτερικό νερό και
- γ) μη διαχωρισμός του νερού με τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Στα περισσότερα slurries το νιτρικό αμμώνιο είναι ο κύριος φορέας οξυγόνου, η προσθήκη όμως και νιτρικού νατρίου είναι απαραίτητη, όταν απαιτείται μεγαλύτερη πυκνότητα και περισσότερο οξυγόνο, αφού το δεύτερο διαθέτει διπλάσια ποσότητα οξυγόνου κατά βάρος από εκείνη του πρώτου.

Τα slurries χαρακτηρίζονται συνήθως εμπορικά από το είδος του ευαισθητοποιητή που περιέχουν. Δηλαδή διακρίνονται σε εκείνα που περιέχουν TNT



ως κύριο ευαισθητοποιητή και καύσιμο και εκείνα που περιέχουν λεπτότατους κόκκους (flakes ή granules) αργιλίου, τα οποία είναι και πιο ακριβά. Υπάρχουν επίσης στο εμπόριο slurries, που περιέχουν και τους δύο ευαισθητοποιητές καθώς και slurries που περιέχουν μικρές ή μεγαλύτερες ποσότητες από άλλους, κυρίως υγρούς, ευαισθητοποιητές. Η επιλογή του ευαισθητοποιητή εξαρτάται από την διάμετρο του διατρήματος, στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το slurry. Για παράδειγμα για ανατινάξεις σε μικρές διαμέτρους (30 - 50 mm) τα slurries περιέχουν κυρίως υγρούς ευαισθητοποιητές, ενώ σε μεγαλύτερες διαμέτρους στερεούς.

Στις Η.Π.Α. και τον Καναδά τα slurries, που ο ευαισθητοποιητής τους δεν είναι ο ίδιος εκρηκτική ύλη, χαρακτηρίζονται ως **εκρηκτικά μέσα** (slurry blasting agents-SBA) με συνέπεια να έχουν ηπιότερους κανονισμούς στην μεταφορά, αποθήκευση και τον χειρισμό τους.

Από πλευράς ιδιοτήτων η οικογένεια των slurries καλύπτει ένα ευρύτατο φάσμα τιμών, τα όρια των οποίων δίνονται παρακάτω:

Ταχύτητα έκρηξης:	D = 3500-5800 m/s (4400)
Πίεση έκρηξης:	P <sub>d</sub> = 70-120 kbar (48)
Πυκνότητα:	P = 1,05-1,6 (0,86)
Θερμότητα έκρηξης:	Κατά βάρος: Q = 600-1200 cal/g (880)
	Κατ' όγκον: Q = 700-1500 cal/cm <sup>3</sup> (756)
Όγκος αερίων προϊόντων:	V = 3,1-4,2 mole/g (4,4)
	V = 3,9-5,3 mole/cm <sup>3</sup> (3,8)

Οι εντός παρενθέσεις αριθμοί αναφέρονται για λόγους σύγκρισης στο standard ANFO.

#### 2.3.4.3 Γαλακτώματα

Τα γαλακτώματα (emulsions) είναι ένα μίγμα από δύο πολύ καλά αναμεμιγμένα ρευστά, που δεν διαλύεται όμως το ένα μέσα στο άλλο (δεν αντιδρούν χημικά μεταξύ τους).

Το οξειδωτικό μέσο, που συνιστά το μέσο διασποράς, αποτελείται από υπερκορεσμένο υδατικό διάλυμα νιτρικού αμμωνίου με μικρές ποσότητες νιτρικού νατρίου ή ασβεστίου. Στο διάλυμα αυτό προστίθεται ως καύσιμο (διασπαρμένη ουσία) πετρέλαιο ή παραφινέλαιο ή κερί παραφίνης (paraffin wax) ή ακόμα μίγματα

αυτών. Η αναλογία όγκου μεταξύ του καύσιμου και του οξειδωτικού μέσου είναι 1 προς 10 περίπου. Η καλή ανάμιξη μεταξύ του οξειδωτικού μέσου και του καύσιμου δίνει, όπως δείχνει και η φωτογραφία του Σχ. 2.28 που έχει ληφθεί με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, ένα μίγμα αποτελούμενο από λεπτότατα πολύ συμπυκνωμένα μεταξύ τους σταγονίδια διαστάσεων μεταξύ 0,002- 0,1  $\mu\text{m}$  του οξειδωτικού μέσου, που περιβάλλονται από εξαιρετικά λεπτού πάχους (εκατομμυριοστά του μέτρου) υμένα.

Με την προσθήκη, εξ άλλου, μικρού ποσοστού γαλακτοποιητή (συνήθως ολεατικό νάτριο) της τάξης του 1% πριν από την ανάμιξη του μίγματος επιτυγχάνεται η σταθερότητα του (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 2.28: Φωτογραφία του γαλακτώματος. Τα σταγονίδια είναι διαστάσεων 0,002 - 0,1 $\mu\text{m}$ . (Hopler, 1993) (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997).

Η ανάμιξη αυτή επιτρέπει την στενή επαφή μεταξύ του καύσιμου και του οξειδωτικού μέσου, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας της αντίδρασης στα 5000-6000 m/s και την μετατροπή όλης σχεδόν της θεωρητικά διαθέσιμης ενέργειας σε πραγματική ενέργεια. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η επικάλυψη του οξειδωτικού μέσου με στρώμα αδιαπέρατου ελαίου (καύσιμο), προσδίδει στα γαλακτώματα υψηλή ανθεκτικότητα στο νερό (Τσουτρέλης, 1997).

Για να αποκτήσει το μίγμα αυτό εκρηκτικές ιδιότητες προστίθεται ένας ευαισθητοποιητής, που σκοπό έχει να δημιουργήσει εντός του μίγματος φυσαλίδες αέρα. Τέτοιοι ευαισθητοποιητές είναι πολύ μικρών διαστάσεων κενά υάλινα σφαιρίδια (microballoons) ή ορυκτά προϊόντα που περιέχουν φυσαλίδες (vesicular mineral products).

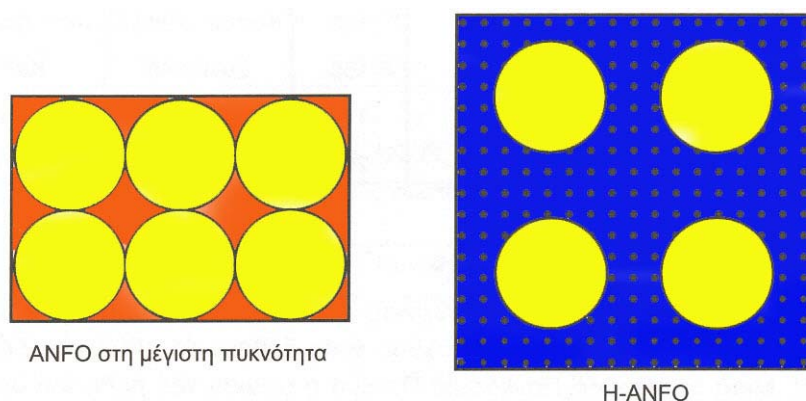
Μια τυπική σύσταση γαλακτώματος κατά βάρος είναι η επόμενη:

Νιτρικό αμμώνιο και νιτρικό νάτριο ή ασβέστιο	60-80%
Νερό	10-12%
Ολεατικό νάτριο	1%
Πετρέλαιο ή παραφίνη	4-6%
Γυάλινα σφαιρίδια	2,5-5% σε μεγέθη 40-70 $\mu\text{m}$

Οι τεχνίτες αυτές φυσαλίδες, ενεργούν ως μικροεναύσματα ή αλλιώς θερμά σημεία (βλ. παραγρ 1.2.4) σε όλο το μίγμα εντός του οποίου έχουν διασκορπιστεί. Συγκεκριμένα, καθώς οι φυσαλίδες συμπιέζονται από την διέλευση του εκρηκτικού κύματος προκαλείται άνοδος της θερμοκρασίας τους, που φθάνει εκείνη της θερμοκρασίας έκρηξης της περιβάλλουσας εκρηκτικής ύλης (Τσουτρέλης, 1997).

#### 2.3.4.4. Βαρύ ANFO

Η προσπάθεια συνδυασμού των πλεονεκτημάτων του ANFO και εκείνων των slurries και των γαλακτωμάτων οδήγησε στις αρχές τις 10ετίας του 1980 στην εισαγωγή μίας νέας οικογένειας εκρηκτικών υλών, που έλαβε το όνομα "Βαρύ ANFO" (Heavy ANFO, H-ANFO) και είναι μίγμα ANFO και γαλακτώματος. Η ιδέα, στην οποία στηρίζεται το "Βαρύ ANFO", είναι απλή. Το ANFO περιέχει 50% περίπου κενά από τα οποία το 30% αυτών βρίσκεται εντός των κόκκων του νιτρικού αμμωνίου και το 70% περίπου μεταξύ των κόκκων. Τα κενά εντός των κόκκων παρέχουν τον απαραίτητο ευαισθητοποιητή, ενώ εκείνα μεταξύ των κόκκων είναι άχρηστος χώρος. Εάν ο χώρος αυτός πληρωθεί με ένα υψηλής πυκνότητας και ανθεκτικότητας στο νερό εκρηκτικό προϊόν, που στην προκειμένη περίπτωση είναι το γαλάκτωμα, τότε το μίγμα που θα προκύψει θα είναι πυκνότερο και ανθεκτικότερο στο νερό από το ANFO, ενώ η αύξηση του κόστους μικρή. Στο Σχ. 2.29 φαίνεται η δομή του H-ANFO σε σχέση προς εκείνη του συνήθους ANFO. Ένα τέτοιο μίγμα ανταγωνίζεται επιτυχώς στην χρήση του άλλες χύμα εκρηκτικές ύλες με βάση το νιτρικό αμμώνιο (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 2.29: Η δομή του H-ANFO σε σχέση προς εκείνη του ANFO (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Το "Βαρύ ANFO" σε χαμηλές περιεκτικότητες γαλακτώματος μοιάζει με διαβρεγμένο ANFO. Για τον λόγο αυτό ορισμένοι παραγωγοί χρωματίζουν το γαλάκτωμα, που θα χρησιμοποιηθεί, για να διακρίνεται εύκολα το H-ANFO από το κοινό ANFO.

Στις χαμηλές περιεκτικότητες γαλακτώματος το χύμα H-ANFO ρέει ελεύθερα για την πλήρωση του διατρήματος. Αυτό συμβαίνει μέχρι περιεκτικότητα 25-30% σε γαλάκτωμα.

Πίνακας 2.8: Επίδραση της περιεκτικότητας του H-ANFO σε γαλάκτωμα στις διάφορες ιδιότητές του (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Περιεκτικότητα σε γαλάκτωμα %	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Σχετική κατ' όγκον ισχύς (RBS)	Κρίσιμη διάμετρος mm	Συνεκτικότητα μίγματος	Ανθεκτικότητα στο νερό
ANFO	0,84	100	75	Καμία	Ουδεμία
" +10 %	0,93	107	100	"	"
" +20%	1,04	118	125	Ρέει ελεύθερα	Ελάχιστη
" +30 %	1,15	128	125	Κάποια συνοχή	Ικανοποιητική
" +40%	1,28	140	150	Συνεκτικό	Καλή
" +45%	1,35	145	175	Συνεκτικό	Πολύ καλή
" +50%	1,40	149	200	Πολύ συνεκτικό	Άριστη

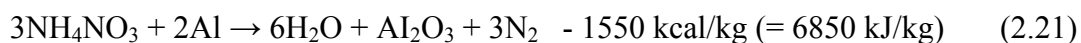
Σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες γαλακτώματος το H-ANFO γίνεται περισσότερο συνεκτικό και πυκνό. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κόκκου του νιτρικού αμμωνίου και την πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου γαλακτώματος, περιεκτικότητές του μεταξύ 35% μέχρι 40% πληρούν τελείως τους κενούς χώρους. Επειδή όμως ένα μέρος του γαλακτώματος απορροφάται εντός των πόρων του κόκκου, απαιτείται λίγο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γαλάκτωμα για την πλήρωση όλων των κενών. Υψηλότερη από 40% περιεκτικότητα σε γαλάκτωμα αρχίζει να απομακρύνει τους κόκκους του νιτρικού αμμωνίου μεταξύ τους (Τσουτρέλης, 1997).

Όπως δείχνει ο Πίνακας 2.8 μεγαλύτερες περιεκτικότητες του 45% σε γαλάκτωμα προσφέρουν πολύ μικρό κέρδος σε ενέργεια, διότι μία εκρηκτική ύλη υψηλής ισχύος κατά βάρος αντικαθίσταται από μία χαμηλότερης ισχύος (λόγω της περιεκτικότητάς της σε νερό), ενώ η πυκνότητά τους παραμένει σχεδόν σταθερή.

#### 2.3.4.5. Αργιλούχες εκρηκτικές ύλες.

Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την προσθήκη αργιλίου στις εκρηκτικές ύλες με σκοπό την βελτίωση της ισχύος τους δόθηκε το 1900 στο Γερμανό G. Roth. Μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο η μείωση της τιμής του αργιλίου επέτρεψε την χρήση του σε κοκκώδη μορφή σε ορισμένες εκρηκτικές ύλες της οικογένειας των δυναμίτιδων. Οι προσπάθειες βελτίωσης της ισχύος και της ευαισθησίας των εκρηκτικών υλών, που αναπτύχθηκαν μετά το 1960 και είχαν ως βάση το νιτρικό αμμώνιο, οδήγησε στην προσθήκη στα τέλη της 10ετίας αυτής αργιλίου σε φυλλώδη ή κονιώδη μορφή στο ANFO και αργότερα στα slurries (Τσουτρέλης, 1997).

Η σχετική αντίδραση για την περίπτωση ανάμιξης αργιλίου με νιτρικό αμμώνιο είναι:



και αντιστοιχεί σε ανάμιξη 81,6% AN με 18,4% AI κατά βάρος.

Σημειώνεται εδώ ότι το αργίλιο μόνο του παρέχει θερμότητα αντίδρασης 7660 kcal/kg (=32049 kJ/kg), όταν οξειδωθεί.

Στον Πίνακα 2.9 δίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του αργιλίου επί της ισχύς του ANFO και στον Πίνακα 2.10 δίνεται η ίδια εικόνα για το ANFO και διάφορα slurries, που περιέχουν αργίλιο.

Πίνακας 2.9: Επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε αργίλιο επί της ισχύος του (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Περιεκτικότητα σε Al %	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Σχετική ισχύς κατά βάρος (RWS)	Σχετική ισχύς κατ' όγκον (RBS)
ANFO χωρίς Al	0,83	100	100
ANFO με 2,5 Al	0,85	110	110
ANFO με 5,0 Al	0,86	118	120
ANFO με 7,5 Al	0,87	125	127
ANFO με 10,0 Al	0,88	133	138
ANFO με 12,5 Al	0,89	139	147
ANFO με 15,0 Al	0,90	146	155

Πίνακας 2.10: Σχετική ισχύς ANFO, αργιλούχου ANFO και slurries που περιέχουν αργίλιο ως συστατικό τους (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Εκρηκτική ύλη % κατά βάρος	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Ισχύς κατά βάρος (RWS)	Ισχύς κατ' όγκον (RBS)
ANFO 94/6	0,85	100	100
ANFO/Al 87/3/10	0,93	124	136
ANFO/Al 84/3/13	0,95	131	146
ANFO/Al 82/3/15	0,96	135	153
Slurry 1% Al, 14% H <sub>2</sub> O	1,25	86	126
" 7% Al, 14% H <sub>2</sub> O	1,30	100	153
" 10% Al, 14% H <sub>2</sub> O	1,35	106	168

Πέρα από την βελτίωση της ισχύος, που επιτυγχάνεται με την προσθήκη αργιλίου, η παρουσία του αυξάνει την ευαισθησία ως προς την έναυση μειώνοντας την κρίσιμη διάμετρο της εκρηκτικής ύλης.

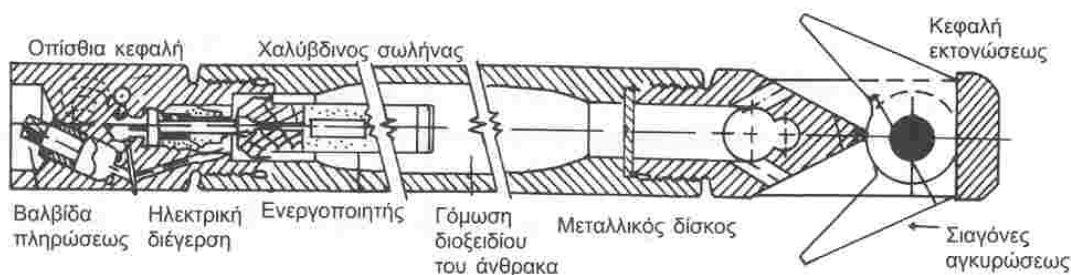
Σήμερα το αργίλιο διατίθεται στο εμπόριο σε τέσσερις μορφές για προσθήκη στο ANFO ή τα slurries:

- Σε κοκκώδη μορφή (granules),
- σε πούδρα,
- σε επικαλυμμένους κόκκους (coated granules)
- και σε φυλλώδη μορφή (leafing grade or flakes) με γενικό χαρακτηριστικό την πολύ μεγάλη επιφάνεια ανά μονάδα βάρους (της τάξης των  $2\text{m}^2$  ανά g)

### 2.3.5. Ειδικοί τύποι εκρηκτικών υλών

#### 2.3.5.1. Cardox

Σε ειδικές περιπτώσεις εξόρυξης, όπου δεν είναι δυνατή η χρήση καμίας από τις προηγούμενες εκρηκτικές ύλες, γίνεται χρήση του Cardox. Πρόκειται για την εικονιζόμενη στο Σχ. 2.30 συσκευή μορφής σωλήνα, η οποία εισάγεται στο διάτρημα και με κατάλληλη εξωτερική διέγερση διοχετεύει σε κλάσμα του δευτερολέπτου προς τα τοιχώματα του διατρήματος  $\text{CO}_2$  σε πολύ υψηλή πίεση, εκμεταλλεύοντας την απότομη εκτόνωση του. Με τον τρόπο αυτό ασκείται μεγάλη ωστική πίεση στο περιβάλλον το διάτρημα πέτρωμα συνεπεία της οποίας προκαλείται θραύση του.



Σχ. 2.30: Συσκευή Cardox (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Η συσκευή αποτελείται από έναν σωλήνα κατασκευασμένο από ειδικής ποιότητας χάλυβα ο οποίος δεν καταστρέφεται κατά την αντίδραση και στα δύο του άκρα απολήγει σε φορητές κεφαλές.

Πίνακας 2.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Cardox (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τύπος σωλήνα			
	B20	B37	F57	C74
Διάμετρος σωλήνα mm	45	45	51	64
Μήκος σωλήνα mm	686	1118	1245	1093
Βάρος συσκευής kg	5,45	8,18	12,73	16,82
Ποσότητα CO <sub>2</sub> σε kg	0,29	0,60	0,82	1,25
ΠΙΕΣΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ σε kg/cm <sup>2</sup>	1.900* ή 2.306	1.900* ή 2.360	1.260* ή 1.900 ή 2.300 ή 2.760	1.260* ή 1.900
Πάχος δίσκου σε mm	2,8-3,6	2,8-3,6	2,4-5,2	3,2-4,8
Διάμετρος διατρήματος mm	57	57	64	76

\*Ανάλογα με το πάχος του δίσκου

Με την διέλευση του ρεύματος το χημικό μίγμα ενεργοποιεί το CO<sub>2</sub> με αποτέλεσμα να αρχίσει η διόγκωσή του, που φθάνει μέχρι 600 φορές τον αρχικό όγκο του. Η διόγκωση αυτή προκαλεί ανάλογη αύξηση της πίεσης μέχρι να φθάσει στην προκαθορισμένη τιμή, στην οποία θραύεται ο δίσκος της κεφαλής εκτόνωσης και το CO<sub>2</sub> διοχετεύεται προς τα τοιχώματα ως μία ψυχρή αέριος μάζα υψηλής πίεσης. Τεχνικά χαρακτηριστικά του Cardox δίνονται στον Πίνακα 2.11. Μερικές από τις εφαρμογές του Cardox είναι:

- σε ανθρακωρυχεία παρουσία μεθανίου,
- στην θραύση θεμελίων μηχανών και καθαίρεση τοίχων από σκυρόδεμα σε εσωτερικούς χώρους,
- σε εργασίες εξόρυξης πλησίον μνημείων για την αποφυγή δονήσεων ή εντός πόλεων
- και γενικά όταν απαγορεύεται ή δεν είναι δυνατή η χρήση εκρηκτικών.



### 2.3.5.2. Μορφοποιημένες εκρηκτικές ύλες (Shaped and pipe charges).

Πρόκειται για διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες, που για διάφορους λόγους, λαμβάνουν κατάλληλη γεωμετρική μορφή (shaped and pipe charges).

Ο οίκος Nitro Nobel κατασκευάζει τις ειδικές εκρηκτικές ύλες του Σχ. 2.31. Η πρώτη που διατίθεται με το εμπορικό όνομα Fragemex, χρησιμοποιείται σε υποθαλάσσιες ανατινάξεις για θραύση βαθμίδων μέχρι ύψους 1,5 m. Ζυγίζει 17 kg (εντός του νερού 1,1 kg), περιέχει 9 kg εκρηκτικής ύλης και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί μέχρι 70 m βάθος νερού. Η δεύτερη που διατίθεται με το εμπορικό όνομα Gurit A, αποτελείται συνίσταται από λεπτά φυσιγγία, μήκους 460 mm, διαμέτρου 11 ή 17 mm και βάρους 50 και 110 g αντίστοιχα. Τα φυσιγγία αυτά φέρουν πλαστικό περίβλημα, που με κατάλληλη διαμόρφωση στα άκρα τους δέχονται μικρό σύνδεσμο (Extension ή Expansion Sleeve) για την ένωση του ενός φυσιγγίου με το επόμενο, ενώ η στερέωσή τους στο κέντρο του διατρήματος επιτυγχάνεται με την βοήθεια κατάλληλων πλαστικών περυγίων. Το Gurit A, χρησιμοποιείται στις μεθόδους ελεγχόμενης εξόρυξης (smooth blasting, pre-splitting and cautious blasting) όπου απαιτείται αποζευγμένη γόμωση καθώς και σε εξορύξεις ορισμένων διακοσμητικών λίθων (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 2.31: Ειδικές εκρηκτικές ύλες του οίκου Nitro-Nobel α. Fragemex, (Πηγή: Dynonobel, 2003)

## **2.4. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ**

Οι εκρηκτικές ύλες μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σύμφωνα με:

- α) το πεδίο εφαρμογής τους,
- β) με τα χαρακτηριστικά έκρηξής τους
- γ) με την ευαισθησία μεταφοράς τους και
- δ) με την ποιότητα των προϊόντων έκρηξης.

### **2.4.1. Ταξινόμηση ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής**

Οι εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε αυτές που χρησιμοποιούνται α) για εμπορικούς και β) για στρατιωτικούς σκοπούς.

Οι δυναμίτιδες, εκρηκτικά τύπου ANFO και εκρηκτικά υγρής φάσης ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, ενώ η TNT, το PETN, το RDX, η σύνθεση B (composition B), κλπ, είναι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται για στρατιωτικούς, σκοπούς.

Τα εκρηκτικά που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία

- α) είναι συνήθως ακριβότερα,
- β) παράγουν μεγάλες ποσότητες επιβλαβών αερίων, και
- γ) δεν μπορούν εύκολα να προσαρμοσθούν σε μεταβαλλόμενες συνθήκες παραγωγής.

### **2.4.2. Ταξινόμηση ανάλογα με την ταχύτητα έκρηξης και την ευαισθησία**

Οι βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες, αναφλέγονται (deflagrate) μετά την έναυσή τους, η ταχύτητα αντίδρασης είναι χαμηλή, η αναπτυσσόμενη πίεση φθάνει μέχρι τα 350 MPa, και δεν συνοδεύονται από την διάδοση κρουστικών κυμάτων.

Οι διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες εκρήγνυνται (detonate) μετά την έναυσή τους, η ταχύτητα έκρηξης είναι υπερηχητική και κυμαίνεται από 2000 έως 7000 m/sec και η αναπτυσσόμενη πίεση κυμαίνεται από 350 έως 28000 MPa. Οι διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την ευαισθησία τους

και την ευκολία ενεργοποίησής τους.

Τα εκρηκτικά που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία (primary or initiating explosives), όπως πχ. το αζίδιο του μολύβδου, ο βροντώδης υδράργυρος κλπ, περιλαμβάνουν εξαιρετικά ασταθείς ουσίες που είναι δυνατόν να εναυθούν με σπινθήρα ή κρουστικό κύμα και οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για την γόμωση εκρηκτικών καψυλλίων.

Τα εκρηκτικά που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία (secondary or high explosives), όπως πχ. εκρηκτικά με βάση την νιτρογλυκερίνη ή το PETN, εναύονται κυρίως με την χρήση εκρηκτικών καψυλλίων και σε μερικές περιπτώσεις με την χρήση ενισχυτικών εναυσμάτων.

Τα εκρηκτικά που ανήκουν στην τρίτη κατηγορία (tertiary or low explosives) δεν είναι δυνατόν να εναυθούν με εκρηκτικό καψύλλιο ισχύος No. 6 (standard No. 6 blasting cap). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν εκρηκτικά χαμηλής ευαισθησίας όπως το ANFO και τα slurries.

#### 2.4.3. Ταξινόμηση ανάλογα με την ασφάλεια κατά την μεταφορά

Το γραφείο μεταφορών των Ηνωμένων Πολιτειών διακρίνει τις παρακάτω κατηγορίες εκρηκτικών:

- **Εκρηκτικά Α' τάξης:** Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει υλικά που μπορούν να εκραγούν ή υλικά μεγίστου κινδύνου. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι δυναμίτιδες, η νιτρογλυκερίνη, τα εκρηκτικά καψύλλια και τα ενισχυτικά εναύσματα (primers).
- **Εκρηκτικά Β' τάξης:** Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει υλικά που μπορούν να αναφλεγούν, όπως εκρηκτικά που χρησιμοποιούνται σαν ωστικά μέσα (propellants), ορισμένες κατηγορίες, πυροτεχνημάτων, κλπ.,
- **Εκρηκτικά Γ' τάξης:** Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει υλικά που ανήκουν στις δύο προηγούμενες κατηγορίες αλλά όταν βρίσκονται σε περιορισμένες ποσότητες.
- **Εκρηκτικά Ασφαλείας:** (permissibles): Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εύφλεκτη ατμόσφαιρα και βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε υπόγεια μεταλλεία (πχ. ανθρακωρυχεία).

#### 2.4.4. Ταξινόμηση ανάλογα με τα αέρια προϊόντα έκρηξης

Τα αέρια προϊόντα που προέρχονται από την αποσύνθεση των διαφόρων εκρηκτικών περιλαμβάνουν κυρίως μη τοξικά αέρια όπως CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> και υδρατμούς, καθώς και μικρό ποσοστό τοξικών αερίων όπως CO, και οξείδια του αζώτου. Σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις τα αέρια αυτά προϊόντα δεν προκαλούν ιδιαίτερα προβλήματα σε αντίθεση με τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις όπου θα πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά όλοι οι παράγοντες που σχετίζονται με την έκρηξη, όπως ο τύπος του εκρηκτικού, οι συνθήκες έκρηξης, η επάρκεια του αερισμού, κλπ.

Μερικοί από τους παράγοντες που αυξάνουν την παραγωγή τοξικών προϊόντων και καπνού είναι

- α) ανεπαρκής ενίσχυση για την έναυση,
- β) ανεπιτυχής σύνθεση του εκρηκτικού,
- γ) μικρός βαθμός ή έλλειψη περιορισμού του εκρηκτικού
- δ) μικρή ανθεκτικότητα του εκρηκτικού στο νερό, κλπ.

Σε πολλές περιπτώσεις η ταξινόμηση των εκρηκτικών ανάλογα με τα αέρια προϊόντα έκρηξης γίνεται χωριστά για τα εκρηκτικά ασφαλείας και για τα συμβατικά εκρηκτικά. Τα εκρηκτικά ασφαλείας (permissible explosives) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιορισμένες ποσότητες σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις και διακρίνονται σύμφωνα με την ταξινόμηση του Γραφείου Μεταλλείων των ΗΠΑ (USBM) σε δύο κατηγορίες (πίνακας 2.12).

Πίνακας 2.12: Ταξινόμηση των εκρηκτικών ασφαλείας (USBM)(Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

Κατηγορία	Όγκος τοξικών αερίων ανά 1.5 λίβρες εκρηκτικού
A	0 – 53 λίτρα (0 – 1.87 ft <sup>3</sup> )
B	53 – 106 λίτρα (1.87 – 3.74 ft <sup>3</sup> )

Η δεύτερη ταξινόμηση η οποία αφορά αυτά που δεν χαρακτηρίζονται εκρηκτικά ασφαλείας (non permissible explosives) προέρχεται από το Ινστιτούτο Κατασκευαστών Εκρηκτικών (Institute of Makers of Explosives, IME). Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα εκρηκτικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (πίνακας 2.13).

Πίνακας 2.13: Ταξινόμηση των εκρηκτικών κατά IME (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

Κατηγορία	Όγκος τοξικών αερίων ανά 1.5 φουσίγγιο
1	0 – 4.5 λίτρα (0 – 0.16 ft <sup>3</sup> )
2	4.5 – 9.4 λίτρα (0.16 – 0.33 ft <sup>3</sup> )
3	9.4 – 19.0 λίτρα (0.33 – 0.67 ft <sup>3</sup> )

## 2.5. ΜΕΣΑ ΕΝΑΥΣΗΣ

Η ενεργοποίηση των εκρηκτικών υλών προκαλείται με την έναυση ή την πυροδότησή τους (initiation). Διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων έναυσης ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης του σήματος έναυσης:

- τα ηλεκτρικά συστήματα
- τα μη ηλεκτρικά συστήματα

Τα συστήματα έναυσης διακρίνονται επίσης ανάλογα και με τον τρόπο έναυσης:

- τα συστήματα μετάδοσης φλόγας που χρησιμοποιούνται για την έναυση εκρηκτικών χαμηλής διαρρηκτικότητας (πυρίτιδες)
- τα συστήματα μετάδοσης κρουστικού παλμού που χρησιμοποιούνται για την έναυση εκρηκτικών υψηλής διαρρηκτικότητας, (δυναμίτιδες, ANFO, κλπ)

Η έναυση της πυρίτιδας είναι δυνατόν να γίνει με α) θρυαλλίδα ασφαλείας και β) ηλεκτρικά καψύλλια πυρίτιδας. Η έναυση των δυναμίτιδων και γενικά των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών απαιτεί την δημιουργία και μετάδοση ενός κρουστικού κύματος (shock wave) και είναι δυνατόν να γίνει με

- α) κοινά καψύλλια δυναμίτιδας
- β) ηλεκτρικά καψύλλια δυναμίτιδας,
- γ) εκρηκτική θρυαλλίδα,
- δ) το σύστημα Nonel,
- ε) το σύστημα Hercudet, καθώς και με συνδυασμούς των προηγούμενων συστημάτων.

Τα ηλεκτρικά και μη ηλεκτρικά συστήματα έναυσης συμπληρώνονται από διάφορα παρελκόμενα όπως επιβραδυντές, συσκευές πυροδότησης, κλπ. Τα συστήματα που κυρίως χρησιμοποιούνται σήμερα στην βιομηχανία είναι τα καψύλλια ή πυροκροτητές και η εκρηκτική θρυαλλίδα.

Τα περισσότερα συστήματα έναυσης περιέχουν ισχυρά εκρηκτικά με συνέπεια να πρέπει να χρησιμοποιούνται με την ίδια προσοχή που απαιτείται για την χρήση των εκρηκτικών υλικών. Ο πίνακας 2.14 παρουσιάζει διαγραμματικά τα διάφορα συστήματα έναυσης που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

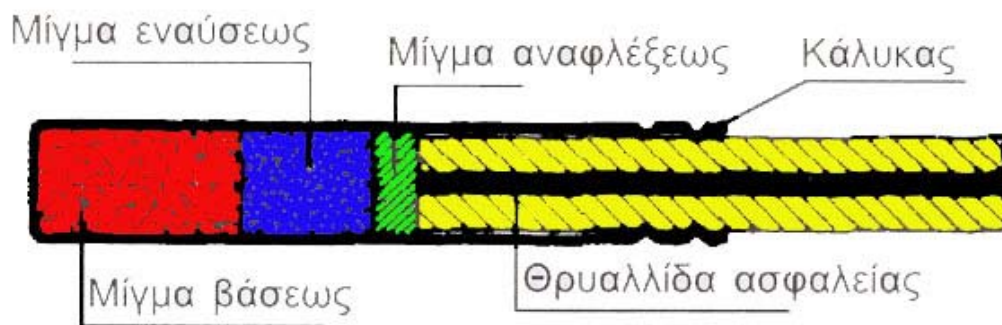
Πίνακας 2.14: Διαγραμματική παρουσίαση των διαφόρων συστημάτων έναυσης που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία (Πηγή: Αγιουτάντης, 1997)

Ηλεκτρικά	Χωρίς επιβράδυνση (Instant)		
	Με επιβράδυνση (Delay)	Γρήγορα (msec)	
		Αργά (1/2 sec)	
Μη ηλεκτρικά	Θρυαλλίδα ασφαλείας και καψύλλια (Fuse and caps)		
	Ακαριαία θρυαλλίδα (Detonating cord)	Σύνδεσμοι επιβράδυνσης (msec connectors)	
	Ακαριαία θρυαλλίδα και καψύλλια (Detonating cord and caps)	Γρήγορα (msec)	
		Αργά (1/2 sec)	
	Έναυση με φλόγα (Flash thru caps)	Σύστημα Nonel	Γρήγορα (msec)
			Αργά(1/2 sec)
		Σύστημα Hercudet	Γρήγορα (msec)

### 2.5.1. Μη ηλεκτρικά μέσα

#### 2.5.1.1. Κοινά καψύλλια δυναμίτιδας

Το κοινό καψύλλιο είναι ο απλούστερος τύπος μέσου έναυσης των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών. Ανακαλύφθηκε το 1868 από τον Alfred Nobel, δηλαδή τέσσερα χρόνια μετά την ανακάλυψη της δυναμίτιδας από τον ίδιο. Συνίσταται από μικρό κάλυκα αλουμινίου διαμέτρου 6,5 mm και μήκους 40 περίπου mm, που είναι κλειστός από το ένα άκρο. Περιέχει δύο εκρηκτικές ουσίες και μία ουσία ανάφλεξης. Ο ρόλος των ουσιών αυτών είναι να μετατρέπουν σταδιακά μία ανάφλεξη σε έκρηξη.



Σχ. 2.32: Διαμήκης τομή κοινού καψυλλίου συνδεδεμένου με θρυαλλίδα ασφαλείας. (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Στο Σχ. 2.32 δίνεται σε διαμήκη τομή ένα κοινό καψύλλιο συνδεδεμένο με θρυαλλίδα ασφαλείας. Το άκρο της θρυαλλίδας ασφαλείας βρίσκεται σε επαφή με μία ουσία ανάφλεξης που έχει συνήθως ως βάση το θειούχο αντιμόνιο ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) και έχει ως σκοπό να ενισχύσει την ασθενή φλόγα της θρυαλλίδας ασφαλείας. Ακολουθεί μια ποσότητα εκρηκτικής ύλης έναυσης (primer charge), που είναι συνήθως αζίδιο του μολύβδου ( $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ) και έχει την ιδιότητα να εναύεται με φλόγα και να εκρήγνυται παρέχοντας ένα ασθενές κρουστικό κύμα προς την επόμενη ουσία, που ευρίσκεται στον πυθμένα του κάλυκα. Η τρίτη αυτή ουσία αποτελεί το μίγμα βάσης (base charge). Αποτελείται από μία ή περισσότερες εκρηκτικές ύλες μεγάλης διαρρηκτικότητας, όπως είναι το PETN, TETRYL, RDX, που παρέχουν ικανής ισχύος κρουστικό κύμα για την έναυση όλων των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών με βάση την NG και ακόμη για μερικές από εκείνες που έχουν ως βάση το νιτρικό αμμώνιο (Τσουτρέλης, 1997).

Η ισχύς των καψυλλίων (κοινών ή άλλων τύπων), εξαρτάται από την ποσότητα του μίγματος βάσεως που περιέχουν. Αρχικά καθορίστηκε η ισχύς τους με αρίθμηση 1 έως 10 ανάλογα με το βάρος της γόμωσης του με αμιγή βροντώδη υδράργυρο. Από την κλίμακα αυτή των καψυλλίων σήμερα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά τα No 8 και No 6. Στην Ευρώπη χρησιμοποιείται συνήθως ο τύπος No 8, που περιέχει στον πυθμένα ποσότητα εκρηκτικής ύλης βάσεως ισοδύναμης προς 2 g βροντώδους υδραργύρου. Για την περίπτωση χρήσης PETN, που είναι η συνηθέστερη περίπτωση, η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε 0,78 g PETN. Ο τύπος No 6, που χρησιμοποιείται συχνά στις Η.Π.Α. και σε άλλες χώρες εκτός Ευρώπης περιέχει 0,35 g PETN και το καψύλλιο είναι μήκους ελάχιστα βραχύτερο (35 mm) (Τσουτρέλης, 1997).

Το κοινό καψύλλιο διατίθεται στο εμπόριο σε κουτιά των 100 τεμαχίων. Η συσκευασία αυτή παρέχει την δυνατότητα διατηρήσεώς τους σε καλή κατάσταση για μεγάλο χρονικό διάστημα σε ξηρό περιβάλλον.

#### **2.5.1.2 Θρυαλλίδα ασφαλείας**

Η θρυαλλίδα ασφαλείας (safety ή ignition fuse) είναι μέσο μετάδοσης της φλόγας κατά τρόπο συνεχή και με σταθερή ταχύτητα από το ένα άκρο της στο άλλο. Αρχικά κατασκευάστηκε από τον William Bickford το 1831 ως ένα ασφαλές μέσο έναυσης της πυρίτιδας. Σήμερα χρησιμοποιείται για να εναύσει αφενός την πυρίτιδα, αφετέρου τις διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες με την παρεμβολή του κοινού καψυλλίου.

Η θρυαλλίδα ασφαλείας έχει μορφή σχοινιού διαμέτρου 4 έως 5,5 mm. Στο κέντρο της φέρει ως ενεργό συστατικό πυρήνα από πυρίτιδα με βάση το  $\text{KNO}_3$  ή το  $\text{NaNO}_3$ . Τον πυρήνα περιβάλλουν αλλεπάλληλα στρώματα βαμβακερού νήματος, και εξωτερικά περιβάλλεται από υδρομονωτικό υλικό ασφαλτικής ή πλαστικής προέλευσης. Ο ρόλος του περιβλήματος είναι να συγκρατεί τον πυρήνα στην θέση του και τον προφυλάσσει από την υγρασία, ενώ παράλληλα προσδίδει ικανοποιητική μηχανική αντοχή στην θρυαλλίδα, ιδιαίτερα σε εφελκυσμό (Τσουτρέλης, 1997).

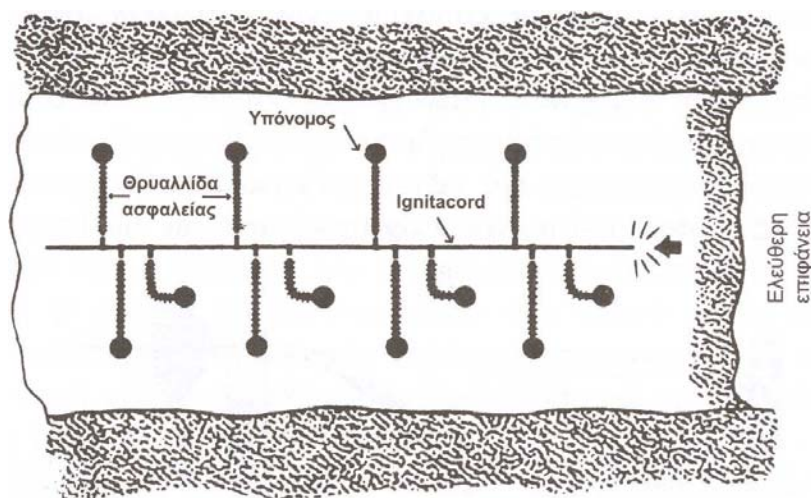
Η ταχύτητα καύσης είναι βασικό στοιχείο της θρυαλλίδας ασφαλείας. Στο εμπόριο διατίθενται συνήθως θρυαλλίδες ασφαλείας με ταχύτητες καύσης 90 s και  $130 \pm 10$  s ανά μέτρο στο υψόμετρο της θάλασσας με ανοχή  $\pm 10\%$  σε ανοικτό περιβάλλον. Επειδή όμως πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ταχύτητα καύσης της όπως είναι οι μεταβολές του καιρού, οι συνθήκες αποθήκευσης και χρήσης της, οι ταχύτητες αυτές δεν είναι απόλυτες. Με την συμπίεση η ταχύτητα καύσεώς της αυξάνεται, ενώ μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου. Ο καλύτερος τρόπος προσδιορισμού της ταχύτητας καύσης της θρυαλλίδας ασφαλείας είναι η διενέργεια δοκιμής στο εργοτάξιο κάτω από τις εκάστοτε συνθήκες χρήσης της (Τσουτρέλης, 1997).

Η θρυαλλίδα ασφαλείας διατίθεται στο εμπόριο σε ρολούς συνήθως των 100, 250 ή 1000 m συσκευασμένους σε χαρτοκιβώτια.



### 2.5.1.3 Θρυαλλίδα ομαδικής πυροδότησης

Η θρυαλλίδα (σχοινί) ομαδικής πυροδότησης (igniter cord) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1954 στην Ν. Αφρική. Πρόκειται, περί ειδικής λεπτής θρυαλλίδας διαμέτρου 2-2,5 mm με την βοήθεια της οποίας παρέχεται η δυνατότητα της πυροδότησης στην σειρά ενός μεγάλου αριθμού υπονόμων με χρόνο παραμονής στο μέτωπο όσο χρειάζεται για την πυροδότηση μίας μόνο υπονόμου. Στον πυρήνα της φέρει εύφλεκτες ουσίες και καίγεται με εξωτερική φλόγα (σε αντίθεση με την εσωτερική φλόγα της θρυαλλίδας ασφαλείας). Στο Σχ. 2.33 αποτυπώνεται η περίπτωση πυροδότησης με την βοήθεια του Ignitacord τριών παράλληλων σειρών υπονόμων σε υπαίθριο μέτωπο μορφής τάφρου. Η λεπτή αυτή θρυαλλίδα καίγεται προοδευτικά δίνοντας βραχείας διάρκειας εξωτερική φλόγα, που προκαλεί την ανάφλεξη της θρυαλλίδας ασφαλείας με την οποία συνδέεται κατάλληλα με την βοήθεια ειδικών συνδέσμων (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 2.33: Σύνδεση του σχοινιού ομαδικής πυροδότησης με την θρυαλλίδα ασφαλείας για την πυροδότηση υπαιθρίου μετώπου μορφής τάφρου (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Κατασκευάζεται κυρίως σε τρεις ποιότητες (γρήγορη καύση: 3-5 sec/ft, μεσαία καύση: 5-10 sec/ft, και αργή καύση: 16-20 sec/ft) και μπορεί να συνδεθεί με ειδικούς μεταλλικούς συνδέσμους (connectors) με την ελεύθερη άκρη της θρυαλλίδας ασφαλείας (Τσουτρέλης, 1997).

Κατά τον σχεδιασμό μίας έκρηξης με αυτό το σύστημα πρέπει να υπολογίζεται το οριακό μήκος θρυαλλίδας ομαδικής πυροδότησης (Limiting cord distance). Η

παράμετρος αυτή εκφράζει το μέγιστο μήκος του σχοινιού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε όλες οι θρυαλλίδες οι οποίες συνδέονται με αυτό να έχουν πυροδοτηθεί προτού εκραγεί το πρώτο διάτρημα. Το μήκος αυτό είναι εύκολο να υπολογιστεί από την ταχύτητα καύσης του σχοινιού και της θρυαλλίδας και τα αντίστοιχα μήκη τους.

Στο εμπόριο το σχοινί ομαδικής πυροδότησης, στο οποίο πάντοτε σημειώνεται κατάλληλα η απόσταση του ενός ft (30 cm), διατίθεται σε ρολούς των 100 ft με 50 ρολούς ανά κιβώτιο. Οι σύνδεσμοι συσκευάζονται σε κουτιά από χαρτόνι των 100 τεμαχίων και σε κιβώτια των 1000 τεμαχίων.

#### **2.5.1.4 Ακαριαία θρυαλλίδα**

Η ακαριαία (εκρηκτική) θρυαλλίδα (detonating cord) αποτελείται από λεπτό ευλύγιστο σχοινί διαμέτρου μερικών mm, το οποίο στον πυρήνα του φέρει ως ενεργό συστατικό την πολύ ισχυρή διαρρηκτική εκρηκτική ύλη PETN. Γύρω από τον πυρήνα υπάρχουν επάλληλα στρώματα από βαμβακερά ή συνθετικά νήματα, που συγκρατούν το PETN στην θέση του και παράλληλα προσδίδουν μηχανική αντοχή στην θρυαλλίδα. Εξωτερικά η εκρηκτική θρυαλλίδα καλύπτεται από πλαστικό αδιάβροχο υλικό (π.χ. PVC) ζωηρού χρώματος για να διακρίνεται εύκολα.

Η εκρηκτική θρυαλλίδα εναύεται με τα ίδια μέσα όπως μία διαρρηκτική εκρηκτική ύλη της οικογένειας των δυναμίτιδων, δηλ με ένα κοινό καψύλλιο και θρυαλλίδα ασφαλείας ή με ένα ηλεκτρικό καψύλλιο (βλ παραγρ. 2.5.2.2. Η ταχύτητα του εκρηκτικού παλμού μεταφέρεται με ταχύτητα  $7.000 \text{ m/s} \pm 200 \text{ m/s}$ , η δε δύναμη του κύματος αυτού είναι αρκετή για να προκαλέσει την έναυση όλων σχεδόν των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών (Τσουτρέλης, 1997).

Παρά την δύναμη του εκρηκτικού της κύματος η εκρηκτική θρυαλλίδα είναι περιορισμένης ευαισθησίας και παρουσιάζει μεγάλη ασφάλεια έναντι της τριβής και των κρούσεων. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά στοιχεία η εκρηκτική θρυαλλίδα ουδέποτε υπήρξε αιτία ανεξέλεγκτης έκρηξης (ατυχήματος) στο μέτωπο. Δεν εκρήγνυται επίσης με παρασιτικά ρεύματα ή ακόμη και όταν χτυπηθεί από κεραυνό (Τσουτρέλης, 1997).

Η εκρηκτική θρυαλλίδα χαρακτηρίζεται από γραμμική πυκνότητα εκρηκτικής ύλης, δηλαδή g ή κόκκους (1 κόκκος = 0,065 g) ανά τρέχον μέτρο. Ανάλογα με την

ποσότητα γόμωσης PETN που φέρει η εκρηκτική θρυαλλίδα κατασκευάζεται με ισχύ μεταξύ 1,5 g/m και 400 g/m με πλέον συνήθεις τύπους εκείνους των 10 και 12 g/m. Οι δύο αυτοί τύποι έχουν διάμετρο 5-6 mm και αντιστοιχούν σε εκείνους των 50-60 κόκκων ανά ft, που κατασκευάζονται στις Η.Π.Α.

Πίνακας 2.15. Διάφοροι τύποι εμπορίου εκρηκτικής θρυαλλίδας με το κατ' εξοχήν πεδίο εφαρμογής τους. (πηγή: Union Espanolas Explosives).

Περιεκτικότητα σε PETN	Εξωτερική διάμετρος mm	Αντοχή σε εφελκυσμό kg/cm	Μήκος ρολού m	Πεδίο εφαρμογής
3 g/m	3,5	100	750	Ειδικές εφαρμογές. Εναύει μόνο ενισχυτές και εκρηκτικές ύλες που περιέχουν νιτρογλυκερίνη
6 g/m	4,0	100	500	Για κατασκευή του κυκλώματος πυροδότησης
12 g/m	4,5	100	250	Για έναυση όλων των εκρηκτικών υλών με βάση τη NG και αρκετών με βάση το AN
20 g/m	6,0	100	200	Για έναυση χαμηλής ευαισθησίας εκρηκτικών υλών
40 g/m	1,3	100	100	Για σεισμικές έρευνες
100 g/m	12,0	100	50	Για ειδικές εξορύξεις (λείων τοιχωμάτων, όγκων γρανιτών κτλ.)
Ειδικός τύπος για υποθαλάσσιες ανατινάξεις	6,0	>150	100	Υποθαλάσσιες ανατινάξεις
Ειδικός ενισχυμένος τύπος	1,0	>150	100	Για υποθαλάσσιες ανατινάξεις με ειδική ενίσχυση
Ειδικός τύπος ανθρακωρυχείων	1,5	>150	100	Για ανθρακωρυχεία

Η εκρηκτική θρυαλλίδα, που φέρει γόμωση μέχρι 12 g/cm, χαρακτηρίζεται ως χαμηλής ή συνήθους ισχύος. Αυτή είναι προφανώς η φθηνότερη και χρησιμοποιείται με επιτυχία για την έναυση υπό κανονικές συνθήκες όλων των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών, που έχουν ως βάση την NG. Μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιούνται για την έναυση των εκρηκτικών υλών, που έχουν ως βάση το νιτρικό αμμώνιο. Η εκρηκτική θρυαλλίδα χρησιμοποιείται με διάφορες περιεκτικότητες PETN ως εκρηκτική ύλη σε ευαίσθητες ανατινάξεις από πλευράς δονήσεων ή σε ειδικές ανατινάξεις όπως είναι οι περιπτώσεις της ελεγχόμενης εξόρυξης (controlled blasting) και η εξόρυξη διακοσμητικών λίθων (Τσουτρέλης, 1997).

Από πλευράς μόνωσης στο εμπόριο διατίθενται τρεις κυρίως τύποι. Ο συνήθης τύπος φέρει γύρω από τον πυρήνα επάλληλα βαμβακερά ή από συνθετικό νήμα στρώματα και εξωτερική κάλυψη από πλαστικό υλικό. Πρόκειται για γενικής χρήσης εκρηκτική θρυαλλίδα, που χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από εκείνες όπου επικρατούν ειδικές συνθήκες (Τσουτρέλης, 1997).

Ο δεύτερος είναι ο ενισχυμένος τύπος (reinforced type), ο οποίος φέρει ισχυρότερη πλαστική μόνωση και χρησιμοποιείται για την κατασκευή της **γραμμής καθόδου** (down line) εντός του διατρήματος, όταν απαιτείται υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και αντίσταση στο νερό (Τσουτρέλης, 1997).

Ο τρίτος φέρει εξωτερική ενίσχυση από λεπτό πλαστικό πλέγμα (plastic wire countered) και χρησιμοποιείται, όταν οι συνθήκες γόμωσης είναι δυσχερείς. Κατασκευάζονται επίσης και διάφοροι τύποι με ειδικά περιβλήματα για χρήσεις εντός του νερού. Στον πίνακα 2.15 δίνονται διάφοροι τύποι εκρηκτικών θρυαλλίδων με τα χαρακτηριστικά στοιχεία τους και με το κατ' εξοχήν πεδίο εφαρμογής τους (Τσουτρέλης, 1997).

Τα πλεονεκτήματα από την χρήση της εκρηκτικής θρυαλλίδας είναι:

- σχεδόν σύγχρονη έναυση πολλών διατρημάτων
- έναυση εκρηκτικών σε αποφραγμένα λούκια μεταλλεύματος
- έναυση χωρίς την χρήση ηλεκτρικών συστημάτων οπότε δεν επηρεάζεται από τυχαία (παράσιτα) ρεύματα και από υγρές συνθήκες όπου είναι δύσκολη η μόνωση των ηλεκτρικών συνδέσεων.



Σχ. 2.34: Ρολό εκρηκτικής θρυαλλίδας (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Ένα μειονέκτημα της εκρηκτικής θρυαλλίδας είναι ότι δημιουργεί υψηλές δονήσεις στον αέρα (Air blast). Σημειώνεται επίσης ότι είναι απαραίτητο να διασφαλίζεται ότι η εκρηκτική θρυαλλίδα δεν διασταυρώνεται τυχαία με άλλο τμήμα της, διότι υπάρχει κίνδυνος ανεξέλεγκτης έναυσης στο σημείο διασταύρωσης (Αγιουτάντης, 1996)

Στο εμπόριο η εκρηκτική θρυαλλίδα διατίθεται σε ρολλούς των 50 έως 500 m την εικόνα των οποίων δίνει το Σχ. 2.34

#### 2.5.1.5 Σύστημα NONEL

Το σύστημα αυτό έναυσης ανακαλύφθηκε από τον καθηγητή Per-Anders Persson κατά την δεκαετία του 1960 στα εργαστήρια του σουηδικού οίκου της Nitro Nobel στο Gyttopp της Σουηδίας και αναπτύχθηκε τόσο ως ανταγωνιστικό εκείνου της ηλεκτρικής έναυσης όσο και για να το αντικαταστήσει πλήρως στις περιπτώσεις, που υπάρχουν παρασιτικά ηλεκτρικά ρεύματα. Σήμερα είναι γνωστό με το εμπορικό όνομα NONEL από τα αρχικά των λέξεων NON-Electric.

Το σύστημα NONEL συνίσταται από τρία μέρη:

- α) Το καψύλλιο (NONEL GT detonator), που συνοδεύεται από λεπτό πλαστικό αγωγό (σωλήνα), όπως δείχνει το Σχ. 2.35.
- β) Τους συνδέσμους (connectors ή connector blocks) NONEL. Αυτοί συνίστανται

από διάφορα μήκη πλαστικού αγωγού, που απολήγουν στο ένα ή και στα δύο άκρα τους, ανάλογα εάν είναι μονού (single connector GT1) ή διπλού (twin connector GT2) τύπου σε πλαστικό υποδοχέα, όπως δείχνει το Σχ. 2.35. Ο υποδοχέας φέρει καψύλλιο με ασθενή γόμωση δεδομένου ότι ένας αγωγός NONEL δεν μπορεί να εναύσει άλλον αγωγό NONEL χωρίς την παρεμβολή καψυλλίου στο σημείο σύνδεσής τους. Οι σύνδεσμοι χρησιμεύουν για να συνδέουν τους αγωγούς των καψυλλίων NONEL με την γραμμή πυροδότησης.

γ) Την γραμμή πυροδότησης. Αυτή συνίσταται επίσης από πλαστικό αγωγό NONEL, που διατίθεται σε ρολούς.

Ο πλαστικός αγωγός του συστήματος NONEL συνίσταται από ειδικής ποιότητας πλαστικό. Εσωτερικά η επιφάνεια του σωλήνα έχει επαληφθεί με λεπτότατη διάστρωση 0,02 g/m από ένα εκρηκτικό μίγμα (HMX=Homocyclonite= Τετρανιτραμινική κυκλοτετραμεθυλίνη, με τύπο  $C_4H_8N_8O_8$  με αργίλιο). Για να ξεκινήσει η αντίδραση απαιτείται συνδυασμός κρούσης και υψηλών θερμοκρασιών. Η κρούση διεγείρει το εκρηκτικό μίγμα, το οποίο μεταφέρει εσωτερικά με αξιοπιστία ένα ασθενές κρουστικό κύμα με ταχύτητα περίπου 2100 m/s. Το κύμα αυτό είναι τόσο ικανό ώστε να εναύσει ένα ειδικό καψύλλιο όχι όμως και να διαρρήξει τον πλαστικό αγωγό. Ο αγωγός NONEL διατίθεται σε δύο τύπους.

Ο συνήθης τύπος 3L έχει εξωτερική διάμετρο 3 mm, και ο βαρύτερος τύπος 3L HD (Heavy Duty) με έχει εξωτερική διάμετρο 3,7 mm. Και στις δύο περιπτώσεις όμως η εσωτερική διάμετρος είναι 1,2 mm.



Σχ. 2.35: Καψύλλιο NONEL με τον πλαστικό του αγωγό (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Και οι δύο τύποι αγωγών κατασκευάζονται από τρία επάλληλα στρώματα ειδικών πλαστικών με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες το κάθε ένα. Το εσωτερικό πλαστικό στρώμα προσφέρει καλή αντοχή στο εκρηκτικό μίγμα καθώς και ισχυρή ακτινική αντοχή, ώστε να εμποδίζεται η διάρρηξή του κατά την όδευση του κρουστικού κύματος. Το ενδιάμεσο πλαστικό στρώμα προσδίδει ικανοποιητική αντοχή σε εφελκυσμό (25 kg σε θερμοκρασία 20 °C και 15 kg σε θερμοκρασία 70 °C) και ταυτόχρονα δρα ως φράγμα για την είσοδο πετρελαίου και άλλων χημικών ουσιών προς το εκρηκτικό μίγμα. Το εξωτερικό στρώμα προσφέρει αντίσταση στην τριβή έχει έντονο χρώμα, ώστε ο αγωγός NONEL να είναι ευδιάκριτος (Dynonobel, 2003).



1. Καψύλλιο μειωμένης ισχύος.  
Διατίθεται με ή χωρίς επιβράδυνση
- 2 Πώμα στεγανότητας.
3. Πλαστικό περίβλημα.
- 4 Αγωγός NONEL σε διάφορα μήκη.
5. Χαρτοταινία συγκράτησης σε ρολό του αγωγού NONEL.
6. Πινακίδα που δίνει τον χρόνο επιβράδυνσης και το μήκος του αγωγού.

Σχ. 2.36: Σύνδεσμοι μονού τύπου του συστήματος NONEL με αγωγό μήκους 2,4 m (Πηγή: Dynonobel, 2003).

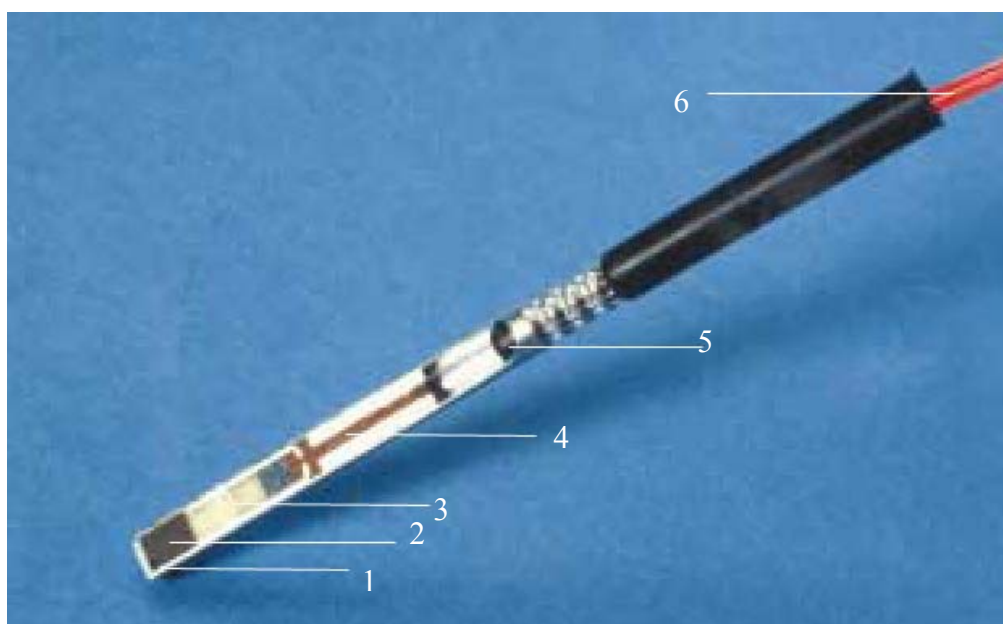
Ο αγωγός NONEL παρέχει προστασία από υπεριώδεις ακτίνες και διατίθεται σε τρία χρώματα:

- Κόκκινο για καψύλλια σε ανατινάξεις βαθμίδων



- Κίτρινο για ανατινάξεις σε στοές
- Ροζ για επιφανειακές συνδέσμους

Το καψύλλιο NONEL, του οποίου η εικόνα δίνεται στο Σχ 2.37, συνίσταται από τρία μέρη: Το στοιχείο επιβράδυνσης, το μίγμα έναυσης και το μίγμα βάσης, που αντιστοιχεί σε εκείνο του κοινού καψυλλίου Νο 8 και κατά συνέπεια είναι ικανό να εναύσει όλες τις εκρηκτικές ύλες, που είναι ευαίσθητες στα καψύλλια.



1. Κέλυφος από αλουμίνιο σε μήκος που εξαρτάται από τον χρόνο επιβράδυνσης.
2. Μίγμα βάσης (κυκλονίτης) που προσδίδει ισχύ ίση προς εκείνη κοινού καψυλλίου Νο 8.
3. Μίγμα έναυσης. Εκρηκτική ύλη ευαίσθητη στην φλόγα.
4. Στοιχείο επιβράδυνσης.
5. Ελαστικό πώμα για προστασία του καψυλλίου και εξασφάλιση στεγανότητας.
6. Αγωγός NONEL προκαθορισμένους μήκους με σφραγισμένο το ελεύθερο άκρο του.

Σχ. 2.37: Εσωτερική δομή του καψυλλίου NONEL με επιβράδυνση (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Το κέλυφος του καψυλλίου κατασκευάζεται από αλουμίνιο και έχει μήκος 45 έως 95 mm, που εξαρτάται από τον χρόνο επιβράδυνσής του. Το στοιχείο επιβράδυνσης αποτελείται από μία ουσία, που αντιδρά με σταθερή ταχύτητα έτσι, ώστε ανάλογα με το μήκος της να ρυθμίζεται ο χρόνος επιβράδυνσης του καψυλλίου. Το μίγμα βάσεως αποτελείται από κυκλονίτη ( $C_3H_6N_6O_6$ ). Λόγω, εξ άλλου, της μη χρήσης πλέον αζιδίου του μολύβδου τα καψύλλια φέρουν τον χαρακτηρισμό NPED (Non - Primary Explosives Detonator) και θεωρούνται πολύ ασφαλή (US patent No.



4.727.808) (Dynonobel, 2003).

Τα καψύλλια NONEL διατίθενται σε τρεις τύπους: NONEL MS, NONEL UNIDET και NONEL LP

Το σύστημα NONEL MS and NONEL UNIDET χρησιμοποιούνται κυρίως για ανατινάξεις βαθμίδων. Συνεπώς οι χρόνοι καθυστέρησης τους είναι σχεδιασμένοι να ταιριάζουν στις συνθήκες που επικρατούν σε τέτοιες ανατινάξεις.

Σε περιπτώσεις ανατίναξης πολλών σειρών σε μία βαθμίδα, είναι σημαντικό να δοθεί στο πέτρωμα της πρώτης σειράς αρκετός χρόνος έτσι ώστε να κινηθεί προς εμπρός πριν ξεκινήσει να κινείται η επόμενη σειρά. Αφού τα πετρώματα διογκώνονται κατά περίπου 50% όταν σπάσουν από εκρηκτικές ύλες, πρέπει να τους δοθεί αρκετός χώρος για την διόγκωση αυτή μέσα σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Μελέτες έδειξαν πως σε ιδανικές συνθήκες το πέτρωμα σε μία σειρά, χρειάζεται να προχωρήσει κατά 1/3 του φορτίου πριν επιτραπεί στην επόμενη σειρά να ανατιναχθεί. Εφόσον η απαιτούμενη καθυστέρηση μεταξύ σειρών μπορεί να διαφοροποιείται μεταξύ 10 ms ανά μέτρο φορτίου σε περιπτώσεις σκληρού πετρώματος και 30 ms ανά μέτρο φορτίου σε περιπτώσεις μαλακού πετρώματος (Dynonobel, 2003).

#### α) NONEL MS



Σχ. 2.38: Εξαρτήματα συστήματος έναυσης NONEL MS (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Το σύστημα έναυσης NONEL MS (Σχ. 2.38) (από την λέξη millisecond = χιλιοστοδευτερόλεπτο) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όποια περίπτωση απαιτείται καθυστέρηση της τάξης του χιλιοστοδευτερολέπτου. Αυτό μπορεί να απευθύνεται σε υπαίθριες, υπόγειες ή υποβρύχιες εργασίες ανατίναξης. Η σειρά NONEL MS είναι κατασκευασμένη με καθυστέρηση 25 ms μεταξύ χρόνων επιβράδυνσης. Το σύστημα έχει 18 διαστήματα αριθμούμενα από το νούμερο 3 μέχρι το 20. Η σειρά αρχίζει με το Νο 3 έχοντας ως σκοπό την καθυστέρηση του πρώτου χρόνων επιβράδυνσης κατά 75 ms για να αποφευχθεί ο κίνδυνος αποκοπής του πλαστικού αγωγού.

Ο πλαστικός αγωγός NONEL ο οποίος μεταφέρει εσωτερικά με αξιοπιστία ένα ασθενές κρουστικό κύμα με ταχύτητα περίπου 2100 m/s, έχει έμφυτη καθυστέρηση 0.5 ms/m. Επομένως σε βαθμίδες μεγάλου μήκους, είναι λογικό όλα τα καψύλλια της ίδιας σειράς να μην λάβουν το σήμα έναυσης μέχρι το χρόνο που αρχίζει η μετακίνηση του πετρώματος στο πρώτο διάτρημα. Το σύστημα NONEL MS χρησιμοποιείται κυρίως για μικρές βαθμίδες (Dynonobel, 2003).

#### β) NONEL UNIDET



Σχ. 2.39: Εξαρτήματα συστήματος έναυσης NONEL UNIDET (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Το σύστημα έναυσης NONEL UNIDET (Σχ. 2.39) αναπτύχθηκε για να δίνει τη μεγαλύτερη δυνατή απλότητα τόσο στη χρήση όσο και στην αποθήκευση των καψυλλίων. Το σύστημα βασίζεται σε ένα συνδυασμό καψυλλίου σε διάτρημα με καθυστέρηση και μονάδες επιφανειακής σύνδεσης επίσης με καθυστέρηση. Αυτό έγινε πραγματικότητα με την ανάπτυξη ενός νέου καψυλλίου με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Το σύστημα αυτό κάνει χρήση ίδιου χρόνου καθυστέρησης μέσα στο διάτρημα και διαφόρων χρόνων στους συνδέσμους (Dynonobel, 2003).

Ο χρόνος καθυστέρησης στο διάτρημα είναι συνήθως 500 ms (αλλά και άλλοι χρόνοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν). Οι χρόνοι καθυστέρησης των καψυλλίων που κυκλοφορούν στο εμπόριο δίνονται στον Πίνακα 2.16.

Πίνακας 2.16: Χρόνοι καθυστέρησης των καψυλλίων του συστήματος NONEL UNIDET (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Επωνυμία	Καθυστέρηση (ms)
U 400	400
U 425	425
U 450	450
U 475	475
U 500	500



Σχ. 2.40: Σύνδεσμοι επιφανειακών καθυστερήσεων του συστήματος NONEL UNIDET (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Οι σύνδεσμοι επιφανειακών καθυστερήσεων (Σχ. 2.40) είναι διαθέσιμοι σε διαφορετικούς χρόνους από 17 μέχρι 176 ms και έχουν διαφορετικό χρώμα για να τονίζονται οι χρόνοι αυτοί. Ο Πίνακας 2.17 δείχνει τον χρόνο καθυστέρησης σε σχέση με το χρώμα του συνδέσμου.

Πίνακας 2.17: Χρόνοι καθυστέρησης σε σχέση με το χρώμα του συνδέσμου του συστήματος NONEL UNIDET (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Επωνυμία	Χρώμα	Καθυστερήση (ms)
SL 0	Πράσινο	0
SL 17	Κίτρινο	17
SL 25	Κόκκινο	25
SL 42	Λευκό	42
SL 67	Μπλε	67
SL 109	Μαύρο	109
SL 167	Πορτοκαλί	176

Οι διαφορετικοί χρόνοι δίνουν τη δυνατότητα ευελιξίας στις εκάστοτε συνθήκες ανατίναξης.

Το Nonel Unidet είναι κατάλληλο για όλων των ειδών τις ανατινάξεις όπου απαιτείται καθυστέρηση χιλιοστοδευτερολέπτου, αλλά δεν προτείνεται για διάνοιξη σηράγγων.

### γ) NONEL LP

Το σύστημα NONEL LP (Σχ. 2.41) από τα αρχικά των λέξεων Long Period (μακράς περιόδου) εξελίχθηκε για ανατινάξεις σε σωρούς και σε στοές, όπου απαιτούνται μεγαλύτεροι χρόνοι καθυστέρησης για να δώσουν αρκετό χρόνο στο πέτρωμα να σπάσει και να απομακρυνθεί από το μέτωπο έκρηξης. Σε ανατινάξεις σηράγγων είναι πολύ σημαντικό οι χρόνοι επιβράδυνσης να είναι αρκετά μεγάλοι ώστε να επιτρέψει στο θραυσμένο πέτρωμα να μετακινηθεί από το μέτωπο της σήραγγας πριν τα επακόλουθα διατρήματα εκραγούν. Για να συμβεί αυτό απαιτούνται μεγαλύτεροι χρόνοι επιβράδυνσης από αυτούς που χρησιμοποιούνται στις επιφανειακές εκρήξεις (Dynonobel, 2003).



Σχ. 2.41: Εξαρτήματα συστήματος έναυσης NONEL LP (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Η σειρά NONEL LP είναι ειδικά σχεδιασμένη για ανατινάξεις σηράγγων. Το σύστημα έναυσης χρησιμοποιείται και για άλλες εργασίες υπόγειων ανατινάξεων. Τα καψύλλια έχουν ξεχωριστούς χρόνους καθυστέρησης οι οποίοι δίνονται στον Πίνακα 2.18.

Πίνακας 2.18: Ονομαστικοί χρόνοι καθυστέρησης NONEL LP (Πηγή: Dynonobel, 2003).

No	Επιβράδυνση (ms)	No	Επιβράδυνση (ms)
1	100	16	1600
2	200	18	1800
3	300	20	2075
4	400	25	2500
5	500	30	3000
6	600	35	3500
7	700	40	4000
8	800	45	4500
9	900	50	5000
10	1000	55	5500
11	1110	60	6000
12	1235		



Η σύνδεση του άκρου του αγωγού κάθε καψυλλίου NONEL με το υπόλοιπο κύκλωμα πυροδότησης επιτυγχάνεται μέσω των προαναφερθέντων συνδέσμων, που απολήγουν σε μικρό κάλυκα από αλουμίνιο. Ο κάλυκας αυτός, που περιέχει εκρηκτική γόμωση και δρα ως ασθενές καψύλλιο, βρίσκεται τοποθετημένος μέσα σε πλαστικό υποδοχέα. Οι υποδοχείς αυτοί είναι κατασκευασμένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δέχονται μέχρι πέντε απολήξεις αγωγών καψυλλίων διαμέτρου 3 mm ή 4 απολήξεις με αγωγούς καψυλλίων διαμέτρου 3,7 mm (HD) ή συνδυασμό 2 αγωγών HD και 3 συνήθους διαμέτρου. Το μικρό αυτό καψύλλιο του υποδοχέα, δεχόμενο ένα ασθενές κρουστικό κύμα από τον αγωγό του συνδέσμου, εκρήγνυται και με την έκρηξη του πυροδοτεί τους κάθετα τοποθετημένους προς την διεύθυνση αυτού αγωγούς των καψυλλίων, όπως δείχνει το Σχ. 2.42. Η παρουσία του μικρού αυτού καψυλλίου εντός του υποδοχέα είναι αναγκαία, διότι ο αγωγός NONEL, όπως ήδη αναφέρθηκε, δεν μπορεί να πυροδοτήσει με απλή παράλληλη επαφή σε κάποιο μήκος άλλο αγωγό NONEL (Dynonobel, 2003).



Σχ. 2.42: Σύνδεση πέντε αγωγών καψυλλίων NONEL με την γραμμή κατασκευής του κυκλώματος πυροδότησης με την βοήθεια συνδέσμου (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Η πυροδότηση του συστήματος NONEL γίνεται με δύο τρόπους:

1. Με χρήση κοινού ή ηλεκτρικού καψυλλίου Νο 6 ή Νο 8 όπως δείχνει το Σχ. 2.43α. Επειδή η ισχύς των καψυλλίων αυτών είναι υπεραρκετή για την έναυση του αγωγού NONEL, το σημείο σύνδεσης πρέπει να γίνεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 5 m από την θέση έκρηξης και να είναι καλυμμένο, ώστε τυχόν θραύσματα να μην προκαλέσουν ζημία στο κύκλωμα πυροδότησης του

NONEL. Το καψύλλιο πρέπει να συνδεθεί στερεά με τον αγωγό NONEL με την βοήθεια μονωτικής ταινίας και ο πυθμένας του να βλέπει προς την διεύθυνση μεταδόσεως του κύματος εντός του αγωγού NONEL.

2. Με χρήση ειδικής συσκευής πυροδότησης (DynoStart blasting machine) της οποίας η εικόνα δίνεται στο Σχ. 2.43β. Το προς πυροδότηση άκρο του αγωγού NONEL, αφού πρώτα απομακρυνθεί με κοπή με μαχαίρι το σφραγισμένο τμήμα του, ωθείται εντός κατάλληλης υποδοχής της συσκευής και στην συνέχεια ακολουθώντας τις οδηγίες, που είναι γραμμένες στην συσκευή, διοχετεύεται ένας υψηλής ενέργειας σπινθήρας που είναι ικανός να εναύσει τον αγωγό NONEL (Dynonobel, 2003).



(α)

(β)

Σχ. 2.43: Πυροδότηση γραμμής NONEL: α) με χρήση ηλεκτρικού καψυλλίου και β) με ειδική συσκευή πυροδότησης (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Τα καψύλλια NONEL διατίθενται στο εμπόριο συσκευασμένα σε κενό εντός σάκου από φύλλο αλουμινίου. Η συσκευασία αυτή του καψυλλίου NONEL επιτρέπει την χρήση του μέχρι δύο χρόνια από την ημερομηνία παραγωγής του, που αναγράφεται επί του πλαστικού σάκου. Καψύλλια σε ανοιγμένους σάκους πρέπει να χρησιμοποιηθούν μέσα σε 30-90 μέρες ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες.

### **2.5.2. Ηλεκτρικά μέσα**

Η έναυση με ηλεκτρικά μέσα (electric initiation), είναι αρκετά διαδεδομένη τόσο σε υπόγειες όσο και σε επιφανειακές ανατινάξεις, λόγω της ευκολίας σύνδεσης και ελέγχου των κυκλωμάτων, πρέπει όμως να αποφεύγεται σε υγρές συνθήκες καθώς και όπου υπάρχουν ισχυρά τυχαία (παράσιτα) ρεύματα (stray currents). Τα παρασιτικά ρεύματα προέρχονται συνήθως από ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, μη γειωμένο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, υψηλής συχνότητας ραδιοφωνικά κύματα, γαλβανικά στοιχεία, κλπ. Σημειώνεται ότι σε υπόγεια ανθρακωρυχεία επιτρέπεται μόνο η χρήση ηλεκτρικών μέσων έναυσης (Dick et al, 1983).

#### **2.5.2.1. Ηλεκτρικά καψύλλια πυρίτιδας**

Τα ηλεκτρικά καψύλλια πυρίτιδας (squibs) αποτελούνται από μικρό κυλινδρικό κάλυκα από αλουμίνιο μήκους περίπου 22 mm, ο οποίος περιέχει στον πυθμένα του ένα μίγμα ανάφλεξης. Εντός του μίγματος αυτού καταλήγουν τα άκρα ζεύγους ηλεκτρικών αγωγών, που ενώνονται μεταξύ τους με κατάλληλο νήμα ερυθροπύρωσης. Από το άλλο άκρο εξέρχονται μονωμένοι οι δύο αγωγοί, αφού διέλθουν μέσα από κυλινδρικό ελαστικό πώμα, που αφ' ενός τους συγκρατεί και αφ' ετέρου κλείνει αεροστεγώς το άκρο του κάλυκα.

Το μίγμα ανάφλεξης είναι ποικίλης σύνθεσης. Συνήθως περιέχει θειούχο αντιμόνιο, χλωρικό ή νιτρικό κάλιο και γραφίτη. Η μάζα αυτή πρέπει να έχει υψηλή ηλεκτρική αντίσταση ούτως ώστε το ρεύμα, που θα διοχετευθεί στους αγωγούς να κυκλοφορήσει μέσω του νήματος για να το ερυθροπυρώσει. Με την ερυθροπύρωση του αναφλέγει το περιβάλλον μίγμα, που με την σειρά του, λόγω των συνθηκών περιορισμού, εκρήγνυται. Με την διάρρηξη του λεπτού κάλυκα η ισχυρή φλόγα εκπέμπεται προς την πυρίτιδα, που περιβάλλει το καψύλλιο και προκαλεί την ασφαλή έναυσή της (Τσουτρέλης, 1997).

Ο οίκος Du Pont κατασκευάζει ηλεκτρικά καψύλλια με χάλκινους αγωγούς από σίδηρο σε μήκη 4, 6, 8, 9, 10 και 12 ft. Στο εμπόριο διατίθενται σε πλαστικά ή μεταλλικά κουτιά των 50 τεμαχίων και σε κιβώτια που περιέχουν 10 κουτιά.



#### 2.5.2.2. Ηλεκτρικά καψύλλια των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών.

Τα ηλεκτρικά καψύλλια (electric blasting caps ή απλώς E.B. caps) διακρίνονται σε καψύλλια χωρίς επιβράδυνση (non-delay electric blasting caps) και σε καψύλλια με επιβράδυνση (delay blasting caps). Με βάση την διάκριση αυτή περιγράφονται κατωτέρω:

##### α. Ηλεκτρικά καψύλλια χωρίς επιβράδυνση.

Το ηλεκτρικό καψύλλιο του οποίου την εικόνα δίνει το Σχ. 2.44, αποτελείται από μικρό κάλυκα από αλουμίνιο διαμέτρου 6,5 mm και μήκους 4-5 cm εντός του οποίου βρίσκονται στην σειρά τρεις διαφορετικές χημικές ουσίες ή μίγματα ουσιών, όπως δείχνει το Σχ. 2.45.

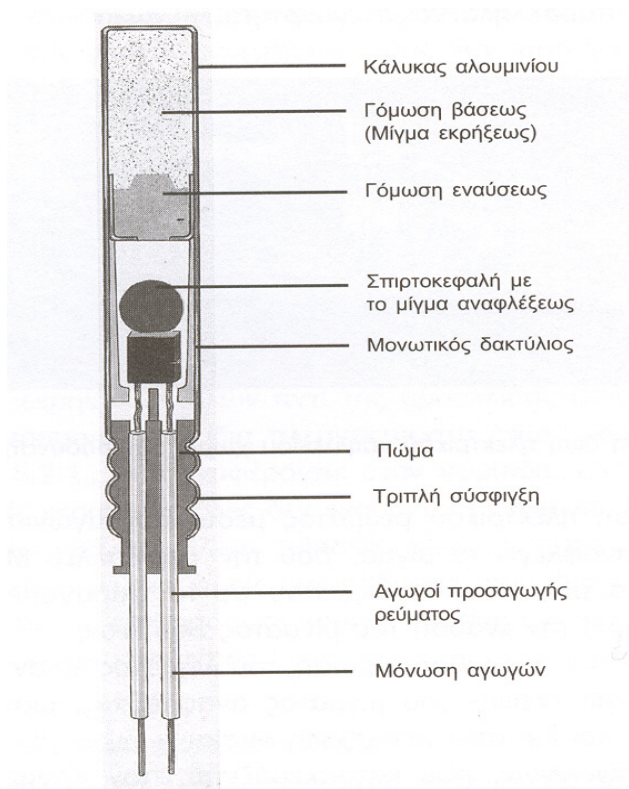


Σχ. 2.44: Εξωτερική όψη ηλεκτρικών καψυλλίων χωρίς επιβράδυνση (Πηγή: Dynonobel, 2003).

Η πρώτη, που ονομάζεται μίγμα ανάφλεξης (flash charge), αποτελείται από ένα πολύ εύφλεκτο μίγμα (ignition mixture). Ακολουθεί το μίγμα έναυσης (primer charge), που έχει την ιδιότητα όταν θερμανθεί να εκρήγνυται. Παλαιότερα αποτελείτο από αζίδιο του μολύβδου αλλά σήμερα υπάρχει σαφής τάση αντικατάστασή του με ασφαλέστερες εκρηκτικές ύλες. Τέλος στον πυθμένα του κάλυκα υπάρχει ποσότητα εκρηκτικής ύλης μεγάλης διαρρηκτικότητας (PETN ή TETRYL ή RDX ή μίγμα αυτών), που συνιστά το μίγμα έκρηξης ή αλλιώς μίγμα βάσης (Τσουτρέλης, 1997).

Εντός του μίγματος αυτού οι δύο αγωγοί συνδέονται μεταξύ τους με λεπτό

γυμνό νήμα (bridge wire) συνήθως χρωμονικελίνης σχηματίζοντας γέφυρα. Με την διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των αγωγών η γέφυρα ερυθροπυρώνεται και αναφλέγει το μίγμα, που την περιβάλλει. Με την σειρά του αυτό πυροδοτεί το μίγμα έναυσης, που με το παραγόμενο ασθενές κρουστικό κύμα προκαλεί την έναυση του μίγματος έκρηξης.



Σχ. 2.45: Εσωτερική δομή ηλεκτρικού καψυλλίου χωρίς επιβράδυνση (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Για να εξασφαλισθεί η ερυθροπύρωση του νήματος η αντίσταση του πρέπει να είναι μικρότερη εκείνης του μίγματος ανάφλεξης, ώστε το ρεύμα να διέλθει από το νήμα και όχι από την χημική ουσία.

Στο εμπόριο διατίθενται ηλεκτρικά καψύλλια ισχύος No 8 και No 6, τα οποία περιέχουν συνήθως γόμωση έκρηξης από PETN σε ποσότητες αντίστοιχα 0,78 g και 0,35 g. Τα καψύλλια αυτά κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους ανάλογα με την ηλεκτρική τους ευαισθησία, το μήκος των αγωγών τους και την χρήση που προορίζονται.

Ανάλογα με την ευαισθησία τους διατίθενται στο εμπόριο δύο ή τρεις τύποι καψυλλίων ως εξής:

- Συνήθους ευαισθησίας (sensitive)
- Χαμηλής ευαισθησίας (insensitive)
- Πολύ χαμηλής ευαισθησίας (highly insensitive) με αντίσταση νήματος. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται σε περιοχές με παρασιτικά ρεύματα που προέρχονται από την λειτουργία πομπών, διέλευση αγωγών υψηλής τάσεως και ύπαρξη ηλεκτρικών γειώσεων (Τσουτρέλης, 1997).

Τα μήκη των αγωγών των ηλεκτρικών καψυλλίων αρχίζουν από 1,2 m και φθάνουν σε ειδικές περιπτώσεις μέχρι τα 100 m. Οι αγωγοί αυτοί φέρουν πάντοτε ζωηρά χρώματα για να είναι ευδιάκριτοι και πολλές φορές διαφορετικά χρώματα ο ένας από τον άλλο, πράγμα το οποίο διευκολύνει την σύνδεσή τους κατά την κατασκευή του ηλεκτρικού κυκλώματος πυροδότησης. Στον Πίνακα 2.19 δίνεται η ονομαστική αντίσταση της σειράς των ηλεκτρικών καψυλλίων του αμερικανικού οίκου Atlas Powder για διάφορα μήκη χάλκινων και σιδηρών αγωγών.

#### β. Ηλεκτρικά καψύλλια με επιβράδυνση

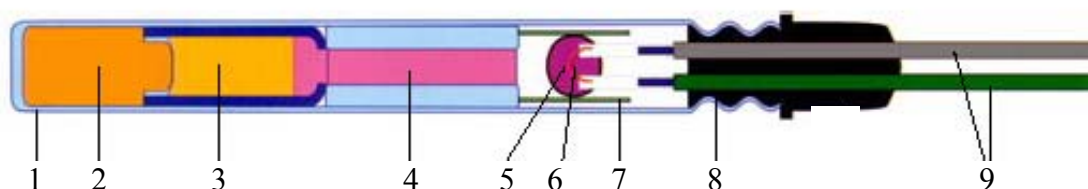
Τα ηλεκτρικά καψύλλια με επιβράδυνση διαφέρουν των προηγούμενων κατά το ότι μεταξύ του μίγματος ανάφλεξης και εκείνου της έναυσης παρεμβάλλεται στοιχείο ελεγχόμενης επιβράδυνσης (delay element). Με τον τρόπο αυτό η επιβράδυνση επιτυγχάνεται εντός του καψυλλίου και με αυτό τον τρόπο καθίσταται εύκολη η επίτευξη μιας σειράς διαδοχικών εκρήξεων με μία μόνο πυροδότηση.

Στο Σχ. 2.46 δίνονται λεπτομέρειες της εσωτερικής δομής ενός ηλεκτρικού καψυλλίου με επιβράδυνση, ενώ στο επόμενο Σχ. 2.47 δίνεται μια σειρά τέτοιων καψυλλίων, όπου η διαφοροποίηση ως προς το μήκος τους, που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5 cm και 10 cm, οφείλεται στην αύξηση του μήκους του στοιχείου επιβράδυνσης, που είναι συνάρτηση του χρόνου επιβράδυνσης.

Πίνακας 2.19: Ονομαστική αντίσταση ηλεκτρικών καψυλλίων του οίκου Atlas Powder για διάφορα μήκη αγωγών από χαλκό και σίδηρο (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

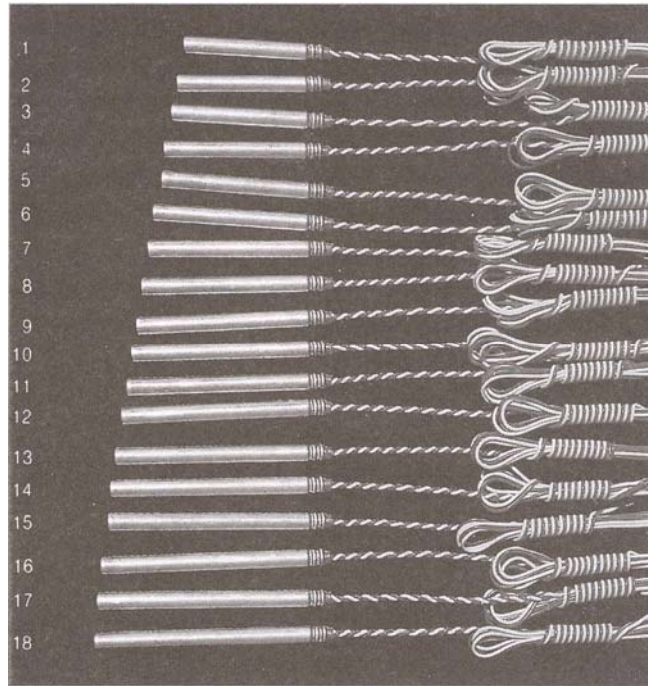
Μήκος αγωγού σε ft(=0,3m)	Χάλκινοι ohm	Σιδηροί ohm
6	1,6	2,8
8	1,7	3,3
10	1,8	3,8
12	1,8	4,3
16	1,9	5,3
20	2,1	6,3
24	2,3	7,3
30	2,3	8,8
40	2,4	11,3
50	2,6	13,8
100	3,8	26,4

Τα ηλεκτρικά καψύλλια επιβράδυνσης κατασκευάζονται σε δύο τύπους ανάλογα με την ακρίβειά τους και τον χρόνο επιβράδυνσής τους. Ο τύπος MS και ο LP. Ο ισπανικός οίκος U.E.E. κατασκευάζει καψύλλια LP με αριθμούς 1-12 με βήμα επιβράδυνσης μεταξύ τους 500 ms.



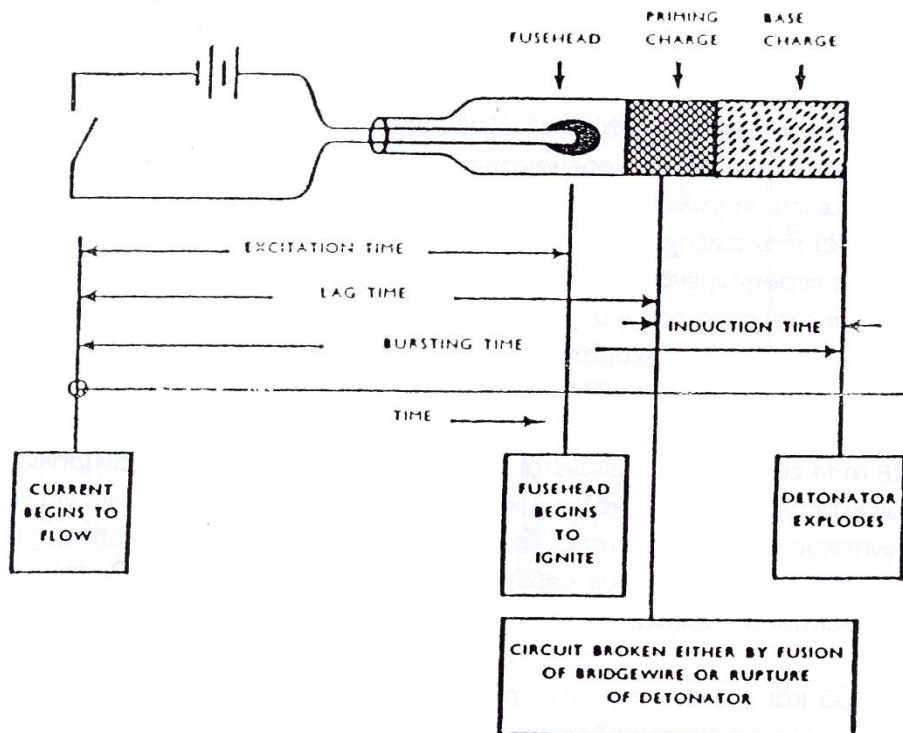
1. Μεταλλικό περίβλημα
2. Μίγμα έκρηξης.
3. Μίγμα έναυσης
4. Στοιχείο επιβράδυνσης
5. Γέφυρα ερυθροπύρωσης.
6. Μίγμα ανάφλεξης
7. Προστασία μίγματος ανάφλεξης
8. Ελαστικό πόμα στεγανότητας
9. Μονωμένοι ηλεκτρικοί αγωγοί

Σχ. 2.46: Δομή ηλεκτρικού καψυλλίου με επιβράδυνση του οίκου Dynonobel (Πηγή: Dynonobel, 2003)



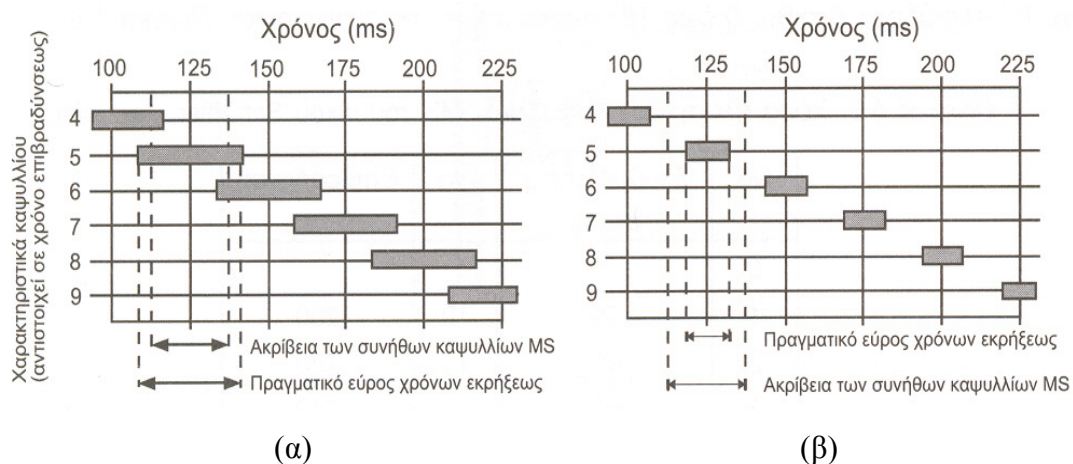
Σχ. 2.47: Σειρά ηλεκτρικών καψυλλίων με επιβράδυνση. Το μήκος τους είναι συνάρτηση του χρόνου επιβράδυνσης (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Μετά την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, στα άκρα των ηλεκτρικών αγωγών, περνάει ένας μικρός χρόνος (συνήθως μερικά χιλιοστοδευτερόλεπτα) μέχρι να θερμανθεί η ηλεκτρική αντίσταση μέσα στο καψύλλιο και να εναύσει το εύφλεκτο μίγμα. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται **χρόνος ενεργοποίησης** (excitation time). Οι χρόνοι ενεργοποίησης διαφέρουν από καψύλλιο σε καψύλλιο λόγω κατασκευαστικών διαφορών. Μετά την ανάφλεξη του εύφλεκτου μίγματος περνάει ένας επιπλέον χρόνος μέχρι να ενεργοποιηθεί η πρωτεύουσα ή/και δευτερεύουσα εκρηκτική ύλη. Μετά την ενεργοποίηση της γόμωσης ενίσχυσης διακόπτεται κατά κανόνα η ηλεκτρική σύνδεση του καψυλλίου με τους κύριους αγωγούς. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται **χρόνος αποκοπής** (lag time). Ο χρόνος μεταξύ της αρχικής επιβολής του ρεύματος και της έκρηξης της βασικής γόμωσης του καψυλλίου ονομάζεται **χρόνος έκρηξης** (bursting time). Η σχέση των διαφόρων χρόνων πυροδότησης φαίνεται στο σχήμα 2.48. Σημειώνεται ότι για την περίπτωση σύνδεσης πολλών καψυλλίων σε σειρά είναι απαραίτητο ο μικρότερος χρόνος αποκοπής να είναι μεγαλύτερος από τον μεγαλύτερο χρόνο ενεργοποίησης. Ο λόγος είναι ότι όλα τα καψύλλια πρέπει, να λάβουν την απαραίτητη ένταση ρεύματος για να ενεργοποιηθούν πριν διακοπεί η συνδεσμολογία (Αγιουτάντης, 1996).



Σχ. 2.48: Χρόνοι ενεργοποίησης ενός καψυλλίου (Πηγή: Αγιουτάντης, 1996)

Από το 1978 ο αμερικανικός οίκος Martin-Marietta σε μελέτη του, αξιολόγησης των ηλεκτρικών καψυλλίων όλων των κατασκευαστών είχε καταλήξει στην εικόνα του Σχ. 2.49α σύμφωνα με την οποία υπάρχει σημαντική χρονική απόκλιση μεταξύ του πραγματικού και του ονομαστικού χρόνου έκρηξης με αποτέλεσμα να υπάρχουν χρονικές επικαλύψεις.



Σχ. 2.49: Σύγκριση από πλευράς χρόνων έκρηξης των συνήθων καψυλλίων MS (α) και των βελτιωμένων καψυλλίων υπερακρίβειας (β) (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)



Οι διαφορές αυτές οφείλονται σε επιδράσεις επί του στοιχείου επιβράδυνσης της πυκνότητας των ουσιών που περιέχει, της ακρίβειας του μήκους του, της χημικής καθαρότητας του, της θερμοκρασίας του χώρου ανατίναξης και του χρόνου χρήσης του σε σχέση με εκείνον της παραγωγής του.

Η μελέτη αυτή οδήγησε στην κατασκευή ηλεκτρικών καψυλλίων βελτιωμένης ακρίβειας, που έχουν μικρότερη πιθανότητα χρονικής επικάλυψης. Τελευταία τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα αυτό είναι τα καψύλλια υπερακρίβειας (super accurate delay detonators), των οποίων η αντίστοιχη εικόνα δίνεται στο Σχ. 2.49β. Τέτοιος τύπος καψυλλίων είναι το Iredet-Super του Καναδικού οίκου Iresco Canada Inc (Τσουτρέλης, 1997).

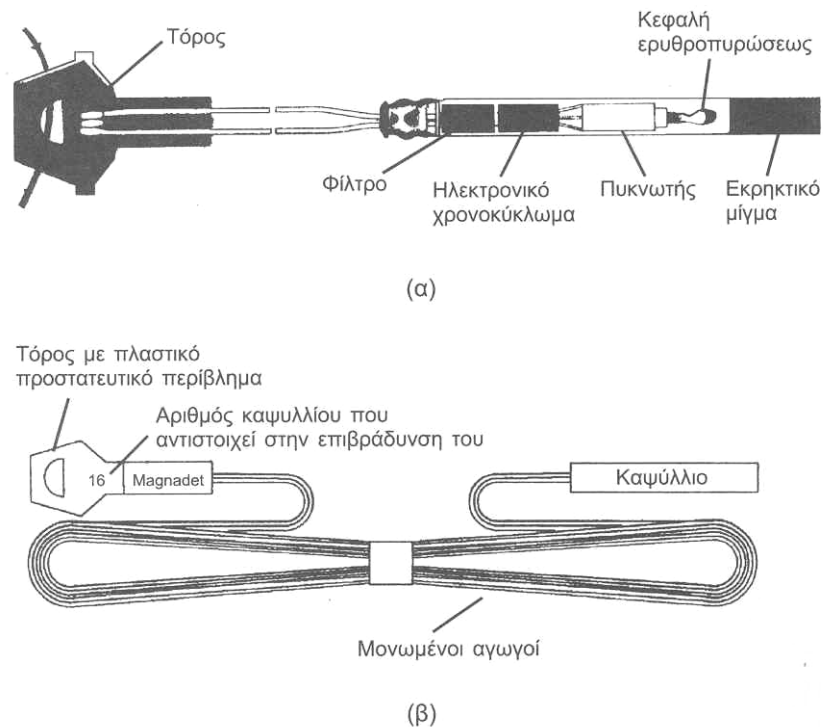
### **2.5.2.3 Ηλεκτρονικά καψύλλια**

Η απαίτηση για την κατασκευή ακόμη πιο ασφαλούς ηλεκτρικού καψυλλίου, που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους χώρους με όλες τις συνθήκες και ειδικά στα ανθρακωρυχεία όπως και παρουσία παρασιτικών ρευμάτων, αλλά και η ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης της ακρίβειας των χρόνων επιβράδυνσης οδήγησε στην κατασκευή των ηλεκτρονικών ηλεκτρικών καψυλλίων (electronic delay detonators).

Στο Σχ. 2.50 δίνεται σε διαμήκη τομή η εσωτερική (Σχ. 2.50α) και η εξωτερική δομή (Σχ. 2.50β) ενός τέτοιου καψυλλίου, που κατασκευάζει ο οίκος I.C.I. της Μεγ. Βρετανίας με το εμπορικό όνομα Magnadet.

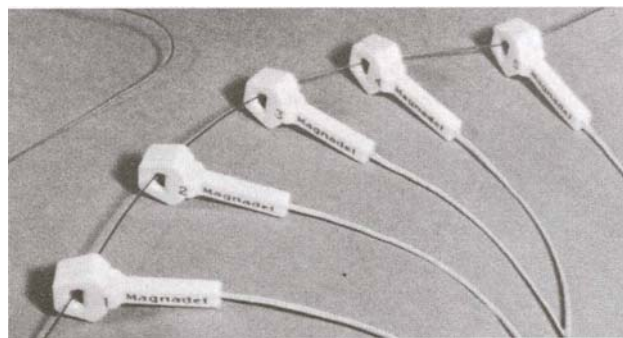
Στο ηλεκτρονικό καψύλλιο το στοιχείο επιβράδυνσης έχει αντικατασταθεί με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, που ευρίσκεται πριν από το μίγμα ανάφλεξης. Το κύκλωμα αυτό έχει προγραμματιστεί κατά την κατασκευή του καψυλλίου να καθυστερήσει κατά τον επιθυμητό χρόνο επιβράδυνσης την διέλευση του ρεύματος για την ερυθροπύρωση του νήματος.

Η πυροδότηση του ηλεκτρονικού καψυλλίου γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικού κυκλώματος, το οποίο προσφέρει πολύ μεγάλη ασφάλεια. Όπως δείχνει το ίδιο σχήμα το ζεύγος των αγωγών του καψυλλίου απολήγει σε περιέλιξη σε τόρο (πηνίο) σιδηρομαγνητικού υλικού, που αποτελεί το δευτερεύον κύκλωμα.



Σχ. 2.50: Διαμήκης τομή ηλεκτρονικού καψυλλίου Magnadet (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Το πρωτεύον κύκλωμα (Σχ. 2.51) σχηματίζεται με απλή διέλευση από την οπή του τόρου του αγωγού προσαγωγής του ρεύματος, που παράγεται από ειδική γεννήτρια πυροδότησης. Η επαγωγή ρεύματος στο δευτερεύον κύκλωμα του τόρου για την πυροδότηση του καψυλλίου επιτυγχάνεται μόνο με την διέλευση υψίσυχνου ρεύματος 15-30 kHz, που παράγει η υπόψη γεννήτρια και είναι εκτός των κανονικών συχνοτήτων των εναλλασσομένων ή συνεχών ρευμάτων ή των παρασιτικών (Τσουτρέλης, 1997). Σε καμία άλλη περίπτωση δεν εκρήγνυται το ηλεκτρονικό καψύλλιο. Ηλεκτρονικά καψύλλια διαθέτει επίσης ο οίκος Nitro-Nobel της Σουηδίας.



Σχ. 2.51: Συνδεσμολογία για την πυροδότηση του ηλεκτρονικού καψυλλίου (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)



## 2.6. ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΈΚΡΗΞΗΣ (ΚΑΠΝΟΙ)

Τα αέρια παράγωγα, αποτέλεσμα της ανατίναξης των εμπορικών εκρηκτικών υλών και εκρηκτικών μέσων αποτελούνται κυρίως από CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, και H<sub>2</sub>O (ατμός). Αναμειγμένα με αέρα αυτά είναι, μη τοξικά. Ωστόσο, δηλητηριώδη αέρια, είναι επίσης παρόντα σε μικρές περιεκτικότητες στα παράγωγα μιας ανατίναξης. Στην βιομηχανία αυτά τα τοξικά αέρια ονομάζονται αναθυμιάσεις. Οι αναθυμιάσεις δεν πρέπει να συγχέονται με τον καπνό, ο οποίος αποτελείται κυρίως από ατμό και τα στερεά παράγωγα της έκρηξης.

Παρόλο που ο καπνός είναι μη τοξικός, διαρκής έκθεση σε αυτόν, ιδιαιτέρως στον καπνό που παράγεται από δυναμίτη, μπορεί να προκαλέσει ισχυρούς πονοκεφάλους και θα πρέπει να αποφεύγεται.

Η NG είναι ισχυρά τοξική ουσία, η οποία προκαλεί με απλή εισπνοή πονοκεφάλους, λόγω της διαστολής των αιμοφόρων αγγείων και συνεπεία αυτής πτώση της πίεσης κυκλοφορίας του αίματος. Ο πονοκέφαλος μπορεί να είναι αποτέλεσμα παρουσίας μικρών σωματιδίων νιτρογλυκερίνης στον καπνό, τα οποία δεν έχουν αντιδράσει ή έχουν αντιδράσει μερικώς. Δηλητηριάσεις με NG μπορεί να προκληθούν τόσο με εισπνοή ατμών της όσο και με απορρόφηση μέσω του δέρματος. Η ιατρική βιβλιογραφία δεν αναφέρει πάντως περιπτώσεις παθολογικών καταστάσεων, που να οφείλονται σε μακροχρόνια προσβολή από έκθεση σε NG.

Τόσο η φύση όσο και η συνολική ποσότητα των δηλητηριωδών αερίων και καπνών ποικίλουν ανάλογα τον τύπο του εκρηκτικού. Για παράδειγμα, η ανατίναξη των γαλακτωμάτων ή των εκρηκτικών υγρής φάσης παράγουν σημαντικά πολύ μικρότερες ποσότητες καπνού από τον δυναμίτη. Οι αναθυμιάσεις μπορεί επίσης να ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες της χρήσης. Οτιδήποτε τείνει να ψήξει τα αέρια γρήγορα αυξάνει την δημιουργία οξειδίων του αζώτου (ISEE, 1998).

Σε υπαίθρια ανατίναξη, οι αναθυμιάσεις προκαλούν μικρή ανησυχία αν μπορούν να διασπορπιστούν από τον αέρα, αλλά σε υπόγειες εργασίες ο τύπος και η ποσότητα του εκρηκτικού, οι συνθήκες ανατίναξης, ο αερισμός και οι λοιποί παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Αντίθετα, στις υπόγειες ανατινάξεις υπάρχει σοβαρό πρόβλημα ιδιαίτερα, όταν ο αερισμός δεν είναι ικανοποιητικός, οπότε πρέπει να παρέλθει αρκετό χρονικό διάστημα για την επίσκεψη του χώρου έκρηξης. Σε αντίθεση με τις δυναμίτιδες, που οι καπνοί τους δίνουν χαρακτηριστική

οσμή πικραμύγδαλου, οι τοξικοί καπνοί από εκρήξεις ANFO και των slurries δεν δίνουν καμία προειδοποίηση (Τσουτρέλης, 1997)

Σε περιπτώσεις όπου οι αναθυμιάσεις μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα, χρησιμοποιούνται κατάλληλα κατασκευασμένα εκρηκτικά και εκρηκτικά μέσα ώστε να παράγουν ελάχιστες ποσότητες τοξικών αερίων. Ωστόσο πρέπει να αναγνωριστεί ότι ορισμένα μονοξείδια του άνθρακα και οξείδια του αζώτου μετά από επαναλαμβανόμενες ανατινάξεις μπορούν να αλλάξουν δραστικά το είδος των αερίων που παράγονται.

Ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι αυξάνουν τη συγκέντρωση των αναθυμιάσεων είναι κακή παρασκευή του προϊόντος, ανεπαρκής γόμωση, ανεπαρκής ανθεκτικότητα στο νερό, έλλειψη περιορισμού, μη αντίδραση του προϊόντος με το πέτρωμα και ατελής αντίδραση προϊόντος. Πριν από την επιστροφή στον τόπο της ανατίναξης πρέπει να περάσει κάποιο χρονικό διάστημα, διότι ορισμένα τοξικά αέρια είναι άοσμα και άχρωμα. Η απουσία καπνού μετά την ανατίναξη δεν αποτελεί εγγύηση ότι δεν υπάρχουν υψηλά επίπεδα τοξικών αερίων. Γι' αυτό ποτέ δεν πρέπει επιχειρείται επιστροφή στον τόπο ανατίναξης πριν ο εξαερισμός απομακρύνει τις αναθυμιάσεις από την περιοχή (ISEE, 1998).

Σε μερικές χώρες, οι εκρηκτικές ύλες ταξινομούνται σε κατηγορίες (fume rating ή class) ανάλογα με την φύση και τις ποσότητες των σχηματιζόμενων κατά την έκρηξη ανεπιθύμητων αερίων. Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται δεκτό ότι, για τις συσκευασμένες εντός φυσιγγίων εκρηκτικές ύλες, η έκρηξη θα λάβει χώρα εντός αυτών.

Στις Η.Π.Α, από πλευράς τοξικών αερίων, οι εκρηκτικές ύλες κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες, που έχουν ως εξής:

- 1- Παράγουν λιγότερο από  $0,16 \text{ ft}^3$  τοξικών αερίων ανά φυσίγγιο διαστάσεων  $1 \frac{1}{4} \times 8 \text{ in}$  και βάρους 200 g.
- 2- Παράγουν μεταξύ  $0,16 - 0,33 \text{ ft}^3$  τοξικών αερίων ανά φυσίγγιο διαστάσεων  $1 \frac{1}{4} \times 8 \text{ in}$  και βάρους 200 g.
- 3- Παράγουν από  $0,33 - 0,67 \text{ ft}^3$  τοξικών αερίων ανά φυσίγγιο διαστάσεων  $1 \frac{1}{4} \times 8 \text{ in}$  και βάρους 200 g.

Η χρήση εκρηκτικών υλών της κατηγορίας 1 είναι υποχρεωτική στις υπόγειες εξορύξεις εκτός εάν χρησιμοποιείται επί πλέον αερισμός, οπότε επιτρέπονται και οι εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας 2.

### 2.6.1. Μέθοδοι δοκιμής αναθυμιάσεων

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι καθορισμού της απόδοσης αναθυμιάσεων ενός εκρηκτικού. Αυτοί περιλαμβάνουν μετρήσεις στο όργανο Bichel στη συσκευή Crawshaw-Johnes, τη μέθοδο Ardeer Tank, δοκιμές στην ύπαιθρο και θεωρητικούς υπολογισμούς.

Η κατάταξη αναθυμιάσεων του IME βασίζεται στις αναθυμιάσεις οι οποίες παράγονται στο όργανο Bichel, στο οποίο περίπου 200 γραμμάρια εκρηκτικού ανατινάζεται μέσα σε ένα βαρύ κλειστό θάλαμο με χωρητικότητα περίπου 15 λίτρα. Μετά την ανατίναξη η πίεση και η θερμοκρασία καταγράφονται και τα αέρια συλλέγονται. Στερεά υπολείμματα συλλέγονται αφού τα αέρια έχουν συλλεχθεί και το δοχείο έχει ανοιχθεί (ISEE, 1998).

Υπάρχουν αρκετά προβλήματα τα οποία σχετίζονται με αναγωγή εργαστηριακών δεδομένων και πραγματική χρήση στην ύπαιθρο. Ορισμένα γαλακτώματα, εκρηκτικά υγρής φάσης και ANFO συνήθως δεν εκρήγνυνται σε τόσο μικρές ποσότητες που απαιτούνται για τις δοκιμές αυτές. Επίσης στις δοκιμές τα εκρηκτικά δεν είναι περιορισμένα και τα παραγόμενα αέρια καταλαμβάνουν γρήγορα μεγάλο όγκο, κάτι που δεν συμβαίνει σε πραγματικές συνθήκες (ISEE, 1998).

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι να ληφθούν επιτόπου μετρήσεις αμέσως μετά την έκρηξη. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο από εξειδικευμένο προσωπικό το οποίο έχει επαρκή προστασία από τα δηλητηριώδη αέρια. Επίσης χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών, ορισμένοι κατασκευαστές εκρηκτικών μπορούν να κάνουν θεωρητικές εκτιμήσεις παραγωγής ποσότητας αναθυμιάσεων. Τέτοιες προσομοιώσεις σχετίζονται αρκετά καλά με τα μετρούμενα αποτελέσματα, αλλά δεν ενδείκνυνται για να αντικαταστήσουν εργαστηριακές ή επιτόπου μετρήσεις (ISEE, 1998).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ

#### 3.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ

Στο παρελθόν η ισχύς υπολογιζόταν με βάση την δοκιμή όλμου (ballistic mortar test), κατά την οποία μετρείται η γωνία απόκλισης ενός εκκρεμούς λόγω έκρηξης 10g εκρηκτικού σε σύγκριση με την έκρηξη 10 g κοινής δυναμίτιδας. Επειδή σήμερα υπάρχουν πολλοί τρόποι υπολογισμού της ισχύος ενός εκρηκτικού, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να αναφέρεται ο τρόπος μέτρησης της ισχύος.

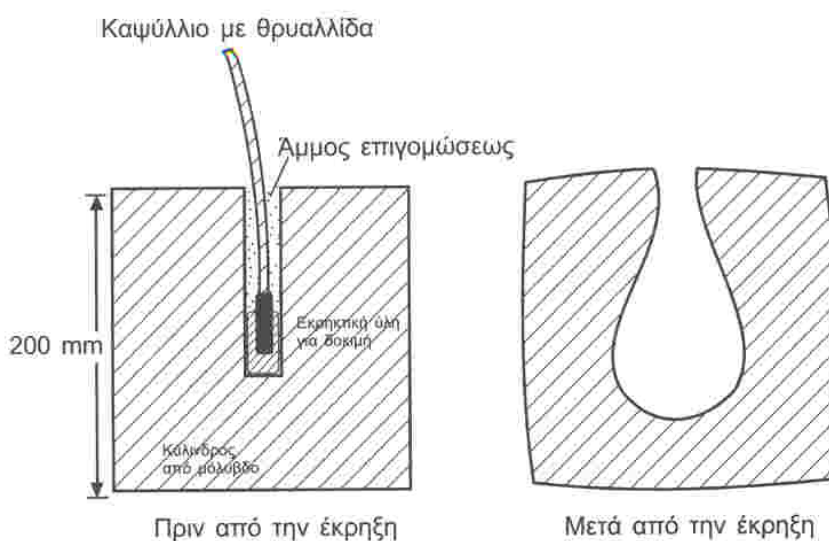
Παλαιότερα οι κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν την ποσοστιαία ισχύ (grade strength), δηλαδή το ποσοστό νιτρογλυκερίνης σε ποσότητα κοινής δυναμίτιδας που έχει την ίδια ισχύ με ίσου βάρους εκρηκτικό που αξιολογείται, και την ισχύ φυσιγγίου (cartridge strength), δηλαδή το ποσοστό νιτρογλυκερίνης σε ορισμένο όγκο κοινής δυναμίτιδας που έχει την ίδια ισχύ με ίσο όγκο του εκρηκτικού αυτού. Σημειώνεται ότι η ισχύς ενός εκρηκτικού δεν είναι ευθέως ανάλογη με την ποσοστιαία του ισχύ λόγω της συμβολής και των υπολοίπων συστατικών του κάθε μίγματος (Αγιουτάντης, 1996).

Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότερες πειραματικές δοκιμές, που χρησιμοποιεί η βιομηχανία εκρηκτικών υλών για να προσδιορίσει άμεσα ή έμμεσα ή να συγκρίνει μεταξύ τους διάφορες εκρηκτικές ύλες από πλευράς ισχύος (strength) ή παροχής ωφέλιμου έργου.

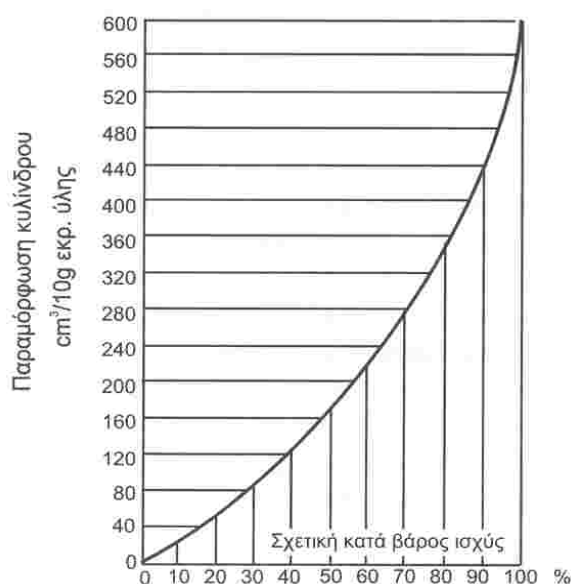
##### 3.1.1 Δοκιμή Trauzl

Κατά την δοκιμή αυτή ποσότητα 10 gr εκρηκτικής ύλης τοποθετούνται σύμφωνα με τις λεπτομέρειες του Σχ. 3.1 στον πυθμένα οπής διαμέτρου 25 mm και βάθους 120 mm. Η οπή έχει διανοιχτεί αξονικά στο κέντρο μολύβδινου κυλίνδρου διαμέτρου και ύψους 200 mm. Το βάρος της συσκευής είναι περίπου 73 kg. Η

εκρηκτική ύλη επιγομώνεται με άμμο και εναύεται με καψύλλιο Νο 8. Ύστερα από την έκρηξη μετρείται η διόγκωση του θαλάμου αφαιρώντας τον αρχικό όγκο της οπής από τον τελικό όγκο μετά την έκρηξη. Η διόγκωση αποτελεί ένα μέτρο έκφρασης της παρεχόμενης ενέργειας. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα από τις δοκιμές κατά Trauzl ευρίσκονται σε ικανοποιητικό συσχετισμό, όπως δείχνει το Σχ. 3.2, με τα αντίστοιχα των θεωρητικών υπολογισμών του μέγιστου ωφέλιμου έργου (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 3.1: Συσκευή Trauzl (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)



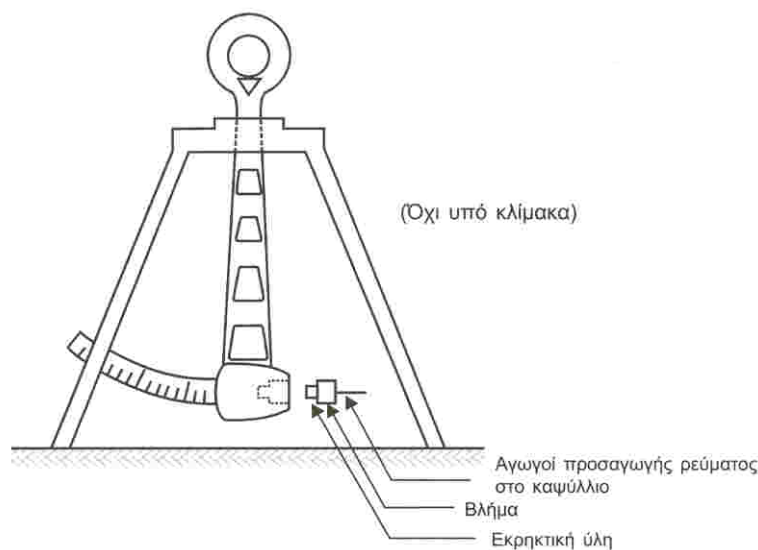
Σχ. 3.2: Σχέση ειδικής ενέργειας και σχετικής κατά βάρος ισχύος εκρηκτικών υλών σε συνάρτηση με την παραμόρφωση της συσκευής Trauzl (Κατά Meyer, 1975).

### 3.1.2 Δοκιμή βαλλιστικού εκκρεμούς

Η δομική του βαλλιστικού εκκρεμούς (ballistic pendulum) ή αλλιώς δοκιμή όλμου (ballistic mortar) πραγματοποιείται με την εικονιζόμενη στο Σχ. 3.3 συσκευή, που σχεδίασαν οι Taylor και Morris (1932).

Η συσκευή αποτελείται από ένα εκκρεμές μήκους 3 μέτρων στο άκρο του οποίου είναι αναρτημένος ο θάλαμος έκρηξης εντός του οποίου τοποθετείται ποσότητα 10 gr της υπό εξέταση εκρηκτικής ύλης. Με την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης το βλήμα εκτοξεύεται προς τα εμπρός, ενώ ο αναρτημένος θάλαμος κινείται, λόγω ανάκρουσης, προς την αντίθετη κατεύθυνση διαγράφοντας συγκεκριμένη τροχιά επί τόξου. Η μέγιστη γωνιακή απόκλιση ως προς την κατακόρυφο αποτελεί το μέτρο σύγκρισης.

Η μέθοδος του εκκρεμούς χρησιμοποιείται κυρίως στις Ευρωπαϊκές χώρες και πρόσφατα υιοθετήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ως μέθοδος δοκιμής των εκρηκτικών υλών (Τσουτρέλης, 1997).



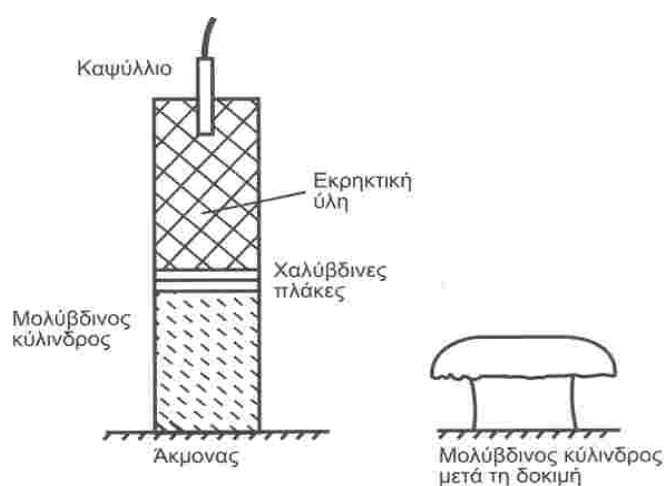
Σχ 3.3: Βαλλιστικό εκκρεμές (κατά M<sup>c</sup>Adam και Westwater, 1958).

### 3.1.3 Δοκιμή Hess

Η διάταξη της δοκιμής αυτής, που είναι γνωστή και ως δοκιμή θραυστικότητας (brisance test) δίνεται στο Σχ. 3.4. Στην άνω βάση μολύβδινου κυλίνδρου ύψους 60

mm και διαμέτρου 40 mm τοποθετείται ποσότητα εκρηκτικής ύλης 50 g ή 100 g μορφοποιημένη σε φυσίγγια από λεπτό μεταλλικό φύλλο ή από χαρτόνι ίδιας διαμέτρου με εκείνη του κυλίνδρου. Η άνω βάση προστατεύεται από δύο χαλύβδινους δίσκους πάχους 6 mm ο καθένας για την ομοιόμορφη παραμόρφωσή της. Μετά την έκρηξη, που πραγματοποιείται με Νο 8 καψύλλιο, μετρείται η μείωση του ύψους που προκλήθηκε στον μολύβδινο κύλινδρο. Η μείωση αυτή εκφράζει την θραυστικότητα κατά Hess της υπόψη εκρηκτικής ύλης. Σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών εκρηκτικών υλών όπου είναι δυνατόν να καταστραφεί ολοσχερώς ο μολύβδινος κύλινδρος κατά την έκρηξη, στον χαρακτηρισμό της θραυστικότητας σημειώνεται "διάλυση κυλίνδρου".

Μερικές ενδεικτικές τιμές της κατά Hess θραυστικότητας είναι: Για το ANFO 5 mm, για τις αμμωνίτιδες 10-12 mm, για τις ζελατινοδυναμίτιδες από 10-30 mm, ενώ οι ισχυρές ζελατίνες διαλύουν τον κύλινδρο (Τσουτρέλης, 1997).



Σχ. 3.4: Συσκευή μέτρησης θραυστικότητας κατά Hess (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

### 3.1.4 Δοκιμή κρατήρα

Κατά την δοκιμή κρατήρα (cratering method) μετρείται ο όγκος κρατήρα, που θα σχηματισθεί στο πέτρωμα, όταν μια ποσότητα εκρηκτικής ύλης εκραγεί σε βάθος που αντιστοιχεί στο **κρίσιμο βάθος** (το βάθος το οποίο, όταν εκραγεί η προς μέτρηση εκρηκτική ύλη, τα αποτελέσματα της έκρηξης μόλις ανιχνεύονται στην επιφάνεια του πετρώματος). Ο όγκος, που θα προκύψει, συγκρίνεται με εκείνο της εκρηκτικής ύλης

αναφοράς. Η μέθοδος για να εφαρμοσθεί με επιτυχία απαιτεί να υπάρχει σε μεγάλη έκταση ομοιόμορφο πέτρωμα καθώς και την πραγματοποίηση εκτεταμένης σειράς δοκιμών για τον προσδιορισμό του κρίσιμου βάθους της εξεταζόμενης εκρηκτικής ύλης και εκείνης της αναφοράς. Λόγω του υψηλού κόστους των δοκιμών αυτών η μέθοδος κρατήρα σπάνια χρησιμοποιείται (Τσουτρέλης, 1997).

## **3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ**

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες πειραματικές δοκιμές για την μέτρηση της ευαισθησίας (sensitivity) των εκρηκτικών υλών. Μεταξύ των δοκιμών αυτών διακρίνονται εκείνες που αναφέρονται στην ευαισθησία ως προς την έναυση (λειτουργική ευαισθησία) και εκείνες, που αναφέρονται στην ευαισθησία κατά τον χειρισμό των εκρηκτικών υλών (επικινδυνότητα ή ευαισθησία σε κρούση).

### **3.2.1 Μέτρηση της λειτουργικής ευαισθησίας**

Οι δοκιμές αυτές αποσκοπούν στο να καθορίσουν την απαιτούμενη ισχύ του μέσου έναυσης για την ικανοποιητική εκρηκτική διέγερση της εκρηκτικής ύλης κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται στην συνέχεια η έκρηξη ολόκληρης της εκρηκτικής στήλης.

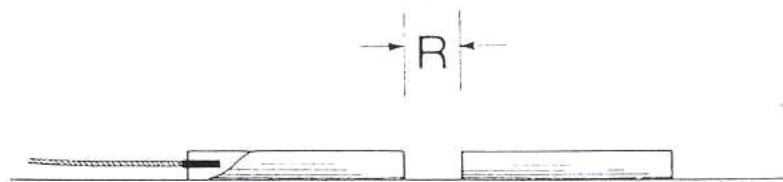
Η πιο συνηθισμένη δοκιμή είναι εκείνη του διάκενου αέρα (gap sensitivity). Σε αυτή μετρείται το μέγιστο διάκενο του αέρα R που απαιτείται μεταξύ του δότη (εκρηκτική ύλη εναυόμενη κατάλληλα) και του δέκτη (εκρηκτική ύλη για έναυση από τον δότη).

Στην περίπτωση του ελέγχου της ευαισθησίας των δυναμίτιδων χρησιμοποιείται συνήθως η δοκιμή με δότη και δέκτη από μισό φυσίγγιο ο κάθε ένας με διάμετρο φυσιγγίου 30 mm (1 ¼ in). Η δοκιμή μπορεί να γίνει και με ολόκληρα φυσίγγια για δότη και δέκτη. Στα αποτελέσματα των δοκιμών πρέπει να καθορίζεται εάν η δοκιμή έγινε με μισό ή ολόκληρο φυσίγγιο, γιατί η απόσταση R που προκύπτει είναι προφανώς διαφορετική (Τσουτρέλης, 1997).

Η ευαισθησία διάκενου αέρα μετράται τοποθετώντας δύο φυσίγγια ομόκεντρα



πάνω σε μολύβδινη πλάκα, όπως δείχνει το Σχ. 3.5 και με μία σειρά μετρήσεων καθορίζεται η μέγιστη απόσταση  $R$ , στην οποία επιτυγχάνεται έκρηξη από το ένα φυσίγγιο (δοτής) στο άλλο (δέκτης) (Berta, 1990).



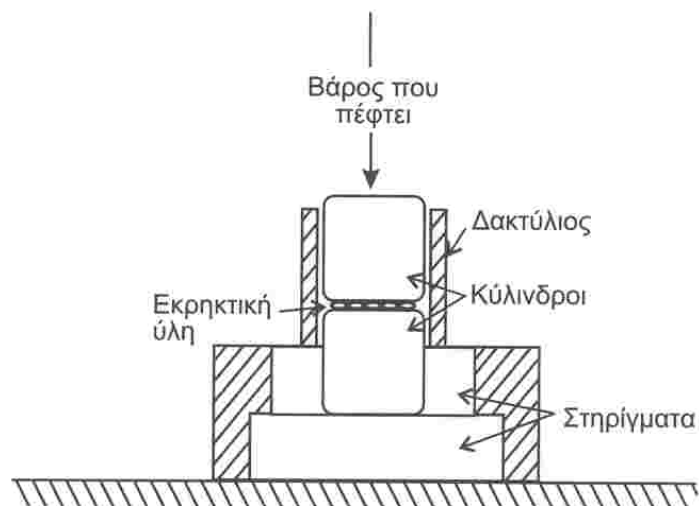
Σχ. 3.5: Πειραματική διάταξη μέτρησης της ευαισθησίας μιας εκρηκτικής ύλης ως προς την έναυση (Πηγή: Berta, 1990).

### 3.2.2 Μέτρηση της ευαισθησίας σε κρούση και τριβή

Ορισμένα εκρηκτικά μπορούν να εναυθούν με υποχηητικά διεγερτικά μέσα όπως η τριβή και η κρούση. Για λόγους ασφαλείας πρέπει να είναι γνωστός ο βαθμός ευαισθησίας όταν αντιμετωπίζονται τέτοιες πράξεις, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό και την μεταφορά.

Η μέτρηση ευαισθησίας σε κρούση πραγματοποιείται με την πτώση ενός βάρους από 0,5 έως 10 kg από διάφορα ύψη σε ένα αμόνι, πάνω στο οποίο έχει τοποθετηθεί περίπου 0.1 g της εξεταζόμενης εκρηκτικής ύλης, μέχρι να επιτευχθεί έκρηξη (Σχ. 3.6). Η προς δοκιμή εκρηκτική ύλη τοποθετείται σε μορφή λεπτού στρώματος ομοιόμορφα κατανεμημένου στην επιφάνεια επαφής των δύο κυλίνδρων

Για παράδειγμα με βάρος 2 kg ο βροντώδης υδράργυρος εκρήγνυται από ύψος 1 με 2 cm, η νιτρογλυκερίνη από 4 με 5 cm, ο δυναμίτης από 15 με 30 cm και εκρηκτικά με βάση το νιτρικό αμμώνιο. Η παράμετρος που προσδιορίζεται είναι η απαιτούμενη κρουστική ενέργεια σε kg.m για την πρόκληση έκρηξης στο δείγμα (Jimeno and others, 1995).



Σχ. 3.6: Συσκευή προσδιορισμού της ευαισθησίας σε κρούση (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η ευαισθησία σε κρούση ορισμένων εκρηκτικών ουσιών και εκρηκτικών υλών όπως αυτές μετρήθηκαν με την παραπάνω συσκευή.

Πίνακας 3.1: Ευαισθησία σε κρούση ορισμένων εκρηκτικών ουσιών και υλών (Πηγή: Τσουτρέλης, 1997)

Εκρηκτική ουσία ή εκρηκτική ύλη	Απαιτούμενη ενέργεια σε kg.m για την έναυση της
Νιτρογλυκερίνη(NG)	0.02
Βροντώδης υδράργυρος	0.20
PETN	0.30
RDX	0.75
Αζίδιο του μολύβδου	0.75
TNT	1.50
Ζελατινοδυναμίτιδες	0.20
Αμμωνίτιδες	1.00
ANFO και Slurries χωρίς NG	2.00

Οι πιο συνηθισμένη δοκιμή μέτρησης τριβής είναι η δοκιμή Julius Peter κατά την οποία μία εκρηκτική ύλη υπόκειται σε διαδικασία τριβής μεταξύ δύο μη

γυαλισμένων πορσελάνινων επιφανειών. Μετά από την διαδικασία τυχόν ανθρακοποίηση, καύση ή έκρηξη παρατηρείται πάνω στην επιφάνεια της πορσελάνης. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε κιλά τα οποία ανταποκρίνονται στην πίεση που ασκεί η επιφάνεια της πορσελάνης στο εκρηκτικό (Jimeno and others, 1995).

### 3.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΕΚΡΗΞΗΣ

Για την μέτρηση της πίεσης έκρηξης χρησιμοποιείται η δοκιμή του ενυδρείου (Aquarium Technique) σε διάφορες πειραματικές παραλλαγές. Στην δοκιμή αυτή ορισμένη ποσότητα εκρηκτικής ύλης εκρήγνυται υποβρυχίως εντός κατάλληλης μικρής υδατοδεξαμενής

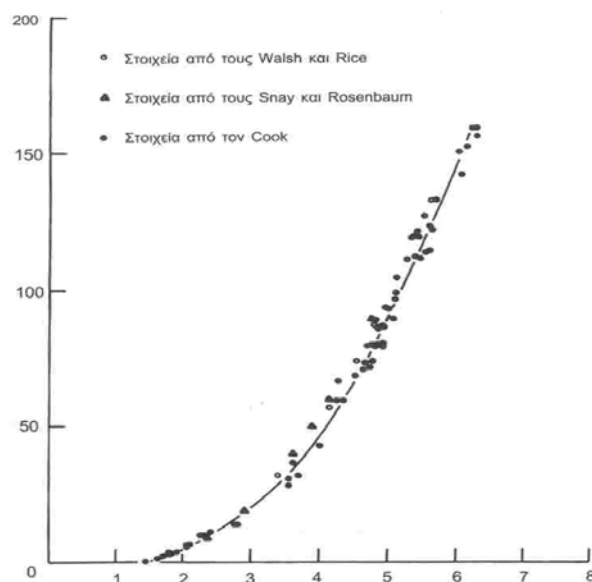
Κατά την πειραματική έκρηξη μέσα στο νερό με την βοήθεια φωτογραφικής μηχανής μεγάλης ταχύτητας λήψης παρακολουθείται η διάδοση του κρουστικού κύματος ως μια διαταραχή στο νερό. Από αυτήν προκύπτει η ταχύτητα διάδοσης  $V_{iw}$  της έκρηξης εντός του νερού. Με την βοήθεια του διαγράμματος του Σχ. 3.7 υπολογίζεται στην συνέχεια η πίεση έκρηξης  $P_{iw}$  εντός του νερού. Ακολουθώντας με την χρησιμοποίηση της σχέσεως 3.1 του Goranson για τις "ασύμβατες σύνθετες αντιστάσεις" (impedance mismatch) υπολογίζεται η πίεση έκρηξης από την σχέση:

$$P_f = \frac{P_{iw} \cdot [(\rho V)_{iw} + \rho_1 \cdot D]}{2(\rho V)_{iw}} \quad (3.1)$$

όπου:

- $P_f$  = πίεση έκρηξης στο μέτωπο της αντίδρασης.
- $P_{iw}$  = αρχική πίεση του νερού. Προκύπτει από την αρχική ταχύτητα διάδοσης της έκρηξης εντός του νερού  $V_{iw}$  με την βοήθεια του διαγράμματος του Σχ. 3.7
- $\rho_1$  = πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.
- $D$  = ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης
- $(\rho V)_{iw}$  = σύνθετη αντίσταση του νερού. Το γινόμενο της πυκνότητάς του επί την ταχύτητα διάδοσης του κυματικού παλμού εντός αυτού.

Η σχέση της πίεσης έκρηξης  $P_f$  με την πίεση έκρηξης  $P_d$  (πίεση που σημειώνεται στο επίπεδο των Chapman και Jouguet) υπολογίζεται θεωρητικά από την υδροδυναμική θεωρία της έκρηξης και πειραματικά με την μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης. Το γενικό συμπέρασμα των παρατηρήσεων του Cook είναι ότι ο λόγος  $P_f/P_d$  βρίσκεται περίπου στη μονάδα.



Σχ. 3.7: Σχέση μεταξύ της αρχικής ταχύτητας διάδοσης του κρουστικού κύματος και της αρχικής πίεσης έκρηξης  $P_{iw}$  για την περίπτωση έκρηξης εντός νερού (Cook, 1974).

Μία παραλλαγή της παραπάνω δοκιμής η πίεση που σημειώνεται εντός του νερού  $P_{iw}$  μετρείται η παραμόρφωση, που δέχεται χάλκινη ή μολύβδινη μεμβράνη ευρισκόμενη σε σταθερή απόσταση από το σημείο της έκρηξης. Επίσης στη θέση του παραπάνω μηχανικού τρόπου μέτρησης της κρουστικής πίεσης χρησιμοποιούνται ηλεκτρομηχανικοί τρόποι μέτρησής της, που χρησιμοποιούν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και παλμογράφο (Τσουτρέλης, 1997)

### 3.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΚΡΗΞΗΣ

Η ταχύτητα έκρηξης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας εκρηκτικής ύλης σε μια ανατίναξη γιατί από αυτήν εξαρτάται η επιτυχία της. Όσο πλησιέστερα βρίσκεται η

ταχύτητα έκρηξης στην ιδανική ταχύτητά της, τόσο καλύτερη καύση και επομένως επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση του εκρηκτικού.

Οι μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες : Ασυνεχείς και συνεχείς μέθοδοι μέτρησης. Οι ασυνεχείς μέθοδοι αποτελούνται από μέτρηση ανάμεσα σε 2 ή περισσότερα σημεία, ενώ οι συνεχείς μέθοδοι αποτελούνται από μέτρηση-ανάλυση σε όλη την στήλη γόμωσης.

Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να εφαρμοστούν κάτω από διάφορες συνθήκες. Μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης σε εκρηκτικά περιορισμένα ή μη και ακόμα παρουσία νερού σε υψηλές πιέσεις παρέχουν πληροφορίες σχετικά με διαφορετικών συστάσεων εκρηκτικά για τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Παρακάτω παρουσιάζονται όλες οι τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα για την μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης (Baliktsis, 2002).

### **3.4.1 Ασυνεχείς μέθοδοι μέτρησης**

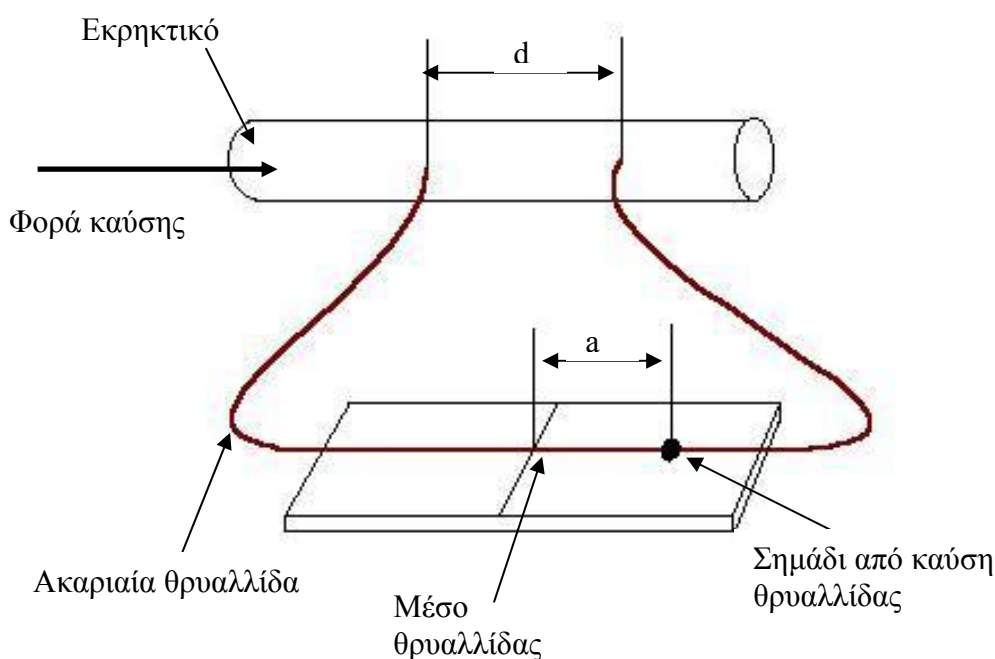
Για την μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης μιας σχετικά μικρής στήλης εκρηκτικού, είναι απαραίτητη η μέτρηση μιας πολύ μικρής διάρκειας χρόνου με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ένα τυπικό μέτωπο έκρηξης μπορεί να διανύσει 1 πόδι (1 ft) σε 1/10.000 του δευτερολέπτου. Για δοκιμή αυτού του είδους χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό όργανο το οποίο είναι ικανό να μετράει με ακρίβεια χρόνους 1/10.000.000 του δευτερολέπτου (0,1  $\mu$ s).

Οι «στόχοι ταχύτητας» ή αλλιώς «επαφές χρονογράφου» εισάγονται στο εκρηκτικό σε προκαθορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Οι στόχοι ταχύτητας μοιάζουν με ηλεκτρικά καψύλλια αλλά έχουν μόνο δύο αυτόνομα μεταξύ τους καλώδια, τα οποία βρίσκονται μέσα σε ένα κέλυφος από χαλκό ή αλουμίνιο. Το ωστικό κύμα της έκρηξης διαλύει το κέλυφος και φέρνοντας τα δύο καλώδια σε επαφή, κλείνει το κύκλωμα. Ο πρώτος στόχος ταχύτητας δίνει εντολή στον χρονογράφο να αρχίσει την εγγραφή και ο δεύτερος δίνει εντολή να σταματήσει. Η διαίρεση της απόστασης των στόχων ταχύτητας με τον χρόνο αυτό δίνει την ταχύτητα έκρηξης του εκρηκτικού. Πολλές δοκιμές χρησιμοποιούν δύο καλώδια ενωμένα στην άκρη, στη θέση των στόχων ταχύτητας. Με αυτή τη μέθοδο ο μετρητής αρχίζει και σταματάει με το άνοιγμα ενός κυκλώματος παρά με το κλείσιμο του (ISEE, 1998).

Στο εμπόριο υπάρχουν και αισθητήρες από οπτικές ίνες. Αυτοί οι αισθητήρες λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν τα συστήματα με καλώδιο αλλά χρησιμοποιούν οπτικά καλώδια που εκμεταλλεύονται το φως το οποίο παράγεται από το μέτωπο έκρηξης για να δώσει εντολή να ξεκινήσει ή να σταματήσει τον μετρητή.

#### 3.4.1.1 Η μέθοδος D'Autriche

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για αρκετά χρόνια, πριν τα σημερινά σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα και βασίζεται στην σύγκριση της ταχύτητας έκρηξης του εκρηκτικού με την γνωστή ταχύτητα μιας ακαριαίας θρυαλλίδας ( $VD_{\theta}$ ).



Σχ. 3.8: Πειραματική διάταξη προσδιορισμού ταχύτητας έκρηξης με τη μέθοδο D'Autriche

Στη μέθοδο (Σχ. 3.8) αυτή χρησιμοποιείται μια μολύβδινη πλάκα – η οποία έχει ένα σημάδι – πάνω στην οποία τοποθετείται μια θρυαλλίδα γνωστού μήκους. Το μέσο της σημαδεύεται και τοποθετείται έτσι ώστε να συμπίπτει με το σημάδι της πλάκας. Κατόπιν τα άκρα της θρυαλλίδας εισάγονται στο εκρηκτικό έχοντας μια συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους ( $d$ ). Το εκρηκτικό εναύεται από το ένα του

άκρο. Καθώς το μέτωπο της έκρηξης προχωράει τα άκρα της ακαριαίας θρυαλλίδας εναύονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και η συνάντησή τους λαμβάνει χώρα πάνω στην μολύβδινη πλάκα αφήνοντας ανά σημάδι σε απόσταση (a) από το μέσο της θρυαλλίδας. Οπότε η ταχύτητα έκρηξής του εκρηκτικού (VDe) καθορίζεται από τον τύπο:

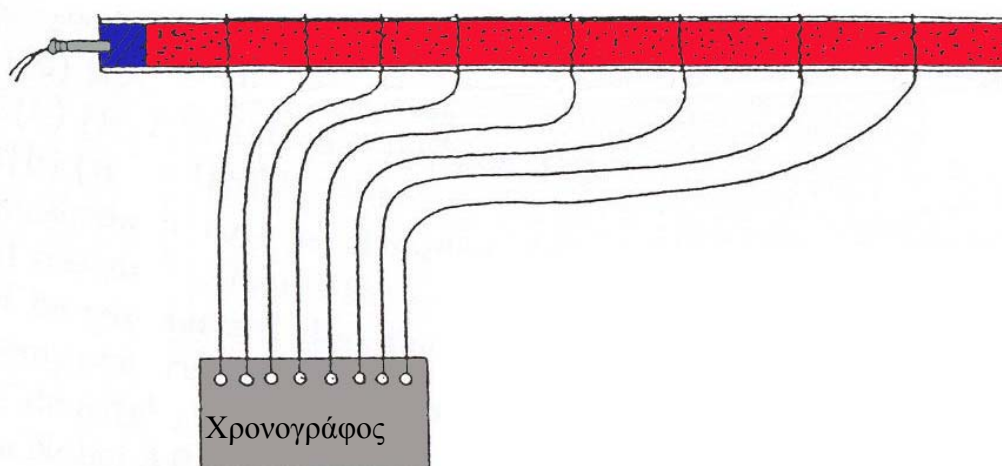
$$VDe = \frac{VD_0 \cdot d}{2a} \quad (3.2)$$

Μολονότι αυτή η μέθοδος φαντάζει αρχαία και πρωτόγονη μπορεί να φανεί χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα δεν είναι διαθέσιμα. Η ακρίβεια αυτής της μεθόδου είναι παραπάνω από επαρκής για μη εργαστηριακές δοκιμές (ISEE, 1998).

#### 3.4.1.2 Μέθοδος χρονογράφου

Η μέθοδος αυτή συνίσταται από δύο ή περισσότερους αισθητήρες οι οποίοι εισάγονται στο εκρηκτικό σε καθορισμένη απόσταση μεταξύ τους (d). Η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων μπορεί να μην είναι σταθερή, αλλά αυτοί να τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις στην εκρηκτική ύλη. Η ταχύτητα έκρηξης μπορεί να μετρηθεί από την διαφορά του χρόνου ενεργοποίησης ( $\Delta t$ ) του κάθε αισθητήρα. Η ταχύτητα έκρηξής του εκρηκτικού (VDe) καθορίζεται από τον τύπο :

$$VDe = \frac{d}{\Delta t} \quad (3.3)$$



Σχ. 3.9: Σχηματική διάταξη προσδιορισμού ταχύτητας έκρηξης με τη μέθοδο χρονογράφου

Σήμερα υπάρχουν όργανα τα οποία μπορούν να δώσουν απ'ευθείας την ταχύτητα έκρηξης και με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι κατασκευασμένοι από απλό καλώδιο ή ακόμα από οπτικές ίνες (Jimeno and others, 1995).

### 3.4.2 Συνεχείς δοκιμές μέτρησης.

Διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της διακύμανσης της ταχύτητας έκρηξης κατά μήκος της στήλης εκρηκτικού. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές ο μηχανικός μπορεί να μελετήσει τις επιδράσεις των διαφόρων συνθηκών στην ταχύτητα έκρηξης.

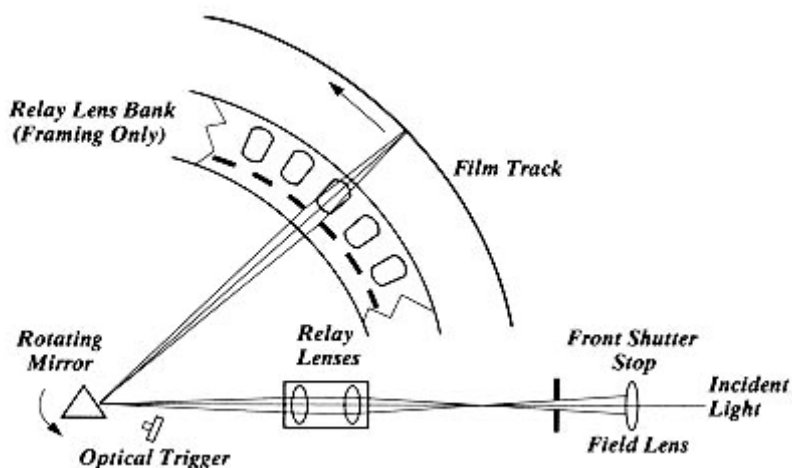
#### 3.4.2.1 Κάμερες ταχείας λήψης

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο πρίσμα – καθρέπτη ο οποίος σαρώνει την εικόνα από μια ανατίναξη και την αποτυπώνει κατά μήκος μίας ταινίας ενός φιλμ. Η κάμερα καταγράφει το φως από το μέτωπο της ανατίναξης, το οποίο περνάει από μία στενή σχισμή. Πάνω στην ταινία ο ένας άξονας είναι ο χρόνος



και ο άλλος η απόσταση. Η κλίση του καταγραμμένου φωτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας έκρηξης από την γνωστή ταχύτητα περιστροφής της εικόνας πάνω στην ταινία. Αυτή η μέθοδος μπορεί να καταγράψει μια ελάχιστη αλλαγή στην ταχύτητα έκρηξης ενός καψυλλίου. Εξ ορισμού σχεδόν, αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για καψύλλια και όχι για μακριές στήλες εκρηκτικού.

Η κάμερα περιστρεφόμενου καθρέπτη (rotating mirror camera) κατευθύνει την εικόνα ενός πυροδοτημένου εκρηκτικού σε μία στάσιμη ταινία φιλμ εκμεταλλεύοντας ένα περιστρεφόμενο πρίσμα (Σχ. 3.10.) Επειδή το φιλμ είναι στάσιμο, άρα το μήκος του περιορισμένο, ο μέγιστος αριθμός των φωτογραφιών είναι μόνο 24. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να υπάρχει πολύ μεγάλη ακρίβεια στη χρονική στιγμή στην οποία θα γίνει η καταγραφή.



Σχ. 3.10: Τρόπος λειτουργίας κάμερας περιστρεφόμενου καθρέπτη (Πηγή: Cordin, 2003)

Οι κάμερες περιστρεφόμενου καθρέπτη μπορούν να κάνουν εγγραφές μέχρι και 25 εκατομμύρια καρέ το δευτερόλεπτο. Στο Σχ. 3.11 παρουσιάζεται μια σειρά από φωτογραφίες από μια τέτοια κάμερα που δείχνει την έκρηξη ενός καψυλλίου.



Σχ. 3.10 Έκρηξη ατσάλενιου κυλινδρικού καψυλλίου με μπρούντζινους δακτυλίους με ταχύτητα λήψης 1 εκατομμύριο καρέ το δευτερόλεπτο (Πηγή: Cordin, 2003)

Γνωρίζοντας το ρυθμό περιστροφής της ταινίας και την απόσταση που διανύει το μέτωπο της έκρηξης από καρέ σε καρέ, η ταχύτητα έκρηξης του καψυλλίου μπορεί να υπολογιστεί. Οι κάμερες αυτές είναι για εργαστηριακή χρήση μόνο.

Η ταχύτερη κινηματογραφική μηχανή που λειτουργεί σήμερα είναι της εταιρίας Cordin Scientific Imaging και είναι απίστευτα γρήγορη: για να προβληθούν σε κλασική κινηματογραφική ταχύτητα οι εικόνες που κατέγραψε το ψηφιακό μοντέλο (ταχύτητας 200 εκατομμυρίων καρέ ανά δευτερόλεπτο) σε ένα μόνο δευτερόλεπτο, θα χρειαζόνταν 96 μέρες (Cordin, 2003)

### 3.4.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΙΧΜΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί γυμνά καλώδια απομονωμένα από το γειωμένο κύκλωμα σε ένα εκρηκτικό. Το ιονισμένο μέτωπο έκρηξης κλείνει το κύκλωμα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί πολλαπλούς στόχους σε προκαθορισμένες αποστάσεις κατά μήκος της εκρηκτικής στήλης. Όταν το μέτωπο της ανατίναξης καταστρέφει τους στόχους, ή κλείσει το κύκλωμα, ένας πυκνωτής απόφορτίζεται αμέσως σε μία

γεννήτρια. Οι κορυφές του ρεύματος που παράγονται τροφοδοτούνται στην εισαγωγή ενός παλμογράφου ή σε παροδικό ψηφιοποιητή. Η ταχύτητα έκρηξης υπολογίζεται από την απόσταση μεταξύ στα καρφιά τα οποία παρουσιάζονται στην εγγραφή του παλμογράφου ή του παροδικού ψηφιοποιητή και την γνωστή απόσταση μεταξύ των στόχων. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη στον καθορισμό των διαφοροποιήσεων στην ταχύτητα έκρηξης σε εκρηκτικά των οποίων η ταχύτητα μεταβάλλεται κατά μήκος της στήλης. Τέτοια είναι εκρηκτικά χαμηλής ευαισθησίας και μικρής διαμέτρου (ISEE, 1998).

### **3.4.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ**

Αυτή η δοκιμή απαιτεί μία υψηλής αντίστασης μεταλλικό άκρο επαφής κυκλώματος (ακίδα), μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος και έναν παλμογράφο. Η ακίδα η οποία αποτελείται από καλώδιο γνωστής, σταθερής ωμικής αντίστασης ανά μονάδα μήκους τοποθετείται κατά μήκος της εκρηκτικής στήλης για να μετρηθεί. Καθώς η έκρηξη εξελίσσεται κατά μήκος της διατρητικής στήλης, το καλώδιο βραχυκυκλώνεται από το ιονισμένο μέτωπο έκρηξης. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι το κύκλωμα παραμένει κλειστό. Κατά την εξέλιξη της έκρηξης το μήκος και κατά αναλογία η ωμική αντίσταση του καλωδίου μειώνονται. Η γεννήτρια διοχετεύει στο καλώδιο ρεύμα συγκεκριμένης έντασης και η μονάδα μέτρησης ανιχνεύει διαφοροποιήσεις της τάσης. Τα δεδομένα τροφοδοτούνται σε ένα φορητό υπολογιστή ο οποίος μεταφράζει τον ρυθμό της αλλαγής της τάσης σε αλλαγή της ωμικής αντίστασης και επομένως αλλαγής μήκους. Τα αποτελέσματα παρατηρούνται στην οθόνη του παλμογράφου. Από αυτήν μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα έκρηξης σε κάθε σημείο της στήλης και σε κάθε χρονική στιγμή (ISEE, 1998).

### **3.4.2.4 Μέθοδος CORRTX**

Μια περισσότερο μοντέρνα μέθοδος απόκτησης σχεδόν συνεχόμενων μετρήσεων της ταχύτητας έκρηξης σε όλα ή σε πολλά διατρήματα σε μία ανατίναξη είναι η μέθοδος CORRTX (Continuous Reflectometry for Radius Versus Time Experiments), η οποία αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο δοκιμών της

Nevada των Η.Π.Α. για πυρηνικά πειράματα. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιεί μία τεχνική ηλεκτρονικής μέτρησης που βασίζεται σε έναν μικροεπεξεργαστή - παρόμοια με Αυτή των ραντάρ – για την μέτρηση του μήκους ενός ομόκεντρου συνηθισμένου καλωδίου σε σχέση με τον χρόνο. Το καλώδιο κατεβάζεται στον πάτο ενός διατρήματος και μετά πάλι επάνω, και ξανά το ίδιο στο επόμενο διάτρημα και ούτο καθ' εξής μέχρι να καλυφθούν όλα τα διατρήματα στα οποία επιθυμούνται να μετρηθεί η ταχύτητα έκρηξης. Ένα σήμα μικροκυμάτων στέλνεται από την μία άκρη του καλωδίου και το άλλο τοποθετείται στον πάτο του πρώτου διατρήματος που θα εναυθεί. Το καλώδιο τοποθετείται στα υπόλοιπα διατρήματα με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται το μήκος του καθώς η ανατίναξη εξελίσσεται κατά μήκος μίας διατρητικής στήλης η μία μετά από την άλλη. Το σήμα μικροκυμάτων συγκρίνει το κύμα που λαμβάνει από την μείωση του μήκους του καλωδίου καθώς το μέτωπο της έκρηξης προχωράει με το συνεχόμενο σήμα που στέλνεται στο καλώδιο. Κατόπιν η πληροφορία τροφοδοτείται σε μια μονάδα ανάλυσης η οποία καταγράφει την τοπική ταχύτητα έκρηξης σε κάθε διάτρημα σαν συνάρτηση της θέσης κατά μήκος του καλωδίου.

Η μέθοδος CORRTX είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη επειδή δίνει πληροφορίες όχι μόνο για την ταχύτητα έκρηξης κάθε διατρήματος, αλλά και την καθυστέρηση κάθε καψυλλίου. Ταυτοχρόνως δίνει πληροφορίες για το πώς επηρεάζεται η ταχύτητα έκρηξης σε ένα διάτρημα από μία που έπεται μίας πυροδότησης ενός κοντινού διατρήματος (ISEE, 1998).

#### **3.4.2.5 Μέθοδος SLIFER**

Η μέθοδος SLIFER (Shorted Location Indication by Frequency of Electrical Resonance) αρχικά αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια της Sandia των Η.Π.Α. για την μέτρηση διάδοσης του ωστικού κύματος από πυρηνικές εκρήξεις. Αποτελείται από ένα ομόκεντρο καλώδιο το οποίο είναι συνδεδεμένο σε ένα εκρηκτικό. Το καλώδιο αποτελεί μέρος ενός κυκλώματος παλμογράφου, η συχνότητα του οποίου εξαρτάται από το μήκος του καλωδίου. Κατά την εξέλιξη της ανατίναξης το μήκος του καλωδίου μειώνεται και η συχνότητα της ταλάντωσης αυξάνεται. Παρατηρώντας αυτή την συχνότητα σε συνάρτηση με τον χρόνο, μπορεί να προσδιοριστεί ο ρυθμός

μεταβολής μήκους του καλωδίου, προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την τιμή της ταχύτητα έκρηξης. Ένα μηχάνημα καθιστά ικανή την μετατροπή της μετρούμενης συχνότητας σε μετρήσεις τάσης σε πραγματικό χρόνο. Η πληροφορία τότε μετατρέπεται σε γραμμική μορφή και η ταχύτητα έκρηξης αποκομίζεται από την κλίση της ευθείας στην γραφική παράσταση μήκους καλωδίου - χρόνου.

Η μέθοδος SLIFER χρησιμοποιεί ένα ομόκεντρο καλώδιο αντίστασης (50-75 ohms). Η τοποθέτηση του καλωδίου γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν στη μέθοδο αντίστασης καλωδίου (ISEE, 1998).

### 3.4.3 Περιγραφή οργάνου

Η συσκευή μέτρησης ταχύτητας έκρηξης VODmate της Instantel (Σχ. 3.12) είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για οποιονδήποτε του οποίου το αντικείμενο εργασίας είναι τα εκρηκτικά.



Σχ. 3.12: Συσκευή μέτρησης ταχύτητας έκρηξης VODmate της Instantel (πηγή: Instantel, 2003)

Μπορεί να βοηθήσει στην γρήγορη και εύκολη διάγνωση προβλημάτων σε περιπτώσεις εκρήξεων, τα οποία σχετίζονται με διάφορες ποιότητες προϊόντων, δύσκολες συνθήκες διατρήματος, ή περιπτώσεις μη ιδανικού σχεδιασμού έκρηξης. Στο συγκεκριμένο όργανο μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης εφαρμόζεται η μέθοδος της αντίστασης καλωδίου. Οι τεχνικές προδιαγραφές της συσκευής VODMate δίνονται στον Πίνακα 3.2

Πίνακας 3.2: Τεχνικές προδιαγραφές της συσκευής VODMate (πηγή: Instantel, 2003)

Κανάλια	Επιλογή 1 ή 2 κανάλια
Ανάλυση	Επιλογή 12 bit ή 14 bit
Ρυθμός δείγματος	Μέχρι 2 MHz ανά κανάλι
Χρόνος εγγραφής	1 κανάλι – μέχρι 2 s σε ρυθμό δείγματος 1 MHz 2 κανάλια – μέχρι 1 s σε ρυθμό δείγματος 1 MHz
Ρυθμίσεις εγγραφής	Χειροκίνητη, μονή, συνεχόμενη
Δυνατότητα αποθήκευσης	Μνήμη 4 MB, ποσότητα αρκετή για μέχρι 40 γεγονότα των 100ms με ένα μόνο κανάλι
Προ-ενεργοποίηση	0 έως 100% του συνολικού χρόνου εγγραφής, ανάλογα τον προγραμματισμό
Ρυθμίσεις ενεργοποίησης	Εσωτερικό σήμα από την συσκευή ή εξωτερικό με ενεργοποίηση καλωδίου
Αυτόματες ρυθμίσεις	Αυτόματη ρύθμιση για μέγιστη ανάλυση και εγγραφή όλων των εν λειτουργία παραμέτρων

Καλώδιο μέτρησης ταχύτητας έκρηξης	Εύκαμπτο καλώδιο-αισθητήρας για χρήση σε διατρήματα ή για δοκιμή δειγμάτων μεγάλου μήκους εκρηκτικών (8.4 Ohms/m, ρολό 300 m)
Βέργα ταχύτητας έκρηξης	Ακαμπτη βέργα μήκους 1 m για δοκιμή μικρών κομματιών εκρηκτικής στήλης ή για μικρού μήκους δείγματα εκρηκτικών 240 Ohms/m (75 Ohms/ft) [δέμα των 12]
Άλλα	Συμβατά με τα περισσότερα καλώδια μέτρησης ταχύτητας έκρηξης και μεγάλης αντίστασης καλώδια από άλλους κατασκευαστές

Διαστάσεις	81 x 92 x 160 mm
Βάρος	1.9 kg
Μπαταρία	Επαναφορτιζόμενη 6V. Ικανή για 13 ώρες εγγραφής σε ρυθμό δείγματος 2 MHz, σε απλό κανάλι, με 100 m καλωδίου μέτρησης
Διεπαφή με το χρήστη	Όλες οι ρυθμίσεις μπορούν να προγραμματιστούν είτε μέσω του λογισμικού Blastware, είτε μέσω του πληκτρολογίου της μονάδας VODMate. Αυτή η διεπαφή δίνει τον απαραίτητο έλεγχο για γρήγορη προσαρμογή στις αλλαγές της ανατίναξης, δίχως την ανάγκη πρόσθετου H/Y
Οθόνη	4-γραμμών x 20-χαρακτήρων LCD
Διεπαφή με τον H/Y	RS-232
Περιβαλλοντικά	
Θερμοκρασία λειτουργίας	-20°C έως 60°C
Θερμοκρασία λειτουργίας LCD	-10°C έως 50°C
Συνοδευόμενα	Μονάδα VODMate, λογισμικό Blastware Analysis, μετασχηματιστής, καλώδιο σύνδεσης RS-232, οδηγίες λειτουργίας, καλώδιο-αισθητήρας RG-58 , υφασμάτινη θήκη μεταφοράς
Λογισμικό	Το λογισμικό Blastware Analysis προσφέρει πλήρη εγκατάσταση εργαλεία λογισμικού για την μονάδα VODMate, καθώς και αυτόματη ψηφιακή επεξεργασία σήματος και απλά εργαλεία για προσδιορισμό της ταχύτητας έκρηξης και χρόνων καθυστέρησης

### **3.4.4 Ρυθμίσεις οργάνου - Διαδικασία μέτρησης**

#### **3.4.4.1 Απαιτούμενα υλικά – αναλώσιμα**

Για την μέτρηση ταχύτητας έκρηξης απαιτούνται

- Καλώδιο μέτρησης VOD της Instantel ελάχιστης ωμικής αντίστασης 84 Ohms. Το Καλώδιο μέτρησης έχει σταθερή ωμική αντίσταση 8,435 ohms/m.
- Καλώδιο προέκτασης το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για σύνδεση του καλωδίου VOD και του οργάνου μέτρησης VODMate.
- Κόπτες καλωδίου.
- Μονωτική ταινία.

#### **3.4.4.2 Σχεδιασμός της μέτρησης**

Πριν απλωθεί το καλώδιο VOD ή εγκατασταθεί το όργανο μέτρησης VODMate πρέπει να γίνει εκτίμηση της περιοχής έκρηξης και να σχεδιαστεί η διαδικασία μέτρησης ταχύτητας έκρηξης.

Το όργανο μέτρησης VODMate παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα εντάσεως μέχρι 40 mA και τάση 27 volt στο καλώδιο VOD. Πρέπει λοιπόν να εξασφαλιστεί πως αυτής της εντάσεως ρεύμα και τάσης είναι ασφαλή για τον τύπο εκρηκτικών και μέσων έναυσης που χρησιμοποιούνται. Πρέπει το ρεύμα που τροφοδοτεί η συσκευή VODMate να είναι μικρότερο από το ελάχιστο ρεύμα που απαιτείται για να γίνει η έκρηξη.

Για να γίνει η μέτρηση πρέπει να χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον 10 μέτρα από το καλώδιο μέτρησης ενώ το μέγιστο προτεινόμενο μήκος είναι 400 μέτρα. Θα χρειαστεί μονό καλώδιο στο πρώτο διάτρημα, διπλό καλώδιο σε κάθε επακόλουθο διάτρημα και αρκετό καλώδιο ανάμεσά των.

Το καλώδιο μέτρησης πρέπει να διέρχεται από τα διατρήματα με τη σειρά που θα ανατιναχθούν. Δηλαδή το μακρινό άκρο του καλωδίου πρέπει να ανατιναχθεί πρώτο.

Όπου είναι δυνατό οι μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης πρέπει να πραγματοποιούνται στα πρώτα διατρήματα της ανατίναξης για να αποφευχθούν τυχόν



κίνηση του εδάφους και εκτίναξη βράχων (flyrock) που θα μπορούσαν να διακόψουν το καλώδιο μέτρησης ή συνδέσεις αυτού. Αν δεν χρησιμοποιηθούν τα πρώτα διατρήματα πρέπει να τοποθετηθεί αρκετό καλώδιο μεταξύ των διατρημάτων έτσι ώστε να μην κοπεί κατά την κίνηση του εδάφους την στιγμή της έκρηξης.

Αφού επιλεγούν τα προς μέτρηση διατρήματα πρέπει να υπολογιστεί το μήκος του καλωδίου μέτρησης το οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Ο υπολογισμός αυτός προϋποθέτει την τοποθέτηση μονού καλωδίου στο πρώτο διάτρημα και διπλού καλωδίου σε κάθε επόμενο διάτρημα-ένα μήκος στήλης για την κάθοδο του καλωδίου και ένα μήκος στήλης για την άνοδο καθώς και το καλώδιο το οποίο υπάρχει μεταξύ των διατρημάτων.

Είναι προφανές ότι το όργανο μέτρησης VODMate πρέπει να τοποθετηθεί σε όσο το δυνατό μακρινότερη απόσταση από το σημείο της έκρηξης σε προστατευόμενο σημείο όπου θα είναι ασφαλές.

#### **3.4.4.3 Τοποθέτηση του καλωδίου μέτρησης ταχύτητας έκρηξης**

Το καλώδιο μέτρησης δεν μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο διάτρημα μετά από τα εκρηκτικά. Πριν την διαδικασία αυτή πρέπει να βραχυκυκλωθεί το άκρο του καλωδίου μέτρησης. Πρέπει να κοπεί πρώτα το εξωτερικό περίβλημα του καλωδίου για να φανεί η πλέξη του και κατόπιν το εσωτερικό περίβλημά του για να αποκαλυφθεί ο πυρήνας του. Τέλος ενώνοντας τον πυρήνα και την πλέξη του και τυλίγοντας την ένωση με μονωτική ταινία το καλώδιο είναι έτοιμο προς χρήση. Μονωτική ταινία προτείνεται μόνο σε περιπτώσεις παρουσίας νερού, αλλά για μεγαλύτερη ασφάλεια καλύτερα να χρησιμοποιείται πάντα.

Το βραχυκυκλωμένο μέρος του καλωδίου δένεται στο ενισχυτικό έναυσης (ζελατοδυναμίτης, αμμωνίτης) και τοποθετείται στο διάτρημα. Το καλώδιο μέτρησης πρέπει να είναι τεντωμένο μέσα στη στήλη για ορθότερες μετρήσεις.

Γνωρίζοντας το μήκος της διατρητικής στήλης μπορεί να υπολογιστεί το μήκος του καλωδίου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο δεύτερο διάτρημα. Το μήκος Αυτό είναι διπλάσιο του μήκους της στήλης. Πάλι το καλώδιο δένεται στο ενισχυτικό έναυσης και τοποθετείται στο διάτρημα.

Καθώς τοποθετούνται τα εκρηκτικά στη διατρητική στήλη απαιτείται προσοχή να μην τσακίσει, διπλώσει ή και να πέσει το καλώδιο μέσα στην στήλη. Για καλύτερη

δράση των εκρηκτικών πρέπει αυτά να έχουν καλό βαθμό περιορισμού. Εκρηκτικά τα οποία δεν είναι ικανοποιητικά περιορισμένα θα αποκτήσουν ταχύτητες έκρηξης μικρότερες από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής και υπάρχει περίπτωση να μην παράγουν αρκετά ισχυρό μέτωπο ώστε να διατηρήσει το καλώδιο μέτρησης βραχυκυκλωμένο, χάνοντας με αυτό τον τρόπο την μέτρηση.

#### **3.4.4.4 Εγκατάσταση του οργάνου μέτρησης VODMate**

Το όργανο μέτρησης πρέπει να τοποθετηθεί όσο πιο μακριά γίνεται από το μέτωπο της έκρηξης και να προστατευθεί από εκτίναξη βράχων. Αυτό μπορεί να γίνει αν τοποθετηθεί πίσω από έναν βράχο ή άλλο μεγάλο αντικείμενο. Το όργανο μέτρησης έχει κάποια σχετική αντοχή στις σταγόνες νερού αλλά δεν είναι αδιάβροχο και γι' αυτό πρέπει να δίνεται σημασία στην προστασία του από το νερό.

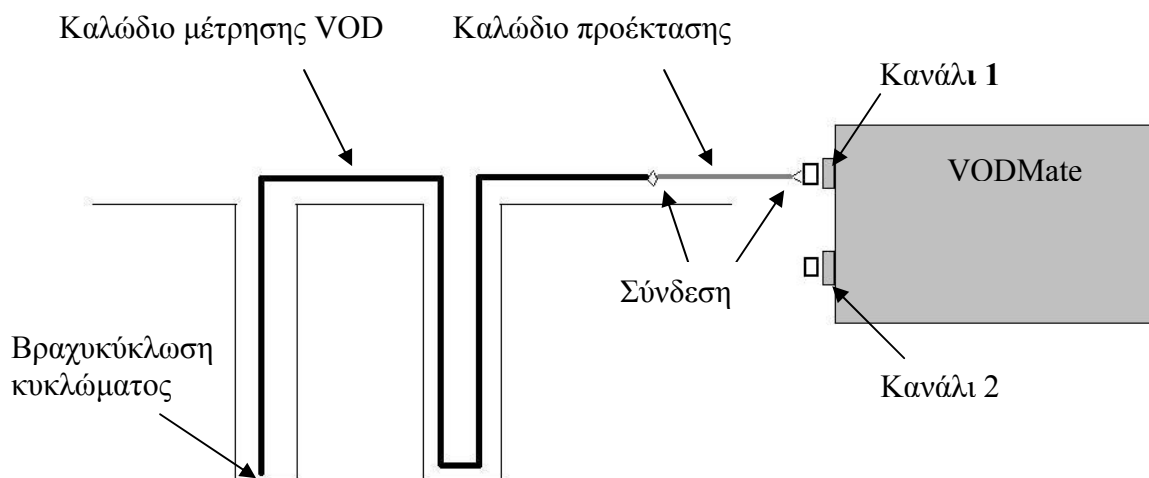
#### **3.4.4.5 Σύνδεση καλωδίου στο όργανο μέτρησης VODMate**

Το καλώδιο μέτρησης δεν πρέπει να συνδεθεί με το όργανο μέτρησης αν όλες οι άλλες συνδέσεις δεν έχουν γίνει. Η συνδεσμολογία πρέπει να γίνει όπως στο Σχ. 3.13

Αφού γίνουν όλες οι απαιτούμενες συνδέσεις τότε μπορεί να γίνει το τεστ σύνδεσης (Connection test) για να διαπιστωθεί ότι όλες οι συνδέσεις είναι σωστές και ασφαλείς.

Το όργανο μέτρησης VODMate σταδιακά αυξάνει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή έντασης ή τάσης. Για λόγους ασφάλειας κατά την διάρκεια του τεστ η περιοχή έκρηξης πρέπει να έχει εκκενωθεί. Η μονάδα συνδυάζει τις μετρούμενες τιμές τάσης και έντασης με την δεδομένη τιμή της ωμικής αντίστασης του καλωδίου μέτρησης και υπολογίζει το μήκος του καλωδίου.

Για επαλήθευση των αποτελεσμάτων της δοκιμής γίνεται σύγκριση μεταξύ του μήκους του καλωδίου το οποίο υπολογίζει η μονάδα μέτρησης και της εκτίμησης του μήκους του καλωδίου που έγινε κατά την σχεδίαση της ανατίναξης. Οι τιμές αυτές πρέπει να είναι συμβατές.



Σχ. 3.13: Συνδεσμολογία οργάνου μέτρησης VODMate

#### 3.4.4.6 Αρχή μέτρησης

Πατώντας το κουμπί **Start monitor** μπορεί να γίνει η εγγραφή-μέτρηση. Πριν από την μέτρηση η μονάδα κάνει δοκιμή σύνδεσης και αν τα αποτελέσματα αυτά έχουν απόκλιση 10% με τα προηγούμενα, τότε υπάρχει λειτουργία στην μονάδα που επιτρέπει την ακύρωση ή την συνέχιση της εγγραφής.

Καθώς η μονάδα περιμένει για να μετρήσει ένα γεγονός, στην οθόνη εμφανίζεται η ένδειξη **System monitoring**. Πατώντας **Cancel** η μονάδα ακυρώνει την εγγραφή. Μετά από μια εγγραφή η μονάδα συμπιέζει το συμβάν. Αυτή η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει αρκετά λεπτά για μια μεγάλη εγγραφή. Μετά την συμπίεση εμφανίζεται μια περίληψη των εγγραφών. Τέλος με το πλήκτρο **Enter** η μονάδα μέτρησης επιστρέφει στο κυρίως μενού.

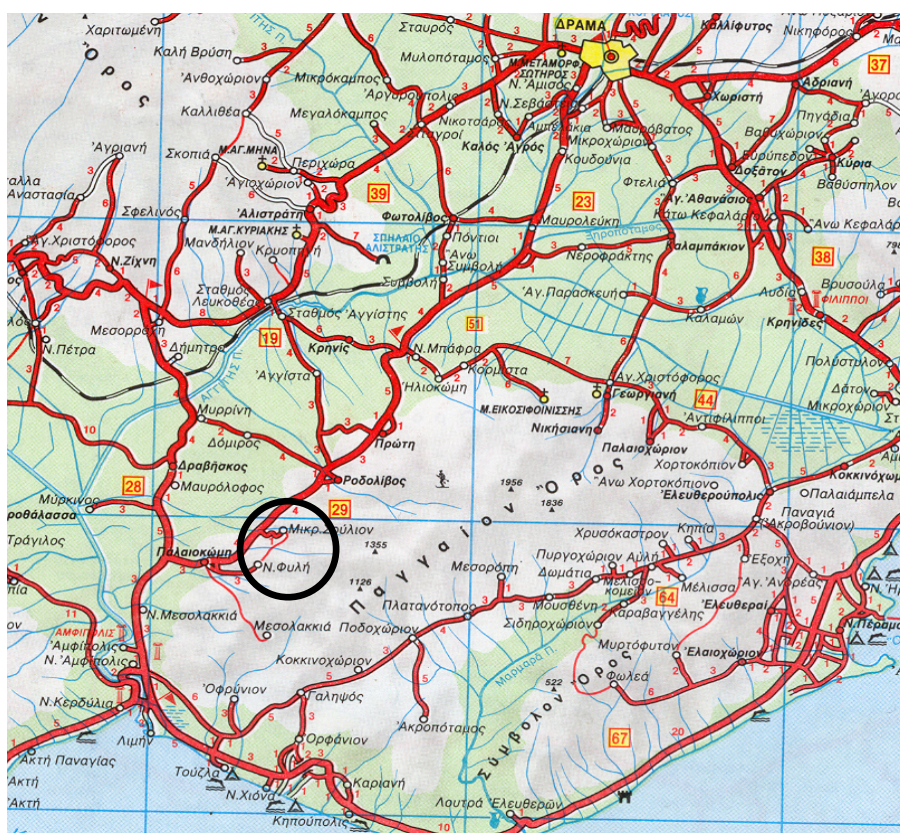
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δοκιμές μέτρησης ταχύτητας έκρηξης καθώς και η επεξεργασία τους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της αντίστασης καλωδίου, χρησιμοποιώντας το όργανο μέτρησης VODMate της Instantel (βλ παραγρ. 3.4.2).

#### 4.1 ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΑΔΡΑΝΩΝ ΜΟΥΛΑΤΗΣ Α.Ε.

Στις 1/4/2003 έγινε η πρώτη μέτρηση ταχύτητας έκρηξης στο λατομείο αδρανών Μουλάτης Α.Ε. στην περιοχή Μικρό Σούλι στο νομό Σερρών. Το λατομείο βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ των χωριών Νέα Φυλή και Μικρού Σουλίου, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1.



Σχ. 4.1 Τοποθεσία Λατομείου αδρανών Μουλάτης Α.Ε.

Για την ανατίναξη χρησιμοποιήθηκε σαν ενισχυτικό ζελατοδυναμίτης, τύπου AUSTROGEL GL DNW του DYNAMIT NOBEL WIEN, σε φυσίγγια 65 x 700 mm, με βάρος 2,5 kg/φυσίγγιο με ταχύτητα έκρηξης 6000 m/s και σαν εκρηκτική ύλη έτοιμο ANFO σε σάκους των 30 kg της εταιρίας ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ ΒΟΡΕΙΟΥ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε., του οποίου οι τεχνικές προδιαγραφές δίνονται στον Πίνακα 4.1. Τα καψύλλια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν μη ηλεκτρικά UEB, με καθυστέρηση 350 ms στο καψύλλιο πυθμένα και 25 ms στο σύνδεσμο επιφανειακής σύνδεσης. Η διάμετρος των διατρημάτων ήταν 104 mm. Ο κάναβος διάτρησης ήταν 4,5x4,5m ενώ το φορτίο υπολογίστηκε σε 3 m.

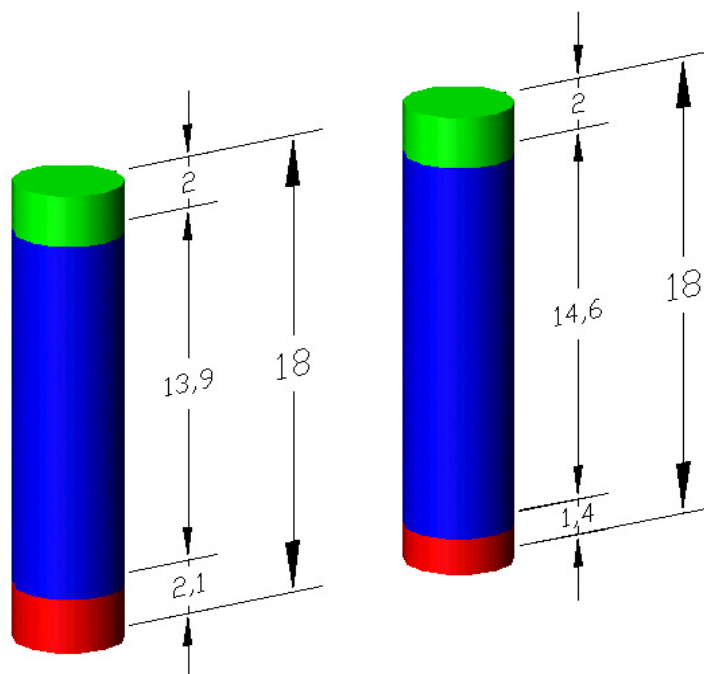
<b>ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ ΒΟΡΕΙΟΥ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε.</b> ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΑΜΥΝΤΑ 14 Τ.Κ. 661 00 ΔΡΑΜΑ ΤΗΛ. & FAX 0521-47111 ΕΡΓ. 82000 ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ: ΑΔΡΙΑΝΗ ΔΡΑΜΑΣ ΑΦΜ 094200685 - Δ.Ο.Υ ΔΡΑΜΑΣ		
<b>ΚΑΡΤΕΛΑ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ</b>		
<b>ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ</b>		
<b>ΠΡΟΪΟΝ: AN-FO</b>		
1. Ταχύτητα έκρηξης (ελεύθερο)		: 2500±200m/s
» » (περιορισμό)		: 3000m/s
2. Πυκνότητα εκρηκτικής ύλης		: 850gr/lt± 50gr/lt
3. Ενέργεια εκρηκτικών αερίων		: 923Kcal/Kg
4. Όγκος εκλυομένων αερίων		: 968lt/kg
5. Σχετική κατά βάρος ισχύς		: 75%
6. Θραυστικότητα (HESS)		: 4,5±0,5mm
7. Ανοχή σε κρούση (5κρ)		: 100cm
» σε τριβή		: μεγαλύτερη 36κρ
Θερμότητα		: κρίσ. διάμετρ. : 1,5mm
		: χρόνος έναυσ. : 33sec
		: χρόνος καύσ. : 5sec

Πίνακας 4.1: Τεχνικές προδιαγραφές του ANFO

Τα διατρήματα είχαν μήκος 18 m. Στο πρώτο διάτρημα χρησιμοποιήθηκε 7,5 kg ζελατοδυναμίτη σαν γόμωση πυθμένα, δηλαδή 3 φυσίγγια και σαν γόμωση στήλης τοποθετήθηκαν 90 kg ANFO, δηλαδή 3 σακιά. Στο δεύτερο διάτρημα σαν γόμωση πυθμένα χρησιμοποιήθηκε 5 kg ζελατοδυναμίτη, σαν γόμωση στήλης προστέθηκαν 100 kg ANFO (Σχ. 4.2). Η επιγόμωση έγινε με προϊόντα της διάτρησης. Αξίζει να



σημειωθεί πως η ανατίναξη έλαβε χώρα παρουσία νερού. Δηλαδή τα διατρήματα διατηρούσαν στο εσωτερικό τους ποσότητα νερού. Η φορά ανατίναξης είναι από αριστερά προς τα δεξιά. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται ο ζελατοδυναμίτης, με μπλε το ANFO και με πράσινο η επιγύμωση. Οι μονάδες αναφέρονται σε μέτρα.

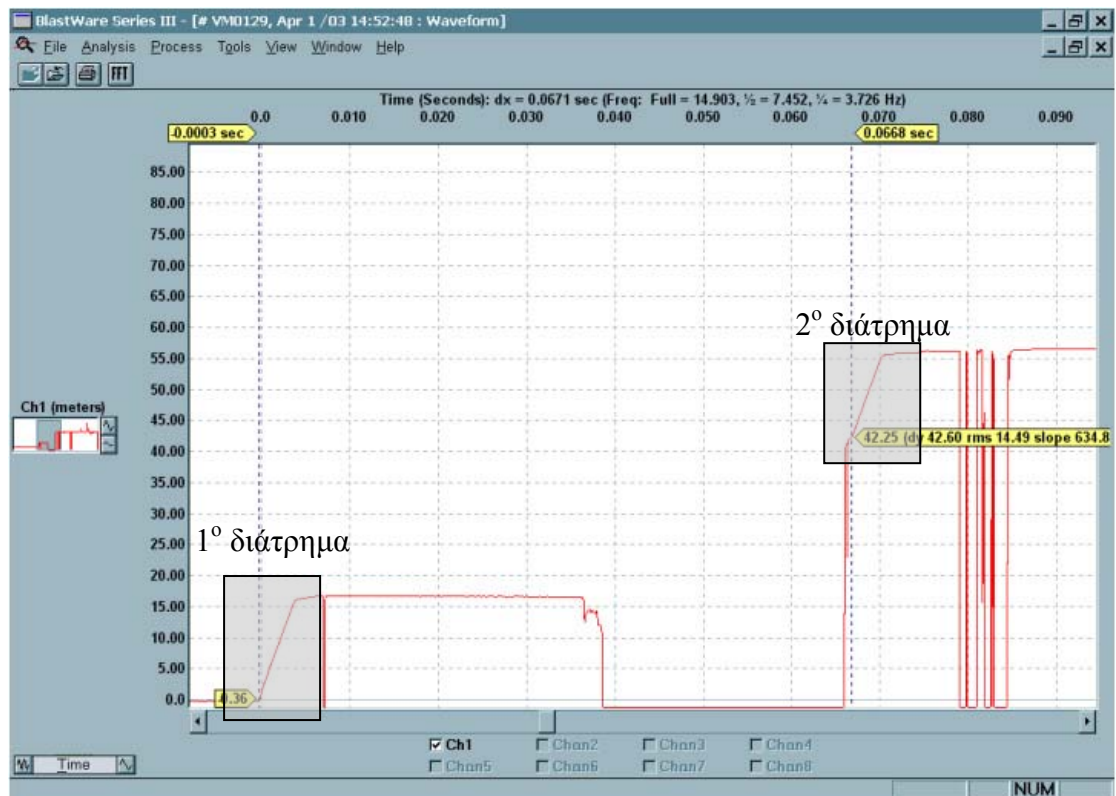


Σχ. 4.2: Διάγραμμα γόμωσης διατρημάτων

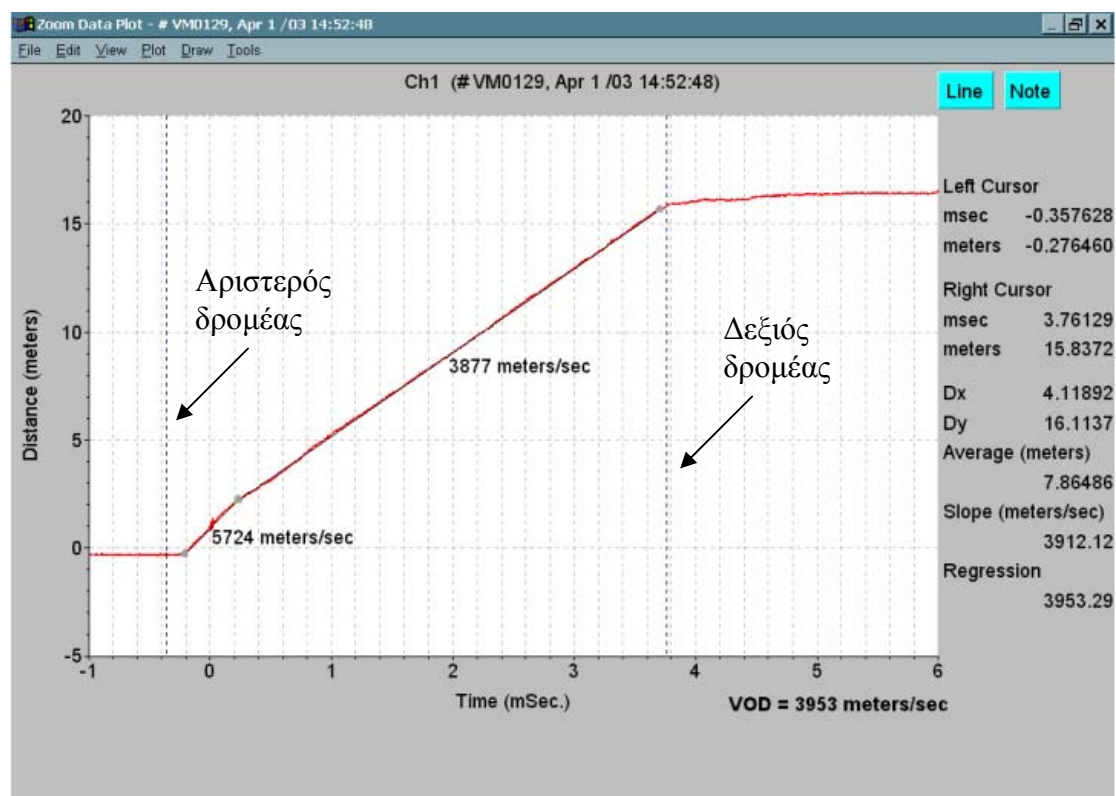
Τα δεδομένα τα οποία συνέλεξε το όργανο μέτρησης VODMate μετατρέπονται σε γραμμική μορφή όπως δείχνει το Σχ. 4.3 για περαιτέρω ανάλυση.

Από τα δεδομένα του Σχ. 4.3 μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος καθυστέρησης. Στο Σχ. 4.4 φαίνεται, ότι ο χρόνος ανατίναξης του πρώτου διατρήματος είναι στον χρόνο 0 ms – αναμενόμενο ήταν εξάλλου – και ο χρόνος του δεύτερου είναι στα 66,8 ms. Ο χρόνος του κάθε συμβάντος βρίσκεται στο πάνω μέρος του παραθύρου του λογισμικού. Άρα η καθυστέρηση είναι 66,8 ms. Η τιμή αυτή είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τον χρόνο των 25 ms που δίνει ο κατασκευαστής.

Αυτή η μεγάλη απόκλιση (41,8 ms) μπορεί να οφείλεται στο γεγονός, ότι ο χρόνος καθυστέρησης στο καψύλλιο πυθμένα του πρώτου διατρήματος να ήταν μικρότερος των 350 ms, ή ο χρόνος καθυστέρησης στο καψύλλιο πυθμένα του πρώτου διατρήματος να ήταν μεγαλύτερος από 350 ms ή να συμβαίνουν και τα δύο ταυτοχρόνως. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιήθηκε κατά λάθος σε ένα από τα διατρήματα χρόνος καθυστέρησης καψυλλίου διαφορετικός των 350 ms. Δηλαδή χρόνος μεγαλύτερος στο δεύτερο ή μικρότερος στο πρώτο.

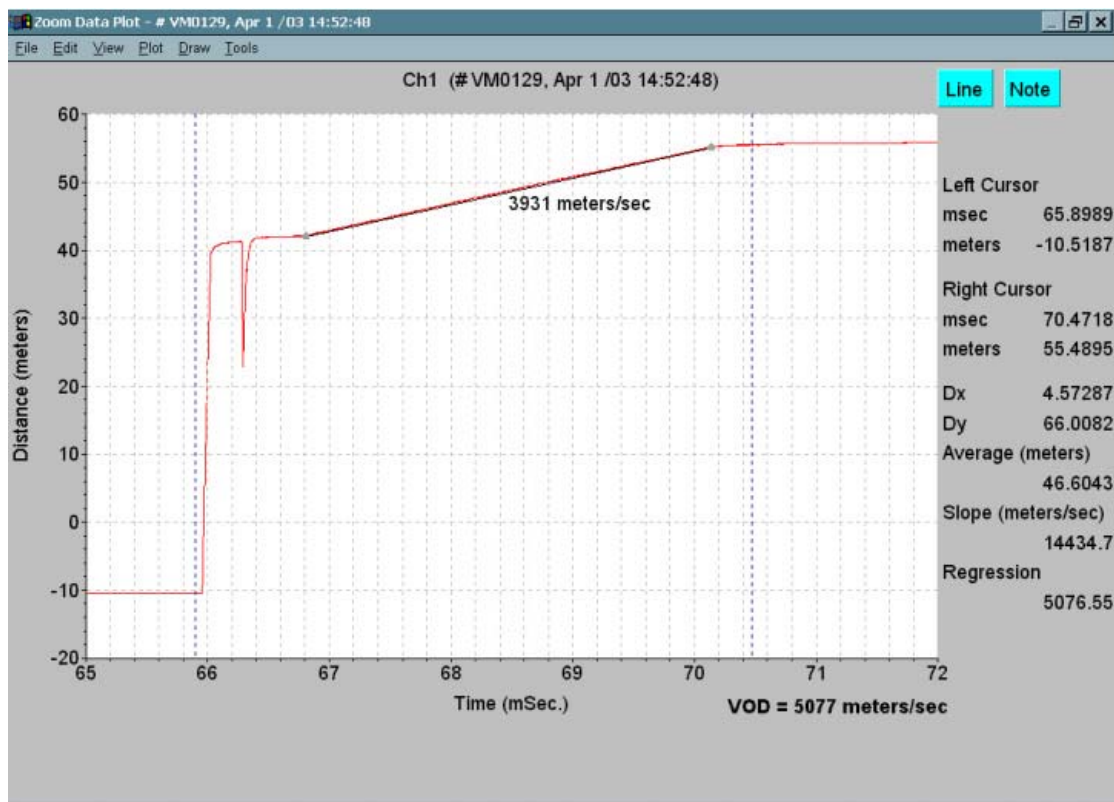


Σχ. 4.3: Δεδομένα μέτρησης ταχύτητας έκρηξης στο λατομείο αδρανών Μουλάτης Α.Ε.



Σχ. 4.4: Μεγέθυνση περιοχής 1<sup>ου</sup> διατρήματος

Με την βοήθεια των εργαλείων λογισμικού του Blastware Analysis και συγκεκριμένα με την εντολή Zoom, μπορεί να γίνει πιο λεπτομερής ανάλυση των δεδομένων στην εκάστοτε ενδιαφερόμενη περιοχή. Στο Σχ. 4.4 δίνεται η μεγέθυνση της περιοχής μελέτης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος.



Σχ. 4.5: Μεγέθυνση περιοχής 2<sup>ου</sup> διατρήματος.

Τοποθετώντας τον δεξιό δρομέα (cursor) σε ένα σημείο της μέτρησης και τον αριστερό σε ένα άλλο, το λογισμικό υπολογίζει, μεταξύ άλλων την μέση κλίση στο διάγραμμα μήκους καλωδίου-χρόνου, δηλαδή την μέση ταχύτητα έκρηξης. Βεβαίως αν το διάστημα που παρεμβάλλεται ανάμεσα στους δύο δρομείς είναι πολύ μικρό τότε υπολογίζεται η στιγμιαία ταχύτητα έκρηξης. Η τιμή της μέσης ταχύτητας έκρηξης δίνεται στο κάτω δεξιό σημείο της εικόνας. Το λειτουργικό δίνει επίσης την δυνατότητα με την εισαγωγή ευθειών στα δεδομένα, τον υπολογισμό της ταχύτητας έκρηξης ανεξάρτητα από τη θέση των δρομέων (Σχ. 4.5).

Στην περιοχή μελέτης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος φαίνονται δύο ταχύτητες έκρηξης. Μία ταχύτητα που οφείλεται στην έκρηξη του ζελατοδυναμίτη και μία ταχύτητα που οφείλεται στην έκρηξη του ANFO. Η ταχύτητα του ζελατοδυναμίτη υπολογίστηκε από το λειτουργικό σε **5724 m/s**. Η ταχύτητα έκρηξης του ANFO υπολογίστηκε σε **3877 m/s**. Το ANFO στην συγκεκριμένη ανατίναξη αποκτά μία ταχύτητα έκρηξης

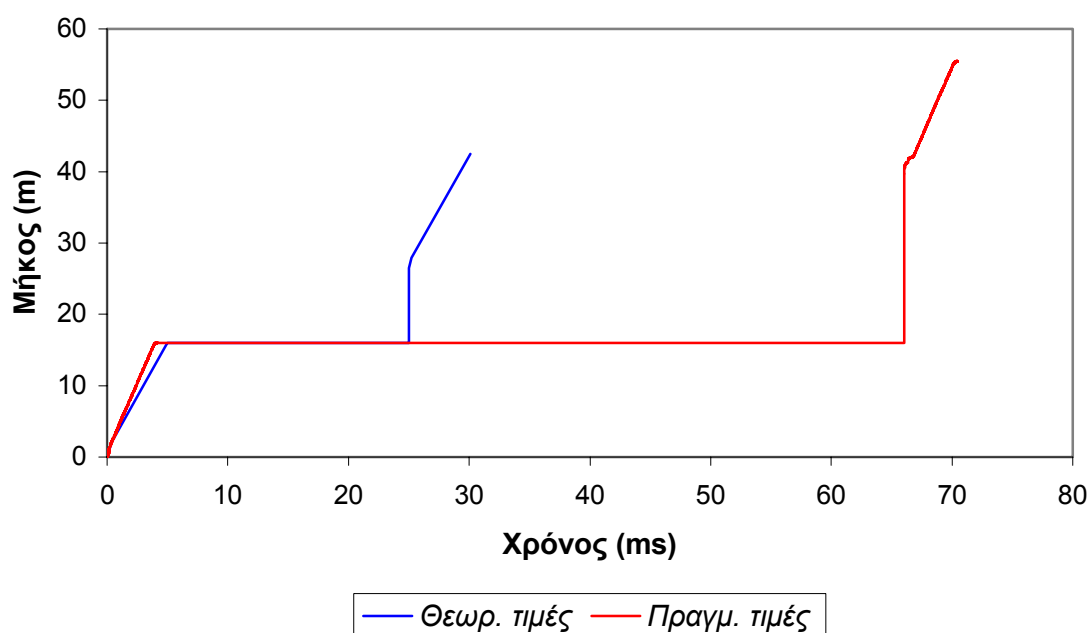


και την διατηρεί μέχρι το τέλος της στήλης. Παρατηρείται όμως μια μικρή διακύμανση της ταχύτητας του ANFO στα πρώτα στάδια της ανατίναξης που πιθανόν να οφείλεται στην παρουσία νερού.

Το Σχ. 4.5 είναι μεγένθυση της περιοχής που αντιστοιχεί στην ανατίναξη του 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Σε αυτό το διάτρημα η γόμωση πυθμένα δεν παρουσιάζεται πουθενά, ενώ η μέτρηση δείχνει μόνο την ταχύτητα έκρηξης του ANFO. Η ταχύτητα του, υπολογίστηκε από το λογισμικό σε **3931 m/s**.

Επίσης αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ενώ η θεωρητική ταχύτητα έκρηξης του ANFO σε περιορισμό είναι 3000 m/s, οι πραγματικές τιμές της ταχύτητας έκρηξης του ANFO και στα δύο διατρήματα είναι πολύ μεγαλύτερες.

Επειδή το ANFO είναι μια σύνθετη, πορώδης, κοκκώδης εκρηκτική ύλη (βλ παραγρ. 2.3.4.1) υπόκειται στις επιδράσεις πολλών παραμέτρων οι οποίοι επηρεάζουν τη δομή του και συνεπώς τις ιδιότητές του. Επομένως η διαφοροποίηση ενός από αυτούς τους παράγοντες έστω και ελάχιστα, θα επιφέρει μεταβολή της ταχύτητας έκρηξής του.



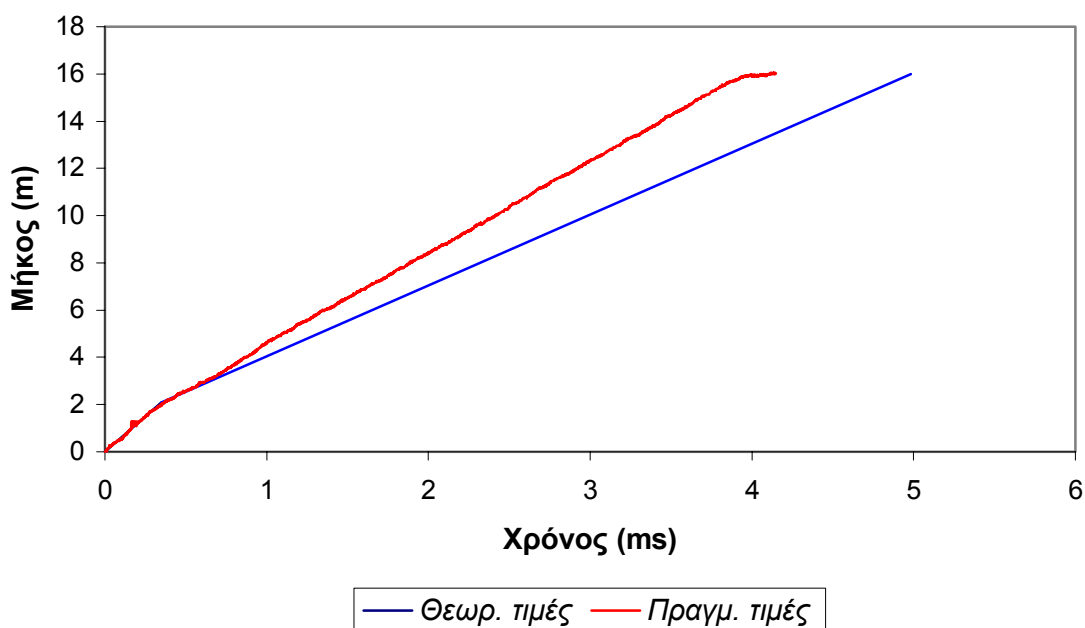
Σχ. 4.6: Κοινό διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών τιμών.

Στο Σχ. 4.6 δίνονται σε κοινό διάγραμμα οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές της μέτρησης ταχύτητας έκρηξης στην περιοχή Μ. Σουλίου. Το διάγραμμα αυτό αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης και ένα εργαλείο ελέγχου της ανατίναξης. Όσο

περισσότερο συμπίπτουν οι δύο γραμμές τόσο περισσότερο η ανατίναξη είναι επιτυχής, από πλευρά σχεδιασμού. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται πολύ καθαρά η διαφορά στον χρόνο επιβράδυνσης που αναφέρθηκε παραπάνω.

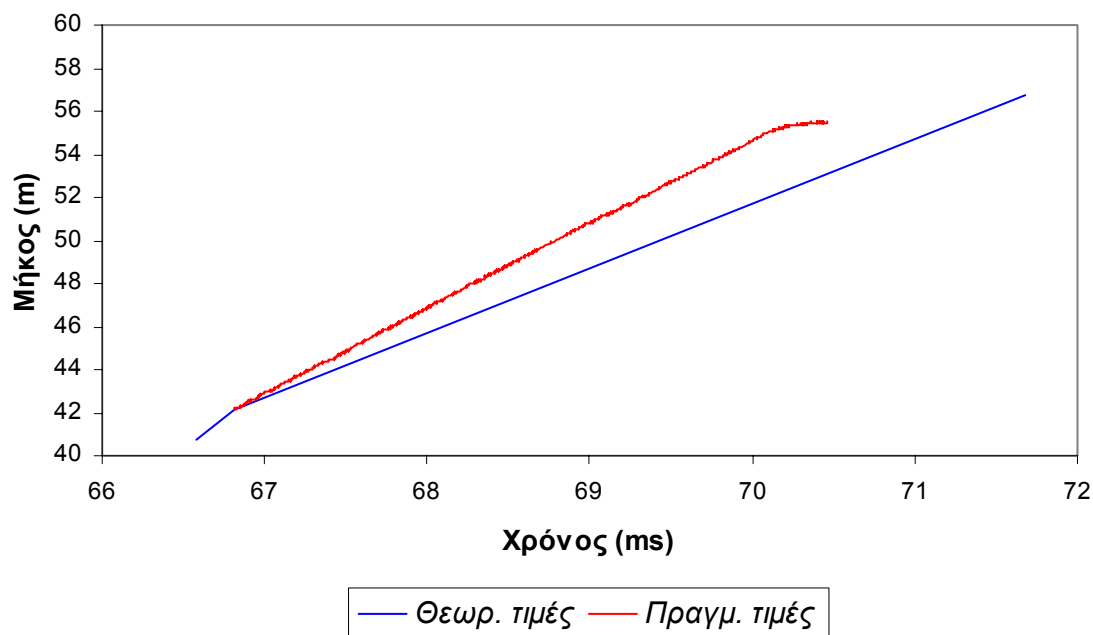
Εκτός της διαφοράς στο χρόνο παρατηρείται μια διαφορά στο μήκος του καλωδίου. Το μήκος του καλωδίου στις πραγματικές μετρήσεις είναι μεγαλύτερο από αυτό των θεωρητικών. Αυτό συμβαίνει διότι η τοποθέτηση του καλωδίου στο δεύτερο διάτρημα δεν έγινε με χρήση μετροταινίας αλλά κατά προσέγγιση. Για λόγους ασφαλείας λοιπόν, για να φτάσει δηλαδή το καλώδιο μέχρι τον πάτο του δεύτερου διατρήματος το μήκος του καλωδίου ήταν πάντα μεγαλύτερο από το απαιτούμενο και έτσι περίσσευε πάντα κάποιο μήκος καλωδίου έξω από το διάτρημα. Αυτό αποτυπώνεται καθαρά στο Σχ. 4.6

Το Σχ. 4.7 δείχνει σε μεγέθυνση το γεγονός της έκρηξης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος. Στον ανατίναξη του ενισχυτικού έναυσης υπάρχει σχεδόν πλήρης ταύτιση, ενώ στην ανατίναξη του ANFO παρατηρείται μια διαφοροποίηση της κλίσης με μεγαλύτερη αυτής των πραγματικών τιμών.



Σχ. 4.7: Μεγέθυνση περιοχής 1<sup>ου</sup> διατρήματος

Στο Σχ. 4.8 δίνονται οι θεωρητικές και πραγματικές τιμές της μέτρησης, αλλά με την διαφορά ότι οι θεωρητικές τιμές έχουν μεταφερθεί κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερη η σύγκριση με τις πραγματικές τιμές με σκοπό την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αφενός δεν παρατηρείται πουθενά η γόμωση πυθμένα και αφετέρου η ταχύτητα έκρηξης του ANFO είναι μεγαλύτερη της αναμενόμενης.



Σχ. 4.8: Μεγέθυνση περιοχής 2<sup>ου</sup> διατρήματος

## 4.2 ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

### 4.2.1 Πρώτη μέτρηση

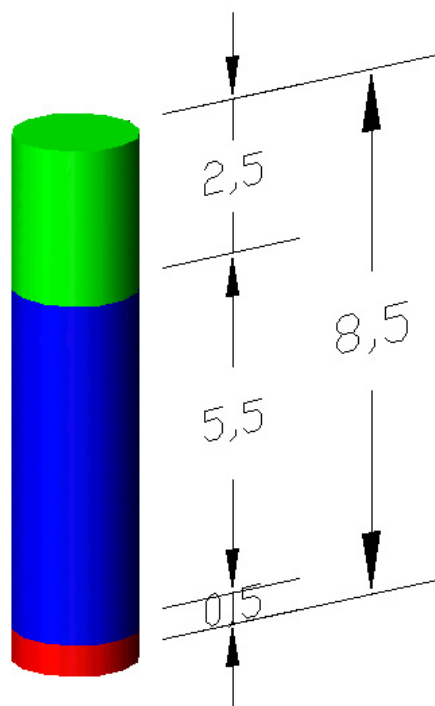
Από τις 14/4/2003 έως τις 16/4/2003 έγιναν τέσσερις μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης στο λατομείο ασβεστόλιθων στην περιοχή Αγ. Γεωργίου στη Λεμεσό Κύπρου.

Για την ανατίναξη χρησιμοποιήθηκε σαν ενισχυτικό ζελατοδυναμίτης, τύπου GOMA 2 ECO της PELIGRO EXPLOSIVES, σε φυσίγγια 65 x 530 mm, με βάρος 2,5 kg/φυσίγγιο με ταχύτητα έκρηξης 6000 m/s και σαν εκρηκτική ύλη ANFO χύμα, επιτόπου προετοιμασία, με Γαλλική νιτρική αμμωνία και 5,6 lit πετρέλαιο/100 kg με ταχύτητα έκρηξης 3000 m/s. Τα καψύλλια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν μη ηλεκτρικά NONEL SCH, με καθυστέρηση 325 ms στο καψύλλιο πυθμένα και 25 ms στο σύνδεσμο επιφανειακής σύνδεσης. Η διάμετρος των διατρημάτων ήταν 101-104 mm. Ο κάναβος διάτρησης ήταν 2x2m ενώ το φορτίο υπολογίστηκε σε 2,1 m.

Αξίζει να επισημανθεί ότι στην ανατίναξη αυτή παρατηρήθηκε κίτρινος καπνός, το οποίο σημαίνει πως δεν αντέδρασε όλο το πετρέλαιο με το νιτρικό αμμώνιο και κάποια ποσότητα πετρελαίου κυριολεκτικά «πήγε χαμένη» ή η

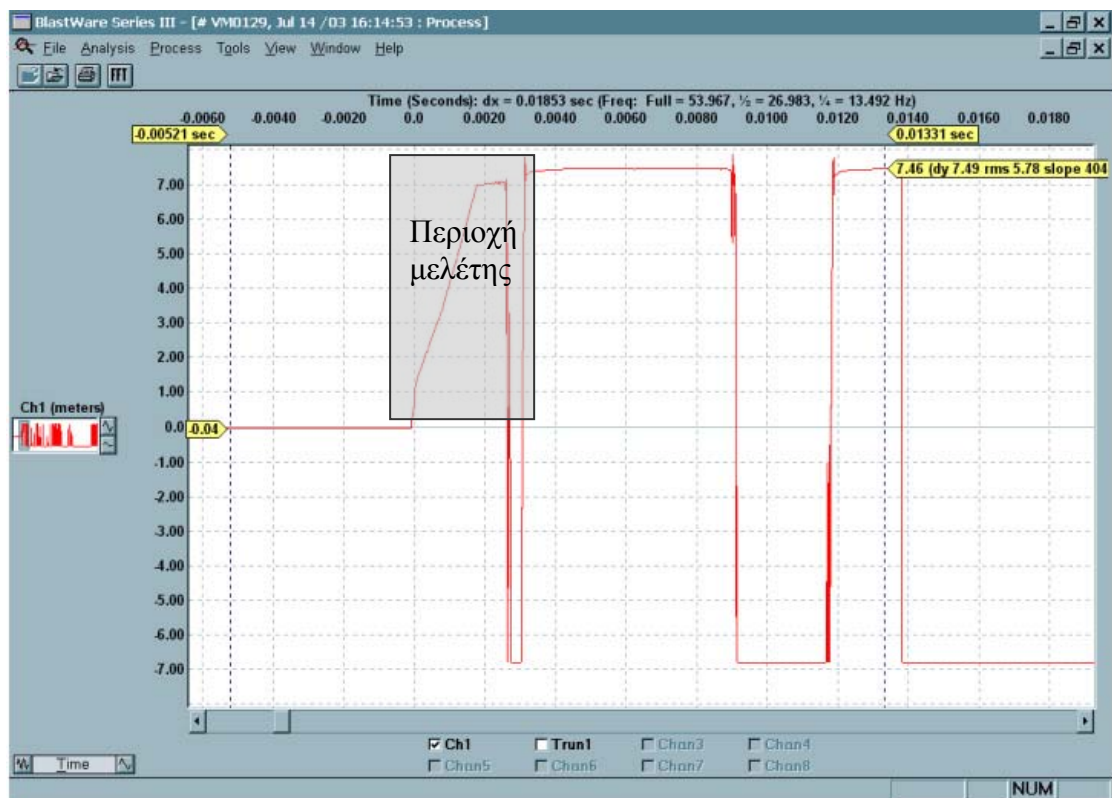
ποσότητα πετρελαίου που προστέθηκε δεν ήταν η απαιτούμενη. Προκαταβολικά, δηλαδή πριν από την επεξεργασία των μετρήσεων, θα ήταν αναμενόμενη μία όχι τόσο καλή κατανομή της ταχύτητας έκρηξης σε όλη της στήλη, λόγω του παραπάνω γεγονότος (Βλ παραγρ 2.3.4.1.α).

Στην 1<sup>η</sup> μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης σαν γόμωση πυθμένα χρησιμοποιήθηκε 2,5 kg ζελατοδυναμίτη δηλαδή 1 φυσίγγιο, σαν γόμωση στήλης τοποθετήθηκαν 37 kg ANFO και τέλος το διάτρημα επιγομώθηκε με παράγωγα της διάτρησης. Το μήκος του διατρήματος ήταν 8,5 m (Σχ. 4.9).



Σχ. 4.9: Διάγραμμα γόμωσης διατρήματος 1<sup>ης</sup> μέτρησης

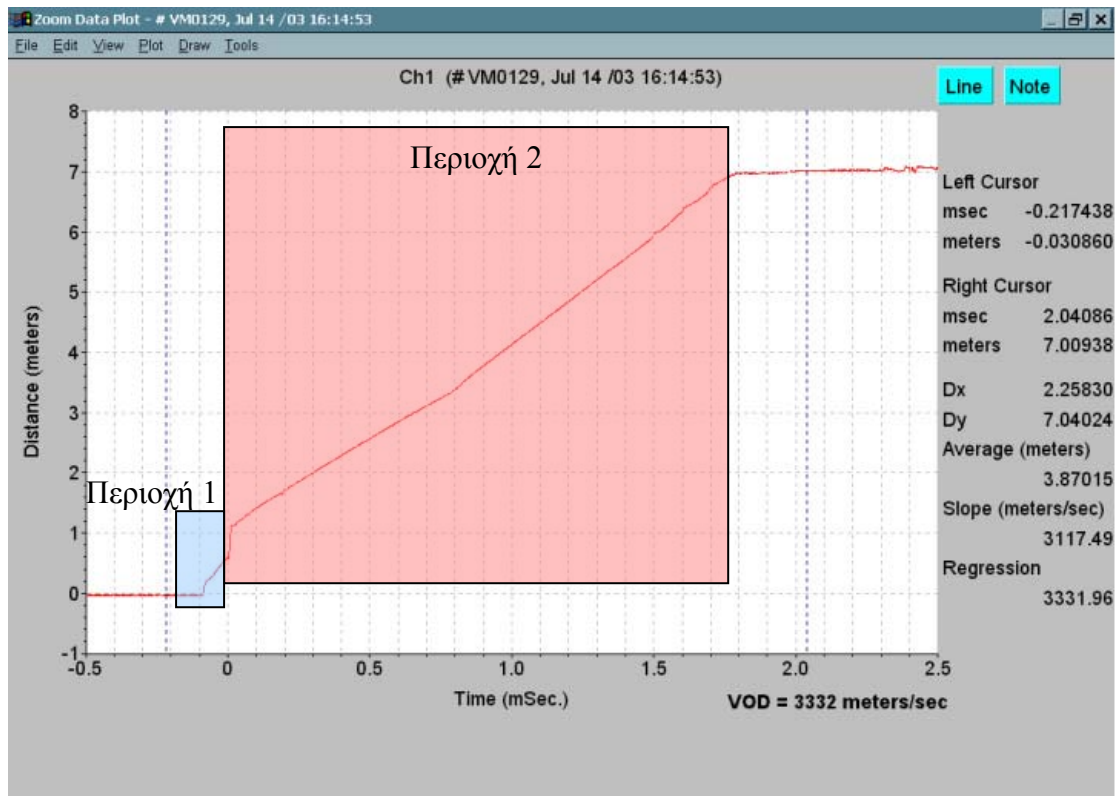
Τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν από το όργανο μέτρησης VODMate κατά την 1<sup>η</sup> μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης δίνονται στο Σχ. 4.10, όπως αυτά παρουσιάζονται καθώς ανοίγει το λογισμικό πακέτο.



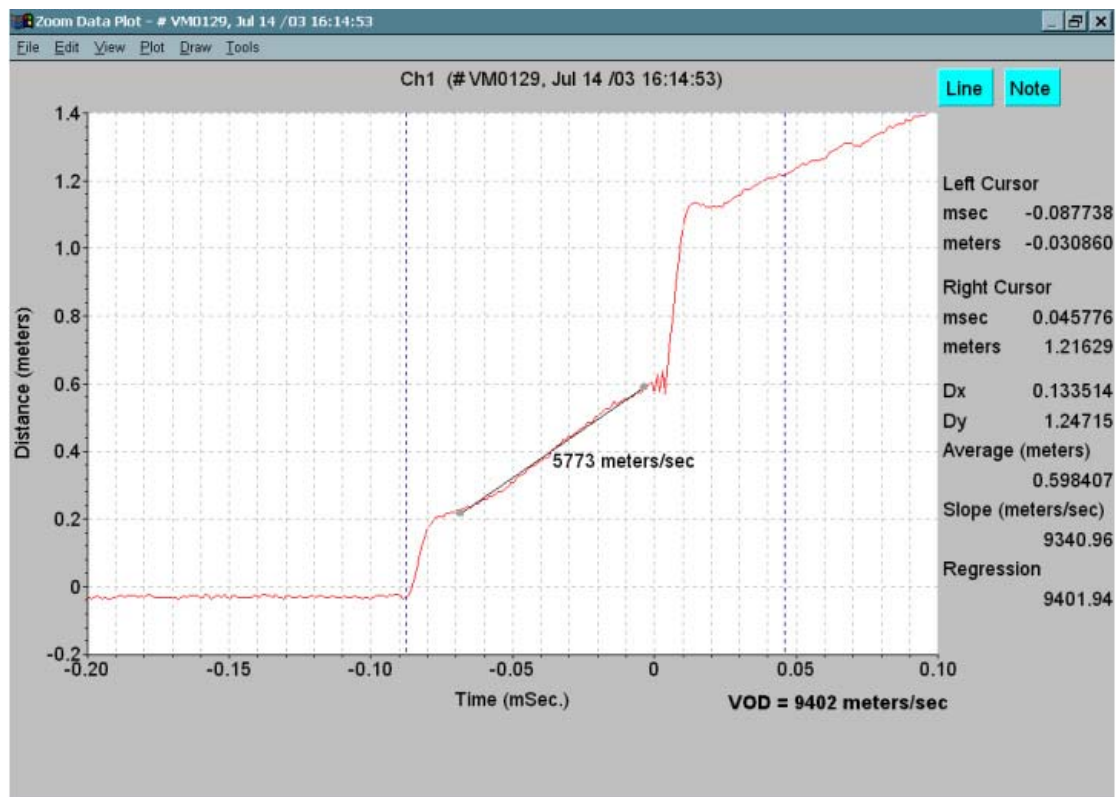
Σχ. 4.10: Δεδομένα της 1<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης στο λατομείο περιοχής Αγ. Γεωργίου

Πάλι με την βοήθεια των εργαλείων λογισμικού του Blastware Analysis και με την εντολή **Zoom** μπορεί να γίνει πιο λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων στην ενδιαφερόμενη περιοχή μελέτης για ακριβέστερα αποτελέσματα (Σχ. 4.11)

Η περιοχή 1 αντιστοιχεί στη γόμωση πυθμένα, δηλαδή στη γόμωση ζελατοδυναμίτη, της οποίας η ταχύτητα έκρηξης υπολογίστηκε από το λειτουργικό σε **5773 m/s**. Στο Σχ. 4.12 αμέσως μετά την πλήρη χημική αντίδραση του ζελατοδυναμίτη παρατηρείται μία απότομη αύξηση του μήκους του καλωδίου σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διαδικαστικό λάθος και όχι σε λάθος του προγράμματος. Μπορεί κατά την τοποθέτηση του καλωδίου, αυτό να μην ήταν τεντωμένο καθ'όλο το μήκος του διατρήματος και στο συγκεκριμένο σημείο να υπήρχε μία τσάκιση και έτσι κατά την διαδικασία καταστροφής του καλωδίου εμφανίζεται αυτό το άλμα.

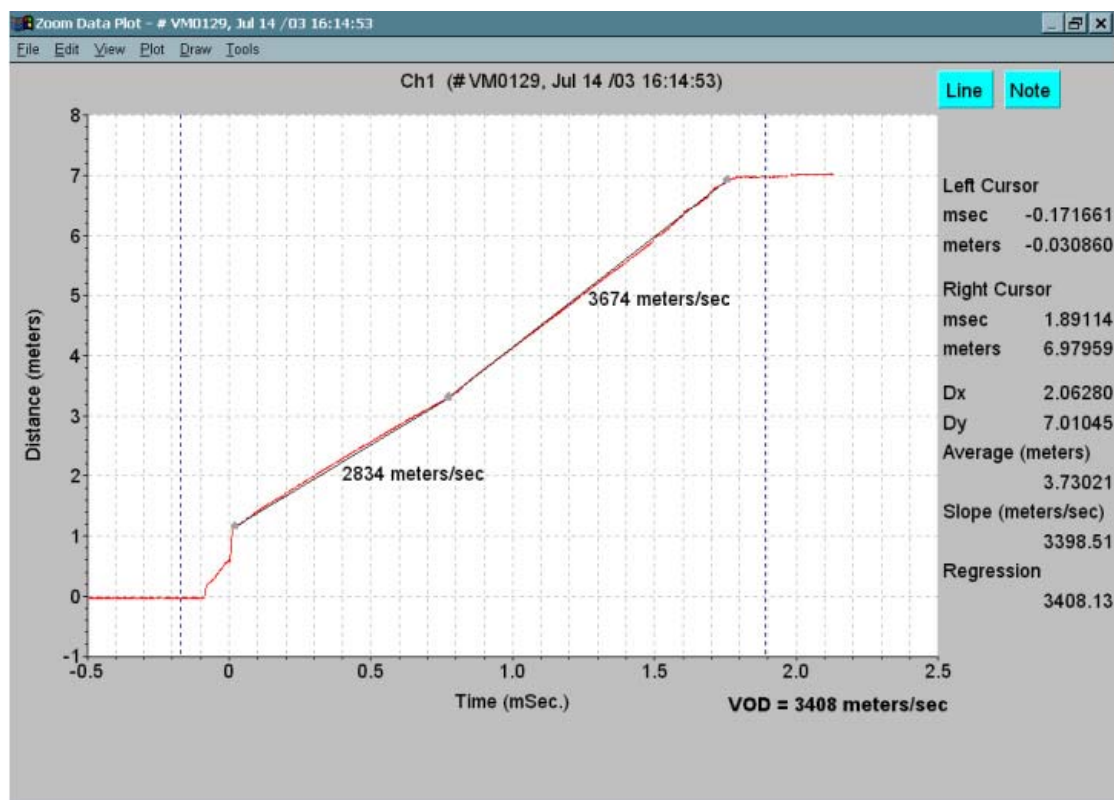


Σχ. 4.11: Μεγέθυνση περιοχής μελέτης



Σχ. 4.12: Μεγέθυνση περιοχής 1

Στην περιοχή 2, η οποία αναφέρεται στη γόμωση στήλης παρατηρούνται δύο κλίσεις. Η μία αντιστοιχεί στα πρώτα στάδια καύσης του ANFO και η δεύτερη στο υπόλοιπο ANFO. Το γεγονός ύπαρξης δύο διαφορετικών ταχυτήτων οφείλεται στο εξής: Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η γόμωση έγινε με επί τόπου ανάμιξη νιτρικής αμμωνίας και πετρελαίου. Μέσα όμως στην αναμικτήρα είχε περισσέψει κάποια ποσότητα ANFO από προηγούμενη γόμωση. Σε αυτή την νιτρική αμμωνία, το πετρέλαιο είχε εξατμιστεί κατά ένα μέρος του. Κατά την γόμωση λοιπόν του συγκεκριμένου διατρήματος στον πάτο της στήλης έπεσε το χαμηλής περιεκτικότητας σε πετρέλαιο ANFO, και γι' αυτό η ταχύτητα έκρηξης του είναι χαμηλή (Βλ παραγρ 2.2.1). Όμως από το σημείο όπου το ANFO αναμειγνύεται εκ νέου και γομώνεται η στήλη, παρατηρείται καθαρά μία μεγαλύτερη ταχύτητα έκρηξής του.

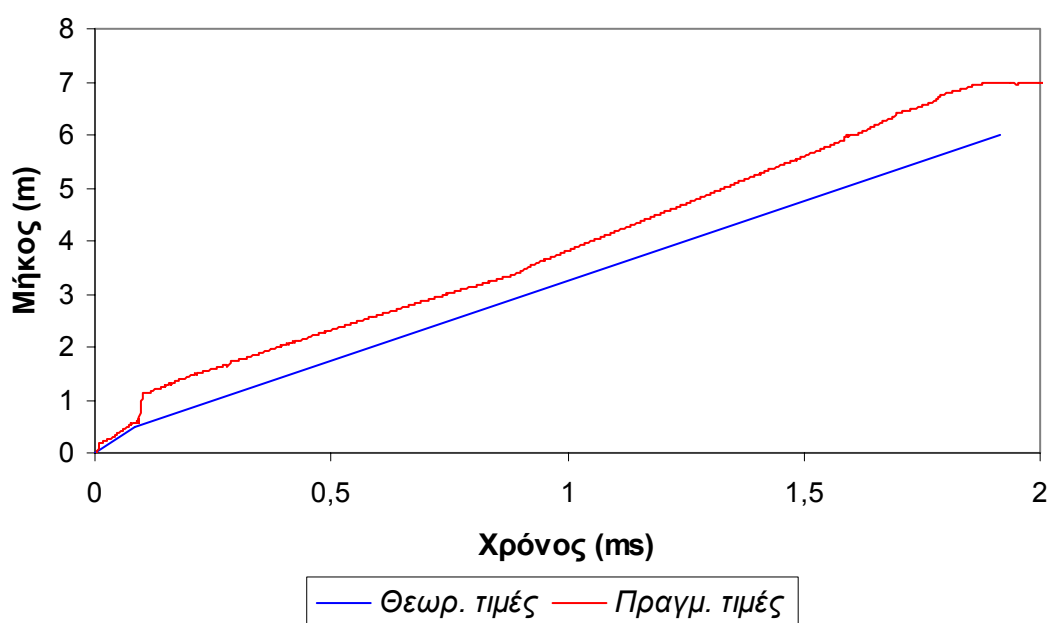


Σχ. 4.13: Μεγέθυνση περιοχής 2

Πράγματι η ταχύτητα έκρηξης του ANFO του οποίου το πετρέλαιο έχει εξατμιστεί υπολογίζεται από το λογισμικό σε **2834 m/s** ενώ του νεοαναμειγμένου ANFO σε **3674 m/s**. Σε αυτή την ανατίναξη γίνεται φανερό πως ακόμα και στην περίπτωση όπου το καλής ποιότητας ANFO δεν δεχθεί τόσο ισχυρό κρουστικό παλμό όσο ενός ζελατοδυναμμίτη, πάλι θα αποκτήσει την μέγιστη ταχύτητα έκρηξης του.



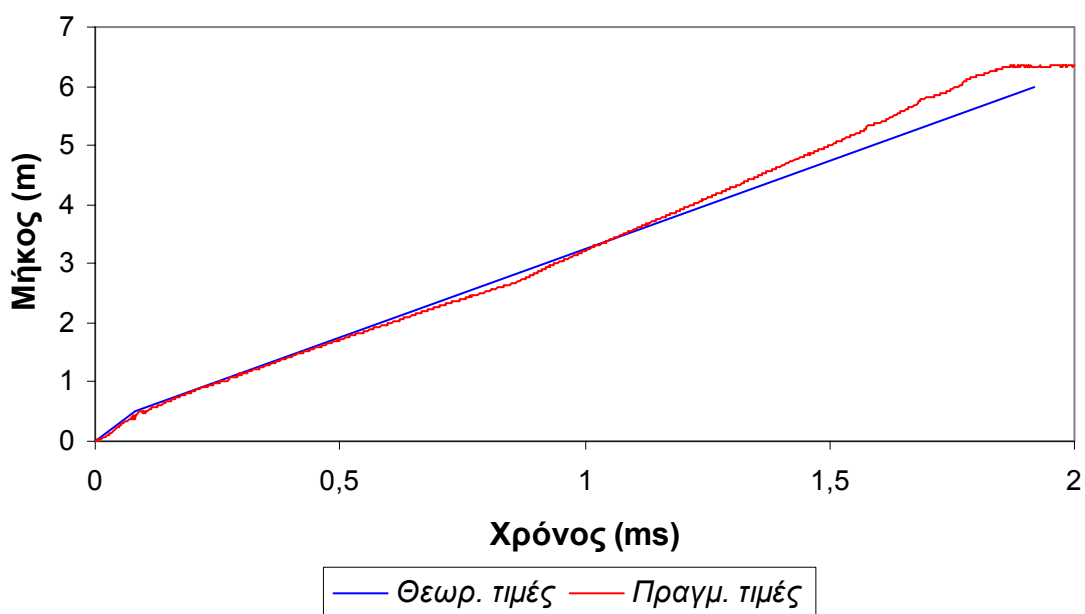
Στο Σχ. 4.14 δίνονται σε κοινό διάγραμμα οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές της 1<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης στο λατομείο της περιοχής Αγ. Γεωργίου. Οι τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της γραμμής των πραγματικών τιμών δεν υπέστησαν καμία επεξεργασία και ελήφθησαν αυτούσιες. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται καθαρά το άλμα το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω και η μεγάλη απόκλιση των τιμών. Παρόλα αυτά οι δύο γραμμές είναι σχεδόν παράλληλες. Για λόγους σύγκρισης λοιπόν κρίθηκε σκόπιμο να γίνει επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.



Σχ. 4.14: Κοινό διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών τιμών (χωρίς διόρθωση).

Πράγματι από το Σχ. 4.14 οι τιμές οι οποίες προκαλούν την απότομη αύξηση του μήκους του καλωδίου εξαιρέθηκαν από τα δεδομένα επεξεργασίας. Το αποτέλεσμα το οποίο δίνεται στο Σχ. 4.15 είναι οι δύο γραμμές, δηλαδή οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές να συμβαδίζουν σχεδόν απόλυτα. Επομένως η ερμηνεία η οποία δόθηκε για το άλμα που παρατηρήθηκε είναι κατά πάσα πιθανότητα σωστή.



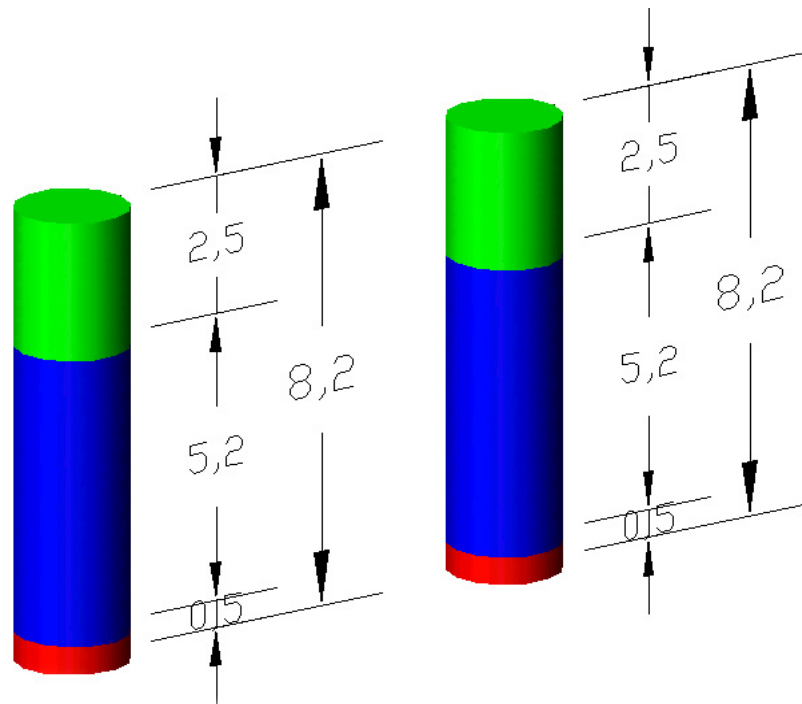


Σχ. 4.15: Κοινό διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών τιμών (με διόρθωση).

#### 4.2.2 Δεύτερη μέτρηση

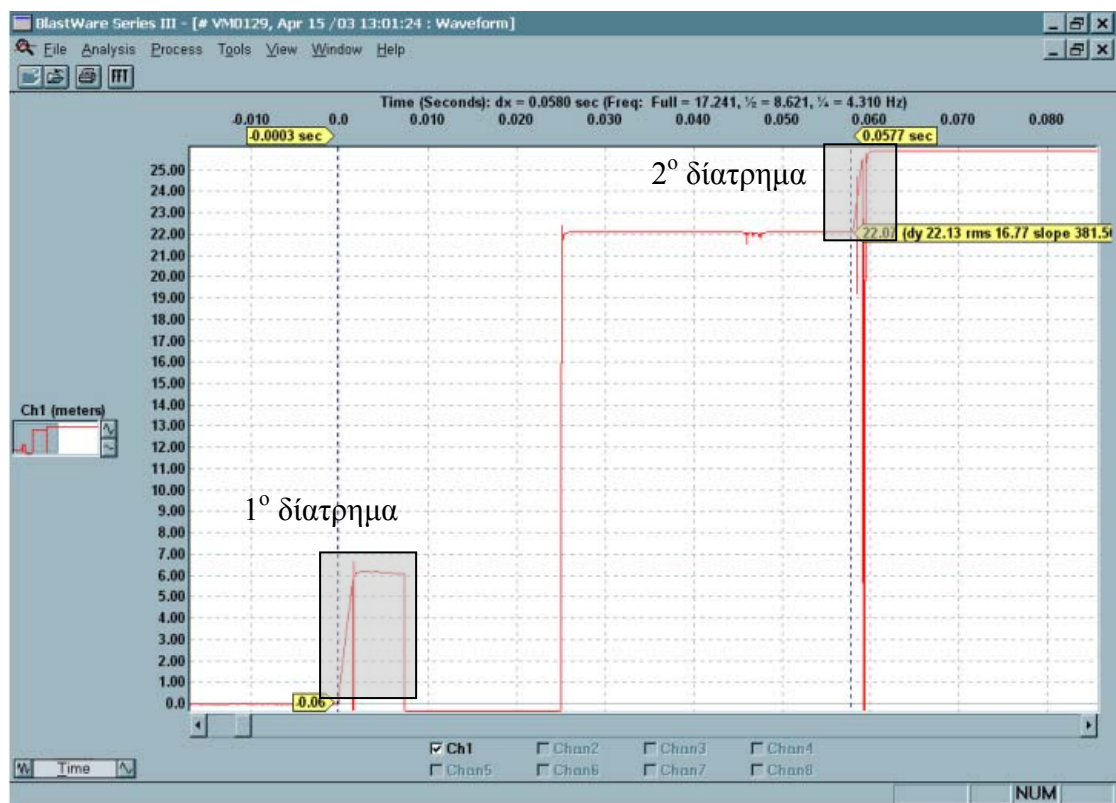
Η 2<sup>η</sup> μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης έλαβε χώρα σε δύο διατρήματα στη σειρά, και όχι μόνο σε ένα, όπως στην 1<sup>η</sup> μέτρηση. Παρουσία κίτρινου καπνού σε αυτή την μέτρηση δεν ανιχνεύτηκε.

Και τα δύο διατρήματα είχαν ακριβώς το ίδιο μήκος και την ίδια γόμωση τόσο στον πυθμένα, όσο και στην στήλη, οπότε η φορά της ανατίναξης δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Σαν γόμωση πυθμένα χρησιμοποιήθηκε 2,5 kg ζελατοδυναμίτη, δηλαδή 1 φυσίγγιο, σαν γόμωση στήλης τοποθετήθηκαν 41 kg ANFO και τέλος, το διάτρημα επιγομώθηκε με παράγωγα της διάτρησης (Σχ. 4.16). Το μήκος των διατρημάτων ήταν 8,2 m και ο χρόνος καθυστέρησης στον σύνδεσμο επιφανειακής σύνδεσης ήταν 25 ms.



Σχ. 4.16: Διάγραμμα γόμωσης διατρημάτων 2<sup>ης</sup> μέτρησης

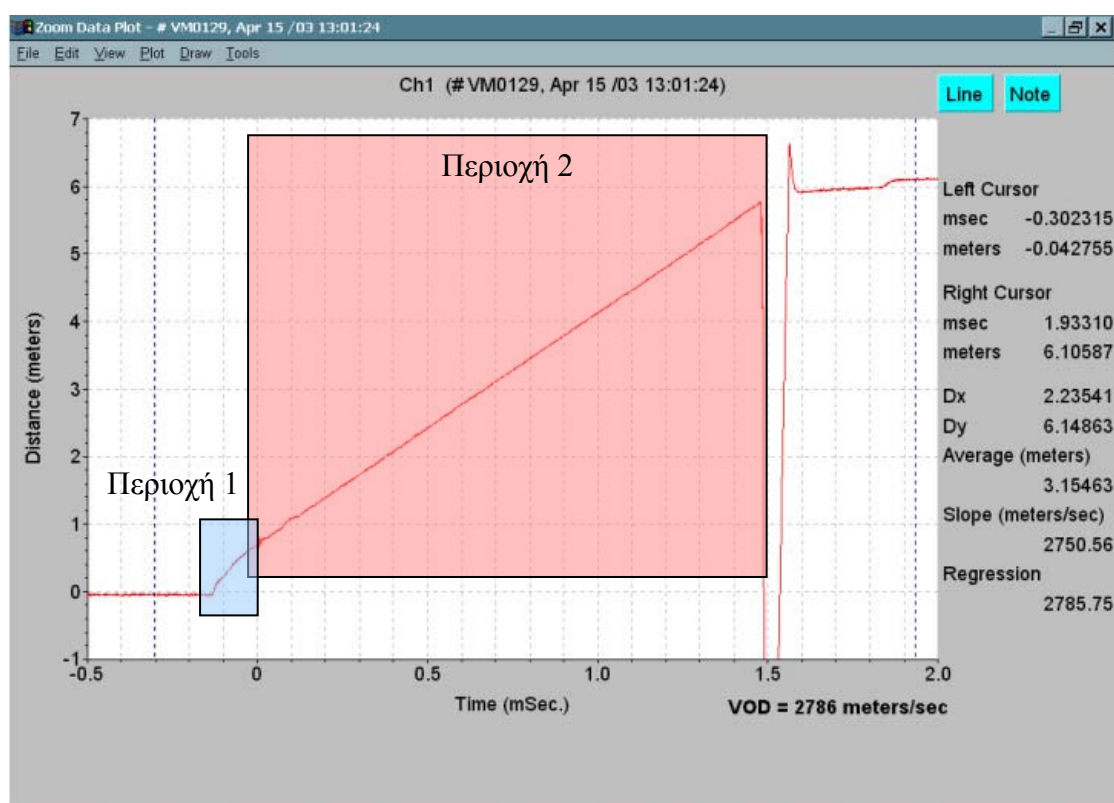
Στο Σχ. 4.17 δίνονται τα δεδομένα της 2<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης και τονίζονται οι περιοχές του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> διατρήματος οι οποίες είναι προς μελέτη.



Σχ. 4.17: Δεδομένα της 2<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης

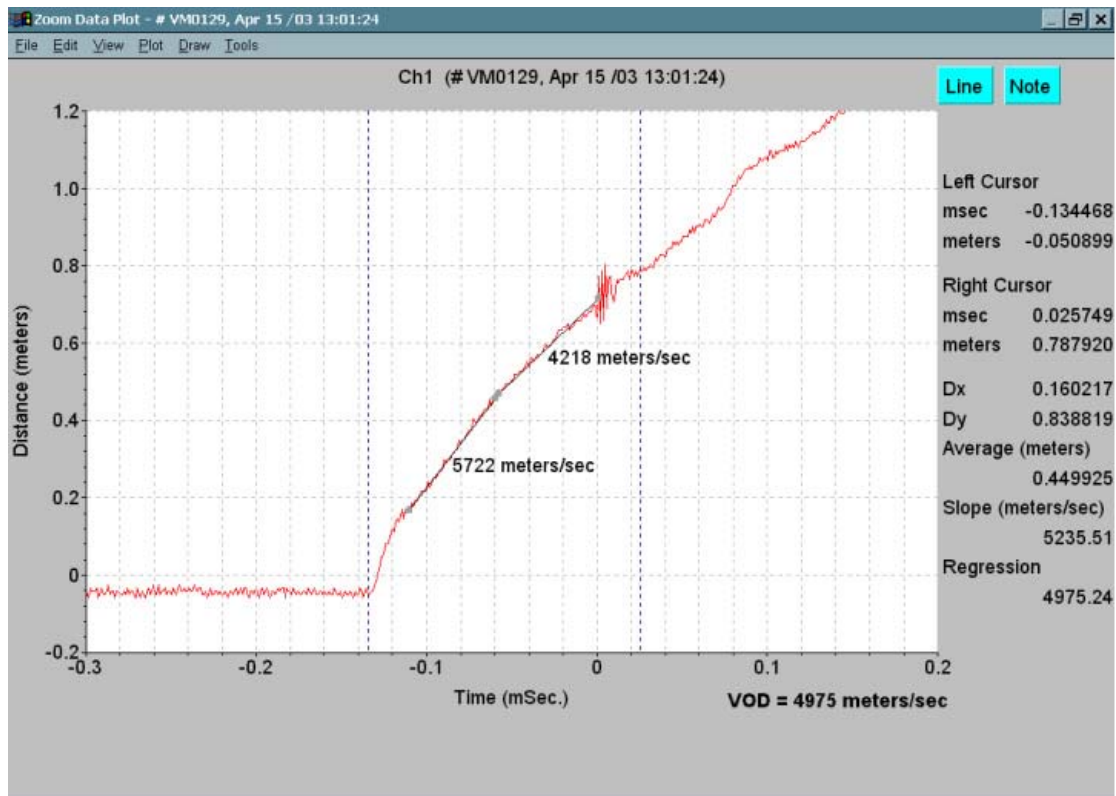
Με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφηκε στον παράγραφο 4.2 ο χρόνος καθυστέρησης υπολογίστηκε στα **57,4 ms**. Συγκεκριμένα ο χρόνος της πρώτης ανατίναξης ήταν 0,3 ms και της δεύτερης 57,7 ms. Ο χρόνος αυτός είναι μακριά από τον χρόνο των 25 ms που δίνει ο κατασκευαστής. Αυτή η μεγάλη απόκλιση (32,4 ms) μπορεί να οφείλεται στους ίδιους παράγοντες που αναφέρονται στην παράγραφο 4.1

Και πάλι με την βοήθεια των εργαλείων λογισμικού του Blastware Analysis μπορεί να γίνει πιο λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων στις περιοχές 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Στο Σχ. 4.18 δίνεται η μεγένθυση της περιοχής μελέτης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος



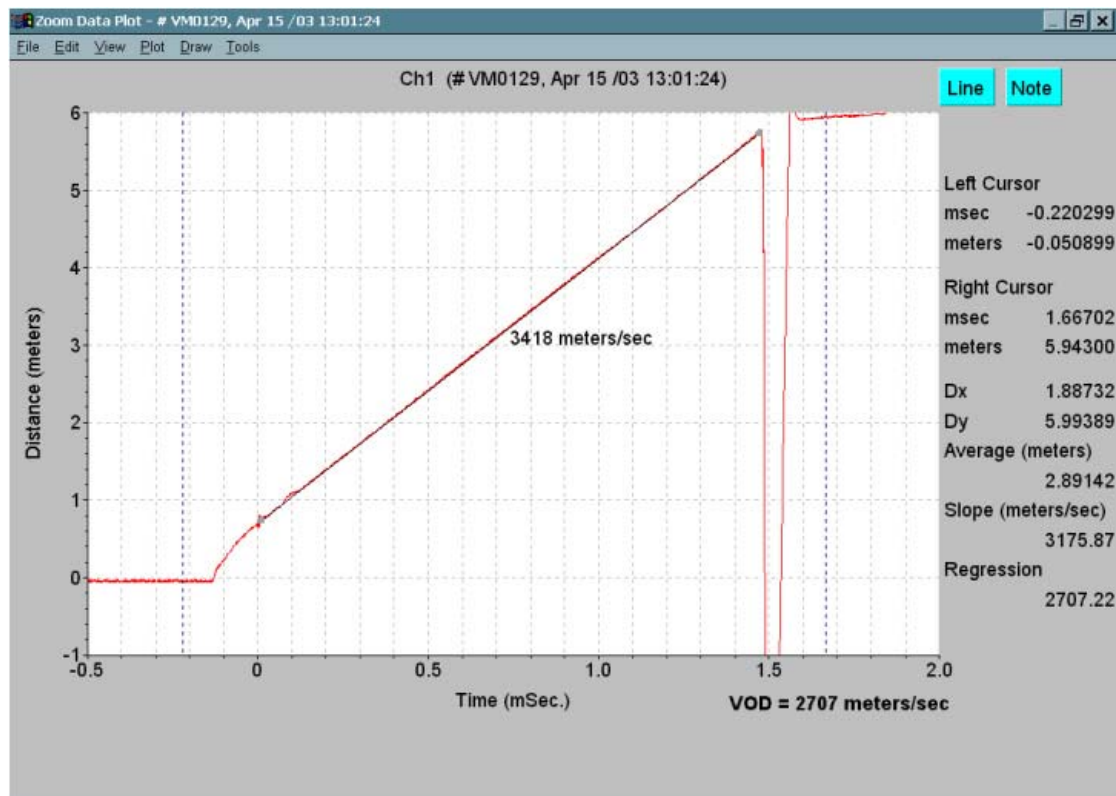
Σχ. 4.18: Μεγέθυνση περιοχής έκρηξης πρώτου διατρήματος, 2<sup>ης</sup> μέτρησης

Η περιοχή 1 αναφέρεται στην ταχύτητα έκρηξης του ζελατοδυναμμίτη, και όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.21 το λογισμικό δίνει μία μέση ταχύτητα **5316 m/s**. Όπως επίσης είναι φανερό η ταχύτητα παρουσιάζει μια κατανομή από μεγάλες τιμές προς τις μικρότερες. Δηλαδή η ταχύτητα έκρηξης του φθάνει σχεδόν αμέσως σε μία μέγιστη τιμή και έπειτα ακολουθεί φθίνουσα πορεία. Συγκεκριμένα ο ζελατοδυναμμίτης ξεκινά την έκρηξη του με ταχύτητα **5722 m/s** και προοδευτικά η ταχύτητα πέφτει στα **4218 m/s**.



Σχ. 4.19: Μεγέθυνση περιοχής 1

Η περιοχή 2 αναφέρεται στην ταχύτητα έκρηξης του ANFO και όπως είναι φανερό η ταχύτητα έκρηξης του, είναι σταθερή σε όλο το μήκος της διατρητικής στήλης. Αυτό σημαίνει ότι η ανατίναξη από χημικής πλευράς είναι πετυχημένη. Το λογισμικό για την περιοχή αυτή υπολόγισε την ταχύτητα έκρηξης του ANFO σε **3418 m/s**, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.22. Και πάλι η ταχύτητα έκρηξης του ANFO είναι μεγαλύτερη από την τιμή των 3000 m/s που δίνει ο κατασκευαστής. Η εξήγηση που δίνεται στο γεγονός της επίτευξης μεγαλύτερης ταχύτητας έκρηξης του ANFO από την επιθυμητή δίνεται στην παράγραφο 4.1.



Σχ. 4.20: Μεγέθυνση περιοχής 2

Τα Σχ. 4.21 και Σχ.4.22 είναι μεγέθυνση της περιοχής που αντιστοιχεί στην ανατίναξη του 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Σε αυτό το διάστημα η γόμωση πυθμένα δεν παρουσιάζεται πουθενά στα δεδομένα της μέτρησης, ενώ παρουσιάζεται μόνο η έκρηξη του ANFO.

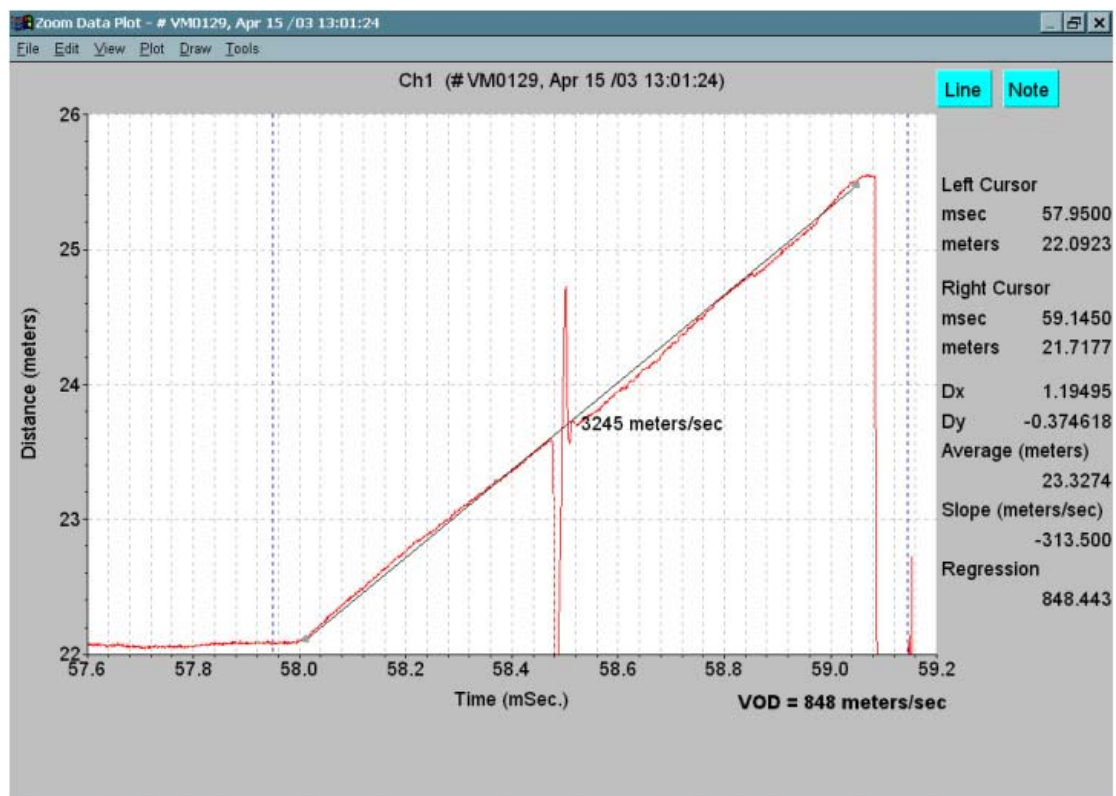
Στα δεδομένα μέτρησης του 2<sup>ου</sup> διατρήματος παρατηρείται μία ανεξήγητη ανωμαλία – παρεμβολή στο μέσο περίπου της διατρητικής στήλης. Το γεγονός αυτό δίνει την δυνατότητα διπλής ερμηνείας. Η πρώτη ερμηνεία είναι ότι το ANFO για κάποιους λόγους (βλ παράγρ. 4.1) δεν αποκτά αρχικά την μέγιστη ταχύτητα αντίδρασης και σε κάποιο σημείο όπου οι προϋποθέσεις γίνονται κατάλληλες το ANFO «αρπάζει» και πετυχαίνει την ιδανική ταχύτητα. Σε αυτή την περίπτωση οι ταχύτητες έκρηξης του ANFO είναι **3172 m/s** και **3421 m/s** αντίστοιχα (Σχ. 4.21)

Η δεύτερη ερμηνεία είναι ότι η παρεμβολή αυτή προκάλεσε μία μετατόπιση των μετρούμενων τιμών στον κατακόρυφο άξονα προς μικρότερες τιμές και έτσι το λειτουργικό δίνει την ψευδή εικόνα των δύο διαφορετικών τιμών, ενώ στην πραγματικότητα η ταχύτητα έκρηξης είναι μία με τιμή **3245 m/s** (Σχ. 4.22).



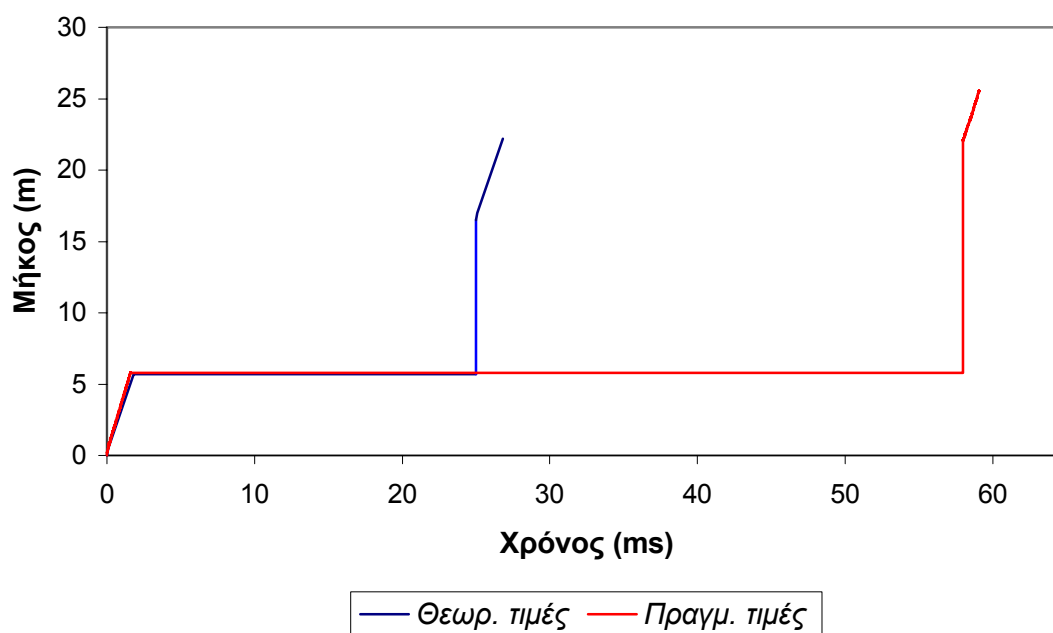


Σχ. 4.21: Μεγέθυνση περιοχής έκρηξης 2ου διατρήματος, 2<sup>ης</sup> μέτρησης (1<sup>η</sup> ερμηνεία)



Σχ. 4.22: Μεγέθυνση περιοχής έκρηξης 2<sup>ου</sup> διατρήματος, 2<sup>ης</sup> μέτρησης (2<sup>η</sup> ερμηνεία)

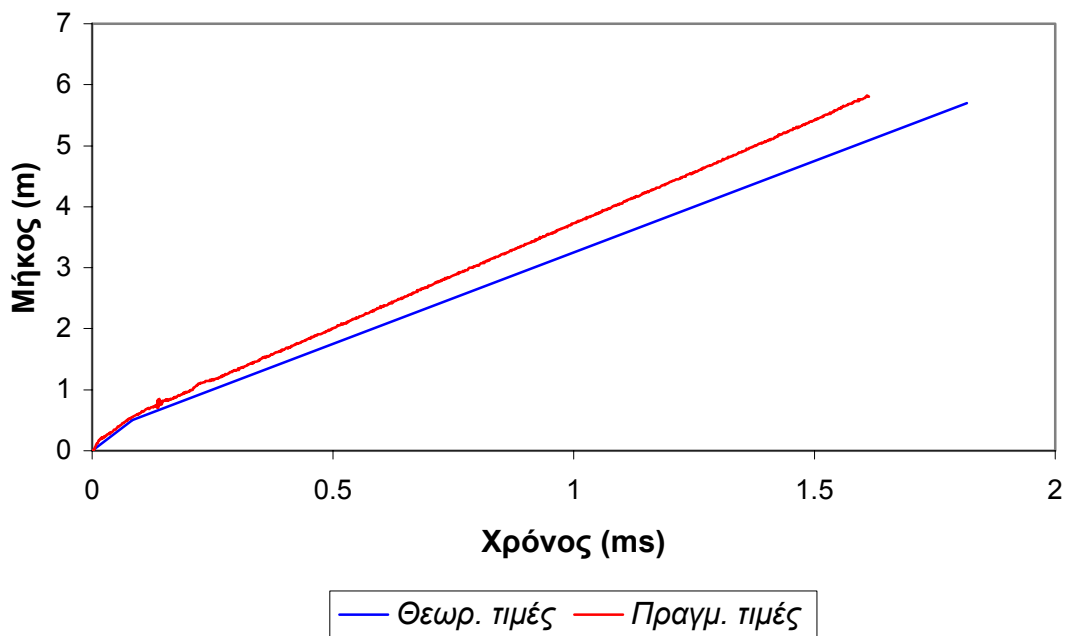
Στο Σχ. 4.23 δίνονται σε κοινό διάγραμμα οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές της 2<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης στο λατομείο της περιοχής Αγ. Γεωργίου. Όπως γίνεται φανερό παρατηρώντας το διάγραμμα του Σχ. 4.23 τα συστήματα επιβράδυνσης απέτυχαν.



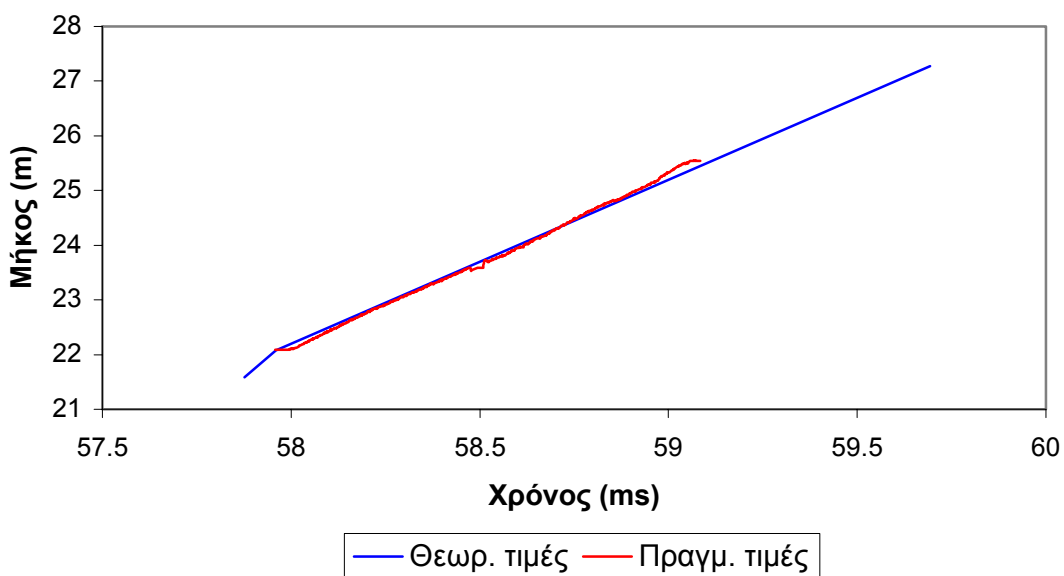
Σχ. 4.23: Κοινό διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών τιμών.

Στο Σχ. 4.24 δίνεται σε μεγέθυνση το γεγονός έκρηξης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος. Στην ανατίναξη του ενισχυτικού έναυσης υπάρχει σχεδόν πλήρης ταύτιση, αλλά μόλις αρχίζει η ανατίναξη του ANFO παρατηρείται μια απόκλιση των θεωρητικών και πραγματικών τιμών, με μεγαλύτερες τιμές αυτές των πραγματικών.

Στο Σχ. 4.25 δίνονται οι θεωρητικές και πραγματικές τιμές της μέτρησης, αλλά με την διαφορά ότι οι θεωρητικές τιμές έχουν μεταφερθεί κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερη η σύγκριση με τις πραγματικές τιμές. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.2.1 αφενός δεν διακρίνεται πουθενά η γόμωση πυθμένα και αφετέρου η ταχύτητα έκρηξης του ANFO είναι σχεδόν ταυτόσημη της ιδανικής.



Σχ. 4.24: Μεγέθυνση περιοχής 1<sup>ου</sup> διατρήματος



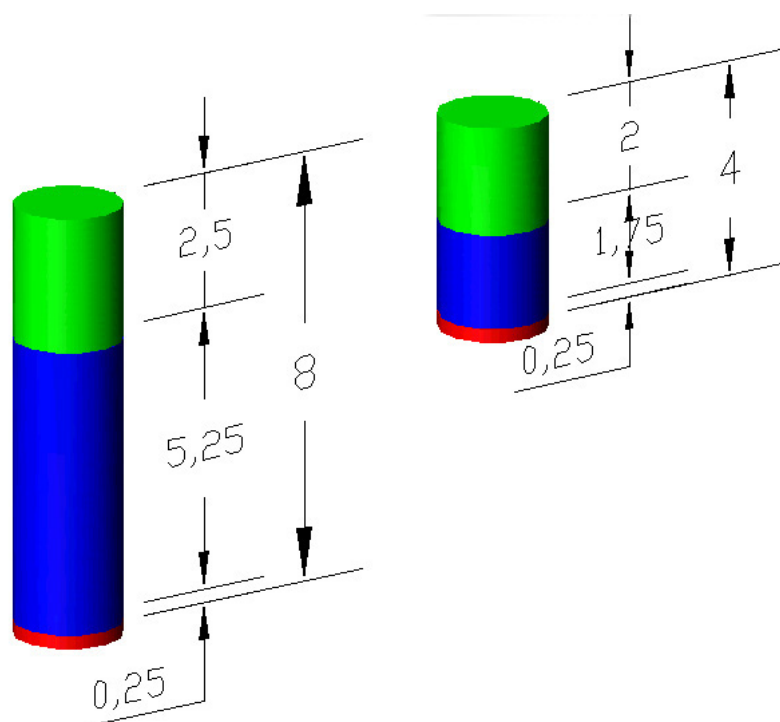
Σχ. 4.25: Μεγέθυνση περιοχής 2<sup>ου</sup> διατρήματος

### 4.2.3 Τρίτη μέτρηση

Η 3<sup>η</sup> μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης έλαβε χώρα σε δύο διατρήματα στη σειρά. Παρουσία κίτρινου καπνού σε αυτή την μέτρηση, επίσης δεν ανιχνεύτηκε.



Το πρώτο διάτρημα είχε μήκος 8 m και το δεύτερο 4 m. Σαν γόμωση πυθμένα στο πρώτο διάτρημα χρησιμοποιήθηκε 1,25 kg ζελατοδυναμίτη, δηλαδή 1/2 φυσίγγιο, σαν γόμωση στήλης τοποθετήθηκαν 42 kg ANFO και τέλος, το διάτρημα επιγομώθηκε με παράγωγα της διάτρησης. Στο δεύτερο διάτρημα σαν γόμωση πυθμένα χρησιμοποιήθηκε επίσης 1,25 kg ζελατοδυναμίτη, σαν γόμωση στήλης προστέθηκαν 11 kg ANFO και τέλος, το διάτρημα επιγομώθηκε (Σχ. 4.26). Ο χρόνος καθυστέρησης ήταν 25 ms. Η φορά ανατίναξης είναι από αριστερά προς τα δεξιά.

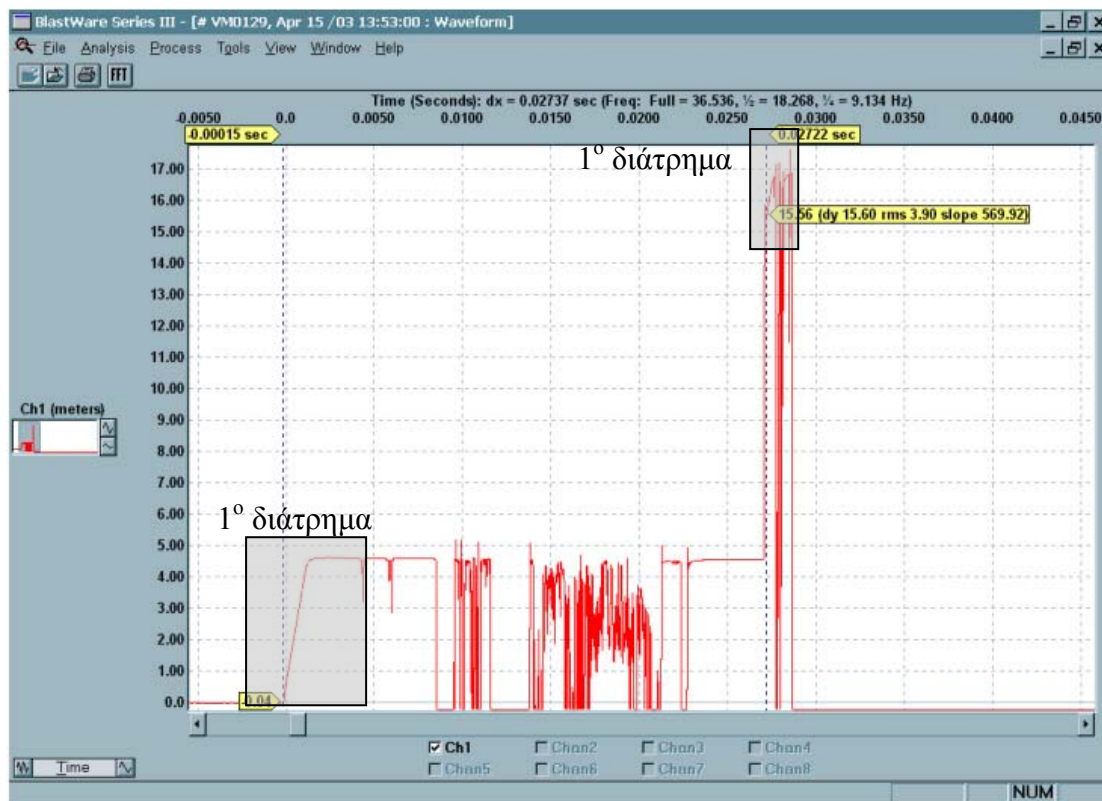


Σχ. 4.26: Διάγραμμα γόμωσης διατρημάτων 3<sup>ης</sup> μέτρησης

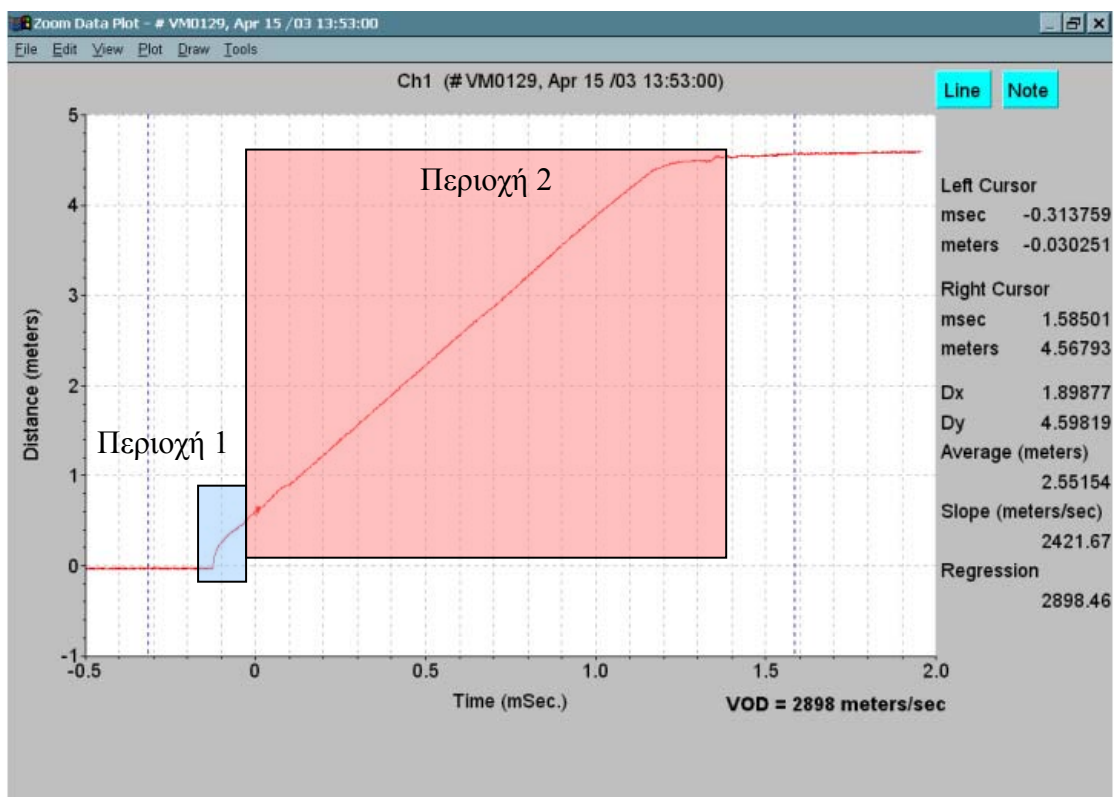
Στο Σχ. 4.27 δίνονται τα δεδομένα της 3<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης και τονίζονται οι περιοχές του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> διατρήματος

Με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφηκε στον παράγραφο 4.1 ο χρόνος καθυστέρησης υπολογίστηκε στα 27,3 ms. Ο χρόνος αυτός είναι πολύ κοντά στον χρόνο των 25 ms που δίνει ο κατασκευαστής. Σε αυτή την περίπτωση τα καψύλλια και οι σύνδεσμοι λειτούργησαν πολύ καλά.

Ξανά με την βοήθεια των εργαλείων λογισμικού του Blastware Analysis μπορεί να γίνει πιο λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων στις περιοχές 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Στο Σχ. 4.28 δίνεται η μεγέθυνση της περιοχής μελέτης 1<sup>ου</sup> διατρήματος.

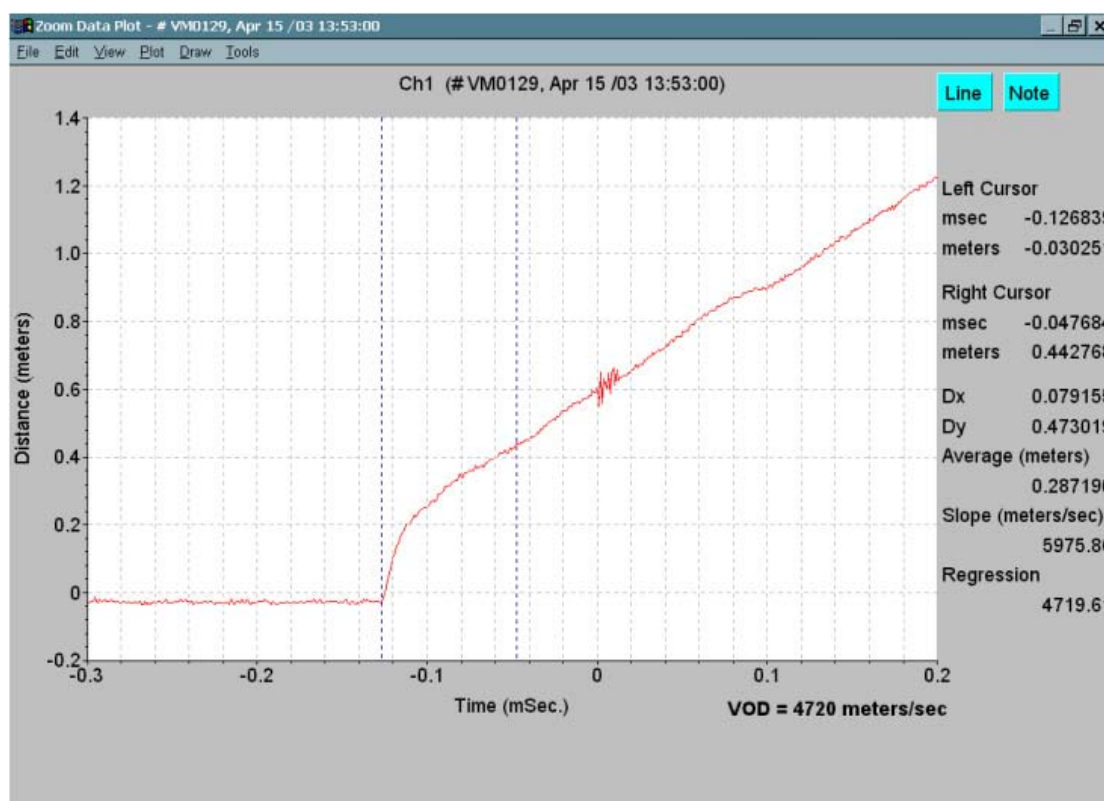


Σχ. 4.27: Δεδομένα της 3<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης



Σχ. 4.28: Μεγένθυση περιοχής έκρηξης πρώτου διατρήματος, 3<sup>ης</sup> μέτρησης

Η περιοχή 1 αναφέρεται στην ταχύτητα έκρηξης του ζελατοδυναμμίτη, και όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.29 το λογισμικό υπολόγισε μια μέση ταχύτητα **4720 m/s**. Πάλι η ταχύτητα έκρηξης όπως και στην περίπτωση που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.2 έχει μεγάλη αρχική τιμή και προοδευτικά ακολουθώντας φθίνουσα πορεία καταλήγει σε μία χαμηλότερη τιμή.

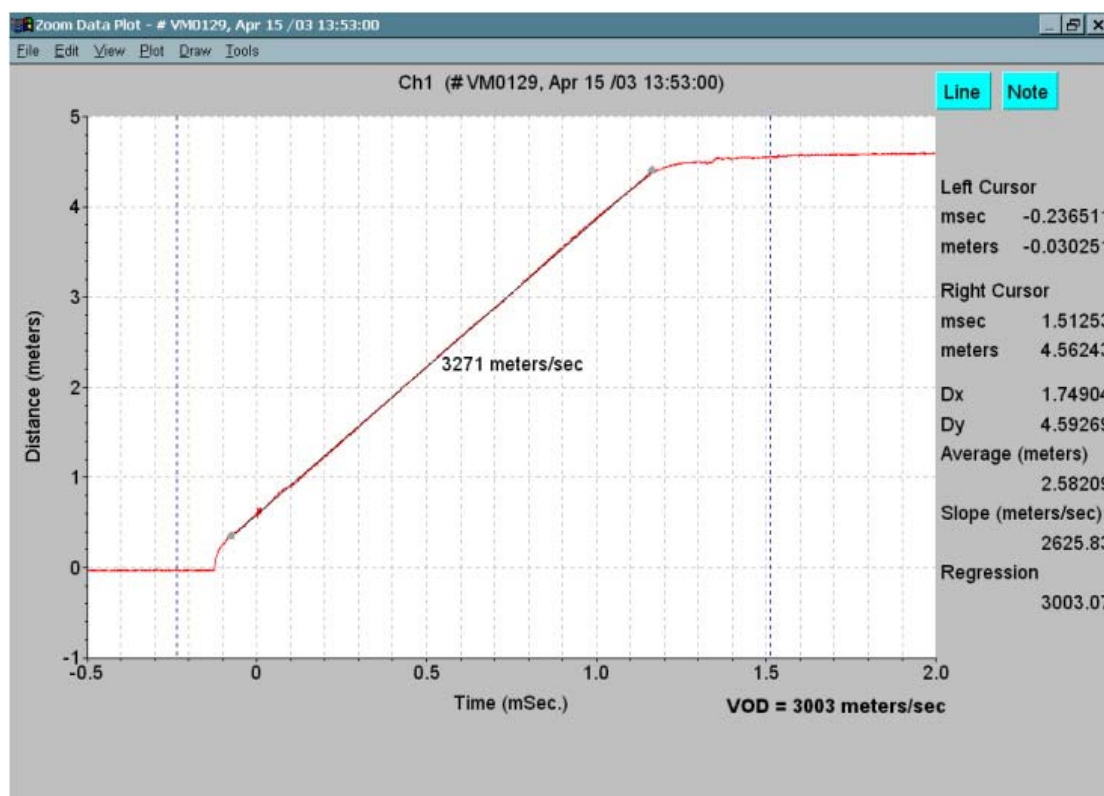


Σχ. 4.29: Μεγέθυνση περιοχής 1

Η περιοχή 2 οφείλεται στην ταχύτητα έκρηξης του ANFO και όπως είναι φανερό και σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα έκρηξής του, είναι σταθερή σε όλο το μήκος της διατρητικής στήλης. Το λογισμικό για την περιοχή αυτή υπολόγισε την ταχύτητα έκρηξης του ANFO σε **3271 m/s**, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.30. Η ταχύτητα έκρηξης του ANFO είναι μεν μεγαλύτερη από αυτή την οποία δίνει ο κατασκευαστής αλλά μέσα στα όρια του ανεκτού.

Το Σχ. 4.31 είναι μεγέθυνση της περιοχής που αντιστοιχεί στην ανατίναξη του 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Και σε αυτό το διάτρημα η γόμωση πυθμένα παραδόξως δεν παρουσιάζεται πουθενά, και τα δεδομένα της μέτρησης δείχνουν μόνο την ταχύτητα έκρηξης του ANFO. Η ταχύτητα του υπολογίστηκε από το λογισμικό σε **3389 m/s**.

Η εξήγηση που δίνεται στο γεγονός της επίτευξης μεγάλης ταχύτητας έκρηξης του ANFO δίνεται στην παράγραφο 4.1.



Σχ. 4.30: Μεγέθυνση περιοχής 2

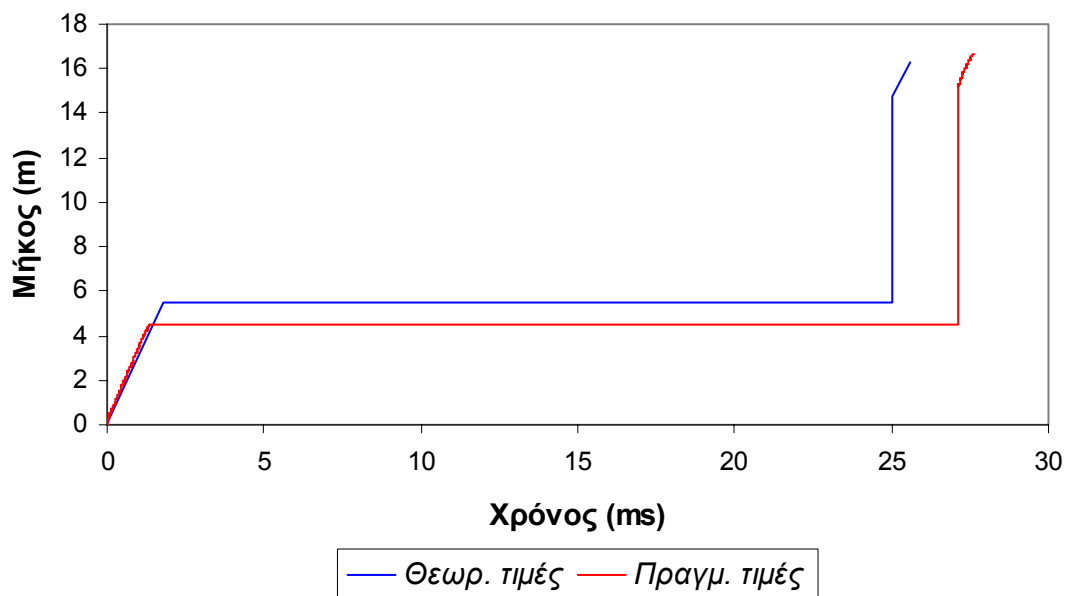
Η περιοχή 2 οφείλεται στην ταχύτητα έκρηξης του ANFO και όπως είναι φανερό και σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα έκρηξης του, είναι σταθερή σε όλο το μήκος της διατρητικής στήλης. Το λογισμικό για την περιοχή αυτή υπολόγισε την ταχύτητα έκρηξης του ANFO σε **3271 m/s**, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.30. Η ταχύτητα έκρηξης του ANFO είναι μεν μεγαλύτερη από αυτή την οποία δίνει ο κατασκευαστής αλλά μέσα στα όρια του ανεκτού.

Το Σχ. 4.31 είναι μεγέθυνση της περιοχής που αντιστοιχεί στην ανατίναξη του 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Και σε αυτό το διάτρημα η γόμωση πυθμένα παραδόξως δεν παρουσιάζεται πουθενά, και τα δεδομένα της μέτρησης δείχνουν μόνο την ταχύτητα έκρηξης του ANFO. Η ταχύτητά του, υπολογίστηκε από το λογισμικό σε **3389 m/s**.

Η εξήγηση που δίνεται στο γεγονός της επίτευξης μεγάλης ταχύτητας έκρηξης του ANFO δίνεται στην παράγραφο 4.1.



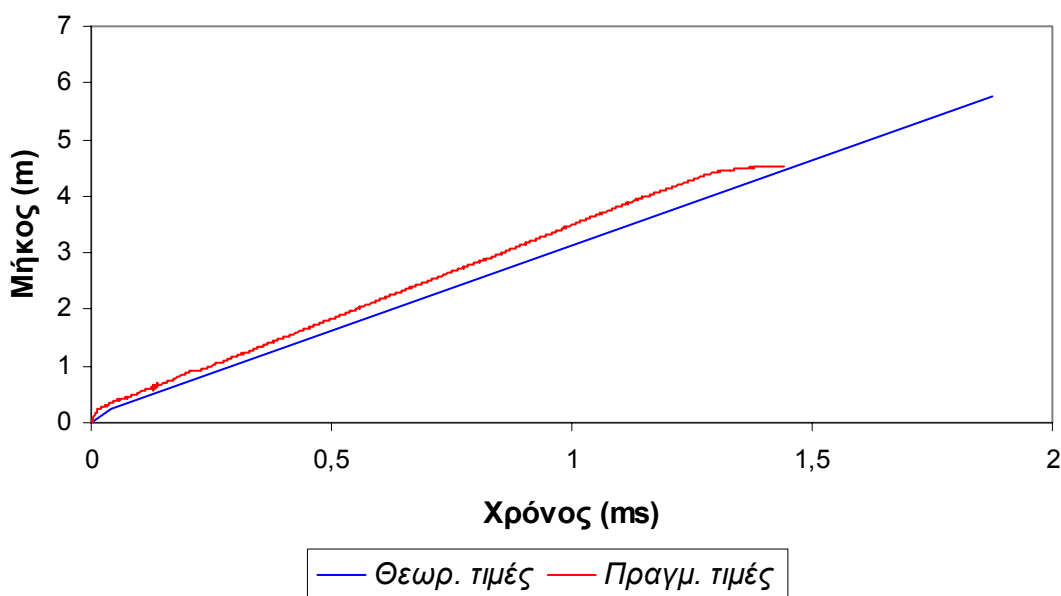
Σχ. 4.31: Μεγέθυνση περιοχής έκρηξης δεύτερου διατρήματος, 3<sup>ης</sup> μέτρησης



Σχ. 4.32: Κοινό διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών τιμών.

Στο Σχ. 4.32 δίνονται σε κοινό διάγραμμα οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές της 3<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης στο λατομείο της περιοχής Αγ. Γεωργίου.

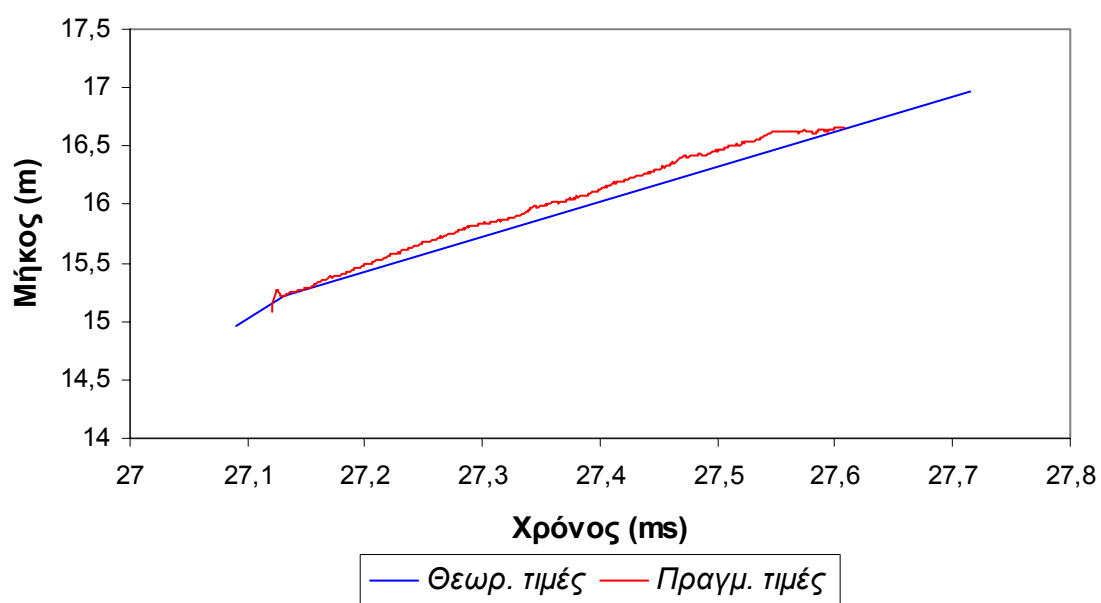
Όπως γίνεται φανερό από μία γρήγορη εξέταση στο διάγραμμα του Σχ.4.32 με εξαίρεση το μικρότερο του αναμενόμενου μήκος της στήλης και της μικρής απόκλισης στους χρόνους καθυστέρησης η ανατίναξη λειτούργησε σχεδόν όπως είχε σχεδιαστεί. Το γεγονός μικρότερου μήκους του 1<sup>ου</sup> διατρήματος μπορεί να οφείλεται σε πιθανή ελλειπή γόμωση της στήλης.



Σχ. 4.33: Μεγέθυνση περιοχής 1<sup>ου</sup> διατρήματος.

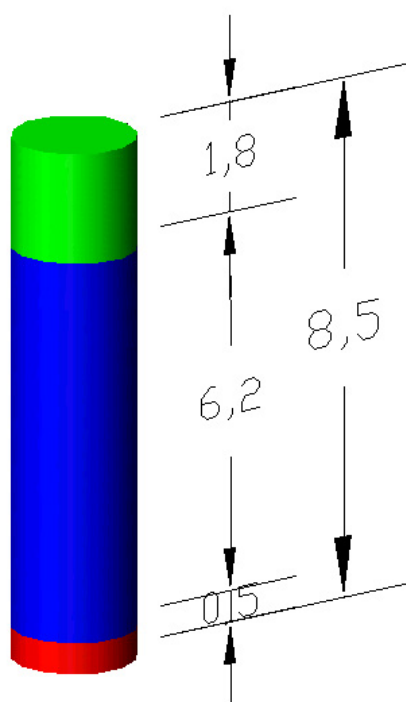
Το Σχ. 4.33 δείχνει σε μεγέθυνση το γεγονός της έκρηξης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος. Στην ανατίναξη του ενισχυτικού έναυσης αλλά και στην ανατίναξη του ANFO υπάρχει σχεδόν πλήρης ταύτιση, με εμφανώς, αλλά ελάχιστα μετατοπισμένες τις πραγματικές τιμές προς μεγαλύτερες τιμές ως προς τον κατακόρυφο άξονα.

Στο Σχ. 4.34 δίνονται οι θεωρητικές και πραγματικές τιμές της μέτρησης του δεύτερου διατρήματος, αλλά με την διαφορά ότι οι θεωρητικές τιμές έχουν μεταφερθεί κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερη η σύγκριση με τις πραγματικές τιμές με σκοπό την ασφαλέστερη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αφενός δεν διακρίνεται πουθενά η γόμωση πυθμένα και αφετέρου η ταχύτητα έκρηξης του ANFO είναι μεγαλύτερης της αναμενόμενης.



Σχ. 4.33: Μεγέθυνση περιοχής 2<sup>ου</sup> διατρήματος.

#### 4.2.4 Τέταρτη μέτρηση

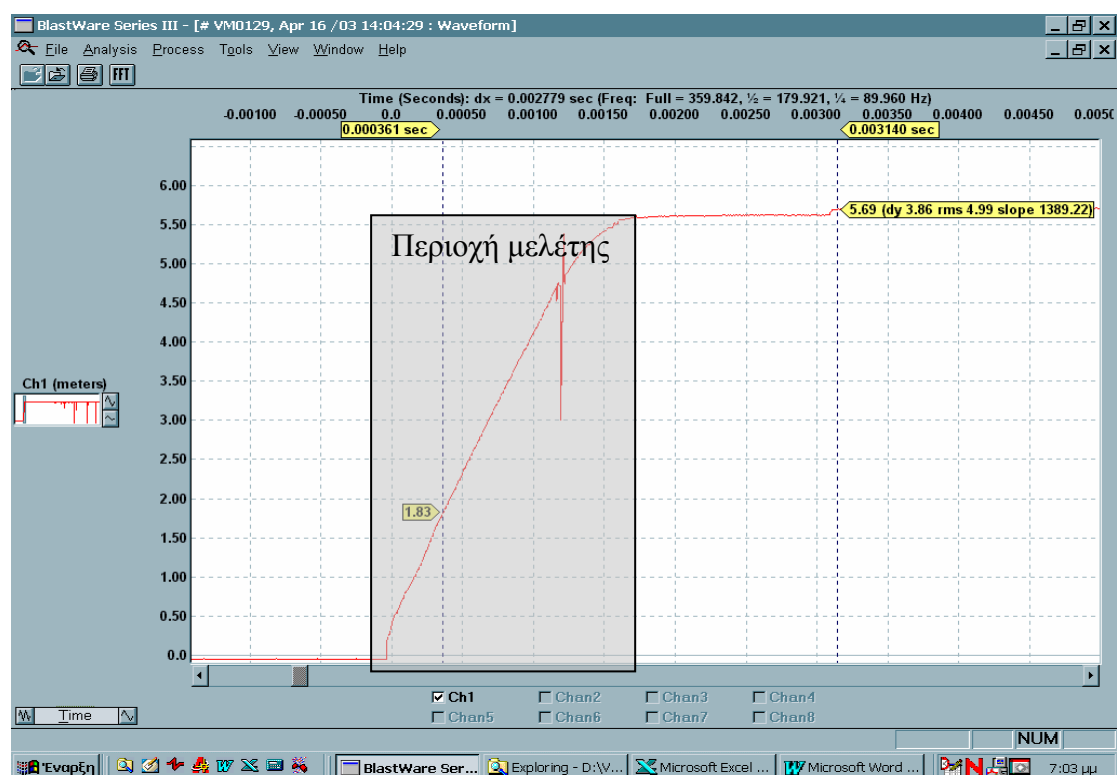


Σχ. 4.34: Διάγραμμα γόμωσης διατρήματος 4<sup>ης</sup> μέτρησης



Η 4<sup>η</sup> μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης έλαβε χώρα σε απλό διάτρημα. Το διάτρημα είχε μήκος 8,5 m. Σαν γόμωση πυθμένα χρησιμοποιήθηκαν 2,5 kg ζελατοδυναμίτη, ήτοι 1 φυσίγγιο, σαν γόμωση στήλης τοποθετήθηκαν 46 kg ANFO και τέλος, το διάτρημα επιγομώθηκε με προϊόντα της διάτρησης (Σχ. 4.34).

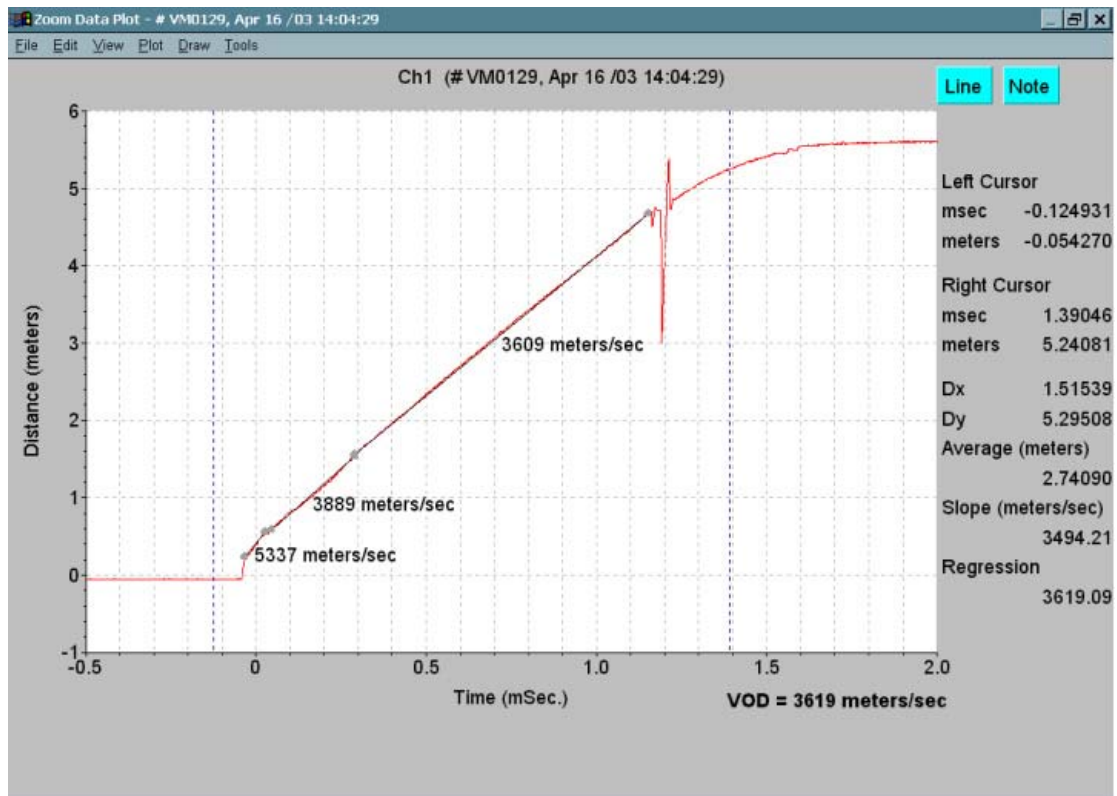
Στο Σχ. 4.35 δίνονται τα δεδομένα της 4<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης και επισημαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος. Στο Σχ. 4.36 δίνεται η μεγέθυνση της υπό εξέτασης περιοχής. Στην περιοχή μελέτης φαίνονται δύο ταχύτητες έκρηξης, μία ταχύτητα για τον ζελατοδυναμίτη και μία μέση ταχύτητα για το ANFO.



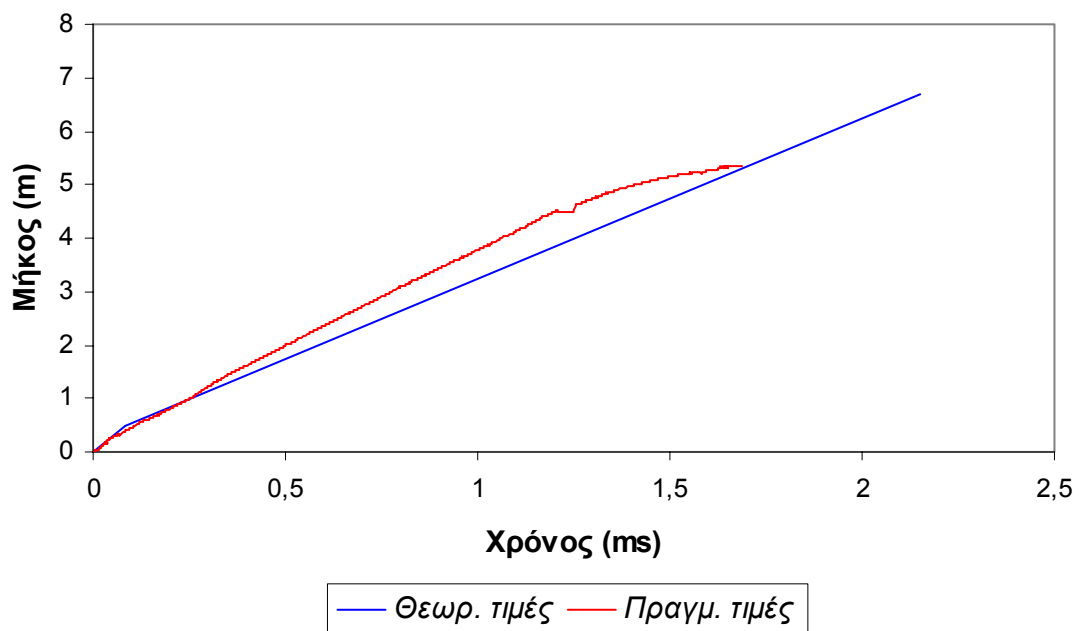
Σχ. 4.35: Δεδομένα της 4<sup>ης</sup> μέτρησης ταχύτητας έκρηξης

Η ταχύτητα του ζελατοδυναμίτη υπολογίστηκε σε **5337 m/s**. Η μέση ταχύτητα έκρηξης του ANFO υπολογίστηκε σε **3700 m/s**. Το ANFO φαίνεται να αποκτά μία αρκετά μεγάλη ταχύτητα έκρηξης και προοδευτικά αυτή να μειώνεται. Η μείωση της ταχύτητας του ANFO λόγω του ρυθμού μείωσης αυτής δικαιολογείται ίσως από την κατανομή πυκνότητας που υπάρχει από τον πάτο μέχρι την κορυφή της στήλης. Στο Σχ. 4.36 δίνονται χαρακτηριστικά κάποιες στιγμιαίες ταχύτητες που κάνουν φανερή τη μείωση αυτή. Η αρχική ταχύτητα έκρηξης του ANFO είναι **3889 m/s** και η τελική **3609 m/s**.





Σχ. 4.36: Μεγέθυνση περιοχής μελέτης



Σχ. 4.37: Κοινό διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών τιμών.

Στο Σχ. 4.37 δίνονται σε κοινό διάγραμμα τα δεδομένα της μέτρησης και οι ιδανικές τιμές. Από μία σύγκριση των γραμμών παρατηρείται σχεδόν ταύτιση των τιμών στο γεγονός έκρηξης του ζελατοδυναμίτη και μεγάλη απόκλιση των τιμών του ANFO.

### 4.3 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΙΚΟΝΙΟΥ

Στις 21/5/2003 έγινε μέτρηση ταχύτητας έκρηξης στην περιοχή του Ικονίου Σκαρμαγκά. Για την ανατίναξη χρησιμοποιήθηκε σαν ενισχυτικό ζελατοδυναμίτης της EXTRACO SA, σε φυσίγγια 56 x 700 mm, με βάρος 2,5 kg/φυσίγγιο του οποίου τα χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 4.2.

Σαν εκρηκτική ύλη χρησιμοποιήθηκε έτοιμο ANFO, του οποίου τα χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 4.3. Τα καψύλλια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν μη ηλεκτρικά SCH, με καθυστέρηση 325 ms στο καψύλλιο πυθμένα και 17 ms στο σύνδεσμο επιφανειακής σύνδεσης. Η διάμετρος των διατρημάτων ήταν 76 mm. Ο κάναβος διάτρησης ήταν 2x2m ενώ το φορτίο υπολογίστηκε σε 2 m.

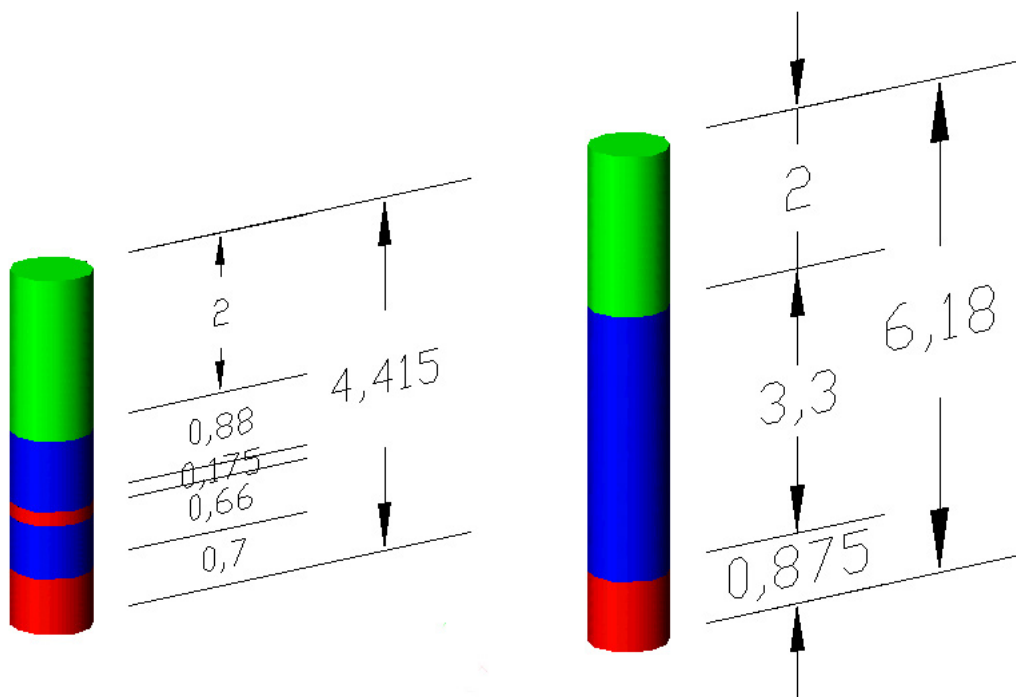
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά ζελατοδυναμίτη της EXTRACO SA

<b>EXTRACO<sup>SA</sup></b> <b>ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ &amp; ΧΗΜΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ</b>		
COMMERCIAL NAME	AUSTROGEL G1	ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ
TECHNICAL NAME	ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ, ΤΥΠΟΥ Α	ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ
UN-number	0081	ΑΡΙΘΜΟΣ UN (ΗΝΩΜΕΝΩΝ ΕΘΝΩΝ)
ADR item	4*	ΕΙΔΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ADR
DIVISION/COMPATIBILITY GROUP	1.1 D	ΟΜΑΔΑ ΕΠΙΚΙΝ/ΤΗΤΑΣ-ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΟΤΗΤΑΣ
DENSITY	1.5 gr/cm <sup>3</sup>	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ
RELATIVE WEIGHT STRENGTH	85 %	ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑ ΒΑΡΟΣ ΙΣΧΥΣ
STRENGTH (TRAUZZL LEAD BLOCK TEST)	380 ml	ΙΣΧΥΣ (TRAUZZL LEAD BLOCK TEST)
BRISANCE (HESS TEST)	18 mm	ΘΡΑΥΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (ΜΕΘΟΔΟΣ HESS)
VELOCITY OF DETONATION	6,000 m/sec	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΚΡΗΞΗΣ
<small>The above results are long term averages. Values may be subject to change.            Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτελούν μέσους όρους, όπως αυτοί έχουν προκύψει από τις μέχρι σήμερα μετρήσεις. Οι τιμές αυτές, μπορεί να διαφοροποιηθούν με γνωστοποίηση.</small>		
<b>Theoretical - Experimental Calculations</b>		<b>Θεωρητικοί υπολογισμοί - Πειραματικές Μετρήσεις</b>
OXYGEN BALANCE	+4.0 %	ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΟΞΥΓΟΝΟΥ
ENERGY OF EXPLOSION	995 Kcal/Kg	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΡΗΞΗΣ
GAS VOLUME	890 lt/Kg	ΟΓΚΟΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ
EXPLOSION TEMPERATURE	3490 °C	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΚΡΗΞΗΣ
FRICTION SENSITIVITY	≥36 kg pistil load	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΣΕ ΤΡΙΒΗ
IMPACT SENSITIVITY	≥0.2 kp m	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ
HEAT SENSITIVITY	Limiting diameter: 14 mm Time until ignition: 10 sec Time of combustion: 0 sec	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΣΕ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ
<small>Recommended use: Within twelve (12) months from the date of manufacture.            Προτεινόμενος χρόνος για ασφαλή χρήση: Μέσα σε δώδεκα (12) μήνες από την ημερομηνία παρασκευής.</small>		
<small><b>Storage conditions - Συνθήκες αποθήκευσης</b>            The product is an explosive and therefore, must be handled, stored, and transported according to the local and International rules.            Το προϊόν είναι εκρηκτική ύλη και για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται, να αποθηκεύεται και να μεταφέρεται σύμφωνα με τις εθνικές και διεθνείς συμβάσεις.            Keep it in a dry, cool, well ventilated, authorized place, away from sources of heat, flames, ignition and direct sunlight.            Διατηρείτε το προϊόν σε ξηρό, δροσερό και καλά αεριζόμενο χώρο, εγκατεσμένο από τις αρμόδιες αρχές, μακριά από πηγές θερμότητας, φλόγας, ενανσματοικά μέσα, και ηλεκτά φως.            Keep it locked up.            Το προϊόν πρέπει να φυλάσσεται πάντοτε κλειδωμένο.            Do not store the product with detonators in the same magazine.            Μην αποθηκεύετε το προϊόν μαζί με πυροκροτητές στην ίδια αποθήκη.            Store the product in original case only, up to +32 °C.            Αποθηκεύετε το προϊόν εντός της αρχικής του συσκευασίας μόνο, σε θερμοκρασία μέχρι +32 °C.            Explosives and Blasting accessories must be used by skilled personnel only.            Οι εκρηκτικές ύλες και τα ενανσματοικά μέσα, πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο από το κατάλληλα εκπαυμένο προσωπικό.</small>		

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά ANFO

1. Πυκνότητα εκρηκτικής ύλης	: 0,8 g/cm <sup>3</sup>
2. Ισχύς	: 480 MJ
3. Ταχύτητα έκρηξης (περιορισμό)	: 3000 m/s
4. Ενέργεια εκρηκτικών αερίων	: 925 kcal/kg
5. Όγκος εκλυόμενων αερίων	: 970 lt/kg
6. Θερμότητα έκρηξης	: 2620 °C
7. Ευαισθησία σε τριβή	: 360 N
7. » » σε κρούση	: 50 J
8. Ελαστικότητα	: 2,5 mm
9. Ελάχιστη διάμετρος	: 42 mm

Η μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης έλαβε χώρα σε δύο διατρήματα στη σειρά. Το πρώτο διάτρημα είχε μήκος 4,5 m και το δεύτερο 6 m. Σαν γόμωση πυθμένα στο πρώτο διάτρημα χρησιμοποιήθηκε 2,5 kg ζελατοδυναμίτη, δηλαδή 1 φυσίγγιο, σαν γόμωση στήλης τοποθετήθηκαν 3 kg ANFO. Κατόπιν στο διάτρημα προστέθηκαν 0,625 kg ζελατοδυναμίτη, δηλαδή ¼ φυσίγγιο και μετά 4 kg ANFO. Τέλος, το διάτρημα επιγομώθηκε με παράγωγα της διάτρησης. Στο δεύτερο διάτρημα σαν γόμωση πυθμένα χρησιμοποιήθηκε επίσης 3,125 kg ζελατοδυναμίτη, δηλαδή 1¼ φυσίγγια σαν γόμωση στήλης προστέθηκαν 15 kg ANFO και τέλος, το διάτρημα επιγομώθηκε με προϊόντα της διάτρησης (Σχ. 4.38). Η φορά ανατίναξης είναι από αριστερά προς τα δεξιά.



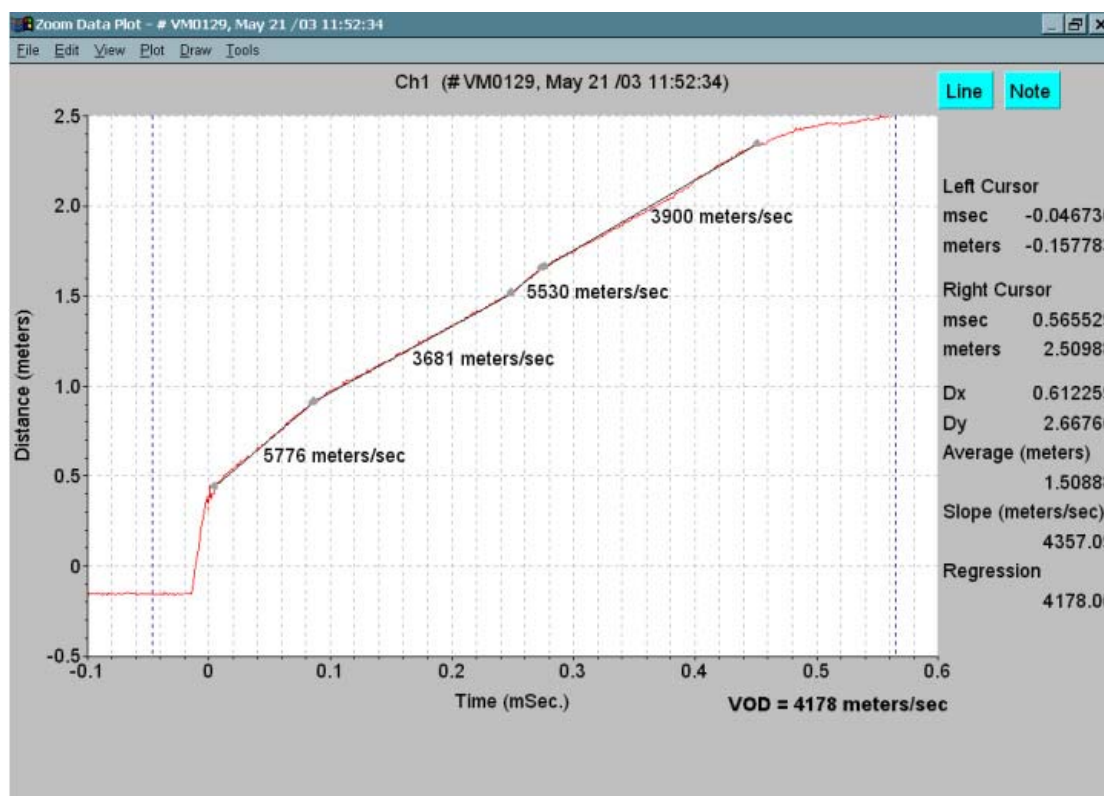
Σχ. 4.38: Διάγραμμα γόμωσης διατρημάτων



Σχ. 4.39: Δεδομένα της μέτρησης ταχύτητας έκρηξης

Με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2 ο χρόνος καθυστέρησης υπολογίστηκε στα 16,9 ms. Ο χρόνος αυτός είναι σχεδόν ίδιος με τον χρόνο των 17 ms που δίνει ο κατασκευαστής.

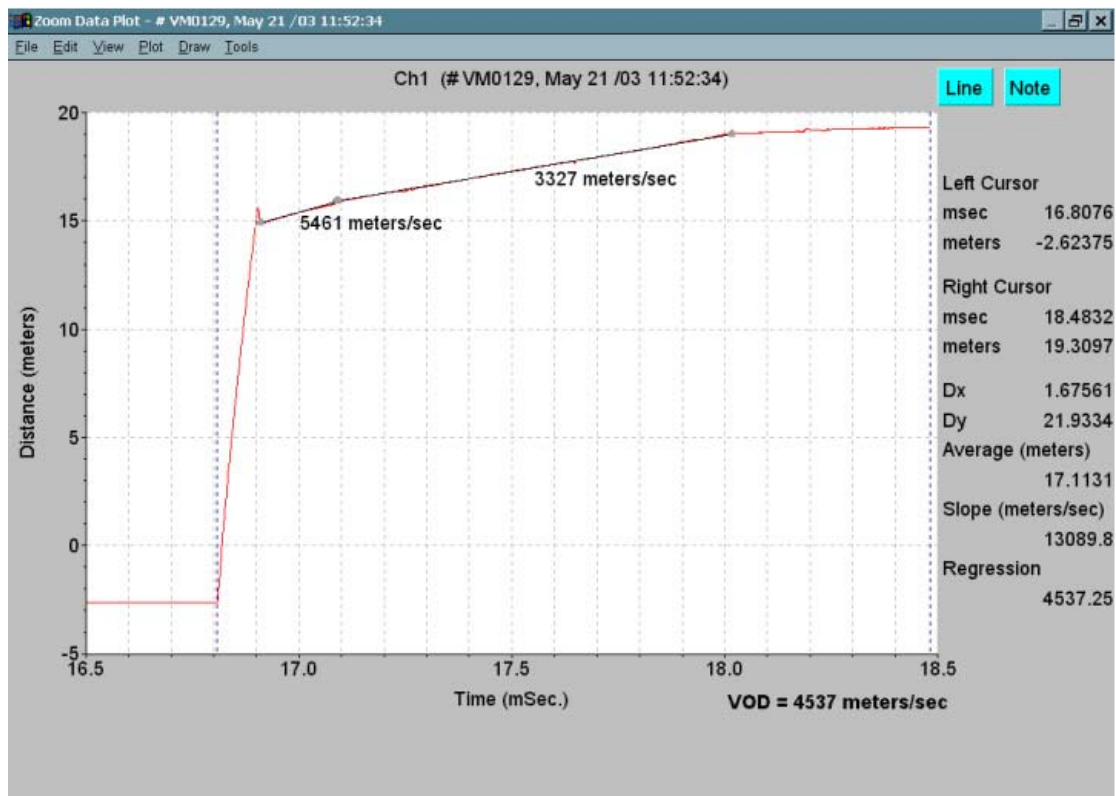
Με τη βοήθεια του λογισμικού Blastware Analysis γίνεται επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων στις περιοχές 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Στο Σχ. 4.40 δίνεται η μεγέθυνση της περιοχής μελέτης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος.



Σχ. 4.40: Μεγένθυση περιοχής έκρηξης πρώτου διατρήματος, και ανάλυση με τη βοήθεια λογισμικού Blastware Analysis

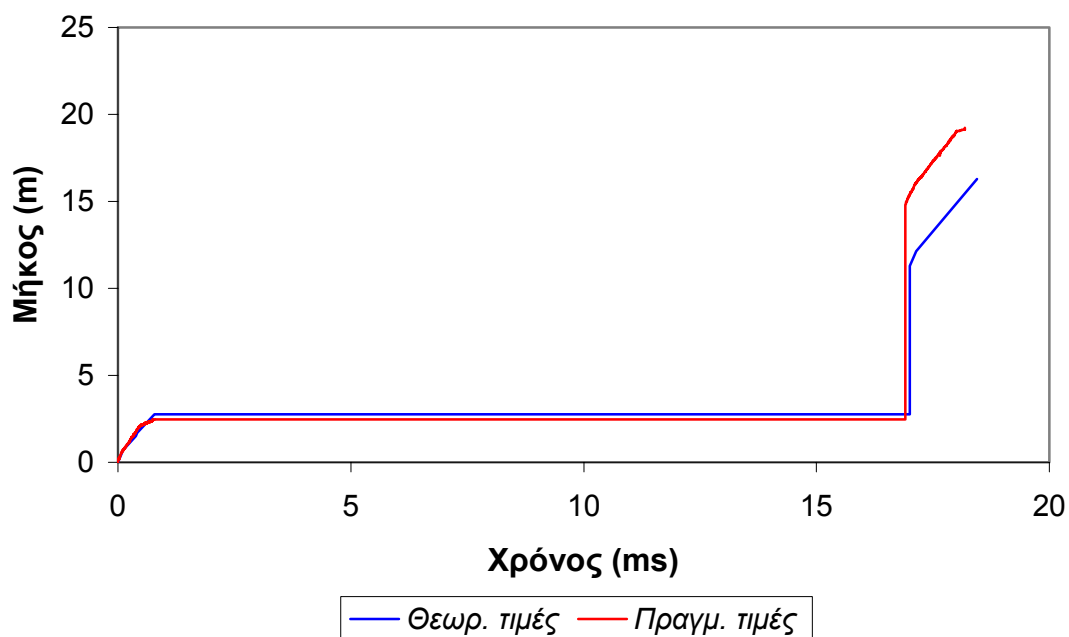
Στο Σχ. 4.40 φαίνεται καθαρά ο τρόπος γόμωσης του διατρήματος. Χαρακτηριστικές είναι οι κλίσεις που οφείλονται στον ζελατοδυναμίτη, ο οποίος βρίσκεται στην βάση του διατρήματος (**5776 m/s**) και σε ύψος περίπου 1,3 m από τον πάτο (**5530 m/s**). Επίσης χαρακτηριστικές είναι και οι κλίσεις που οφείλονται στο ANFO, το οποίο υπέρκειται του ζελατοδυναμίτη (**3681 m/s**) και (**3900 m/s**) αντίστοιχα.

Το Σχ. 4.41 είναι μεγέθυνση της περιοχής που αντιστοιχεί στην ανατίναξη του 2<sup>ου</sup> διατρήματος. Σε αυτό το διάτρημα φαίνεται και η γόμωση πυθμένα και η ταχύτητα έκρηξης του ANFO. Η ταχύτητα του ζελατοδυναμίτη, υπολογίστηκε από το λογισμικό σε **5461 m/s** και η ταχύτητα έκρηξης του ANFO σε **3327 m/s**.



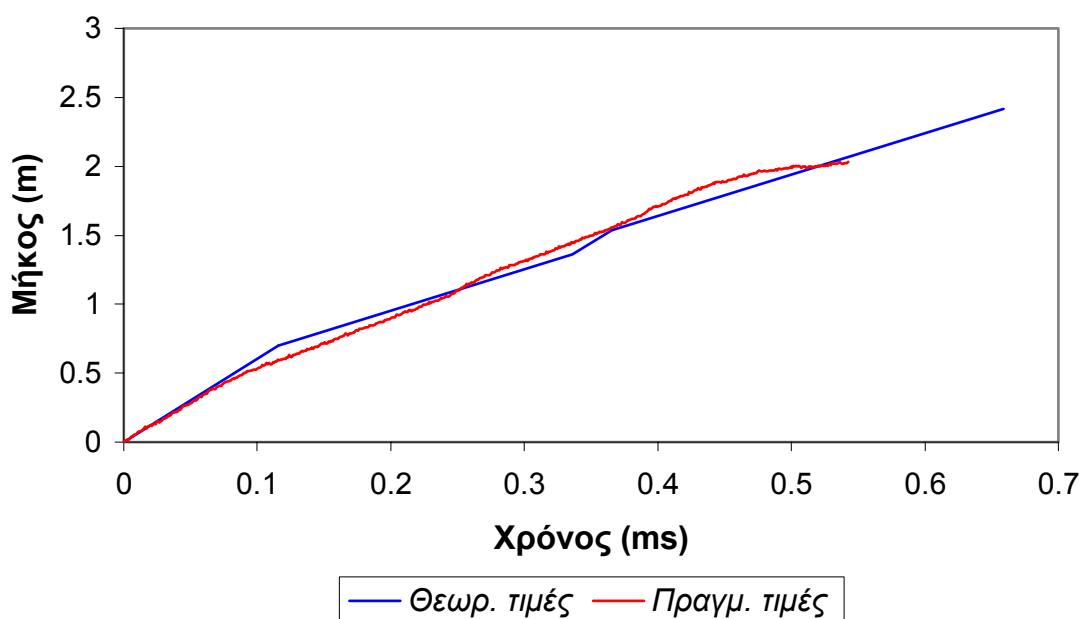
Σχ. 4.41: Μεγέθυνση περιοχής έκρηξης δεύτερου διατρήματος και ανάλυση με τη βοήθεια λογισμικού Blastware Analysis

Στο Σχ. 4.42 δίνονται σε κοινό διάγραμμα οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές της μέτρησης ταχύτητας έκρηξης στην περιοχή του Ικονίου κατά τις εργασίες για την αποπεράτωση του έργου της σήραγγας του ΕΡΓΟΣΕ. Από όλα τα διαγράμματα που δόθηκαν παραπάνω στο Σχ. 4.42 υπάρχει η μεγαλύτερη ταύτιση των θεωρητικών και πειραματικών τιμών. Η μόνη απόκλιση, η οποία είναι και αναμενόμενη, είναι το μεγαλύτερο μήκος καλωδίου στις πραγματικές τιμές που, όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 4.1 οφείλεται στο επιπλέον καλώδιο που υπήρχε μεταξύ των διατρημάτων, για λόγους ασφαλείας (βλ παραγρ. 4.1).



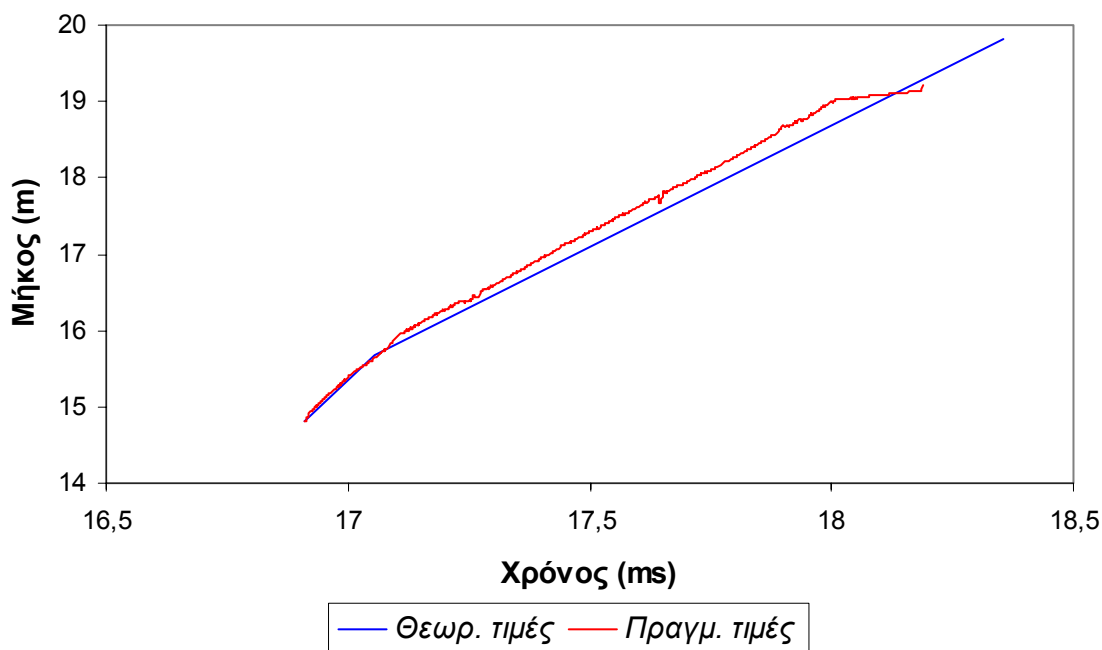
Σχ. 4.42: Κοινό διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών τιμών.

Στο Σχ. 4.42 δίνεται η μεγέθυνση του γεγονότος έκρηξης του 1<sup>ου</sup> διατρήματος. Όπως γίνεται αντιληπτό από τη μορφή του Σχ. 4.42 το μήκος του 1<sup>ου</sup> ζελατοδυναμμίτη και του 1<sup>ου</sup> ANFO, των πραγματικών τιμών είναι μικρότερο του αρχικά υπολογιζόμενου, και αυτό προκαλεί μια μετατόπιση της γραμμής των πραγματικών τιμών προς τα κάτω στον κατακόρυφο άξονα.



Σχ. 4.43: Μεγέθυνση περιοχής 1<sup>ου</sup> διατρήματος.





Σχ. 4.44: Μεγέθυνση περιοχής 2<sup>ου</sup> διατρήματος.

Στο Σχ. 4.44 δίνονται οι θεωρητικές και πραγματικές τιμές της μέτρησης. Πάλι οι θεωρητικές τιμές έχουν μεταφερθεί κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερη η σύγκριση με τις πραγματικές τιμές. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει πολύ καλή ταύτιση των δύο γραμμών. Άρα οι θεωρητικά υπολογιζόμενες και οι πραγματικές τιμές είναι ικανοποιητικά κοντά.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

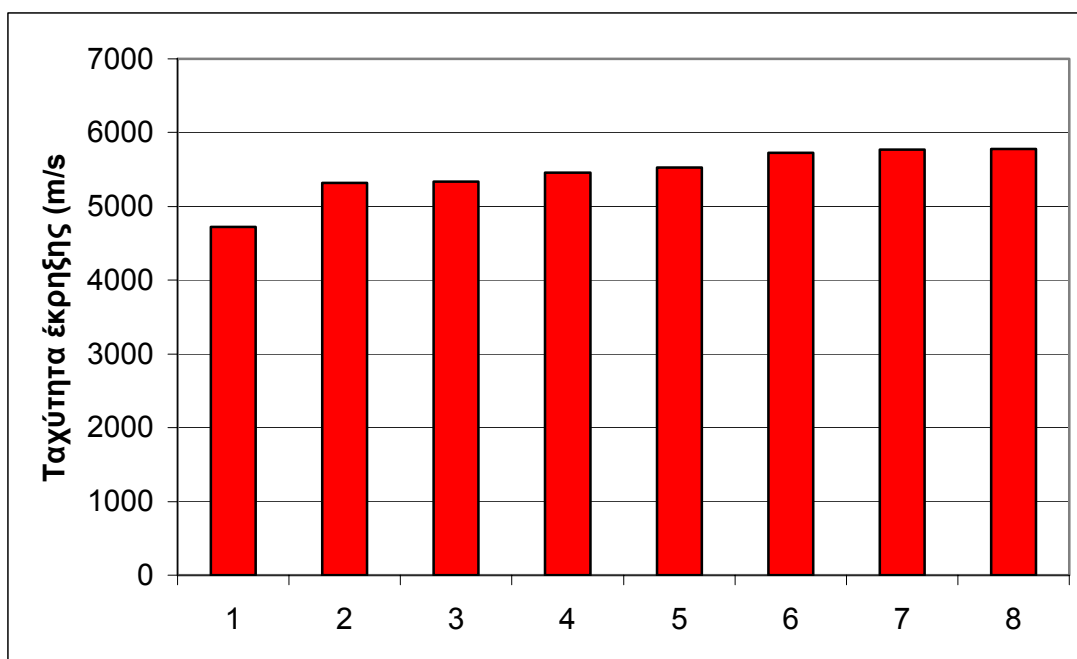
#### 5.1 ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όλες οι μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης έδειξαν ότι οι τιμές της ταχύτητας έκρηξης του ενισχυτικού έναυσης καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του εκρηκτικού στήλης δεν ήταν σε συμφωνία. Υπήρχε βέβαια σχέση ανάμεσα στις μετρούμενες και στις θεωρητικές τιμές, αλλά σε καμία από τις περιπτώσεις που αντιμετωπίστηκαν δεν υπήρχε απόλυτη σύμπτωση. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι η ανατίναξη δεν θα είναι επιτυχής, απλώς ότι δεν μπορεί να γίνει σωστός σχεδιασμός της.

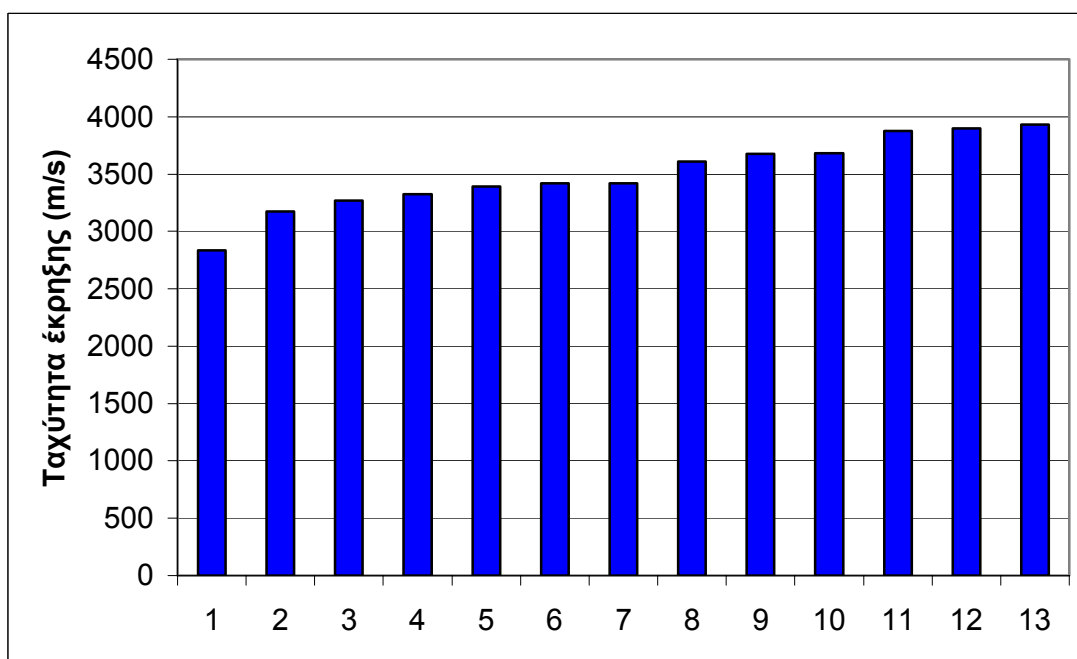
Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη τιμή ταχύτητας έκρηξης του ζελατοδυναμίτη που μετρήθηκε ήταν 5776 m/s (96 % της θεωρητικά μέγιστης δυνατής) και η μικρότερη ήταν 4720 m/s (79 % της θεωρητικά μέγιστης δυνατής).

Οι μέγιστες τιμές ταχύτητας έκρηξης που απόκτησε το ANFO είχαν μεγαλύτερο ποσοστιαίο εύρος από αυτές που απόκτησε ο ζελατοδυναμίτης (Σχ. 5.1 και Σχ. 5.2). Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη τιμή ταχύτητας έκρηξης του ANFO που μετρήθηκε ήταν 3172 m/s (106 % της θεωρητικά μέγιστης δυνατής) και η μικρότερη ήταν 3931 m/s (131 % της θεωρητικά μέγιστης δυνατής). Σε αυτές τις τιμές δεν συνυπολογίζεται το κακής ποιότητας ANFO στο οποίο είχε εξατμιστεί το πετρέλαιο. Αν συνυπολογιστεί και αυτή η τιμή τότε η μικρότερη τιμή ταχύτητας έκρηξης είναι 2834 m/s (95 % της θεωρητικά μέγιστης δυνατής)

Όμως, ακόμα και στην περίπτωση που ο ζελατοδυναμίτης αποκτήσει χαμηλές για αυτόν ταχύτητες ο κρουστικός παλμός είναι τόσο ισχυρός ώστε να εναύσει το ANFO και μάλιστα με ταχύτητα έκρηξης μεγαλύτερη από αυτή που δίνει ο κατασκευαστής. Αυτό σημαίνει ότι η ανατίναξη θα ήταν δυνατή ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί μικρότερη ποσότητα ζελατοδυναμίτη ή χρησιμοποιηθεί αντί για ζελατοδυναμίτη κάποιο άλλο φθηνότερο ενισχυτικό.



Σχ. 5.1: Εύρος τιμών ταχύτητας έκρηξης ζελατοδυναμίτη



Σχ. 5.1: Εύρος τιμών ταχύτητας έκρηξης ANFO

Οι χρόνοι επιβράδυνσης που μετρήθηκαν, στις μισές των περιπτώσεων ήταν κατά πολύ μεγαλύτεροι από τους αναμενόμενους. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος καθυστέρησης αντί των 25 ms ήταν 66,8 ms (ποσοστιαία διαφορά 267 %), στην δεύτερη περίπτωση αντί 25 ms ήταν 57,4 ms (ποσοστιαία

διαφορά 230 %), στην τρίτη περίπτωση αντί 25 ms ήταν 27,3 ms (ποσοστιαία διαφορά 10) και στην τελευταία η ποσοστιαία διαφορά ήταν σχεδόν μηδενική (16,9 ms αντί 17 ms).

Ένα ανεξήγητο φαινόμενο που παρατηρήθηκε ήταν η μη εμφάνιση της γόμωσης πυθμένα, στο δεύτερο κατά σειρά διάτρημα. Σε μία μόνο μέτρηση – την τελευταία – εμφανίστηκε. Σε όλες τις άλλες τις περιπτώσεις εμφανιζόταν μόνο η γόμωση στήλης.

Τέλος σε όλες τις μετρήσεις - σε άλλες περισσότερο και σε άλλες λιγότερο - παρατηρείται μία σπατάλη του καλωδίου που συνδέει τα διατρήματα. Το επιπλέον καλώδιο αυτό δεν δημιουργεί πρόβλημα στις μετρήσεις, αλλά καλό θα ήταν να περιορίζεται η σπατάλη για λόγους οικονομικούς και μόνο. Σημειώνεται ότι η τιμή του καλωδίου μέτρησης είναι περίπου 3 € ανά μέτρο (τιμές 2003). Οπότε για μόνο μία μέτρηση δύο διατρημάτων στη σειρά, μήκους 12 m καταναλώνεται περίπου 40 m καλώδιο.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι κάθε μέτρηση είχε τις δικές τις ιδιαιτερότες και παρουσιάζει διαφορετικές δυσλειτουργίες. Επίσης οι τελευταίες χρονικά μετρήσεις ήταν καλύτερες από τις πρώτες και μάλιστα παρατηρείται μία βελτίωση των μετρήσεων από τις παλαιότερες στις νεώτερες.

Για να δώσει κανείς πλήρη εξήγηση σε όλα τα αναπάντητα ερωτήματα που δημιουργούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων ταχύτητας έκρηξης με τη μέθοδο αντίστασης καλωδίου χρειάζεται μεγάλη εμπειρία και να έχει κάνει πολλές μετρήσεις V.O.D.

## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Παρόλο που κάθε ανατίναξη παρουσιάζει μία μοναδικότητα ως προς τις δυσλειτουργίες της, υπάρχουν κάποια σημεία τα οποία αν προσεχθούν οι αποκλίσεις θα ελαττωθούν ή και ακόμα να μηδενιστούν. Για την σωστή εξαγωγή των συμπερασμάτων θα πρέπει πριν από κάθε μέτρηση να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Προσοχή στα υλικά και στα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για καλύτερο σχεδιασμό της ανατίναξης

- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στο ANFO το οποίο κατασκευάζεται χύμα στην αναλογία ανάμιξης και στον χρόνο παραμονής στο διάτρημα πριν από την ανατίναξη
- Ελαχιστοποίηση του μήκους του καλωδίου που συνδέει τα διατρήματα, για οικονομικούς λόγους
- Κατά την τοποθέτηση του καλωδίου μέτρησης στο διάτρημα θα πρέπει αυτό να είναι πάντα τεντωμένο για αποφυγή ανωμαλιών κατά την μέτρηση
- Πρόβλεψη και πρόληψη τυχόν παρουσίας νερού μέσα στο διάτρημα
- Θα πρέπει να αναμένεται μία απόκλιση των θεωρητικών και μετρούμενων τιμών, πάντα στο μέτρο του αποδεκτού.

## ***Βιβλιογραφία***

### **Ελληνική**

1. Αγιουτάντης, Ζ., “Εκμετάλλευση Π (Διάτρηση και Ανατίναξη)” Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 1996.
2. Κατσαμπάνης, Δ. και. Μπαλικτσής Η. “Πρακτικά Συνεδρίου Ορυκτού πλούτου”, Τόμος Α, σελ. 457-466, Αθήνα, 2000.
3. Τσουτρέλης, Χ., “Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων”, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1997

### **Ξένα**

4. Baliktsis, E., “Blasting Technology and Know-How Offer Ways to Make Mining – Quarring-Extractive Activities More Effective and Environmentally Friendly. Our Hellenic Reality”, International Conference of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, pgs117-121, Bulgaria 9-15 June, 2002.
5. Berta G., “Explosives: An Engineering Tool”, Italesplosivi, Milano, Italy, 1990
6. Clark G.B., “Principles of Rock Fragmentation”, John Wiley and Sons, New York, 1987
7. Cook M.A., “The science of High Explosives”, ACS Monograph No 139, Reinhold Publishing Co., N.Y., New York, 1958
8. Cook M.A., “The science of Industrial Explosives”, Ireco Chemicals, Salt Lake City, Utah, 1974
9. Cordin, 2003, [www.Cordin.com](http://www.Cordin.com), τελευταία πρόσβαση Ιούλιος, 2003
10. Dynonobel, 2003, [www.Dynonobel.dk](http://www.Dynonobel.dk), τελευταία πρόσβαση Ιούνιος, 2003
11. Instantel. User’s manual for VODMate, 2003
12. (Instantel, 2003), [www.Instantel.com](http://www.Instantel.com), τελευταία πρόσβαση Σεπτέμβριος, 2003

13. ISEE (International Society of Explosives Engineers), “Blasters’ Handbook”, 17<sup>th</sup> edition, 1998.
14. Jimeno C., Jimeno E., Cardero F., “Drilling and Blasting of Rocks”, Balkema, 1995
15. Katsabanis P.D. “Explosives Technology-Open Pit and Underground Blasting. Part A”, Queen’s University, 1996
16. Persson Per-Anders, Holmberg R. and Lee Jamin, “Rock Blasting and Explosives Engineering”, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1984
17. Olofsson S.O., “Applied Explosives Technology for Construction and Mining”, APPLEX, publisher, Arla, Sweden, 1990

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## Ρυθμίσεις μονάδας μέτρησης VODMate

Με τα πλήκτρα **Up arrow** (↑) και **Right arrow** (→) γίνονται όλες οι αλλαγές στις ρυθμίσεις και με το πλήκτρο **Enter** αποθηκεύονται. Όταν έχουν γίνει όλες οι απαιτούμενες ρυθμίσεις το λειτουργικό αυτόματα επανέρχεται στο κυρίως μενού. Για την έξοδο από την διαδικασία ρυθμίσεων χρησιμοποιείται το πλήκτρο **Cancel**. Οποιαδήποτε ρύθμιση έχει γίνει μέχρι εκείνη την χρονική στιγμή θα σωθεί. Παρακάτω δίνονται οι περιγραφές των διαφόρων λειτουργιών και οι διαθέσιμες ρυθμίσεις :

### 1. Επιλογή αριθμού καναλιών

Το όργανο μέτρησης VODMate μπορεί να κάνει εγγραφή από ένα ή και από δυο κανάλια. Κάνοντας καταγραφή από δυο κανάλια επιτρέπεται η λήψη εγγραφής από περισσότερα διαστήματα, αλλά ο συνολικός χρόνος εγγραφής θα είναι μικρότερος γιατί τα ληφθέντα δεδομένα θα καταλαμβάνουν διπλάσιο χώρο. Με το πλήκτρο **Right arrow** μπορεί να επιλέγει πχ. **Ch 1 on – Ch2 off** αν είναι επιθυμητό να γίνει εγγραφή μόνο από το κανάλι ένα. Με το πλήκτρο **Enter** αποθηκεύεται η επιλογή.

### 2. Επιλογή ρυθμίσεων εγγραφής

Το όργανο μέτρησης VODMate έχει τρεις επιλογές εγγραφής :

- Μονή εγγραφή (**Single Shot**), η οποία παίρνει μόνο μια μέτρηση την εμφανίζει στην οθόνη και σταματάει.
- Συνεχόμενη εγγραφή (**Continuous Shot**), στην οποία το όργανο συλλέγει συνεχώς δεδομένα μέχρι κάποιος να το σταματήσει ή να γεμίσει η μνήμη του.

- Χειροκίνητη εγγραφή (**Manual Shot**), η οποία επιτρέπει την εγγραφή μόνο όταν πληκτρολογηθεί το **Start monitor**. Η χειροκίνητη εγγραφή γενικά δεν χρησιμοποιείται για μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μόνη εγγραφή είναι η καλύτερη ρύθμιση.

Η επιλογή εγγραφής εμφανίζεται μετά από την επιλογή αριθμού καναλιών. Με το **Right arrow** επιλέγεται η μονή εγγραφή και με το **Enter** αποθηκεύεται η επιλογή.

### 3. Ρυθμός δειγματοληψίας

Ο ρυθμός δειγματοληψίας καθορίζει πόσο συχνά η μονάδα μετράει την ταχύτητα της έκρηξης σε δείγματα ανά δευτερόλεπτο (sps). Το όργανο μέτρησης VODMate προσφέρει οκτώ επιλογές: 16384, 32768, 65536, 131072, 262144, 524288, 1048576 και 2097152 sps. Η πιο συνηθισμένη επιλογή είναι 1048576 ή 2097152 sps καθώς δίνουν τα πιο ακριβή στοιχεία.

Η επιλογή ρυθμού δείγματος εμφανίζεται μετά από την επιλογή εγγραφής. Με το **Right arrow** αλλάζει ο ρυθμός δείγματος και όταν εμφανιστεί στην οθόνη ο επιθυμητός, με το **Enter** αποθηκεύεται η επιλογή.

### 4. Επιλογή της ευαισθησίας

Μόλις καθοριστεί ο ρυθμός δείγματος η ευαισθησία του καναλιού 1 εμφανίζεται στην οθόνη. Αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται για να οριστεί η αντίσταση του καλωδίου που θα συνδεθεί στο κανάλι 1. Η τιμή αυτή είναι αναγκαία για τη μονάδα μέτρησης ώστε να μετρήσει με ακρίβεια την ταχύτητα της έκρηξης. Το καλώδιο της Instantel έχει αντίσταση **8,435 Ohms/m (2,571 Ohms/f)**. Για να οριστεί η τιμή αυτή με το **Right arrow** μετακινείται ο δρομέας στο ψηφίο που είναι επιθυμητή η αλλαγή και με το **Up arrow** πραγματοποιείται. Με το πλήκτρο **Enter** αποθηκεύεται η αλλαγή.



Με όμοιο τρόπο ορίζεται και η ευαισθησία του καναλιού 2. Σε περίπτωση που οι εγγραφές πραγματοποιούνται από ένα μόνο κανάλι χρησιμοποιείται το πλήκτρο **Enter** για να προχωρήσουμε στην επόμενη ρύθμιση.

## 5. Επιλογή ενεργοποίησης εγγραφής

Η επιλογή της ενεργοποίησης εγγραφής χρησιμοποιείται για να ενεργοποιηθεί η εγγραφή του καναλιού 1 ή 2 ή και των δυο. Υπάρχουν μόνο δυο επιλογές : ενεργοποιημένο (**Enabled**) και απενεργοποιημένο (**Disabled**). Με το **Right arrow** επιλέγεται το κανάλι το οποίο επιθυμείται να χρησιμοποιηθεί - ή και τα δυο - και με το **Enter** επιλέγεται η επόμενη ρύθμιση.

## 6. Επιλογή επιπέδου ενεργοποίησης

Το όργανο μέτρησης VODMate χρησιμοποιεί ένα επίπεδο ενεργοποίησης, το οποίο καθορίζεται από αυτόν που χειρίζεται το όργανο, για να αρχίσει αυτόματα να συλλέγει δεδομένα όταν ένα γεγονός υπερβεί αυτό το προκαθορισμένο επίπεδο. Για μετρήσεις VOD το επίπεδο πυροδότησης εκφράζεται σαν το ποσοστό του καλωδίου το οποίο καταναλώνεται πριν αρχίσει η μέτρηση. Το ελάχιστο επίπεδο πυροδότησης είναι 4% του συνολικού μήκους του καλωδίου. Για παράδειγμα, για καλώδιο 50 μέτρων πρέπει να καταστραφούν τα πρώτα 2 μέτρα για να πάρει το όργανο μέτρηση.

Το όργανο μέτρησης έχει την δυνατότητα να θέτει αυτόματα το ελάχιστο επίπεδο πυροδότησης που απαιτείται αρκεί να ορισθεί η τιμή 0,0. Με το **Right arrow** μετακινείται ο δρομέας στο ψηφίο που είναι επιθυμητή η αλλαγή και με το **Up arrow** πραγματοποιείται. Με το πλήκτρο **Enter** αποθηκεύεται η αλλαγή.

Και πάλι αν ενεργοποιηθούν και τα δυο κανάλια πρέπει να ορισθεί και στο δεύτερο κανάλι το επίπεδο πυροδότησης. Αν χρησιμοποιείται το ένα μόνο κανάλι τότε πρέπει να πατηθεί το **Enter** ξανά για να παρακαμφθεί το άλλο. Η επόμενη ρύθμιση είναι ο προσδιορισμός του χρόνου εγγραφής.

## 7. Επιλογή χρόνου εγγραφής

Ο χρόνος εγγραφής είναι η χρονική διάρκεια κατά την οποία η μονάδα θα καταγράφει το γεγονός. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την διαθέσιμο χώρο στη μνήμη του οργάνου. Όσο μεγαλύτερος διαθέσιμος χώρος υπάρχει τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο χρόνος εγγραφής. Ο μέγιστος χρόνος εγγραφής φαίνεται στην οθόνη. Για παράδειγμα η ένδειξη “ < 0.4s ” σημαίνει πως ο χρόνος εγγραφής πρέπει να είναι μικρότερος από 0.4 δευτερόλεπτα. Σε περίπτωση που ο χρόνος εγγραφής που έχει οριστεί είναι μεγαλύτερος από τον μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο, τότε το όργανο αυτόματα θα χρησιμοποιήσει τον μέγιστο δυνατό χρόνο εγγραφής.

Για να οριστεί ο χρόνος εγγραφής πληκτρολογείται το **Right arrow** για να μετακινηθεί ο δρομέας στο ψηφίο που επιθυμητή η αλλαγή και με το **Up arrow** πραγματοποιείται. Με το πλήκτρο **Enter** αποθηκεύεται η αλλαγή και η διαδικασία συνεχίζεται στην επόμενη ρύθμιση η οποία είναι ο χρόνος προ-πυροδότησης.

## 8. Επιλογή χρόνου προ-ενεργοποίησης

Ο χρόνος προ-πυροδότησης είναι το ποσοστό του συνολικού χρόνου ο οποίος θα παραχωρηθεί στα δεδομένα πριν από την πυροδότηση. Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει να ληφθεί μέτρηση VOD ακόμα και στο κομμάτι του καλωδίου που καταναλώθηκε πριν από το επίπεδο πυροδότησης. Για παράδειγμα αν ο συνολικός χρόνος εγγραφής είναι 0.3 seconds (300 ms) και ο χρόνος προ-πυροδότησης είναι 10% τότε τα δεδομένα των πρώτων 30 ms θα αναφέρονται στα γεγονότα πριν από την πυροδότηση και τα υπόλοιπα 270 ms μετά από αυτήν.

Για να οριστεί ο χρόνος προ-πυροδότησης χρησιμοποιείται το πλήκτρο **Right arrow** για να μετακινηθεί ο δρομέας στο ψηφίο που είναι επιθυμητή η αλλαγή και με το **Up arrow** πραγματοποιείται. Με το πλήκτρο **Enter** αποθηκεύεται η αλλαγή.

## 9. Ρύθμιση ώρας

Το όργανο μέτρησης VODMate υποστηρίζει και ώρα τύπου (11:55:23 PM) και ώρα τύπου (23:55:23). Η επιλογή αφήνεται στον χειριστή του οργάνου. Με το **Right arrow** μετακινείται ο δρομέας και με το **Up arrow** ορίζεται η ώρα.

## 10. Ρύθμιση ημερομηνίας

Το όργανο μέτρησης VODMate χρησιμοποιεί τύπο ημερομηνίας Μηνας/Ημερα/Χρονιά. Με παρόμοιο τρόπο που ορίστηκε η ώρα ορίζεται και η ημερομηνία. Με **Enter** αποθηκεύονται οι ρυθμίσεις και το όργανο είναι έτοιμο για να λάβει μέτρηση.