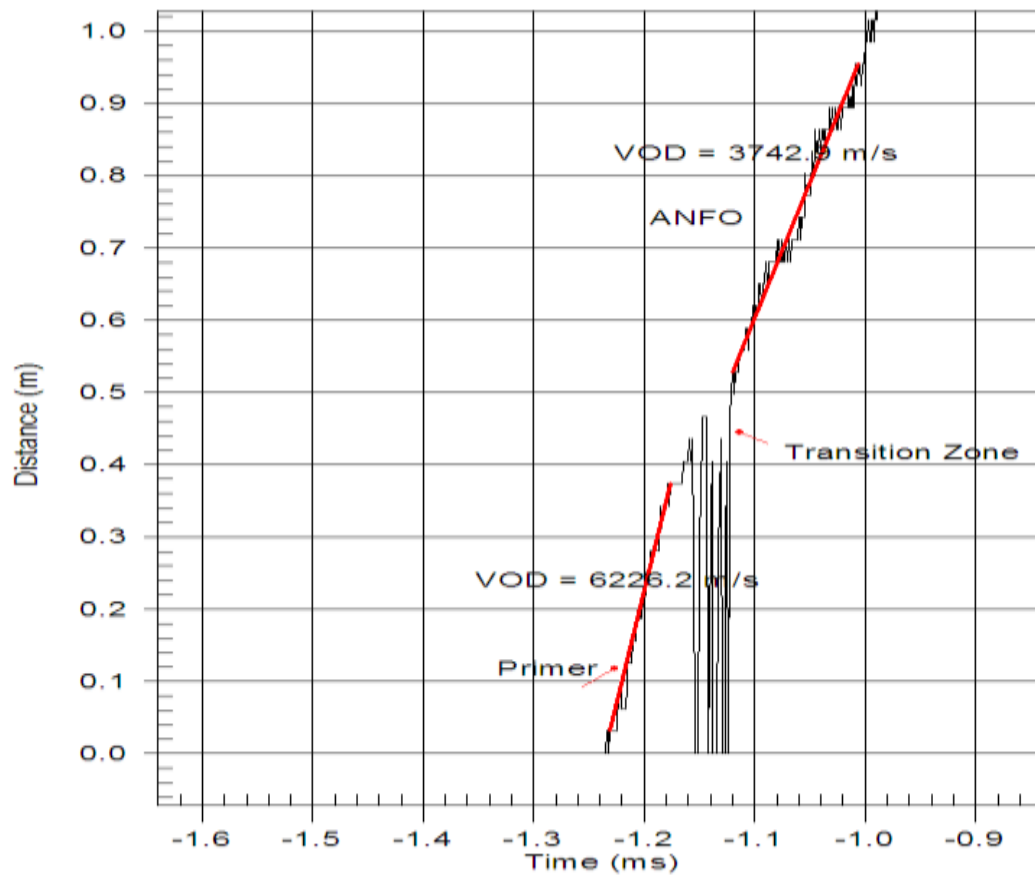




Μέτρηση της Ταχύτητας Έκρηξης Γόμωσης εντός Διατρήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΓΕΝΑΡΕΛΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ – ΝΙΚΟΛΑΟΣ

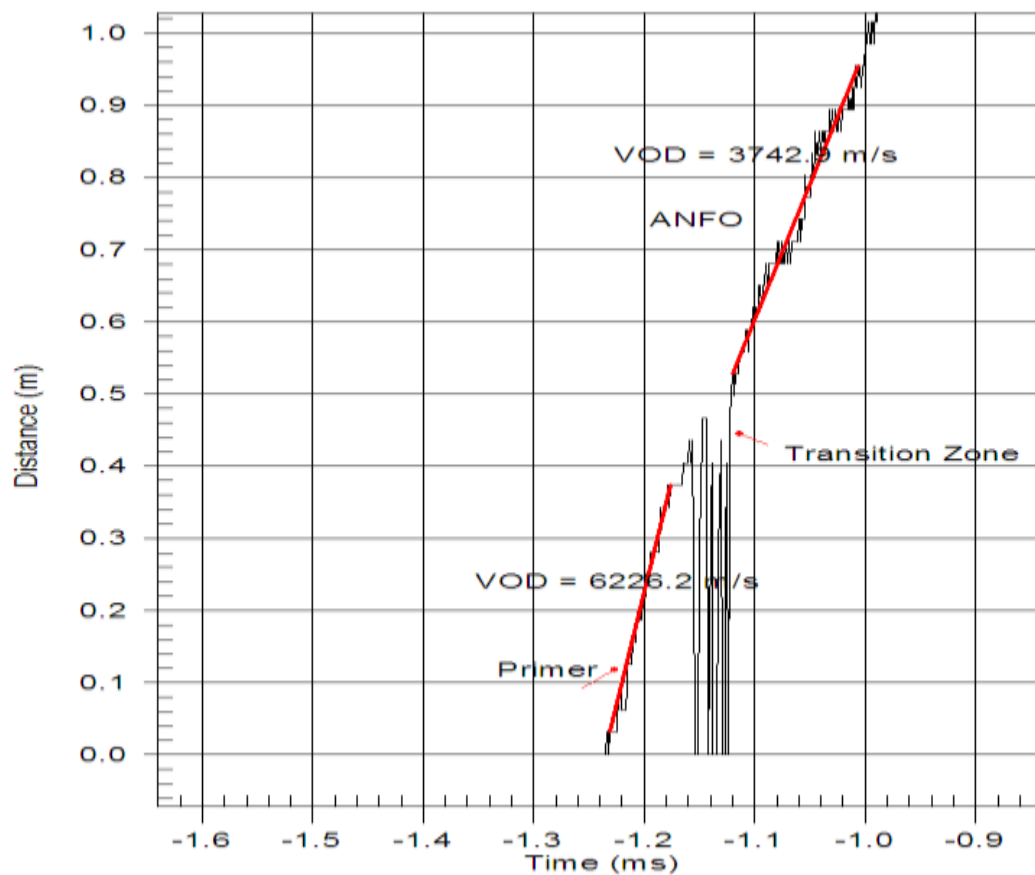
Επιβλέπων Καθηγητής: ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2011



Μέτρηση της Ταχύτητας Έκρηξης Γόμωσης εντός Διατρήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΓΕΝΑΡΕΛΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ – ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΙΧΑΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

Copyright © Νικόλαος - Γεώργιος Π. Γεναρέλλης, 2011
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πρόλογος

Τη περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου 2010 και Ιουλίου 2011 εκπονήθηκε η διπλωματική εργασία με θέμα : **“Μέτρηση της Ταχύτητας Έκρηξης Γόμωσης εντός Διατρήματος”**.

Για το σκοπό αυτό έγινε βιβλιογραφική έρευνα στο κομμάτι των εκρηκτικών υλών που χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη πετρωμάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις βασικές ιδιότητες των εκρηκτικών υλών και ειδικά στην ταχύτητα έκρηξης. Εκτενής αναφορά έγινε στην εκρηκτική ύλη ANFO που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Στις 7 Ιουλίου 2011 πραγματοποιήθηκε στο λατομείο ΧΑΛΥΨ στην περιοχή της Μάντρας Αττικής, πειραματική μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης σε διάτρημα με τα αποτελέσματα της οποίας ολοκληρώνεται αυτή η εργασία.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω το Δ. Μπρέκη, την Η. Γραμμενοπούλου, την Λ. Χολέβα, την Χ. Παρασκευοπούλου, την Μ. Δημητριάδη και τους γονείς μου για την ηθική στήριξη αλλά και την πρακτική του βοήθεια και κυρίως τον καθηγητή μου κ. Γ. Παναγιώτου για την καθοδήγηση και την υπομονή του. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Θ. Τσοκανή και την μεταλλειολόγο κα. Π. Πετροχείλου που μου έδωσαν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσω τα πειράματα στο χώρο του λατομείου.

Περίληψη

Η ταχύτητα έκρηξης είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των εκρηκτικών υλών. Είναι απαραίτητο τα εκρηκτικά στο διάτρημα να εκρήγνυνται στο βέλτιστο χρόνο ώστε να έχουμε επαρκή πίεση που θα οδηγήσει σε καλό θρυμματισμό του πετρώματος.

Εκτός από την ταχύτητα έκρηξης υπάρχουν και άλλες σημαντικές ιδιότητες των εκρηκτικών που σχετίζονται με την ανατίναξη πετρωμάτων όπως η ισχύς, η πίεση έκρηξης, η πυκνότητα γόμωσης, η αντίσταση στο νερό, η ποιότητα καπνών.

Σε αυτήν την εργασία μετά από θεωρητική προσέγγιση των ιδιοτήτων των εκρηκτικών υλών που σχετίζονται με την εξόρυξη πετρωμάτων και ειδικά του ANFO έγινε πειραματική δοκιμή μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης σε γομωμένο με ANFO διάτρημα. Το πείραμα έγινε στο λατομείο αδρανών ΧΑΛΥΨ στην τοποθεσία Κεραμίδεζα στη Μάνδρα Αττικής. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Handitrap^{II} VOD Recorder της εταιρίας Mrel. Με αυτόν τον τρόπο συσχετίστηκαν οι θεωρητικές τιμές της ταχύτητας έκρηξης με τα πειραματικά, επί τόπου αποτελέσματα.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις, η ταχύτητα έκρηξης στο διάτρημα παρουσίασε διακυμάνσεις και διέφερε από αυτήν που καθόριζε ο παρασκευαστής. Επιπλέον επισημάνθηκε η μεγάλη σημασία της “ζωηρής” έναυσης του ANFO με την κατάλληλη εναυσματική γόμωση στο αποτέλεσμα της ανατίναξης. Τέλος με τη χρήση της συσκευής Handitrap^{II} VOD Recorder και του κατάλληλου συνοδευτικού λογισμικού αποτυπώθηκε πλήρως η εικόνα της εξέλιξης της εκρηκτικής αντίδρασης στο μήκος του διατρήματος.

Abstract

The velocity of detonation (VOD) is one of the most important properties of explosives. It is essential that the explosive in the field condition detonates at its optimum rate and induces sufficient detonation pressure leading to good fragmentation.

Apart from velocity of detonation the explosives have a number of important properties related to the blast performance, such as strength, detonation pressure, density, water resistance, fume characteristics.

In this project after analyzing the properties of the explosives used in rock blasting and especially ANFO, measurements are done on site to calculate the VOD in charged with ANFO boreholes. The measurements took place at the HALYPS quarry at Mandra Attiki. The equipment used for this purpose was the Mrel Handitrap^{II} vod Recorder. The explosives' theoretical performance was compared to that of the practical.

According to the results, VOD appeared different than that the manufacture claimed. Moreover the importance of the primer, related to the result of the blast, was emphasized. Using Handitrap^{II} VOD Recorder with the suitable software the progress of the explosive reaction along the charged borehole (bulk) was imprinted.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....σελ.1	σελ.1
2. Το μοντέλο της έκρηξης.....σελ.3	σελ.3
2.1. Κατηγορίες εκρηκτικών με βάση τον τρόπο αντίδρασης.....σελ.3	σελ.3
2.2. Μοντέλο του Langweiler.....σελ.4	σελ.4
2.3. Μοντέλο Cook.....σελ.5	σελ.5
2.4. Ιδανική και μη ιδανική έκρηξη.....σελ.6	σελ.6
3. Χημεία των εκρηκτικών υλών.....σελ.7	σελ.7
3.1. Τι είναι εκρηκτική ύλη.....σελ.7	σελ.7
4. Ισχύς.....σελ.8	σελ.8
4.1. Ο όρος Ισχύς.....σελ.8	σελ.8
4.2. Δοκιμές μέτρησης ισχύος.....σελ.11	σελ.11
4.3. Δοκιμή Trawzi.....σελ.11	σελ.11
4.4. Δοκιμή βαλιστικού εκρεμμούς.....σελ.12	σελ.12
4.5. Δοκιμή Hess.....σελ.13	σελ.13
4.6. Δοκιμή κρατήρα.....σελ.14	σελ.14
5. Ταχύτητα έκρηξης.....σελ.15	σελ.15
5.1. Ορισμός ταχύτητας έκρηξης.....σελ.15	σελ.15
5.2. Μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης.....σελ.18	σελ.18
5.3. Ηλεκτρονικά συστήματα καταγραφής της Ταχύτητας έκρηξης.....σελ.20	σελ.20
5.4. Εφαρμογή των επιτόπου μετρήσεων της ταχύτητας έκρηξηςσελ.23	σελ.23
6. Πίεση έκρηξης.....σελ.24	σελ.24
6.1. Ορισμός της πίεσης έκρηξης.....σελ.24	σελ.24
6.2. Πειραματική δοκιμή μέτρησης της πίεσης Έκρηξης.....σελ.27	σελ.27
7. Πυκνότητα γομώσεων.....σελ.29	σελ.29
7.1. Ορισμός της πυκνότητας γόμωσης.....σελ.29	σελ.29
7.2. Επίδραση της πυκνότητας γόμωσης στις παραμέτρους της έκρηξης.....σελ.29	σελ.29

8. Ποιότητα καπνών.....σελ.31	
8.1. Αέρια παράγωγα εκρηκτικής ύλης τύπου C-H-N-O.....σελ.31	
9. Αντίσταση στο νερό.....σελ.32	
9.1. Έκθεση εκρηκτικής ύλης σε υγρό περιβάλλον.....σελ.32	
10. Το ANFO και οι ιδιότητες του.....σελ.33	
10.1. Ιστορική αναδρομή.....σελ.33	
10.2. Γενικές πληροφορίες- ιδιότητες.....σελ.33	
10.3. Η απόδοση του ANFO.....σελ.34	
10.4. Η ασφάλεια του ANFO.....σελ.46	
11. Η συσκευή μέτρησης Handitrap Vod Recorder.....σελ.48	
11.1. Γενικές πληροφορίες.....σελ.48	
11.2. Ασφαλής χρήση.....σελ.48	
11.3. Αρχή λειτουργίας.....σελ.48	
11.4. Εφαρμογές.....σελ.49	
11.5. Συγκρότηση της συσκευής Handitrap.....σελ.50	
11.6. Προετοιμασία του Handitrap για μέτρηση ταχύτητας έκρηξης στο διάτρημα με τη χρήση PROBECABLE-HT.....σελ.54	
12. Μέτρηση ταχύτητας έκρηξης σε διάτρημα.....σελ.57	
12.1. Λατομείο ΧΑΛΥΨ.....σελ.57	
12.2. Το σχέδιο της ανατίναξης.....σελ.59	
12.3. Η διαδικασία της μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης.....σελ.61	
12.4. Ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης.....σελ.69	
12.5. Συμπεράσματα.....σελ.75	
Βιβλιογραφία.....σελ.76	

Λίστα διαγραμμάτων, εικόνων, νομογραμμάτων

Κεφάλαιο 2:

Εικόνα 1: Μαύρη Πυρίτιδα

Εικόνα 2: Μοντέλο έκρηξης διαρρηκτικής εκρηκτικής ύλης

Εικόνα 3: Μοντέλο μετώπου έκρηξης κατά Langweiler

Εικόνα 4: Μοντέλο μετώπου έκρηξης κατά Cook

Κεφάλαιο 4:

Νομόγραμμα 1 : Μετατροπή της κατά βάρος ισχύς σε κατ'όγκο και αντιστρόφως εκρηκτικής ύλης δεδομένης πυκνότητας

Εικόνα 5: Μολύβδινος κύλινδρος για τη δοκιμή Trauzl

Διάγραμμα 1: Σχέση ειδικής ενέργειας και σχετικής κατά βάρος ισχύος εκρηκτικών υλών προς την παραμόρφωση της συσκευής Trauzl

Εικόνα 6 : Βαλιστικό εκκρεμές

Εικόνα 7: Συσκευή μέτρησης θραυστικότητας κατά Hess

Κεφάλαιο 5:

Εικόνα 8: Χημική αντίδραση ενός κόκκου εκρηκτικής ύλης σε συνάρτηση με το μήκος της ζώνης αντιδράσεως για διάφορες διαμέτρους γομώσεως Φ1, Φ2, Φ3, Φ4

Διάγραμμα 2 : Μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης με την αύξηση της διαμέτρου γόμωσης

Εικόνα 9: Διάταξη μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης με παλμογράφο

Εικόνα 10: Πειραματική διάταξη προσδιορισμού της ταχύτητας έκρηξης με τη μέθοδο Dautriche

Κεφάλαιο 6:

Εικόνα 11: Το μοντέλο του μετώπου της έκρηξης κατά Langweiler

Νομόγραμμα 2 : Προσδιορισμός της πίεσης έκρηξης p_d από τη ταχύτητα έκρηξης και την πυκνότητα γόμωσης

Διάγραμμα 3: Σχέση μεταξύ αρχικής ταχύτητας διάδοσης του κρουστικού κύματος και της αρχικής πίεσης έκρηξης p_{iw} για την περίπτωση έκρηξης σε νερό

Κεφάλαιο 7:

Διάγραμμα 4: Επίδραση της πυκνότητας γομώσεως στην κρίσιμη διάμετρο της εκρηκτικής ύλης

Κεφάλαιο 9:

Πίνακας 1 : Ταξινόμηση δυναμίτιδων σε κλάσεις ανάλογα με το χρόνο που μπορούν να παραμείνουν στο νερό.

Κεφάλαιο 10:

Διάγραμμα 5: Αποδιδόμενη θεωρητικά ενέργεια κατά την αντίδραση του νιτρικού αμμωνίου με διάφορες περιεκτικότητες πετρελαίου

Διάγραμμα 6: Επίδραση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο του ANFO στην ιδανική και πραγματική ταχύτητα έκρηξής του

Διάγραμμα 7: Επίδραση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο του ANFO επί της ιδανικής ταχύτητας έκρηξης για πέντε πυκνότητες γόμωσης

Διάγραμμα 8: Επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε πετρέλαιο στην ευαισθησία έναυσής του

Διάγραμμα 9: Επίδραση της κοκκομετρίας του νιτρικού αμμωνίου στη ταχύτητα έκρηξης του

Διάγραμμα 10: Επίδραση της κοκκομετρικής σύνθεσης του νιτρικού αμμωνίου στην ευαισθησία έναυσής του

Διάγραμμα 11: Επίδραση της κοκκομετρικής σύνθεσης του νιτρικού αμμωνίου στην ευαισθησία έναυσής του σε συνθήκες μη περιορισμού

Διάγραμμα 12: Η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό του ANFO στη ταχύτητα έκρηξής του

Διάγραμμα 13: Η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό του ANFO επί της ευαισθησίας έναυσής του

- Διάγραμμα 14: Η μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης του ANFO σε συνάρτηση με το βαθμό περιορισμού της γόμωσης
- Διάγραμμα 15 : Σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης του ANFO και της ταχύτητας έκρηξής του
- Διάγραμμα 16: Σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης και ευαισθησίας έναυσης του ANFO
- Διάγραμμα 17: Επίδραση της διαμέτρου του διατρήματος στην ταχύτητα έκρηξης του ANFO για διάφορες πυκνότητες γόμωσης
- Διάγραμμα 18: Μεταβολή της ευαισθησίας έναυσης του ANFO σε σχέση με τη διάμετρο του διατρήματος
- Διάγραμμα 19: Σχέση χρόνου έκθεσης του ANFO και θερμοκρασίας σε μείγμα ενός θειούχου μεταλλεύματος και θειούχου σιδήρου

Κεφάλαιο 11 :

- Εικόνα 12: Συσκευή Handitrap "
- Εικόνα 13 : Φορτιστής Handitrap "
- Εικόνα 14: Καλώδιο επικοινωνίας Handitrap με Η/Υ
- Εικόνα 95 : Αντάπτορας BNC
- Εικόνα 16 : Αισθητήρας - Αγωγός VOD PROBERODE
- Εικόνα 17 : Αισθητήρας - Αγωγός VOD PROBECABLE – HT
- Εικόνα 18 : Αγωγός RG-58/U
- Εικόνα 19 : Στοιχεία του εξοπλισμού μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης που βρίσκονται εκτός διατρήματος
- Εικόνα 20 : Στοιχεία του εξοπλισμού μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης που βρίσκονται εντός διατρήματος

Κεφάλαιο 12 :

- Εικόνα 21 : Αποτύπωση του λατομείου ΧΑΛΥΨ (πάνω και αριστερά) μέσω του Google maps
- Πίνακας 2 : Προϊόντα που παράγονται στο λατομείο ΧΑΛΥΨ
- Εικόνα 22 : Τμήμα χάρτη της ευρύτερης περιοχής του λατομείου στον οποίο φαίνονται και οι υψομετρικές καμπύλες
- Εικόνα 23 : Διατρητικό μηχάνημα της Atlas corco
- Εικόνα 24 : Κάτοψη κανάβου ανατίναξης (αριστερά) και τομή διατρήματος ανατίναξης (δεξιά)

- Εικόνα 25 : Φυσίγγιο εναυσματικής γόμωσης Poladyn 31 Eco και αισθητήρας PROBLECABLE-HT (πράσινο καλώδιο)
- Εικόνα 26 : Ο πυροκροτητής Nonel τοποθετείται στο φυσίγγιο της εναυσματικής γόμωσης
- Εικόνα 27 : Ο πυροκροτητής Nonel δένεται κατάλληλα στο φυσίγγιο της εναυσματικής γόμωσης
- Εικόνα 28 : Το φυσίγγιο ο αγωγός PROBLECABLE-HT και ο σωλήνας Nonel κατεβαίνουν στο διάτρημα
- Εικόνα 29 : Γόμωση διατρήματος με ANFO
- Εικόνα 30 : Μέτρηση της αντίστασης του αισθητήρα PROBLECABLE-HT
- Εικόνα 31 : Ο αισθητήρας PROBLECABLE-HT ενώνεται με τον μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U
- Εικόνα 32 : Το μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U ενώνεται με τον αντάπτορα BNC
- Εικόνα 33 : Ο αντάπτορας BNC συνδέεται με το Handitrap
- Εικόνα 34 : Το Handitrap^{II} τοποθετείται σε πλαστική σωλήνα για προστασία
- Διάγραμμα 20 : Ανεπεξέργαστα δεδομένα μέτρησης Handitrap^{II}
- Διάγραμμα 21 : Καταγραφές του Handitrap^{II} που αντιστοιχούν στο συνολικό μήκος της γόμωσης
- Διάγραμμα 22 : Καταγραφές του Handitrap^{II} που αντιστοιχούν στην περιοχή του Πυθμένα
- Διάγραμμα 23 : Τμήμα της γόμωσης του ANFO στην περιοχή 6 με 12 μέτρα από τον πυθμένα του διατρήματος
- Διάγραμμα 24 : Τμήμα της γόμωσης ANFO στην περιοχή 19 με 21 μέτρα από τον πυθμένα του διατρήματος

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η εξόρυξη των πετρωμάτων σε υπαίθρια αλλά και σε υπόγεια μέτωπα στις περισσότερες των περιπτώσεων περιλαμβάνει την ανατίναξη του μετώπου με τη βοήθεια εκρηκτικών υλών.

Τα χαρακτηριστικά μιας επιτυχούς ανατίναξης είναι:

- Η θραύση του συνόλου του πετρώματος που προετοιμάστηκε για ανατίναξη.
- Η παραγωγή τεμαχίων πετρώματος με κατάλληλο μέγεθος για περαιτέρω επεξεργασία.
- Η συγκέντρωση του θραυσμένου πετρώματος σε σωρό στον χώρο της ανατίναξης και όχι διασκορπισμένο σε μεγάλη έκταση.
- Η μειωμένη (ή καλύτερα καθόλου) ρωγμάτωση του γειτονικού πετρώματος.
- Η ελαχιστοποίηση των δονήσεων στον περιβάλλοντα χώρο.
- Η ασφάλεια χειρισμού της εκρηκτικής ύλης στις διαδικασίες που προηγούνται της ανατίναξης.

Για να πετύχουμε τα παραπάνω πρέπει να σχεδιάσουμε κατάλληλα την ανατίναξη και να προχωρήσουμε στη σωστή επιλογή της εκρηκτικής ύλης που θα χρησιμοποιήσουμε.

Η συνήθης πρακτική επιλογής εκρηκτικών υλών δίνει σημασία μόνο στο κόστος αγοράς αγνοώντας άλλες εξίσου σημαντικές ιδιότητες που θα αναφέρουμε στη συνέχεια. Ως εκ τούτου η επιλογή της κατάλληλης εκρηκτικής ύλης πρέπει να λαμβάνει υπόψιν εκτός από το κόστος και άλλες παραμέτρους που πολλές φορές βασίζονται σε επιτόπου πειραματικές δοκιμές.

Χαρακτηριστικές ιδιότητες των εκρηκτικών είναι:

- Η ισχύς
- Η ταχύτητα έκρηξης
- Η πίεση έκρηξης
- Η πυκνότητα γόμωσης
- Η ποιότητα καπνών
- Η αντίσταση στο νερό

Σημειώνεται ότι για τον ίδιο χημικό τύπο εκρηκτικής ύλης οι παραπάνω ιδιότητες ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης και τον τρόπο μέτρησής τους.

Ταχύτητα έκρηξης ορίζεται ως η σταθερή εκείνη ταχύτητα με την οποία οδεύει το μέτωπο της αντίδρασης έκρηξης εντός μιας κυλινδρικής στήλης γόμωσης από εκρηκτική ύλη. Είναι η σπουδαιότερη ιδιότητα των εκρηκτικών υλών όταν αυτά αξιολογούνται από πλευράς επίδοσης αφού εκφράζει το ρυθμό έκλυσης της χημικής τους ενέργειας και χαρακτηρίζει τη διαρρηκτικότητά τους.

Η ταχύτητα έκρηξης καθορίζεται από τους κατασκευαστές του εκρηκτικού και αναφέρεται στις τεχνικές προδιαγραφές του εκάστοτε προϊόντος. Ο σχεδιασμός της ανατίναξης γίνεται με την προϋπόθεση ότι τα χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης είναι αυτά τα οποία αναφέρει ο κατασκευαστής για το προϊόν του. Όμως αυτό δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Οι τιμές οι οποίες προκύπτουν από τις εργαστηριακές δοκιμές πολλές φορές δεν συμπίπτουν με τις τιμές της ταχύτητας έκρηξης που μετρώνται στο διάτρημα.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μείωση της ταχύτητας έκρηξης θα επιφέρει μείωση της πίεσης έκρηξης γεγονός το οποίο στη συνέχεια θα έχει επίπτωση στη διαρρηκτική



ενέργεια(ενέργεια κρούσης) της εκρηκτικής ύλης. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό το εκρηκτικό να έχει τη βέλτιστη ταχύτητα εξασκώντας επαρκή πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος ώστε να οδηγήσει στο βέλτιστο θρυμματισμό του πετρώματος.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι αφού περιγράψει το μηχανισμό της έκρηξης δίνοντας έμφαση στην πλέον χαρακτηριστική ιδιότητα της, την **ταχύτητα έκρηξης** , να συσχετίσει τις θεωρητικές τιμές της ταχύτητας έκρηξης με αυτές που θα προκύψουν από επιτόπου μετρήσεις στο διάτρημα και ειδικά στην πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη εκρηκτική ύλη το ANFO.



Κεφάλαιο 2: Το μοντέλο της έκρηξης

2.1. Κατηγορίες εκρηκτικών με βάση τον τρόπο αντίδρασης

Εξετάζοντας τον τρόπο αντίδρασης των εκρηκτικών υλών προκύπτουν δύο κατηγορίες:

Οι βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες, στις οποίες η αντίδραση λαμβάνει χώρα υπό μορφή ταχείας ανάφλεξης και ονομάζεται **κατάκαυση**. Η κατάκαυση οφείλεται στο γεγονός ότι ποσά θερμότητας μεταφέρονται δια αγωγιμότητας σε γειτονικούς κόκκους της εκρηκτικής ύλης προκαλώντας την θερμική διέγερσή τους. Η ενέργεια των βραδυδραστικών εκρηκτικών υλών εδηλώνεται σαν ισχυρή ώθηση του πετρώματος. Κύριος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι η μαύρη πυρίτιδα (black powder).



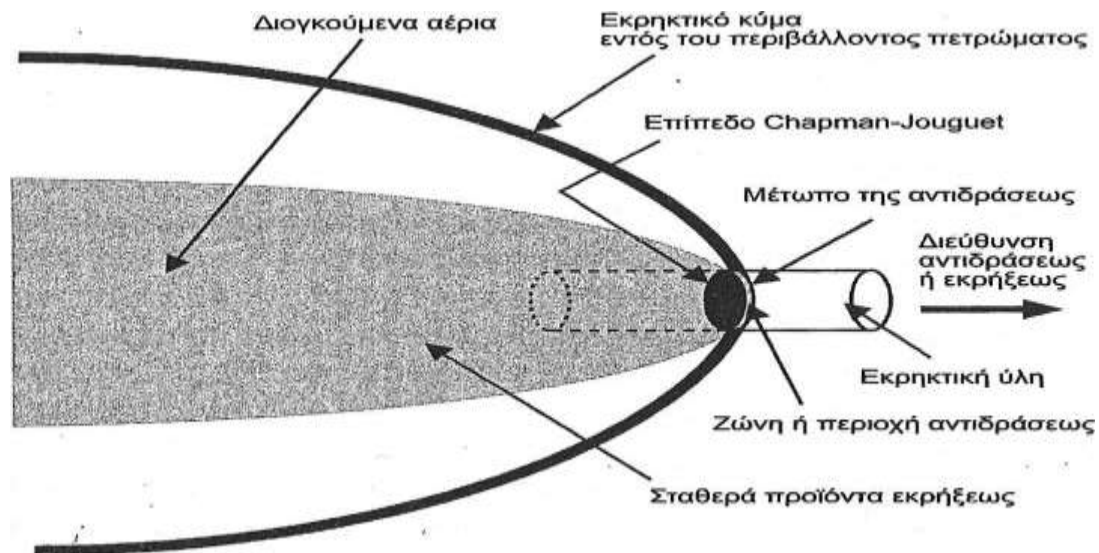
Εικόνα 10: Μαύρη Πυρίτιδα

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες, στις οποίες δεν έχουμε κατάκαυση αλλά **αποσύνθεση της ύλης** λόγω μιας εκρηκτικής αντίδρασης που οφείλεται στη διάδοση ενός κρουστικού κύματος κατά μήκος της γόμωσης. Το κύμα αυτό διαδίδεται με υπερηχητική ταχύτητα στη μάζα της εκρηκτικής ύλης.

Για την παρακολούθηση της έκρηξης χρησιμοποιείται συχνά το εικονιζόμενο στην Εικόνα 2 μοντέλο, που αναφέρεται στην περίπτωση έκρηξης στήλης διαρρηκτικής εκρηκτικής ύλης.

Η έκρηξη στο σχήμα αυτό οδεύει από αριστερά προς τα δεξιά. 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.





Εικόνα 11: Μοντέλο έκρηξης διαρρηκτικής εκρηκτικής ύλης

Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται το σχηματιζόμενο στο πέτρωμα, που περιβάλλει το διάτρημα, **εκρηκτικό – κρουστικό κύμα** (explosive wave), το οποίο προσπίπτει με σφοδρότητα στο πέτρωμα συνθλίβοντας και διαρρηγνύοντας το, λόγω της υψηλής πίεσης που αναπτύσσεται. Επίσης φαίνεται και η μεταγενέστερα δημιουργούμενη φάση της ωστικής πίεσης από τα σχηματιζόμενα κατά την αντίδραση αέρια προϊόντα. Το **ωστικό κύμα** πίεσης είναι αυτό το οποίο επιτυγχάνει την απόσπαση του πετρώματος από τη φυσική του θέση και την μετακίνησή του.

Το κρουστικό και το ωστικό κύμα όσο απομακρύνονται από τον άξονα της γόμωσης χάνουν ενέργεια, καθώς παράγουν έργο θραύσης και μετατόπισης αντίστοιχα και σταδιακά αποσβένονται.

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

2.2. Μοντέλο του Langweiler

Σύμφωνα με το **μοντέλο του Langweiler (Εικόνα 3)**, που αναφέρεται στην περίπτωση κυλινδρικής γόμωσης απείρου διαμέτρου ή απολύτου περιορισμού, ώστε να αποκλείονται πλευρικές απώλειες, στον χώρο της εκρήξεως διακρίνονται τρεις περιοχές:

- α. Περιοχή της εκρηκτικής ύλης, που δεν έχει ακόμη αντιδράσει,
- β. Ζώνη αντίδρασης και μεγάλης πυκνότητας εντός της οποίας αρχίζει και ολοκληρώνεται η αντίδραση και
- γ. Περιοχή αραιώσεως. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από μικρή πυκνότητα σε σύγκριση προς εκείνη της ζώνης αντίδρασης.



Οι περιοχές αυτές διαχωρίζονται από δύο παράλληλα επίπεδα:

α. Εκείνο του μετώπου της εκρήξεως, το οποίο διαχωρίζει την εκρηκτική ύλη, που δεν έχει αντιδράσει με την ζώνη της αντιδράσεως. Κατά το επίπεδο αυτό γίνεται η προσβολή της εκρηκτικής ύλης.

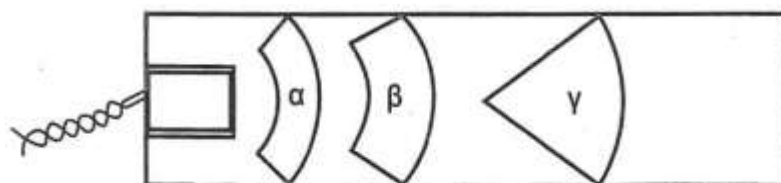
β. Εκείνο του μετώπου της αραιώσεως, που διαχωρίζει την ζώνη της αντιδράσεως από την περιοχή της αραιώσεως. **(Επίπεδο C-J).**



Εικόνα 12: Μοντέλο μετώπου έκρηξης κατά Langweiler

2.3. Μοντέλο Cook

Κατά τον Cook επίπεδα μέτωπα δεν υφίστανται, τουλάχιστον στην περίπτωση σταθερής κατάστασης έκρηξης, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για **ιδανική ή μη ιδανική έκρηξη**. Για την περίπτωση γόμωσης σε συγκεκριμένο διάμετρο χωρίς όμως πλευρικό περιορισμό, ώστε να υπάρχει δυνατότητα πλευρικής αραιώσεως, η μορφή του μετώπου της έκρηξης από το σημείο της έναυσης (α) μέχρι την σταθερή κατάσταση (γ) φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 13: Μοντέλο μετώπου έκρηξης κατά Cook

Αρχικά η μορφή του μετώπου σε τομή είναι ημισφαιρική (α) και στην συνέχεια λαμβάνει μορφή κολουρου 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, επειδή η επίδραση της πλευρικής αραιώσεως γίνεται μεγαλύτερη μέχρις ότου τα πλευρικά κύματα να συναντηθούν στον άξονα της γόμωσης, οπότε η αντίδραση σταθεροποιείται στην κωνική μορφή (γ). Το μήκος της ζώνης πλήρους αντίδρασης, όπως απέδειξαν ραδιογραφήματα, είναι περίπου ίσο προς την διάμετρο του διατρήματος, ενώ απαιτείται για την περίπτωση έκρηξης χωρίς περιορισμό μήκος 3 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) ή αλλιώς ζώνη επώασης. Η πυκνότητα, εξ άλλου, εντός της ζώνης αντίδρασης είναι κατά τον Cook ίση περίπου προς τα $4/3 \rho$, όπου ρ 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 έως 3,5 d, όπου d η διάμετρος του διατρήματος.

2.4.Ιδανική και μη ιδανική έκρηξη

Ανάλογα με την επιτυγχανόμενη ταχύτητα έκρηξης εντός μίας ομοιόμορφης στήλης γόμωσης η έκρηξη δύναται να χαρακτηριστεί ως ιδανική (ideal) ή μη ιδανική (non-ideal).

Ιδανική είναι μία έκρηξη στην οποία επιτυγχάνεται ταχύτητα έκρηξης ίση προς την μέγιστη θεωρητική ταχύτητα αντίδρασης της υπόψη εκρηκτικής ύλης, θεωρείται δε ότι η όλη αντίδραση έχει ολοκληρωθεί εντός της ζώνης αντίδρασης.

Μη ιδανική είναι μία έκρηξη στην οποία η ταχύτητα, που επιτυγχάνεται, είναι μικρότερη εκείνης της ιδανικής έκρηξης και συνήθως παρατηρείται η συνέχιση της αντίδρασης πέραν του επιπέδου C-J.

Στην πράξη όλες οι ανατινάξεις πραγματοποιούνται για διάφορους λόγους σε συνθήκες μη ιδανικής έκρηξης.



Κεφάλαιο 3: Χημεία των εκρηκτικών υλών

3.1. Τι είναι εκρηκτική ύλη

Η εκρηκτική ύλη είναι μία χημική ουσία ή μίγμα ουσιών, οι οποίες υφίστανται ταχύτατη αυτοδιδιδόμενη αντίδραση αποσυνθέσεως, όταν διεγερθούν με την παροχή ενέργειας υπό μορφή θερμότητας ή κρουστικού κύματος. Η αποσύνθεση αποδίδει σταθερά προϊόντα, κυρίως αέρια, (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2) και μεγάλες ποσότητες θερμότητας. Τα πολύ υψηλής θερμοκρασίας (μεταξύ 2000°C και 4000°C) παραγόμενα κατά την αντίδραση αέρια προϊόντα με την κινητική ενέργεια που διαθέτουν δημιουργούν πολύ υψηλές κρουστικές και στην συνέχεια ωστικές πιέσεις εντός του διατρήματος συνεπεία των οποίων το περιβάλλον πέτρωμα θραύεται.

Αν η **ταχύτητα της αντίδρασης** της εκρηκτικής ύλης είναι **μικρότερη της ταχύτητας του ήχου** εντός της ζώνης αντιδράσεως τότε έχουμε **ταχεία ανάφλεξη** και η εκρηκτική ύλη ονομάζεται **βραδυδραστική**.

Αν η **ταχύτητα της αντίδρασης** είναι **μεγαλύτερη**, τότε έχουμε **εκρηκτική αντίδραση** και η εκρηκτική ύλη ονομάζεται **διαρρηκτική**.

Μία εκρηκτική ύλη συνίσταται βασικά από **καύσιμες και οξειδωτικές χημικές ουσίες**.

Τα συνήθη καύσιμα στις εμπορικές εκρηκτικές ύλες είναι το πετρέλαιο, ο άνθρακας, το αργίλιο, το θειάφι και σπανιώς η νιτρική μονοθυλαμίνη και η νιτρική αμινομονοαιθανόλη. Ορισμένα από τα καύσιμα παίζουν και ρόλο ευαισθητοποιητού, δηλαδή ουσιών που επαυξάνουν την ευαισθησία μιας εκρηκτικής ύλης ως προς την έναυσή της. Άλλοι ευαισθητοποιητές είναι η νιτρογλυκερίνη και η νιτροκυτταρίνη. Γυάλινα μικροσφαιρίδια και διάφορα μέσα αερίωσης προστίθενται επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις ως ευαισθητοποιητές.

Το συνηθέστερο οξειδωτικό μέσο είναι το νιτρικό αμμώνιο (NH_4NO_3) και ενίοτε το νιτρικό νάτριο (NaNO_3), το νιτρικό κάλιο (KNO_3) και το νιτρικό ασβέστιο $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.

Άλλα συστατικά των εκρηκτικών υλών είναι το νερό, διάφορες κόλλες (gums), πυκνωτές (thickeners), ουσίες σταθεροποίησης των αιωρημάτων μορφής διασταυρωμένων συνδέσεων μεταξύ των μορίων (cross linking agents) για χρήση στα slurries, ζελατινοποιητές, αντιόξινες ουσίες, απορροφητικές ουσίες και τέλος επιβραδυντές φλόγας (flame retardants).

Σε μερικές εκρηκτικές ουσίες όπως είναι η νιτρογλυκερίνη, το TNT και το PETN, το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο περιέχονται στην ίδια ουσία.



Κεφάλαιο 4: Ισχύς

4.1.Ο όρος ισχύς

Ο όρος ισχύς (strength), όπως χρησιμοποιείται σήμερα, εκφράζει ποσοτικώς την **εκλυόμενη κατά την έκρηξη μιας εκρηκτικής ύλης ενέργεια**.

Κατά την έκρηξη η συσσωρευμένη χημική ενέργεια στην εκρηκτική ύλη μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης (πυκνά μόρια αερίων με υψηλές κινητικές ενέργειες), που κρουστικώς και με άσκηση σχεδόν στατικής πίεσης καταναλώνεται κατά ένα μέρος γία την εκτέλεση ωφέλιμου έργου θραύσης του πετρώματος κατά δε το υπόλοιπο για την μετακίνηση του πετρώματος, για την πρόκληση δονήσεων στο πέριξ πέτρωμα, ως ακουστική ενέργεια, ως τριβή κτλ.

Είναι προφανές ότι, όσο **περισσότερη είναι η διατιθέμενη 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 υπό την επίδραση της κρουστικής και της ωστικής φάσεως, η οποία εξαρτάται από τα φυσικά και μηχανικά του χαρακτηριστικά. Είναι δε τέτοια η επίδραση των τελευταίων ώστε **ισχυρότερες εκρηκτικές ύλες να προκαλούν μικρότερη θραύση σε μαλακότερα πετρώματα** από ότι άλλες χαμηλότερης ισχύος εκρηκτικές ύλες.

Η ενέργεια, που περιέχει μία εκρηκτική ύλη μπορεί να εκφρασθεί κατά **μονάδα βάρους ή μονάδα όγκου** της εκρηκτικής ύλης. Είναι δυνατόν επίσης να εκφραστεί ως **απόλυτος ισχύς ή σχετική ισχύς** σε σύγκριση με εκείνη μίας άλλης εκρηκτικής ύλης. Προκύπτουν συνεπώς τέσσερις δυνατότητες έκφρασης της ισχύος:

- 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 δια πολλαπλασιασμού της AWS επί την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης. Για ANFO πυκνότητας 0,81 g/cm³ θα είναι 930 x 0,81 = 753 cal/cm³. Για την προηγούμενη αμμωνιοδυναμίτιδα πυκνότητας 1,36 g θα είναι: 1080 x 1,36 = 1460 cal/cm³ και για το υπόψη γαλάκτωμα 770 x 1,25 = 963 cal/cm³.
- 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).

Αρχικά η σύγκριση της σχετικής ισχύος γινόταν με βάση την κοινή δυναμίτιδα (straight nitroglycerin dynamite), που περιείχε ως μόνο ενεργό συστατικό την NG. Δηλαδή μία εκρηκτική ύλη, που περιείχε 60% NG, ήταν τριπλάσιας ισχύος σε σύγκριση με την κοινή δυναμίτιδα περιεκτικότητας 20% σε NG. Αργότερα με την αντικατάσταση των αδρανών ουσιών με ενεργά συστατικά, όπως οξυγονούχες και καύσιμες ουσίες η ανωτέρω σύγκριση έπαυσε να έχει αξία, διότι η πραγματική σχέση ισχύος μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης εκρηκτικής ύλης περιορίσθηκε από 3 προς 1 σε 1,5 προς 1.



Περαιτέρω σύγκριση δημιουργείται από το γεγονός ότι, δύο διαφορετικές εκρηκτικές ύλες αλλά ίδιας ισχύος με βάση την περιεκτικότητά τους σε NG, δίνουν στην πράξη διαφορετικό αποτέλεσμα, διότι έχουν άλλα χαρακτηριστικά έκρηξης.

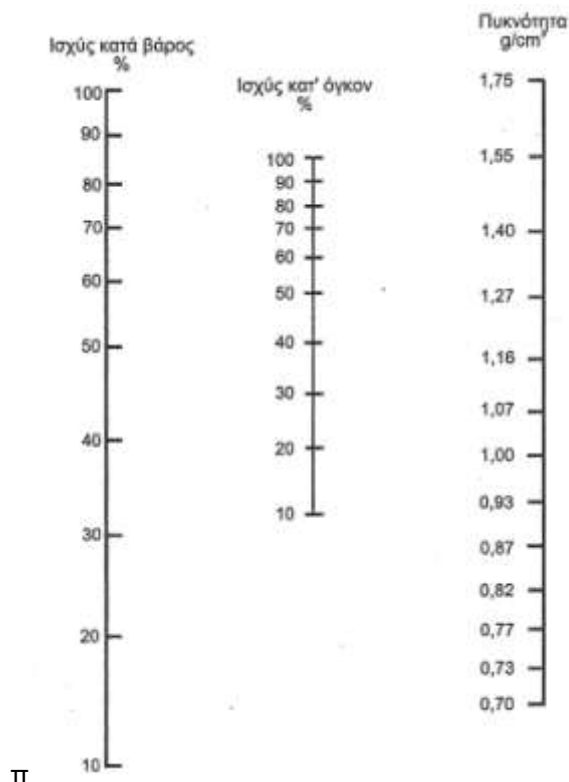
Για να αμβλυθεί έστω και μερικώς το μειονέκτημα της παράληψης των άλλων εκρηκτικών ουσιών, που είναι παρούσες και ιδιαίτερα του AN, στην περιεκτικότητα σε NG προστίθεται και εκείνη του AN θεωρώντας ότι 100 μονάδες AN αντιστοιχούν σε 75 μονάδες NG.

Εάν συνεπώς μία εκρηκτική ύλη περιέχει 40% κατά βάρος NG και 20% AN η ισχύς της κατά βάρος θα είναι:

$$40 + 0,75 \times 20 = 54\%.$$

Η σχέση μεταξύ της κατά βάρος και της κατ' όγκον ισχύος εξαρτάται προφανώς από την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης, που κυμαίνεται από 0,80- 1,70.

Το Νομόγραμμα 1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή της μιας ισχύος στην άλλη, όταν είναι γνωστή η πυκνότητα.



Νομόγραμμα 3: Μετατροπή της κατά βάρος ισχύος σε κατ' όγκον και αντιστρόφως εκρηκτικής ύλης δεδομένης πυκνότητας



Σήμερα έχει αρχίσει να γίνεται **διεθνώς αποδεκτή**, τουλάχιστον για τις **εκρηκτικές ύλες** που έχουν ως **βάση το AN**, η κατά βάρος ή κατ' όγκον **σύγκριση με το τυπικό ANFO** (Standard ANFO), για το οποίο λαμβάνεται ως απόλυτη ισχύς η ποσότητα θερμότητας, που εκλύει κατά γραμμάριο ή κατά κυβικό εκατοστό.

Η κατά βάρος απόλυτος ισχύς του Standard ANFO λαμβάνεται ως 912 cal/g, οπότε η σχετική ισχύς μιας άλλης εκρηκτικής ύλης A με ενέργεια 680 cal/g θα είναι:

RWS της εκρηκτικής ύλης $A=680/912=75\%$ έναντι του Standard ANFO.

Η **κατ' όγκον απόλυτος ισχύς** του Standard ANFO για πυκνότητα $0,84 \text{ g/cm}^3$ θα είναι:

$912 \times 0,84 = 766 \text{ cal/cm}^3$, οπότε εκείνη της εκρηκτικής ύλης A, που έχει πυκνότητα $1,25 \text{ g/cm}^3$, θα είναι:

RBS της εκρηκτικής ύλης $A=680 * 1,25/912 * 0,84 = 115\%$ έναντι του Standard ANFO
Η θεωρητικά εξ' άλλου, διαθέσιμη ενέργεια εντός του διατρήματος θα είναι:

Ενεργεία σε kcal/m διατρήματος = $\pi \times d^2 / 4$ (cal/cm^3) της εκρηκτικής ύλης.

Για χύμα εκρηκτικές ύλες το d αναφέρεται στην διάμετρο του διατρήματος, ενώ για συσκευασμένες εκρηκτικές ύλες στην διάμετρο του φυσιγγίου.

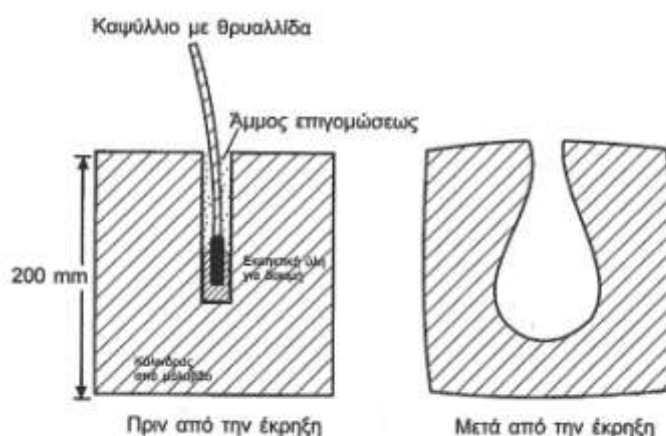


4.2. Δοκιμές μέτρησης ισχύος

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, περιγράφονται παρακάτω. Διευκρινίζεται ότι μία εκρηκτική ύλη που δίνει σε συγκεκριμένη πειραματική μέθοδο περισσότερο ωφέλιμο έργο από μία άλλη, δεν την καθιστά και αποτελεσματικότερη στην πράξη όπου η επιλογή της εκρηκτικής ύλης βασίζεται όχι μόνον στην ισχύ της αλλά και στην κατάλληλη προσαρμογή της προς τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και τις συνθήκες ανατινάξεως για να επιτευχθεί το μέγιστο δυνατόν έργο αποσυνθέσεως του πετρώματος.

4.3. Δοκιμή Trauzl

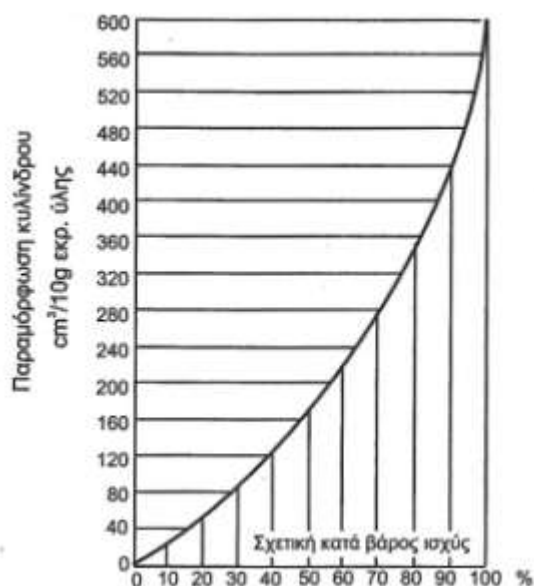
Κατά την δοκιμή αυτή (Εικόνα 5) ποσότητα εκρηκτικής ύλης 10 g τοποθετείται στον πυθμένα οπής διαμέτρου 25 mm και βάθους 120 mm, που έχει διανοιχθεί αξονικά στο κέντρο μολύβδινου κυλίνδρου διαμέτρου και ύψους 200 mm και βάρους περίπου 73 kg. Η εκρηκτική ύλη επιγομώνεται με άμμο και εναύεται με Νο 8 καψύλλιο. Ύστερα από την έκρηξη μετρείται η διόγκωση του θαλάμου, η οποία μετά την αφαίρεση του αρχικού όγκου της οπής αποτελεί ένα μέτρο εκφράσεως της παρεχόμενης ενέργειας.



Εικόνα 14: Μολύβδινος κύλινδρος για τη δοκιμή Trauzl

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα από τις δοκιμές κατά Trauzl βρίσκονται σε ικανοποιητικό συσχετισμό, όπως δείχνει το Διάγραμμα 1 που ακολουθεί, με τα αντίστοιχα των θεωρητικών υπολογισμών του μέγιστου ωφέλιμου έργου.





Διάγραμμα 20: Σχέση ειδικής ενέργειας και σχετικής κατά βάρος ισχύος εκρηκτικών υλών προς την παραμόρφωση της συσκευής Trauzl

4.4. Δοκιμή βαλιστικού εκκρεμούς

Η δομική του βαλιστικού εκκρεμούς (ballistic pendulum) ή αλλιώς όλμου (ballistic mortar) πραγματοποιείται με την εικονιζόμενη συσκευή (Εικόνα 6) που σχεδίασαν οι Taylor και Morris (1932).

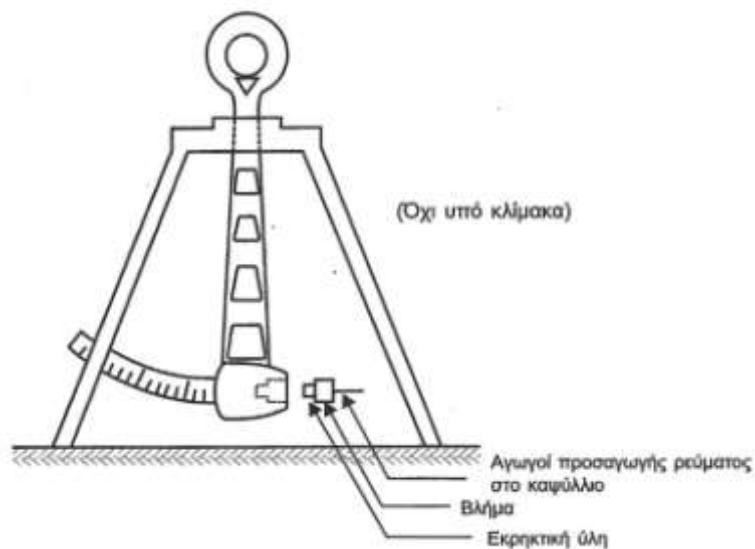
Η συσκευή συνίσταται από εκκρεμές μήκους 3 μέτρων στο άκρο του οποίου είναι αναρτημένος θάλαμος έκρηξης εντός του οποίου τοποθετείται ποσότητα 10 g της προς δοκιμήν εκρηκτικής ύλης. Το στόμιο του θαλάμου φράσσεται με κατάλληλο χαλύβδινο βλήμα. Με την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης το βλήμα εκτοξεύεται προς τα εμπρός, ενώ ο αναρτημένος θάλαμος κινείται, λόγω ανάκρουσης, προς την αντίθετη κατεύθυνση διαγράφοντας συγκεκριμένη τροχιά επί τόξου, η μέγιστη γωνιακή απόκλιση του οποίου α ως προς την κατακόρυφο αποτελεί το μέτρο σύγκρισης.

Κατά τους Taylor και Morris (1932) η αποδιδόμενη ολική ενέργεια E του συστήματος είναι:

$$E = E_0 \cdot (1 - \cos \alpha)$$

όπου E_0 σταθερά εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά της μάζας και της γεωμετρίας του εκκρεμούς.

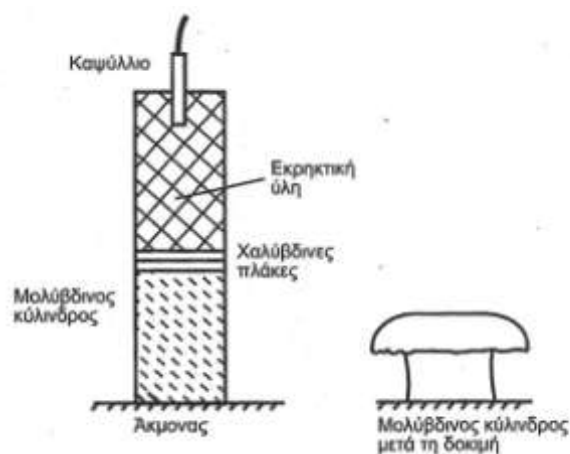




Εικόνα 15 : Βαλιστικό εκκρεμές

4.5. Δοκιμή Hess

Η σχετική διάταξη της δοκιμής αυτής, που είναι γνωστή και ως δοκιμή θραυστικότητας (brisance test) δίνεται στην Εικόνα 7. Στην άνω βάση μολύβδινου κυλίνδρου ύψους 60 mm και διαμέτρου 40 mm, η οποία προστατεύεται από δύο χαλύβδινους δίσκους πάχους 6 mm έκαστος για την ομοιόμορφη παραμόρφωσή της, τοποθετείται ποσότητα εκρηκτικής ύλης 50g ή 100g μορφοποιημένη σε φυσίγγιο από λεπτό μεταλλικό φύλλο ή από χαρτόνι ίδιας διαμέτρου με εκείνη του κυλίνδρου. Μετά την έκρηξη, που πραγματοποιείται με Νο 8 καψύλλιο, μετρείται η μείωση του ύψους που προκλήθηκε στον μολύβδινο κύλινδρο.



Εικόνα 16: Συσσκευή μέτρησης θραυστικότητας κατά Hess



Η μείωση αυτή εκφράζει την κατά Hess θραυστικότητα (δηλαδή την αποτελεσματικότητα μιας εκρηκτικής ύλης να θρυμματίσει το πέτρωμα) της υπόψιν εκρηκτικής ύλης. Σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών εκρηκτικών υλών είναι δυνατόν να καταστραφεί ολοσχερώς κατά την έκρηξη ο μολύβδινος κύλινδρος, οπότε 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.

4.6. Δοκιμή κρατήρα

Κατά την δοκιμή αυτή (cratering method) μετρείται ο όγκος κρατήρα, που θα σχηματισθεί στο πέτρωμα, όταν μια ποσότητα εκρηκτικής ύλης εκραγεί σε βάθος που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό του **κρίσιμου βάθους** της ή συνήθως στο ίδιο το κρίσιμο βάθος της. Ο όγκος, που θα προκύψει, συγκρίνεται προς εκείνον εκρηκτικής ύλης αναφοράς και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα για την ισχύ της προς δοκιμή εκρηκτικής ύλης. 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.



Κεφάλαιο 5 : Ταχύτητα έκρηξης

5.1.Ορισμός ταχύτητας έκρηξης

Η ταχύτητα έκρηξης (velocity of detonation, VOD) ορίζεται ως η **σταθερή** εκείνη **ταχύτητα** με την οποία οδεύει **το μέτωπο της αντίδρασης** εντός μιας κυλινδρικής στήλης γόμωσης από εκρηκτική ύλη. Η ταχύτητα έκρηξης, μετά την εμφάνιση κοντά στο σημείο έναυσης μιας ασταθούς κατάστασης, σταθεροποιείται στην συνέχεια και οδεύει σε όλο το υπόλοιπο μήκος της γόμωσης με υπερηχητική ταχύτητα (με εξαίρεση τις βραδυδραστικές ύλες).

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 ενέργειας** της και **επιπλέον βραχύτερη σε διάρκεια η ωστική φάση της έκρηξης** και αντιστρόφως. Για τον λόγο αυτό εκρηκτικές ύλες χαμηλών ταχυτήτων εκρήξεως δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε ημίσκληρα πετρώματα.

Σε κάθε εκρηκτική ύλη διακρίνονται τρεις ταχύτητες εκρήξεως.

- 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:

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

Δεδομένου ότι, κατά κανόνα οι εκρήξεις λαμβάνουν χώρα σε περιορισμένες συνθήκες (εντός διατρήματος), το ενδιαφέρον περιορίζεται στην αντίστοιχη ταχύτητα εκρήξεως D_c .

Εν τούτοις, οι κατασκευαστές εκρηκτικών υλών δεν ακολουθούν μέχρι σήμερα τυποποιημένη μέθοδο εκφράσεως της ταχύτητας έκρηξης. Άλλοι την δίνουν σε ελεύθερες συνθήκες έκρηξης και διάμετρο διατρήματος 30 mm (1 1/4 in), άλλοι δε στις περιορισμένες συνθήκες, που δημιουργεί η έκρηξη εντός χαλύβδινου σωλήνα διαφόρων διαμέτρων.

Η ταχύτητα έκρηξης είναι κυρίως συνάρτηση:

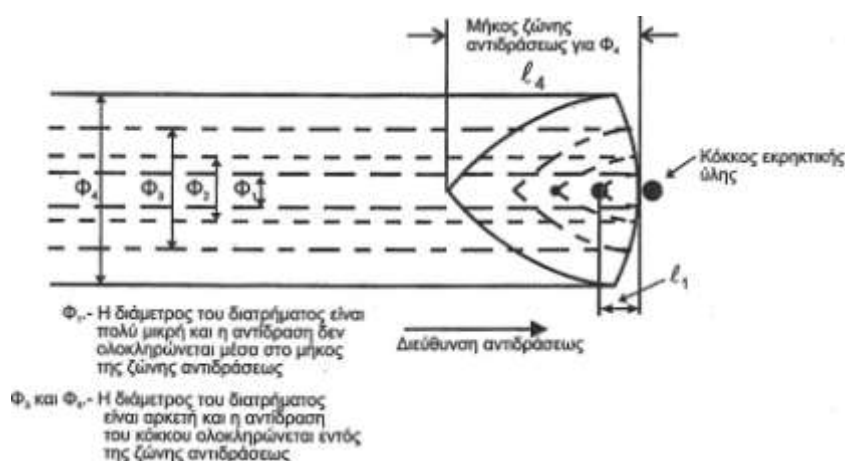
α) της χημικής σύστασης της εκρηκτικής ύλης. Υπάρχουν δηλαδή χημικές ουσίες, όπως για παράδειγμα η νιτρογλυκερίνη, που παρουσιάζουν πολύ υψηλές ταχύτητες σε σχέση με άλλες, όπως για παράδειγμα το ANFO.

β) της κοκκομετρίας της. Μείωση του μεγέθους των κόκκων οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας έκρηξης, μέχρι την επίτευξη της ιδανικής ταχύτητας που είναι και η μέγιστη θεωρητική για την συγκεκριμένη εκρηκτική ύλη.

γ) της πυκνότητας γόμωσης, που φθάνει θεωρητικά μέχρι την κρυσταλλική πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης(κυμαίνεται από τιμές μικρότερες της μονάδος για το ANFO και ορισμένες δυναμίτιδες μέχρι 1,70. Αύξηση της πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας έκρηξης.



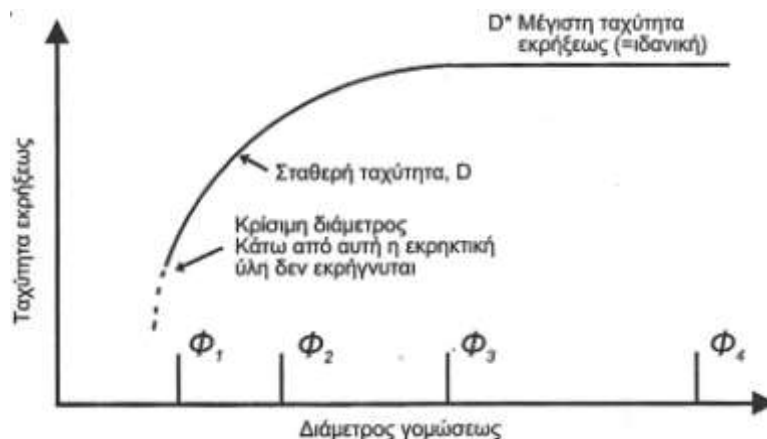
δ) της διαμέτρου γόμωσης της εκρηκτικής ύλης, που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εκείνη του διατρήματος. Αύξηση της διαμέτρου επιφέρει και αύξηση της ταχύτητας έκρηξης. Στην Εικόνα 8 εξετάζεται η σχέση μεταξύ διαμέτρου γόμωσης και ταχύτητας έκρηξης. Το σχήμα εξηγεί τι συμβαίνει όταν ένας κόκκος 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 Φ_1 η αντίδραση δεν προλαβαίνει να ολοκληρωθεί, λόγω του μικρού μήκους της ζώνης αντιδράσεως l_1 και η απελευθερούμενη ενέργεια δεν είναι αρκετή για να διατηρήσει την έκρηξη. Καθώς η διάμετρος αυξάνει και το μήκος της ζώνης αντίδρασης γίνεται μεγαλύτερο, το ποσοστό αντίδρασης του ίδιου κόκκου αυξάνει.



Εικόνα 17: Χημική αντίδραση ενός κόκκου εκρηκτικής ύλης σε συνάρτηση με το μήκος της ζώνης αντιδράσεως για διάφορες διαμέτρους γόμωσης $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$

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 αυτοδιάδοση 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 γόμωσης της. Περαιτέρω αύξηση της διαμέτρου οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού αντίδρασης του κόκκου με την συνεχή απελευθέρωση περισσότερης ενέργειας μέχρι να φθάσει σε κάποια διάμετρο στο 100%, που αντιστοιχεί στην ταχύτητα έκρηξης D_c για δεδομένες συνθήκες. Περαιτέρω αύξηση της διαμέτρου της γόμωσης δεν μεταβάλλει, όπως δείχνει το Διάγραμμα 2, την ταχύτητα έκρηξης. Είναι γεγονός ότι, η μέγιστη αυτή ταχύτητα έκρηξης, D_c θα αντιστοιχεί στην **ιδανική ταχύτητα** έκρηξης D για την υπόψη πυκνότητα και συνθήκες γόμωσης της εκρηκτικής ύλης. Μεγαλύτερη σταθερή ταχύτητα έκρηξης από την ιδανική δεν μπορεί να παρατηρηθεί σε μία εκρηκτική ύλη. Μεταβατικά μόνο είναι δυνατόν να παρατηρηθούν μεγαλύτερες ταχύτητες σε συνθήκες υπερδιέργεσης και μόνο στην άμεση περιοχή της έναυσης.





Διάγραμμα 21 : Μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης με την αύξηση της διαμέτρου γόμωσης

Επειδή, εξ άλλου, για να ολοκληρωθεί η αντίδραση σε μια έκρηξη απαιτείται σε μη περιορισμένες συνθήκες μήκος από το σημείο έναυσεως 3,5 φορές εκείνο της διαμέτρου της γομώσεως προκύπτει ότι, σε όλη αυτή την περιοχή, τα φαινόμενα θα είναι μεταβατικά έχοντας συνεχή μεταβολή του ρυθμού αντιδράσεως και της ταχύτητας έκρηξης μέχρι να φθάσει στην σταθερή τιμή της.

ε) του βαθμού περιορισμού εντός τους διατρήματος. 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 έως 5,5 φορές την διάμετρο του διατρήματος έναντι 3,5 φορές χωρίς περιορισμό, για την επίτευξη σταθερών συνθηκών έκρηξης. Παράλληλα αυξάνει το μήκος της ζώνης της αντίδρασης από d σε περίπου $4/3 d$, όπου d η διάμετρος του διατρήματος και της γόμωσης, πράγμα που σημαίνει ότι, εάν προηγουμένως για δοθείσα 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 ταυτοχρόνως μειώνεται η κρίσιμη διάμετρος.

Σημειώνεται ότι, κατά τις δοκιμές εκρηκτικών υλών, οι πραγματικές συνθήκες περιορισμού, που αντιστοιχούν σε ένα σκληρό πέτρωμα, προσομοιάζονται προς εκείνες της έκρηξης εντός χαλύβδινου σωλήνα.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα έκρηξης είναι:

- ζ) η θερμοκρασία.
- η) ο τρόπος έναυσης της εκρηκτικής ύλης.
- θ) ο χρόνος που μεσολαβεί από τη γόμωση μέχρι την πυροδότηση.
- ι) ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η γόμωση.
- κ) το μήκος του διατρήματος.
- λ) το περιβάλλον του διατρήματος.
- μ) ο χρόνος αποθήκευσης της εκρηκτικής ύλης.
- ν) η εγγύτητα στην κρίσιμη διάμετρο και στην κρίσιμη πυκνότητα.
- ξ) η διάφορες προσμίξεις στην εκρηκτική ύλη.
- ο) ο τρόπος συσκευασίας της εκρηκτικής ύλης.



5.2. Μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης

Το ταχύτατο, σχεδόν ακαριαίο, φαινόμενο της έκρηξης καθώς επίσης το ότι αποτελεί μια καταστρεπτική μη αναστρέψιμη διαδικασία καθιστούν τις πειραματικές μεθόδους μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης εξαιρετικά απαιτητικές και ακριβείς. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ταχύτητα ορισμένων εκρηκτικών φτάνει περίπου τα 8mm/μs και η ολική διάρκεια ενός τέτοιου πειράματος είναι μερικά μικροseconds. Η καταγραφή τέτοιων φαινομένων απαιτεί υπερταχείες τεχνικές καταγραφής και ταυτόχρονα αποτύπωση των δεδομένων σε πραγματικούς χρόνους και μακριά από την περιοχή της έκρηξης.

Ποικίλες πειραματικές μέθοδοι και συσκευές χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ταχύτητας έκρηξης. Οι μετρήσεις βασίζονται στις ιδιότητες των εκρηκτικών κυμάτων και σε διάφορες τεχνικές ταχείας καταγραφής σημάτων. Οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ταχύτητας έκρηξης, καθώς και οι αρχές στις οποίες στηρίζονται είναι οι εξής:

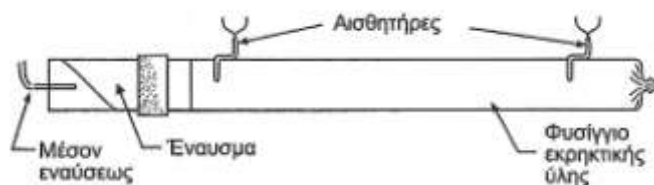
α) Μέθοδοι υπερταχείας φωτογράφισης

Οι μέθοδοι υπερταχείας φωτογράφισης διαχωρίζονται σε μεθόδους αποτύπωσης του ίχνους του μετώπου της έκρηξης ή της εικόνας της περιοχής της έκρηξης, οι οποίες πραγματοποιούνται με την βοήθεια φωτογραφικών μηχανών υπερταχείας λήψης με ταχύτητες καταγραφής από 0,5 έως 15 mm/μs. Με τις ταχύτητες αυτές υπερκαλύπτεται όλο το φάσμα των ταχυτήτων έκρηξης, το οποίο αναμένεται από τις βιομηχανικές εκρηκτικές ύλες.

β) Ηλεκτρονικές μέθοδοι

Στις ηλεκτρονικές μεθόδους για την μέτρηση της ταχύτητας εκρήξεως γίνεται χρήση αισθητήρων σε συνδυασμό με παλμογράφο καταγραφής χρόνου. Η εκρηκτική ύλη σε μορφή κυλινδρικής γομώσεως μήκους 50 cm τουλάχιστον τοποθετείται επί χαλύβδινης πλάκας. Εντός της μάζας της τοποθετούνται σε ορισμένη μεταξύ τους απόσταση δύο αισθητήρες, που στην συνέχεια συνδέονται κατάλληλα με τον παλμογράφο, όπως στην Εικόνα 9.

Η άφιξη του μετώπου της έκρηξης σε κάθε αισθητήρα καταγράφεται στο διάγραμμα του παλμογράφου και με τον τρόπο αυτό εύκολα υπολογίζεται η ταχύτητα έκρηξης. Η μέθοδος έχει δυνατότητα καταγραφής μεταβολών χρόνου μικρότερων του 0,1 μs με μεταξύ των δύο αισθητήρων.



Εικόνα 9: Διάταξη μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης με παλμογράφο

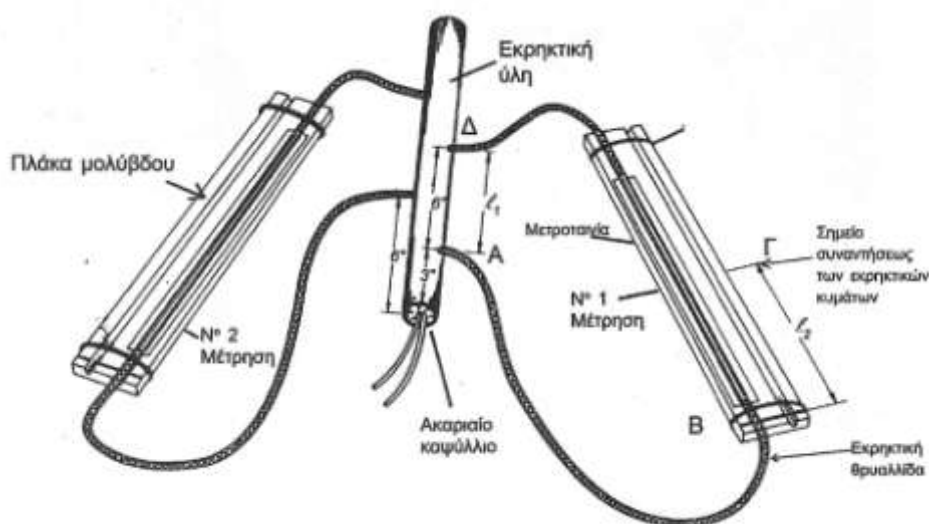


Μια δεύτερη κατηγορία ηλεκτρονικών μεθόδων χρησιμοποιώντας συσκευές υπερταχείας καταγραφής έντασης ρεύματος και διαφοράς δυναμικού στα άκρα ειδικού αγωγού που διατρέχει κατά μήκος τη γομωμένη με εκρηκτική ύλη στήλη ανιχνεύει τη στιγμιαία θέση του μετώπου της έκρηξης όσο ο αγωγός καταναλώνεται από το εκρηκτικό κύμα κατά τη διάρκεια της αντίδρασης.

γ) Μέθοδος Dautriche

Μια εύχρηστη και απλή μέθοδος, που δεν κάνει χρήση οργάνων για την μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης, είναι εκείνη του Dautriche. Βασίζεται στην σύγκριση της ταχύτητας έκρηξης της υπό προσδιορισμό εκρηκτικής ύλης με την γνωστή ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής θρυαλλίδας. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται ένα μικρό τεμάχιο εκρηκτικής θρυαλλίδας, μία μολύβδινη πλάκα για την αποτύπωση της πορείας της έκρηξης και ένα υποδεκάμετρο.

Η σχετική πειραματική διάταξη δίνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Πειραματική διάταξη προσδιορισμού της ταχύτητας έκρηξης με τη μέθοδο Dautriche

Εντός της μάζας της εκρηκτικής ύλης, που έχει διαμορφωθεί σε φυσίγγιο, διανοίγονται δύο εγκάρσιες οπές σε απόσταση μεταξύ τους. Σε τεμάχιο εκρηκτικής θρυαλλίδας μήκους ενός περίπου μέτρου σημειώνεται το μέσον του μήκους του, ενώ τα δύο άκρα του βυθίζονται στο ίδιο βάθος εντός των οπών της εκρηκτικής ύλης. Η περιοχή του μέσου του τεμαχίου της εκρηκτικής θρυαλλίδας στερεώνεται ελαφρά σε μολύβδινη πλάκα επί της οποίας χαράσσεται μία γραμμή, που καθορίζει την θέση του μέσου του μήκους της Β.

Με την έναυση της εκρηκτικής ύλης η έκρηξη φθάνει στο σημείο Α (θέση πρώτης οπής), όπου δημιουργείται δεύτερο μέτωπο έκρηξης, που οδεύει κατά μήκος της εκρηκτικής θρυαλλίδας. Τρίτο μέτωπο έκρηξης δημιουργείται στο σημείο Δ (θέση δεύτερης οπής), που οδεύει επίσης κατά μήκος της εκρηκτικής θρυαλλίδας. Το μέτωπο αυτό συναντά το προηγούμενο μέτωπο της εκρηκτικής θρυαλλίδας στο σημείο Γ, αφήνοντας επί της μολύβδινης πλάκας έντονο ίχνος, λόγω της συμβολής των δύο αντίθετα οδευόμενων μετώπων.



Θεωρώντας ίσους τους χρόνους οδεύσεως των μηκών ΑΒΓ και ΑΔΓ εύκολα προκύπτει ότι:

$$D = D_0 \cdot \frac{\ell_1}{2\ell_2}$$

όπου:

D = ζητούμενη ταχύτητα έκρηξης σε m/s

D₀ = ταχύτητα εκρήξεως της εκρηκτικής θρυαλλίδας σε m/s

ℓ₁ = αξονική απόσταση μεταξύ των δύο οπών της εκρηκτικής ύλης σε cm.

ℓ₂ = μήκος μεταξύ των σημείων Β και Γ επί της μολύβδινης πλάκας σε cm.

Για την μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης σε σταθερές συνθήκες πρέπει η απόσταση μεταξύ του σημείου εναύσεως και της οπής Α να είναι τουλάχιστον ίση προς 4 διαμέτρους, το δε μήκος ΑΔ να είναι μεγαλύτερο από 15 cm. Η επιτυγχανόμενη ακρίβεια με την μέθοδο αυτή είναι απολύτως ικανοποιητική για τον έλεγχο των εμπορικών εκρηκτικών υλών.

δ) Μέθοδοι που βασίζονται στη χρήση οπτικών ινών.

Οι οπτικές ίνες έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν και να μεταδίδουν το οπτικό σήμα που συνοδεύει το εκρηκτικό κύμα. Το οπτικό σήμα μπορεί να καταγραφεί με τη χρήση οπτικών μεθόδων (όπως κάμερες υψηλής ταχύτητας) ή μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια καταγράφεται με κατάλληλες τεχνικές.

5.3. Ηλεκτρονικά συστήματα καταγραφής της ταχύτητας έκρηξης

Τα ηλεκτρονικά συστήματα καταγραφής ταχύτητας έκρηξης που διατίθενται στο εμπόριο πορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

1. Στα σημειακά συστήματα μέτρησης

Τα σημειακά συστήματα μέτρησης είναι ουσιαστικά συσκευές που θυμίζουν τη λειτουργία του χρονόμετρου. Σε ένα γομωμένο με εκρηκτικά διάτρημα στο οποίο έχουμε εγκαταστήσει μια τέτοια διάταξη ο πρώτος δέκτης ενεργοποιεί ένα χρονόμετρο μόλις περάσει από αυτόν το εκρηκτικό κύμα. Ο αμέσως επόμενος δέκτης το απενεργοποιεί. Η ίδια διαδικασία ακολουθεί και για τους επόμενους δέκτες που έχουμε εγκαταστήσει. Οι χρόνοι που έκανε το εκρηκτικό κύμα να πάει από τον ένα δέκτη στον επόμενο ή αθροιστικά από τον πρώτο δέκτη που ενεργοποιήθηκε στον τελευταίο καταγράφονται και στη συνέχεια υπολογίζονται οι ταχύτητες έκρηξης μεταξύ των δεκτών λαμβάνοντας υπόψιν τις μεταξύ του αποστάσεις.

Σε αυτή τη μέθοδο είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ακρίβεια στον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ των δεκτών.



Οι μετρήσεις με σημειακά συστήματα μέτρησης είναι αποδεκτές για πολλές περιπτώσεις. Καθίστανται όμως **ανεπαρκείς** στο να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με σημαντικές πειραματικές μετρήσεις για την καταγραφή της **δυσλειτουργίας των εκρηκτικών και της μεταβολής της ταχύτητας έκρηξης στο μήκος της στήλης του διατρήματος**. Η μέθοδος αυτή είναι από τις απλούστερες μεθόδους υπολογισμού της ταχύτητας έκρηξης και απαιτεί τη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται το εκρηκτικό κύμα για να διανύσει μια γνωστή απόσταση μεταξύ δύο σημείων μέσα στο γομωμένο διάτρημα.

Για το λόγο αυτό ο εξοπλισμός μέτρησης πρέπει να παρέχει:

- Τη δυνατότητα ανίχνευσης – άφιξης του εκρηκτικού κύματος σε ένα δεδομένο σημείο.
- Τη δυνατότητα μέτρησης εξαιρετικά μικρών χρόνων (της τάξης του μικροsecond) που απαιτεί το εκρηκτικό κύμα για να διανύσει μια απόσταση στο διάτρημα.

2. Στα συνεχή συστήματα μέτρησης

α. Σύστημα συνεχούς μέτρησης με αγωγό αντίστασης

Η μέθοδος **συνεχούς μέτρησης με αγωγό αντίστασης** αναπτύχθηκε στις αρχές του 1960 από την U.S.B.M (United States Bureau of Mines). Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στο νόμο του Ohm ($E = R I$ όπου $E =$ τάση $R =$ αντίσταση και $I =$ ένταση).

Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής:

Ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης I και στα άκρα του μετρείται τάση E . Όταν αυτός ο αγωγός καταναλώνεται (κονταίνει) από το εκρηκτικό κύμα κατά τη διάρκεια της έκρηξης και με την προϋπόθεση ότι έχει γνωστή και σταθερή αντίσταση ανά μονάδα μήκους, η πτώση τάσης στα άκρα του αγωγού η οποία είναι αντίστοιχη του μήκους του μετρείται ανά πάσα χρονική στιγμή.

Το σύστημα αυτό για την ακρίβεια περιλαμβάνει δύο αγωγούς οι οποίοι πρέπει να καταναλώνονται κατά τη διάρκεια της έκρηξης. Μια κατηγορία αποτελείται από δύο μονωμένους αγωγούς οι οποίοι είναι πλεγμένοι μεταξύ τους και η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από ένα καλυμένο αγωγό μέσα σε ένα μικρό μεταλλικό σωλήνα ο οποίος έχει το ρόλο του δεύτερου αγωγού. Με την προϋπόθεση ότι οι δύο αγωγοί καταστρέφονται κατάλληλα κατά τη διάρκεια της έκρηξης, η παραπάνω μέθοδος παρέχει συνεχείς μετρήσεις της ταχύτητας έκρηξης σε όλο το μήκος της εκρηκτικής στήλης. Σε περίπτωση που ο αγωγός δεν καταναλώνεται με συνεχή τρόπο κατά τη διάρκεια της έκρηξης θα παρατηρηθούν φαινόμενα όπως απότομη πτώση τάσης, ηλεκτρονικός θόρυβος. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι μετρήσεις δεν λαμβάνονται υπόψιν.



β. Σύστημα συνεχούς μέτρησης Sliffer

Το σύστημα αυτό αρχικά αναπτύχθηκε από το Sandia National Laboratories των Η.Π.Α με σκοπό να μετρήσει τη διάδοση κρουστικών κυμάτων σε πυρινικές εκρήξεις.

Αποτελείται από ένα μονοαξονικό καλώδιο το οποίο τοποθετείται μέσα στο εκρηκτικό. Το καλώδιο αυτό είναι μέρος ενός κυκλώματος η συχνότητα ταλάντωσης του οποίου επηρεάζεται από το μήκος του καλωδίου. Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, το ενεργό μήκος του καλωδίου μειώνεται και η συχνότητα ταλάντωσης αυξάνεται.

Καταγράφοντας αυτή τη συχνότητα σε συνάρτηση με το χρόνο ο ρυθμός με τον οποίο το μήκος του καλωδίου αλλάζει μπορεί να προσδιοριστεί οδηγώντας σε απευθείας τιμές ταχύτητας έκρηξης.

Το σύστημα αυτό είναι εξαιρετικό για εργαστηριακές δοκιμές. Ένα βασικό του μειονέκτημα για μετρήσεις στο ύπαιθρο, είναι ότι το ηλεκτρονικό σύστημα από το οποίο αποτελείται και με το οποίο ενώνονται τα καλώδια καταγραφής πρέπει να είναι πολύ κοντά στο διάτρημα ή στην περιοχή της έκρηξης.

γ. Σύστημα συνεχούς μέτρησης TDR

Το πρώτο σύστημα **TDR(time domain reflectometry)** αναπτύχθηκε από το Los Alamos National Laboratory των Η.Π.Α. για να μετρήσει τις αποδόσεις πυρηνικών εκρήξεων. Το σύστημα αυτό ήταν γνωστό ως CORRTEX και αργότερα άλλαξε σε VODR-I όταν τροποποιήθηκε για εμπορική χρήση. Για μετρήσεις ταχύτητας με αυτή τη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε μονοαξονικό καλώδιο αντίστασης 50Ω.

Η αρχή λειτουργίας του είναι αντίστοιχη με αυτή των ραντάρ, όπου ένας παλμός ραδιοκύματος στέλνεται και στη συνέχεια καταγράφεται η αντανάκλασή του. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα κλασικό καλώδιο για να μεταφέρει ένα ταχύ ηλεκτρικό παλμό. Ο παλμός ταξιδεύει στο καλώδιο με 70 – 99% της ταχύτητας του φωτός (ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του καλωδίου). Τα δεδομένα που προκύπτουν καταγράφονται χωρίς επεξεργασία έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης επειδή το πλάτος του ηλεκτρικού παλμού είναι πολύ περιορισμένο υπάρχει σχεδόν μηδενική ποσότητα ενέργειας στο καλώδιο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας καθιστώντας το TDR ένα από τα πιο γρήγορα συστήματα για τη μέτρηση επίδοσης εμπορικών αλλά και στρατιωτικών εκρηκτικών υλών. Μια από τις μοναδικές ιδιότητες του συστήματος είναι ότι ο ηλεκτρικός παλμός εκπέμπεται πάντα από την άκρη του καλωδίου ανεξάρτητα αν το καλώδιο κονταίνει κατά τη διάρκεια της έκρηξης. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δυο συστήματα το TDR δεν απαιτεί τα καλώδια αισθητήρες να κονταίνουν σύμφωνα με το μέτωπο του εκρηκτικού κύματος.



5.4. Εφαρμογή των επί τόπου μετρήσεων της ταχύτητας έκρηξης

Η ταχύτητα έκρηξης ενός εκρηκτικού υποδεικνύει μια σειρά από σημαντικά χαρακτηριστικά εξετάζοντας την απόδοση του εκρηκτικού κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες που γίνεται η πειραματική δοκιμή. Με την προϋπόθεση ότι οι πειραματικές μετρήσεις ερμηνεύονται σωστά μπορούμε να:

- Υπολογίσουμε την σταθερότητα της έκρηξης.
- Διαπιστώνουμε αν έχουμε έκρηξη, κατάκαυση ή αποτυχημένη έναυση.
- Μελετήσουμε την επίδραση της εναυσματικής γόμωσης στην επίδοση του εκρηκτικού.
- Συγκρίνουμε τις εργαστηριακές με τις πραγματικές (αυτές που έχουν μετρηθεί στο διάτρημα) ταχύτητες έκρηξης.
- Συσχετίσουμε την επίδοση των εκρηκτικών.

Επειδή η ταχύτητα έκρηξης προκύπτει από απευθείας μετρήσεις στο διάτρημα και όχι από έμμεσους συσχετισμούς άλλων μεγεθών, μπορεί να μας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τα εκρηκτικά κύματα, τις δονήσεις στο έδαφος, την ευθραυστότητα, τα ανεπιθύμητα τοξικά αέρια, και άλλους παράγοντες που συνοδεύουν την έκρηξη.



Κεφάλαιο 6 : Πίεση έκρηξης

6.1. Ορισμός της πίεσης έκρηξης

Η πίεση έκρηξης p_d (detonation pressure) είναι μία 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.

Ως πίεση έκρηξης ορίζεται η πίεση, που σημειώνεται στο πέρας της ζώνης της αντιδράσεως στο επίπεδο των Charman and Jouguet, όπως δείχνει η Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Το μοντέλο του μετώπου της έκρηξης κατά Langweiler

Η πίεση έκρηξης εκφράζεται συνήθως σε kbar και κυμαίνεται ανάλογα(με την εκρηκτική ύλη από 10 έως περίπου 200 kbar με συνηθέστερες τιμές μεταξύ 20-120 kbar (2-12 GPa).

Θεωρητικά η πίεση έκρηξης για μία ιδανική έκρηξη δύναται να υπολογισθεί από την θερμοδυναμική θεωρία της έκρηξης βάσει πολύπλοκων σχέσεων (όπως είναι εκείνη του Paterson) . Δύναται 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 μόνον για εκρηκτικές ύλες του τύπου C-H-N-O με πυκνότητα μεγαλύτερη του 1 g/cm^3 .

όπου:

$$p_d = 15,58 \rho_1^2 N M^{1/2} Q^{1/2}$$

p_d = πίεση εκρήξεως σε kbar.

ρ_1 = πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (πυκνότητα γομώσεως).

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

M = μέσο μοριακό βάρος των αερίων προϊόντων της εκρήξεως 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:

$$P_d = \rho_1 D W + p_a$$

όπου:

ρ_1 = πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (πυκνότητα γομώσεως).

D = ταχύτητα εκρήξεως,

W = μέση ταχύτητα ταλαντώσεως των προϊόντων της εκρήξεως στο πέρασ της ζώνης αντιδράσεως (ωκύτης).

p_a = ατμοσφαιρική πίεση, η οποία δύναται να παραληφθεί από την σχέση χωρίς αισθητό λάθος.

Οι ποσότητες ρ_1 και D της σχέσεως μπορεί εύκολα να μετρηθούν με ακρίβεια σε αντίθεση με την ποσότητα W για την οποία μέχρι σήμερα δεν υπάρχει αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης.

Από την ίδια θεωρία προκύπτει επίσης ότι:

$$W = (1 - \rho_1/\rho_2) D$$

όπου:

ρ_2 = πυκνότητα των προϊόντων της έκρηξης στο πέρασ της ζώνης αντιδράσεως.

Για την περίπτωση ιδανικής έκρηξης η σχέση $W = (1 - \rho_1/\rho_2) D$, λαμβάνει την προσεγγιστική μορφή:

$$W = (0,38-1270 \cdot \rho_1/D \cdot \rho_c) D^*$$

όπου:

ρ_c = κρυσταλλική πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.

D^* = ιδανική ταχύτητα έκρηξης, η δε σχέση $P_d = \rho_1 D W + p_a$ την μορφή:

$$P_d = 0,0097 \rho_1 D^* (0,38-1270 \cdot \rho_1/D \cdot \rho_c)$$

όπου ρ_d εκφράζεται σε atm, D^* σε m/s και ρ_1 σε g/cm³.

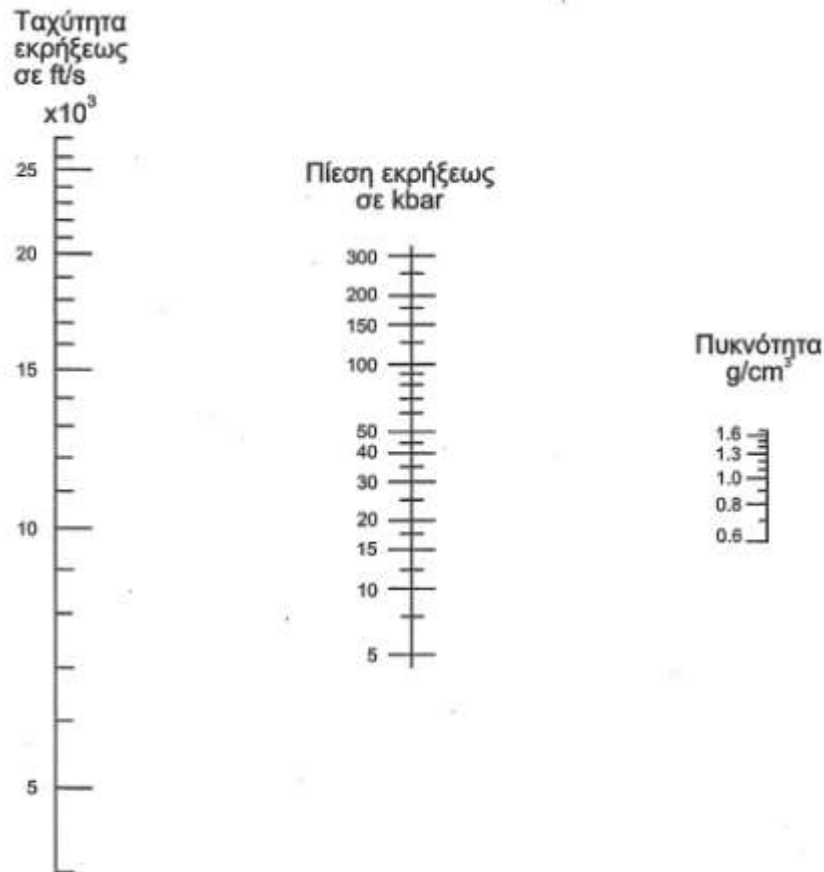
Στην πράξη, όπου έχουμε περίπτωση μη ιδανικής έκρηξης, λαμβάνεται προσεγγιστικά ότι $\rho_1/\rho_2=3/4$, οπότε η σχέση $W = (1 - \rho_1/\rho_2) D$

γράφεται $W=D/4$ και η πίεση έκρηξης υπολογίζεται από την απλή σχέση (Clark, 1987).

$$p_d = 0,00987 \cdot \rho_1 D^2 / 4$$

Το Νομόγραμμα 2 παρέχει έναν εύκολο τρόπο προσδιορισμού κατά προσέγγιση της πίεσης έκρηξης, όταν η ταχύτητα έκρηξης και η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης είναι γνωστά μεγέθη.





Νομόγραμμα 4 : Προσδιορισμός της πίεσης έκρηξης p_d από τη ταχύτητα έκρηξης και την πυκνότητα γόμωσης

Αναφέρεται τέλος ότι, η πίεση όπισθεν της ζώνης αντίδρασης, η οποία αντιστοιχεί προς την πίεση του θαλάμου της έκρηξης p_b (borehole pressure) για την περίπτωση σχέσης ζεύξεως (σχέση ζεύξεως ορίζεται ως ο λόγος της διαμέτρου της εκρηκτικής ύλης προς εκείνη του διατρήματος) (coupling ratio) 100%, που αντιστοιχεί σε γόμωση διατρήματος με χύμα εκρηκτική ύλη, δίνεται προσεγγιστικώς από την σχέση:

$$P_b = 0,50 p_d$$

ενώ μια γενικότερη σχέση, που καλύπτει όλους τους τύπους εκρηκτικών υλών πάντοτε για σχέση ζεύξεως 100%, είναι:

$$p_b = (0,30 - 0,70)p_d$$

δηλαδή η πίεση στον θάλαμο της εκρήξεως μετά την διέλευση του κρουστικού κύματος κυμαίνεται μεταξύ 30-70% της πιέσεως εκρήξεως.

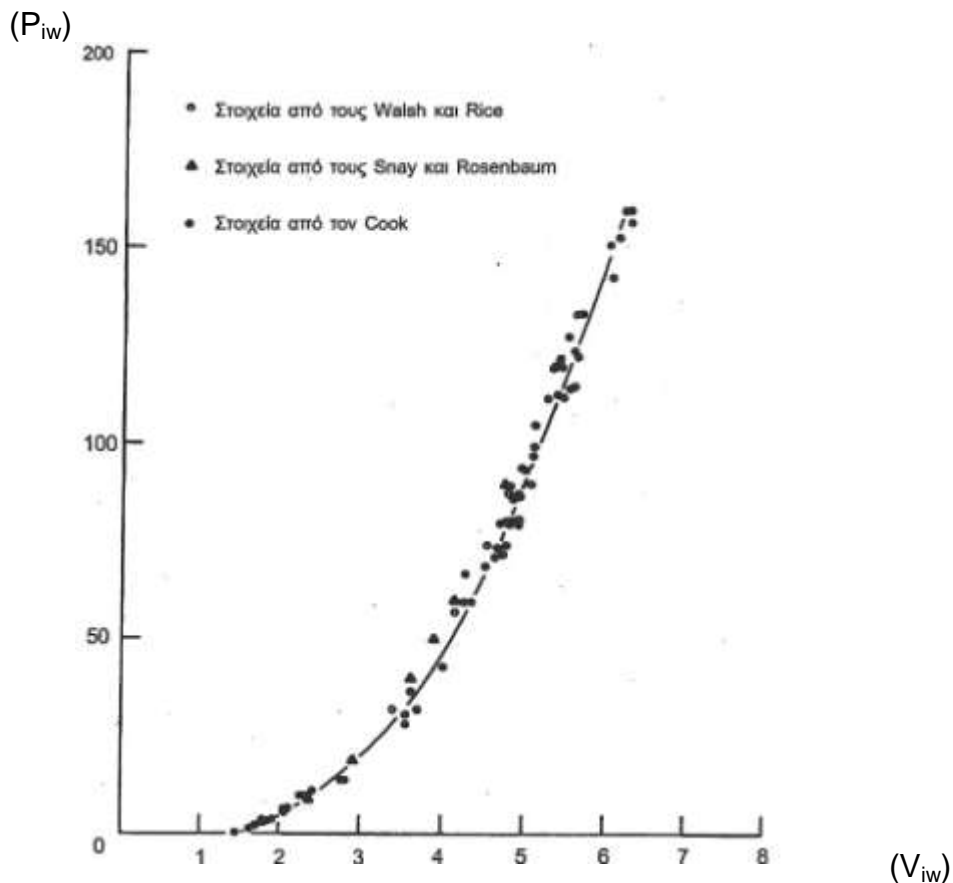


6.2. Πειραματική δοκιμή μέτρηση της πίεσης έκρηξης

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 της οποίας τα μεν τοιχώματα προστατεύονται κατά την έκρηξη με αερόφραγμα, που σχηματίζεται με την διοχέτευση πεπιεσμένου αέρα, ο δε πυθμένας με την τοποθέτηση κατάλληλου απορροφητικού σε κρούσεις υλικού.

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} του εκρηκτικού κύματος εντός του νερού. Με την βοήθεια του Διαγράμματος 3 υπολογίζεται στην συνέχεια η πίεση έκρηξης P_{iw} εντός του νερού.



Διάγραμμα 22: Σχέση μεταξύ αρχικής ταχύτητας διάδοσης του κρουστικού κύματος και της αρχικής πίεσης έκρηξης P_{iw} για την περίπτωση έκρηξης σε νερό



Ακολουθώντας με την χρησιμοποίηση της σχέσης του Goranson για τις "ασύμβατες σύνθετες αντιστάσεις" (impedance mismatch) υπολογίζεται η πίεση έκρηξης από την σχέση:

$$p_f = \frac{p_{iw} [(pV)_{iw} + \rho_1 \cdot D]}{2(pV)_{iw}}$$

όπου:

p_f = πίεση εκρήξεως στο μέτωπο της αντίδρασης,

p_{iw} = αρχική πίεση, που σημειώνεται εντός του νερού. Προκύπτει από την αρχική ταχύτητα διάδοσης της έκρηξης εντός του νερού V_{iw} με την βοήθεια του Διαγράμματος 3

ρ_1 = πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.

D = ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης.

$(pV)_{iw}$ = σύνθετη αντίσταση του νερού, δηλαδή το γινόμενο της πυκνότητας του επί την ταχύτητα διάδοσης του κυματικού παλμού εντός αυτού.

Κατά μία παραλλαγή της υπόψιν δοκιμής η πίεση που σημειώνεται εντός του νερού p_{iw} μετρείται δια της παραμόρφωσης, που δέχεται χάλκινη ή μολύβδινη μεμβράνη ευρισκόμενη σε σταθερή απόσταση από το σημείο της έκρηξης. Η παραμόρφωση αυτή είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών της εκρηκτικής ύλης, της αντίστασης της μεμβράνης και της απόστασης από το σημείο έκρηξης.

Χρησιμοποιούνται επίσης ηλεκτρομηχανικοί τρόποι μέτρησης, που κάνουν χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και παλμογράφου.



Κεφάλαιο 7: Πυκνότητα γόμωσης

7.1. Ορισμός της πυκνότητας γόμωσης

Κατά την διαδικασία της γόμωσης μία προκαθορισμένη ποσότητα εκρηκτικής ύλης σε φυσίγγια ή χύμα τοποθετείται εντός του κατάλληλου διατρήματος. Με τον τρόπο αυτό η εκρηκτική ύλη λαμβάνει μορφή κυλινδρικής γόμωσης, που μπορεί να διακριθεί σε γόμωση πυθμένα (bottom charge) και γόμωση στήλης (column charge).

Ως πυκνότητα γόμωσης (blasting density) ορίζεται η ποσότητα εκείνη της εκρηκτικής ύλης, που περιέχεται στην μονάδα όγκου του διατρήματος.

Η πυκνότητα αυτή γόμωσης επιτυγχάνεται είτε με φυσίγγια δεδομένης πυκνότητας (cartridge density) ή με γόμωση του διατρήματος με χύμα εκρηκτική ύλη (bulk density). Κυμαίνεται από τιμές μικρότερες της μονάδος για το ANFO και ορισμένες δυναμίτιδες μέχρι 1,70 με τις περισσότερες εκρηκτικές ύλες να έχουν πυκνότητα γομώσεως μεταξύ 1,10-1,30.

Η πυκνότητα είναι σπουδαία ιδιότητα των εκρηκτικών υλών, γιατί όσο πυκνότερη είναι μία εκρηκτική ύλη τόσο περισσότερη ενέργεια παράγει στην μονάδα του όγκου. Το ANFO π.χ. με πυκνότητα $0,85 \text{ g/cm}^3$ και ένα γαλάκτωμα με πυκνότητα $1,25 \text{ g/cm}^3$ έχουν διαφορά $0,40 \text{ g/cm}^3$, που σημαίνει ότι στην δεύτερη περίπτωση στον ίδιο όγκο διατρήματος υπάρχει περισσότερη ποσότητα εκρηκτικής ύλης.

Για την περίπτωση κοκκώδους υφής εκρηκτική ύλη χύμα ή σε φυσίγγια η πυκνότητα γόμωσης είναι συνάρτηση της κρυσταλλικής πυκνότητας των κόκκων και του ποσοστού κενών μεταξύ των κόκκων. Ως παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση του ANFO, όπου η κρυσταλλική πυκνότητα του νιτρικού αμμωνίου είναι $1,65 \text{ g/cm}^3$, ενώ υπό μορφή κόκκων ως εκρηκτική ύλη με 6% πετρέλαιο γίνεται $0,83-0,85 \text{ g/cm}^3$ λόγω των κενών μεταξύ των κόκκων και του πορώδους.

Αύξηση του βαθμού συμπίεσεως των κόκκων και η βελτίωση της κοκκομετρικής σύστασής τους, ώστε να καλύπτεται ευρύτερο φάσμα μεγεθών, αυξάνει την πυκνότητα γόμωσης.

7.2. Επίδραση της πυκνότητας γόμωσης στις παραμέτρους της έκρηξης

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.

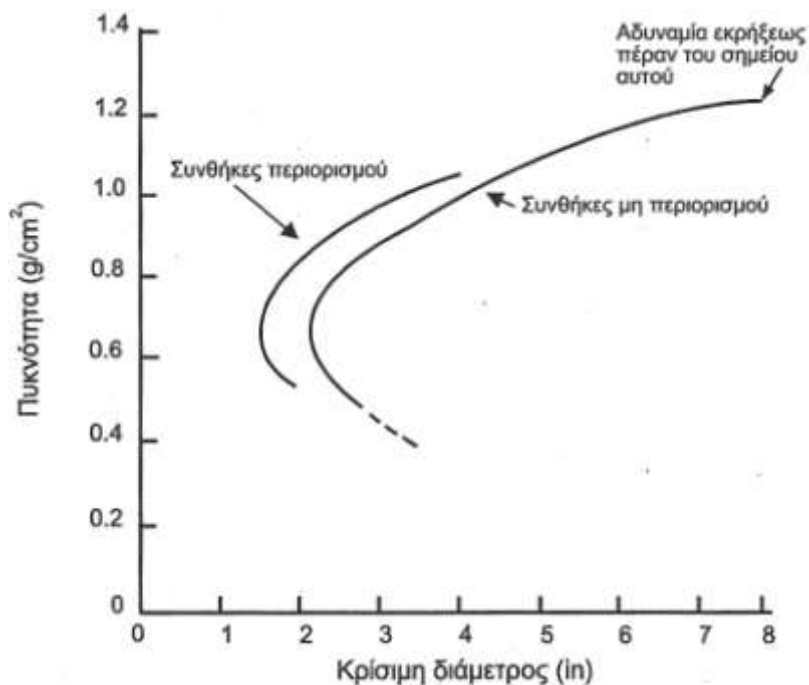
Όπως δείχνει το Διάγραμμα 4 η αύξηση της πυκνότητας γόμωσης προκαλεί αύξηση της κρίσιμης διαμέτρου σε συνθήκες χωρίς ή με περιορισμό μέχρι κάποια οριακή τιμή, που αντιστοιχεί σε $1,2 \text{ g/cm}^3$ για το σφαιρόμορφο πορώδες ANFO σε συνθήκες χωρίς περιορισμό. Για μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή η εκρηκτική ύλη δεν εκρήγνυται, διότι η κρίσιμη διάμετρος γίνεται άπειρη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, ο παγιδευμένος εντός της κοκκώδους αυτής 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.



Μείωση της πυκνότητας γόμωσης κάτω από $0,7 \text{ g/cm}^3$ για το υπόψη σφαιρόμορφο πορώδες ANFO, του οποίου η κρίσιμη διάμετρος του είναι 2 in, οδηγεί σε αύξησή της, που για $0,4 \text{ g/cm}^3$ φθάνει τις 3 1/2 in.

Οι συνθήκες περιορισμού, εξ άλλου προκαλούν μείωση της κρίσιμης διαμέτρου.

Για την περίπτωση των ρευστών εκρηκτικών υλών (π.χ. γαλακτώματα) ισχύει ότι και για τις κοκκώδεις εκρηκτικές ύλες ως προς την ευαισθησία τους διατήρησης της αντίδρασης, η οποία εξαρτάται από την παρουσία παγιδευμένου αέρα στο υγρό σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη μέσω αερίωσης (gassing agents), που δημιουργούν φυσαλίδες (gas bubbles) αέρα. Η θερμοκρασία που φτάνουν αυτές οι φυσαλίδες αέρα καθώς συνθλίβονται, κυμαίνεται από $3000-7000 \text{ }^\circ\text{K}$.



Διάγραμμα 23: Επίδραση της πυκνότητας γόμωσης στην κρίσιμη διάμετρο της εκρηκτικής ύλης

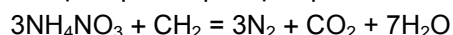


Κεφάλαιο 8: Ποιότητα καπνών

8.1. Αέρια παράγωγα εκρηκτικής ύλης τύπου C-H-N-O

Η ιδανική έκρηξη μιας εμπορικής εκρηκτικής ύλης τύπου C-H-N-O δίνει μη τοξικά αέρια προϊόντα στην θερμοκρασία της αντιδράσεως, όπως CO₂, N₂, H₂O όταν είναι ισοζυγισμένη προς το οξυγόνο.

Μια τέτοια εκρηκτική αντίδραση είναι η επόμενη:



Ορισμένες εκρηκτικές ύλες, λόγω της χημικής σύνθεσής τους, δίνουν και λίγες στερεές ύλες, όπως Al₂O₃ και Na₂SO₄, που εμφανίζονται σε μορφή λεπτότατης σκόνης.

Στην πράξη ποτέ δεν επιτυγχάνεται ιδανική έκρηξη. Πάντοτε δημιουργούνται ανεπιθύμητα αέρια όπως CO και διάφορα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία είναι τοξικά και έκθεση σε αυτά μπορεί να οδηγήσει σε θάνατο. Γενικά εκρηκτικές ύλες ελλειπείς σε οξυγόνο μπορεί να σχηματίσουν CO, ενώ όταν υπάρχει περίσσεια δίνουν οξείδια του αζώτου.

Ο σχηματισμός των τοξικών αυτών αερίων μπορεί επίσης να οφείλεται στην:

- α. μειωμένη ανθεκτικότητα της εκρηκτικής ύλης στην υγρασία
- β. πλημμελή γόμωση με σχηματισμό κενού μεταξύ των φυσιγγίων
- γ. μη ικανοποιητική (οριακή) έναυση
- δ. ανάφλεξη αντί εκρήξεως
- ε. στο σχίσιμο κατά τον διαμήκη άξονά τους των φυσιγγίων για την επίτευξη καλύτερης πυκνότητας γόμωσης

Στις υπαίθριες ανατινάξεις οι τοξικοί καπνοί δεν δημιουργούν πρόβλημα, γιατί διαλύονται αμέσως στην ατμόσφαιρα.

Αντιθέτως, 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 της ανατίναξης. 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.

Σε μερικές χώρες, οι εκρηκτικές ύλες ταξινομούνται σε κλάσεις (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.



Κεφάλαιο 9: Αντίσταση στο νερό

9.1. Έκθεση εκρηκτικής ύλης σε υγρό περιβάλλον

Η αντίσταση στο νερό (water resistance) μιας εκρηκτικής ύλης προσδιορίζει την ικανότητά της να εκραγεί, όταν εκτεθεί σε υγρό περιβάλλον για κάποιο χρονικό διάστημα.

Μία εκρηκτική ύλη, που χαρακτηρίζεται ως "καλής αντίστασης στο νερό" μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε υγρό διάτρημα για βραχύ 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.

Για την περίπτωση των εκρηκτικών υλών της οικογένειας των δυναμίτιδων (Πίνακας 1) η ανθεκτικότητά τους στο νερό εκφράζεται με την ταξινόμηση τους στις κατωτέρω κλάσεις 1 έως 7, οι οποίες εκφράζουν ώρες, που μπορεί μία εκρηκτική ύλη να παραμείνει στο νερό χωρίς να υποβαθμισθεί.

Πίνακας 2 : Ταξινόμηση δυναμίτιδων σε κλάσεις ανάλογα με το χρόνο που μπορούν να παραμείνουν στο νερό.

Κλάση	Διάρκει παραμονής της δυναμίτιδας στο νερο διατηρώντας τις ιδιότητές της
1	για αόριστο διάστημα
2	32 – 71 ώρες
3	16 – 31 ώρες
4	8 – 15 ώρες
5	4 – 7 ώρες
6	1 – 3 ώρες
7	Λιγότερο από 1 ώρα

Εκπομπή καπνών χρώματος κίτρινου ανοικτού έως σκούρου καφέ είναι ενδεικτικά της παρουσίας οξειδίων του αζώτου σε μία έκρηξη και συχνά υποδηλώνουν ότι, η εκρηκτική ύλη έχει αλλοιωθεί, λόγω έκθεσής της σε υγρό περιβάλλον.



Κεφάλαιο 10: Το ANFO και οι ιδιότητές του

Το ANFO είναι η πλέον διαδεδομένη εκρηκτική ύλη παγκοσμίως. Λόγω της σύνθεσής της παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε ό,τι αφορά τις ιδιότητές της και για το λόγο αυτόν στη συνέχεια αναλύονται εκτενώς οι χαρακτηριστικές της ιδιότητες.

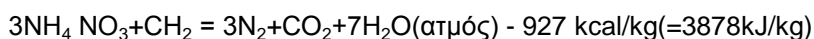
10.1. Ιστορική αναδρομή

Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την χρησιμοποίηση ως εκρηκτικής ύλης απλών μιγμάτων νιτρικού αμμωνίου και ανθρακούχου καυσίμου, όπως είναι ο άνθρακας, το ροκανίδι, το πετρέλαιο σε υπολογισμένες αναλογίες δόθηκε το 1867 στους Σουηδούς J. Ohlsson and J. Norrbín. Η εκρηκτική αυτή ύλη δεν πέτυχε τότε να διαδοθεί εμπορικά, γιατί αφ' ενός συνέπεσε με την ανακάλυψη της δυναμίτιδας από τον A. Nobel και αφ' ετέρου διότι παρουσίαζε δυσχέρειες ως προς την έναυσή της με τα διατιθέμενα τότε μέσα έναυσης σε συνδυασμό με τις ακατάλληλες για την εκρηκτική αυτή ύλη μικρές διαμέτρους διατρημάτων, που χρησιμοποιούντο.

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 LeClair το 1956, που απέδειξαν την αποτελεσματικότητά της σε διάφορες συνθήκες υπαιθρίων ανατινάξεων. Ακολούθησε ταχεία έκτοτε διάδοση με αποτέλεσμα πέντε χρόνια αργότερα να καταλάβει στις Η. Π. Α. η εκρηκτική αυτή ύλη το 50% της αγοράς εκρηκτικών υλών και το 2009 το 99% του συνόλου της κατανάλωσης εκρηκτικών υλών να αποτελείται από μίγμα νιτρικού αμμωνίου / καυσίμου (blasting agents) με το ANFO να αντιπροσωπεύει το 80% του συνόλου.

10.2. Γενικές πληροφορίες - ιδιότητες

Η λέξη ANFO, με την οποία είναι πλέον διεθνώς γνωστή η εκρηκτική αυτή ύλη, είναι αρχικά των αγγλικών λέξεων Ammonium Nitrate (νιτρικό αμμώνιο) και Fuel Oil (πετρέλαιο ντήζελ εσωτερικής καύσεως). Το ANFO είναι μίγμα των δύο αυτών ουσιών σε αναλογία κατά βάρος πρακτικά 94% AN και 6% FO. Στην αναλογία αυτή το ποσό του οξυγόνου του νιτρικού αμμωνίου επαρκεί για την πλήρη οξειδωση των συστατικών του καυσίμου στον υψηλότερο βαθμό οξειδωσης τους σύμφωνα με την εξίσωση:



(Ο πληρέστερος τύπος του πετρελαίου ντήζελ είναι: $(\text{CH}_3)_2 \cdot (\text{CH}_2)_n$)

Η θεωρητική ενέργεια του ANFO φθάνει την μέγιστη τιμή της 930 kcal/kg(=3891 kJ/kg) σε αναλογία 94,5% AN και 5,5% FO κατά βάρος. Στην πράξη χρησιμοποιείται πάντα 94% AN και 6% πετρέλαιο

Παράλληλα παράγονται 11/3 moles αερίων κατά mole AN κανένα από τα οποία δεν είναι τοξικό.

Η χρησιμοποίηση πετρελαίου ντήζελ εσωτερικής καύσης έναντι οποιουδήποτε άλλου καυσίμου για την παρασκευή του ANFO έχει γενικευθεί πλέον διεθνώς, λόγω αφ' ενός μεν της επιτυγχανόμενης καλύτερης ανάμιξης και της ευκολίας εύρεσης πετρελαίου ντήζελ και αφ'

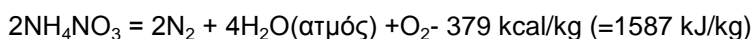


ετέρου, όπως δείχνει η σύγκριση της κατωτέρω εξίσωσης με την προηγούμενη, της επίτευξης κατά 5% περισσότερων αέριων προϊόντων με την ίδια περίπου εκλυόμενη ενέργεια έκρηξης σε σχέση με τον καθαρό άνθρακα.



παρέχοντας 72 moles αέριων προϊόντων κατά mole AN.

Διευκρινίζεται ότι το νιτρικό αμμώνιο σε ορισμένες συνθήκες (μεγάλη διάμετρος και κατάλληλη κοκκομετρία) μπορεί να εκραγεί μόνο του σύμφωνα με την εξίσωση:



παρέχοντας 980 l/kg αέριων προϊόντων.

Το ANFO έχει τρία μεγάλα πλεονεκτήματα στα οποία οφείλει την διάδοσή του:

1. Είναι χαμηλού κόστους εκρηκτική ύλη.
2. Παρέχει μεγάλη ασφάλεια κατά την χρήση του.
3. Έχει ικανοποιητική ισχύ, όταν χρησιμοποιηθεί ορθά.

Από πλευράς μειονεκτημάτων σημειώνεται ότι:

1. Δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί σε υγρό περιβάλλον διότι είναι έντονα υγροσκοπικό.
2. Η έναυσή του είναι δυσχερής.
3. Απαιτείται μεγάλη σχετικά διάμετρος διατρήματος για να αποδώσει την μέγιστη ισχύ του.
4. Είναι διαβρωτικό, διότι σε υγρό περιβάλλον δρα ως ασθενές οξύ και δύναται να προσβάλει το μεταλλικό περίβλημα του μέσου έναυσης.

10.3. Η απόδοση του ANFO

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

Από τα φυσικά χαρακτηριστικά του νιτρικού αμμωνίου, την περιεκτικότητα του σε πετρέλαιο καθώς και από την υγρασία του, τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιείται η έκρηξη, δηλαδή εάν η έκρηξη γίνεται υπό περιορισμό ή όχι, την πυκνότητα γόμωσης του και από το μέσο έναυσης.

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

1. Ποιότητα νιτρικού αμμωνίου

Το συνηθισμένο νιτρικό αμμώνιο $(\text{NH}_4\text{NO}_3)^+$, που έχει συμπαγείς κόκκους και 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 λεπτό στρώμα του πετρελαίου. Για την παραγωγή του ANFO ενδείκνυται η χρήση ειδικού τύπου νιτρικού αμμωνίου με πορώδη υφή, που έχει υψηλή απορροφητικότητα, ώστε να συγκρατεί το πετρέλαιο στην επιφάνεια κάθε κόκκου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ομοιογενές μίγμα και συνθήκες εκρήξεως, 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.

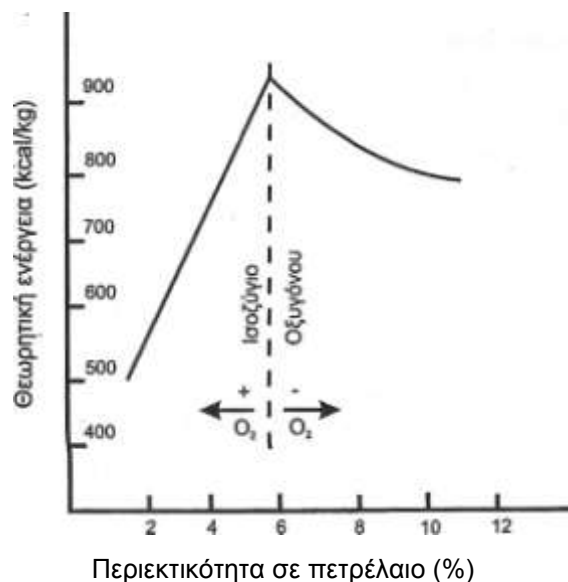
Συγκεκριμένα μετά την εξουδετέρωση του νιτρικού οξέος με αμμωνία και την συμπύκνωση του προϊόντος σε πολύ υψηλή περιεκτικότητα νιτρικού αμμωνίου, το τελευταίο ψεκάζεται από την κορυφή υψηλού πύργου σε αντηροή με ρεύμα αέρα για τον σχηματισμό πορώδους νιτρικού αμμωνίου. Το προϊόν στην συνέχεια ξηραίνεται 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/cm³ (47-53 lb/ft³).

Οι προδιαγραφές για χρήση του σε εκρηκτικά ουσίας απαιτούν ελάχιστη καθαρότητα 99%, μέγιστη υγρασία 0,3%,θειικά υπολογιζόμενα ως H₂SO₄ κάτω του 0,05% και χλωρίοντα, που δεν υπερβαίνουν το 0,05%. Ακόμη πρέπει να είναι ελεύθερο αλκαλικότητας και νιτρωδών με ουδέτερη αντίδραση σε χαρτί ηλιοτροπίου.

2. Περιεκτικότητα σε πετρέλαιο.

Στο Διάγραμμα 5 δίνεται η σχέση μεταξύ της εκλυόμενης θεωρητικά ενέργειας κατά την αντίδραση του νιτρικού αμμωνίου με διάφορες περιεκτικότητες πετρελαίου για πυκνότητα γόμωσης $\rho=0,80 \text{ g/cm}^3$. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί σε 5,6% περίπου περιεκτικότητα σε πετρέλαιο, που είναι η περίπτωση μηδενικού ισοζυγίου οξυγόνου.



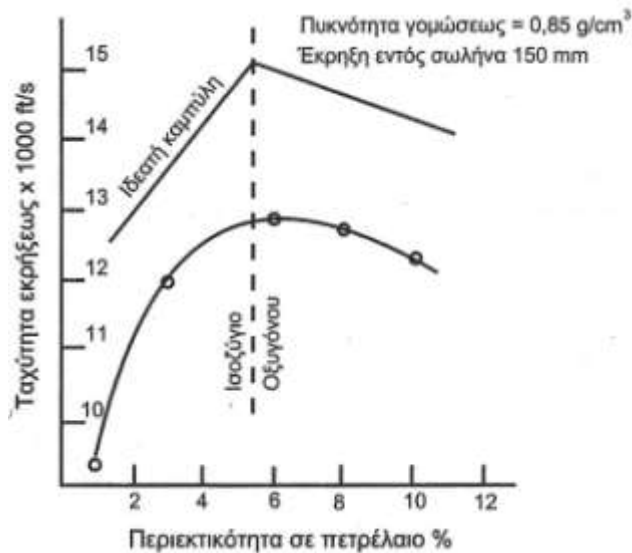
Διάγραμμα 24: Αποδιδόμενη θεωρητικά ενέργεια κατά την αντίδραση του νιτρικού αμμωνίου με διάφορες περιεκτικότητες πετρελαίου.

Από το ίδιο Διάγραμμα προκύπτει ότι η εκλυόμενη ενέργεια ελαττώνεται με βραδύτερο ρυθμό με περίσσεια πετρελαίου παρά με έλλειψη του. Για τον λόγο αυτό στην πράξη η αναλογία αναμίξεως είναι 94% AN και 6% πετρέλαιο προκειμένου να επιτυγχάνεται με την μικρή



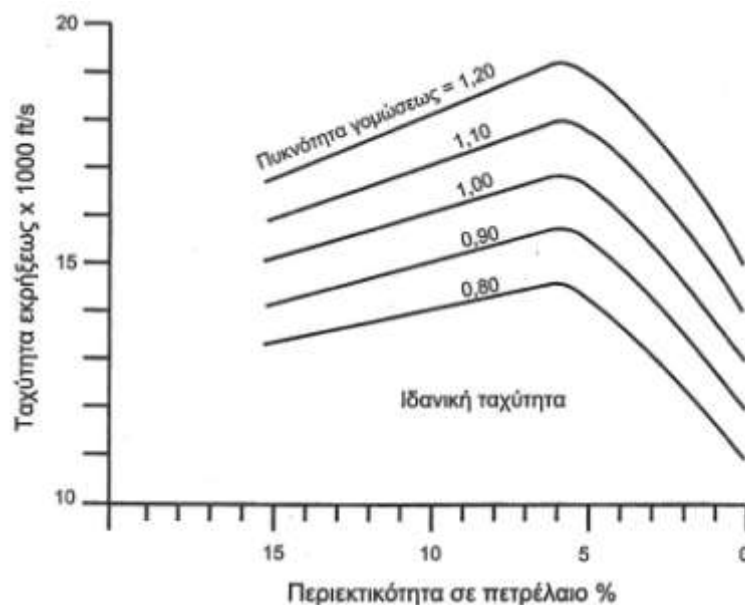
περίσσεια καλύτερη επικάλυψη των κόκκων του AN με πετρέλαιο. Η εμφάνιση, εξ άλλου, κατά την έκρηξη καπνών χρώματος πορτοκαλί ή κίτρινου οφείλεται συνήθως σε ελλειμματική περιεκτικότητα του μίγματος σε πετρέλαιο. Μπορεί όμως να οφείλεται και σε ατελή έκρηξη, λόγω απορροφήσεως νερού από το ANFO.

Στο Διάγραμμα 6 δίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο του ANFO επί της ιδανικής ταχύτητας έκρηξης του και εκείνης, που σημειώνεται στην πράξη.



Διάγραμμα 25: Επίδραση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο του ANFO στην ιδανική και πραγματική ταχύτητα έκρηξής του

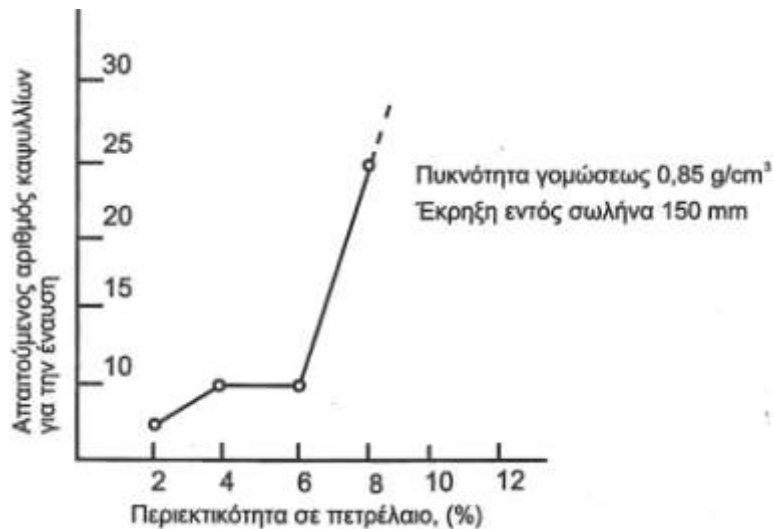
Στο Διάγραμμα 7 δίνεται η ίδια επίδραση για πυκνότητες γομώσεως από 0,80 έως 1,20. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η μέγιστη ταχύτητα έκρηξης σημειώνεται σε περιεκτικότητα πετρελαίου 5,6% περίπου.



Διάγραμμα 26: Επίδραση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο του ANFO επί της ιδανικής ταχύτητας έκρηξης για πέντε πυκνότητες γόμωσης



Στο Διάγραμμα 8 δίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε πετρέλαιο ως προς την ευαισθησία έναυσής του, που εκφράζεται με τον αριθμό των απαιτούμενων καψυλλίων Νο 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.



Διάγραμμα 27: Επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε πετρέλαιο στην ευαισθησία έναυσής του

Από τα προηγούμενα διαγράμματα γίνεται εμφανής η μεγάλη σημασία της χρησιμοποίησης ενός απόλυτα ομοιογενούς, μίγματος νιτρικού αμμωνίου και πετρελαίου με περιεκτικότητα 6% σε πετρέλαιο. Επειδή, εξ άλλου, το νιτρικό αμμώνιο τείνει γενικά να αποβάλλει το πετρέλαιο, επιβάλλεται όπως η ανάμιξη τους πραγματοποιείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς τον χρόνο χρήσεως. Για τον λόγο αυτό διατίθενται στην αγορά ειδικοί αναμικτήρες για την παρασκευή του ANFO επί τόπου του έργου λίγο πριν χρησιμοποιηθεί. Σε άλλες περιπτώσεις ο αναμικτήρας και ο γομωτής είναι ενσωματωμένοι στο ίδιο μηχάνημα.

Παρατεταμένη αποθήκευση του ANFO δεν ενδείκνυται, διότι το πετρέλαιο εξατμίζεται ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Μία δοκιμή, που έγινε τους καλοκαιρινούς μήνες, έδειξε ότι το ANFO απώλεσε το ήμισυ του πετρελαίου του σε μία εβδομάδα. Για τον λόγο αυτό συνιστάται πάντοτε η χρήση σφαιρόμορφου πορώδους νιτρικού αμμωνίου για την παρασκευή του ANFO, που απορροφά και συγκρατεί καλύτερα στους κόκκους του το πετρέλαιο.

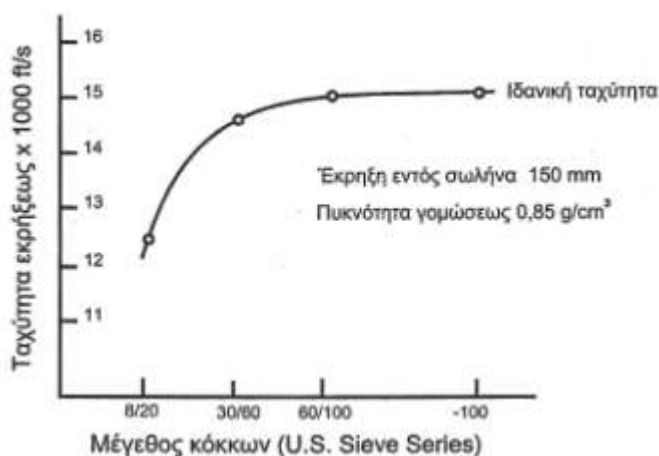
3. Κοκκομετρική σύνθεση του Νιτρικού αμμωνίου.

Στο Διάγραμμα 9 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 (δηλ. 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 καύσεως του κόκκου** 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



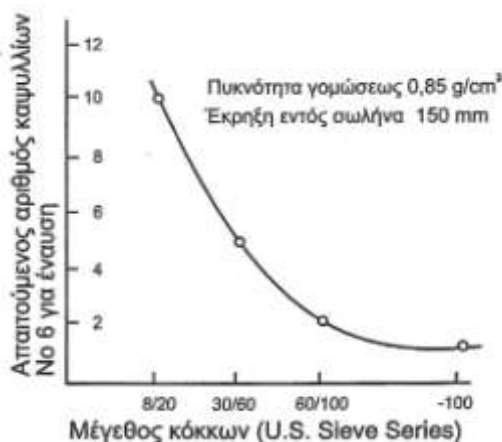
συνέπεια να αυξάνεται ο ρυθμός αντίδρασης της μάζας της εκρηκτικής ύλης ανά μονάδα όγκου.

Το σφαιρόμορφο πορώδες νιτρικό αμμώνιο του εμπορίου έχει συνήθως μέγεθος κόκκων μεταξύ -8 +20 mesh. Για να παραχθεί λεπτότερο προϊόν για βελτίωση της ταχύτητας έκρηξης απαιτείται λειοτριβήση, που δίνει όμως γωνιώδη και ακανόνιστου σχήματος τεμάχια. Η μείωση του μεγέθους με τον τρόπο αυτό προκαλεί πολλές φορές αντίθετα αποτελέσματα των επιθυμητών, διότι η πυκνότητα γομώσεως αντί να αυξάνει ελατώνεται με αποτέλεσμα ANFO κοκκομετρίας -100 mesh, που παρασκευάστηκε με τον ανωτέρω τρόπο, να έχει για χύμα γόμωση πυκνότητα γομώσεως μόλις $0,60 \text{ g/cm}^3$ έναντι $0,85 \text{ g/cm}^3$ του -8+20 mesh. Για να αποκτήσει το πρώτο πυκνότητα $0,85 \text{ g/cm}^3$ απαιτείται κατάλληλη συμπίεση.



Διάγραμμα 28: Επίδραση της κοκκομετρίας του νιτρικού αμμωνίου στη ταχύτητα έκρηξης του

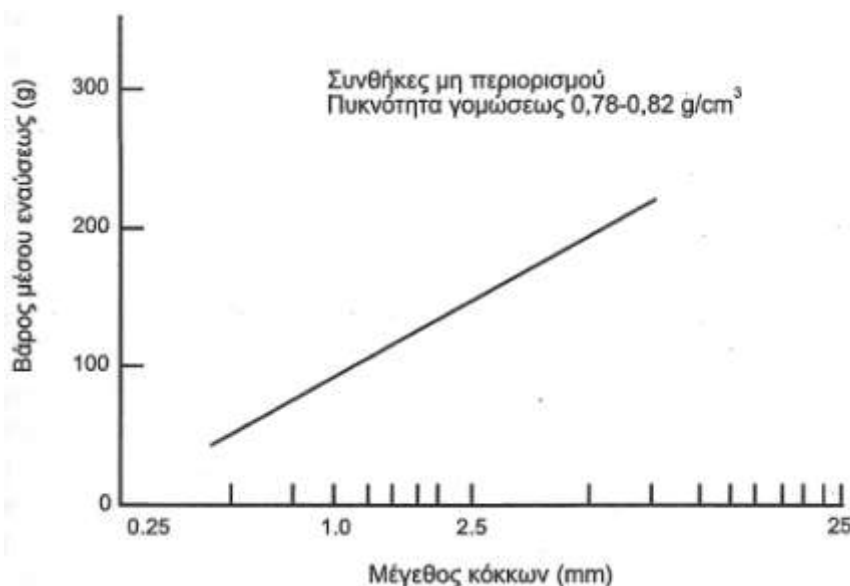
Το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει επίσης την ευαισθησία του ANFO ως προς την έναυσή του, όπως δείχνει το Διάγραμμα 10. Με την μείωση του μεγέθους αυξάνει η ευαισθησία του και είναι δυνατόν τελικά να επιτευχθεί η έναυση του με ένα μόνον καψύλλιο No 6 σε κοκκομετρία -100 mesh.



Διάγραμμα 29: Επίδραση της κοκκομετρικής σύνθεσης του νιτρικού αμμωνίου στην ευαισθησία έναυσής του



Το Διάγραμμα 11 δίνει επίσης την ίδια σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα σε ευρύτερο όμως φάσμα κόκκων μέχρι 25 mm σε συνθήκες μη περιορισμού, όπου πλέον απαιτείται εναυσματική γόμωση για την έναυση του ANFO.

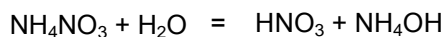


Διάγραμμα 30: Επίδραση της κοκκομετρικής σύνθεσης του νιτρικού αμμωνίου στην ευαισθησία έναυσής του σε συνθήκες μη περιορισμού

Οι βελτιωμένες ιδιότητες έκρηξης του ANFO με την μείωση του μεγέθους των κόκκων στην πράξη δεν είναι τόσο έντονες, γιατί με την μείωση του μεγέθους των κόκκων αυξάνεται η τάση για συσσωμάτωσή του καθώς και η υγροσκοπικότητά του με αποτέλεσμα να μην ρέει πλέον εύκολα χύμα και σε γομώσεις μικρής διαμέτρου να παρατηρούνται ακόμη και εμφράξεις. Οι δυσμενείς αυτές επιδράσεις ελαχιστοποιούνται με την χρήση φρέσκου νιτρικού αμμωνίου, την ανάμιξή του με πετρέλαιο λίγο πριν χρησιμοποιηθεί και την κατάλληλη συμπίεση του στο διάτρημα με την βοήθεια ειδικού πνευματικού γομωτήρα.

4. Περιεκτικότητα σε νερό

Το νιτρικό αμμώνιο αντιδρά με το νερό κατά την εξίσωση:



σχηματίζοντας αραιό νιτρικό οξύ.

Η διαλυτότητα του νιτρικού αμμωνίου στο νερό είναι μεγάλη και το κορεσμένο διάλυμα περιέχει περίπου 65% NH_4NO_3 και έχει 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.

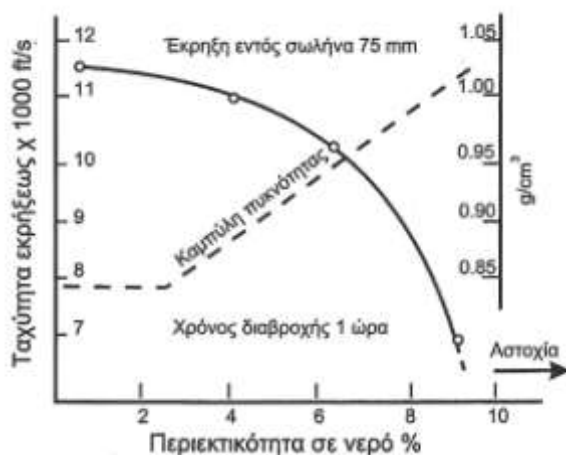


Στο Διάγραμμα 12 δίνεται η κατά τον Clark (1981) επίδραση της περιεκτικότητας του ANFO σε νερό στην ταχύτητα έκρηξής του. Όπως δείχνει το σχήμα αυτό περιεκτικότητα νερού μέχρι 4% ασκεί μικρή επίδραση στην ταχύτητα έκρηξης, ενώ σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες η ταχύτητα μειώνεται έντονα και πέραν του 9% περίπου το ANFO δεν εκρήγνυται.

Η αδυναμία αυτή εναύσεως του ANFO οφείλεται κατά τον Clark (1987) 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.

Κατά τον Yancik (1960) ο χρόνος διαβροχής του ANFO με νερό επηρεάζει το αποτέλεσμα. Σύμφωνα με παρατηρήσεις του, εάν η έκρηξη πραγματοποιηθεί μερικά λεπτά μετά την προσθήκη νερού, τότε η ταχύτητα έκρηξης θα μειωθεί λίγο μέχρι περιεκτικότητα 4% σε νερό και στην συνέχεια θα μειωθεί με αστοχία περίρι του 10%. Ακόμη σημειώνει ότι ANFO με περιεκτικότητα 3% σε νερό αποθηκευμένο για μία εβδομάδα δεν εκρήγνυται.

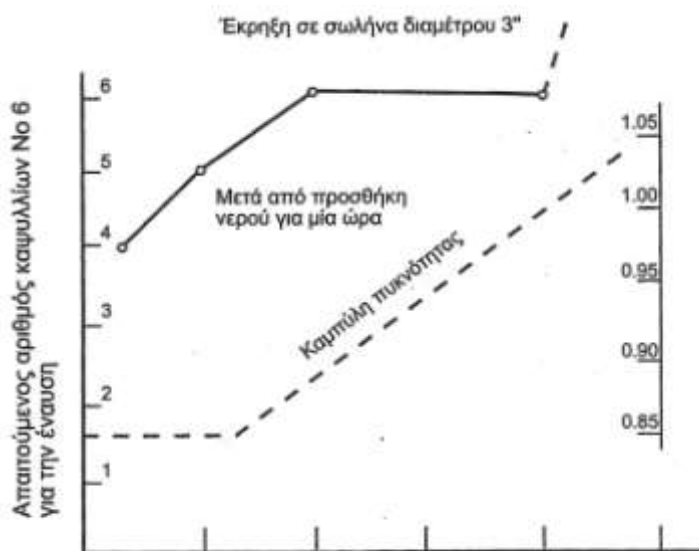
Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι μικρή προσθήκη νερού 1% έως 2% στο ANFO λίγο πριν από την χρήση του δύναται να έχει ευεργετική επίδραση σε εξορύξεις πετρωμάτων, που απαιτούν σημαντική ωστική ενέργεια, διότι με την προσθήκη αυτή αυξάνονται τα αέρια προϊόντα της έκρηξης.



Διάγραμμα 31: Η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό του ANFO στη ταχύτητα έκρηξής του



Η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό του ANFO επί της ευαισθησίας έναυσής του δίνεται στο Διάγραμμα 13.



Διάγραμμα 32: Η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό του ANFO επί της ευαισθησίας έναυσής του

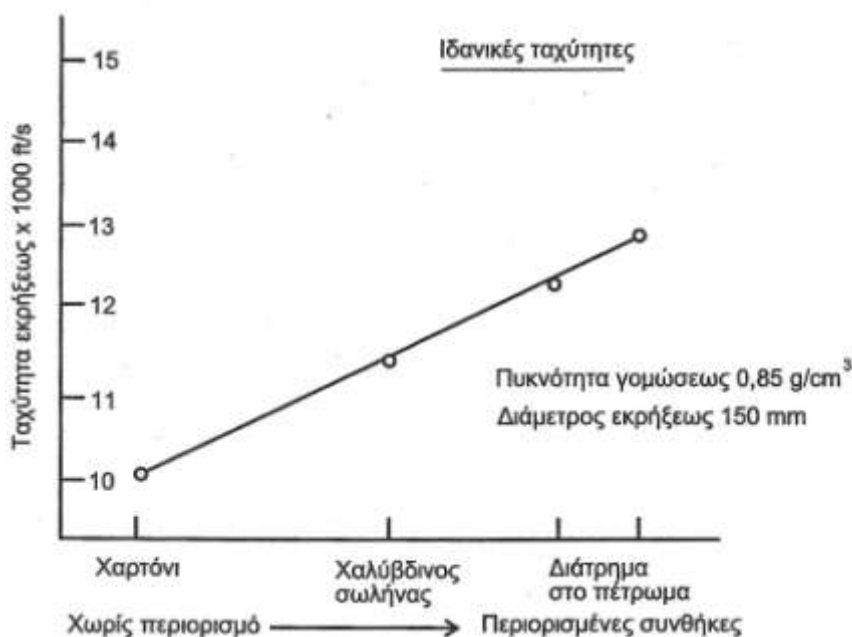
Είναι σαφές από το διάγραμμα αυτό ότι η ευαισθησία έναυσης του ANFO μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητάς του σε νερό. Εάν για κανονική υγρασία 0,3% απαιτούνται 4 καψύλλια No 6 για την έναυσή του, ο αριθμός τους αυξάνεται σε 6 για περιεκτικότητα μεταξύ 4% και 8%, ενώ με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό το ANFO δεν εναύεται ανεξάρτητα από τον αριθμό των καψυλλίων. Κατά τον Yancik (1960), εάν η δοκιμή γίνει αμέσως μετά την προσθήκη νερού, τότε η ευαισθησία του ANFO αυξάνεται μεταξύ περιεκτικότητας 2% έως 4% και είναι δυνατόν η έναυσή του να πραγματοποιηθεί με 1 ή 2 καψύλλια μόνον. Η αυξημένη αυτή ευαισθησία του ANFO είναι μόνο μικρής διάρκειας και γρήγορα αρχίζει με ταχύτατο ρυθμό η μείωση της.

5. Περιορισμός της γόμωσης

Στο Διάγραμμα.14 δίνεται η σχέση μεταξύ του βαθμού περιορισμού του ANFO και της ταχύτητας έκρηξης του για πυκνότητα γόμωσης 0,85 g/cm³. Όπως δείχνει το σχήμα αυτό η ταχύτητα έκρηξης αυξάνεται σημαντικά μεταξύ της έκρηξης 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.





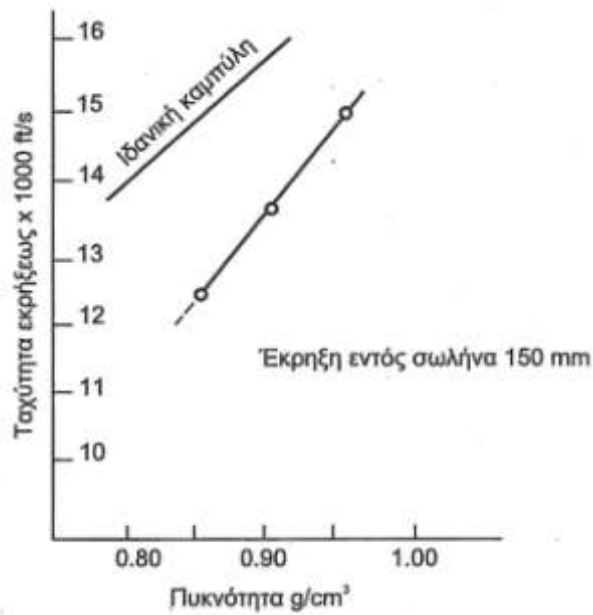
Διάγραμμα 33: Η μεταβολή της ταχύτητας έκρηξης του ANFO σε συνάρτηση με το βαθμό περιορισμού της γόμωσης

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 χαρτινό περιβλήμα. Είναι σαφές από τα ανωτέρω ότι, εάν ο βαθμός περιορισμού του ANFO μεταβληθεί λίγο πριν από την έκρηξη για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, τότε η έναυση του γίνεται δυσχερέστερη.

6. Πυκνότητα γόμωσης

Το ANFO, ανάλογα με την κοκκομετρία του και τον τρόπο γόμωσής του, δίνει πυκνότητες γόμωσης σε υπαίθρια διατρήματα για χύμα γόμωση μεταξύ $0,75-85 \text{ g/cm}^3$ έναντι $1,65 \text{ g/cm}^3$ 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. Όπως δείχνει το Διάγραμμα 15, η σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης και ταχύτητας έκρηξης είναι γραμμική τόσο στην περίπτωση ιδανικής έκρηξης όσο και στην πράξη με βάση πειραματικά δεδομένα. Ενδείκνυται 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 αναμιγνύοντας τους με ολόκληρους κόκκους. Όταν συμπιεσθεί καλά ένα τέτοιο μίγμα με αναλογία 50/50 μπορεί να φθάσει σε πυκνότητα μέχρι $1,05 \text{ g/cm}^3$.



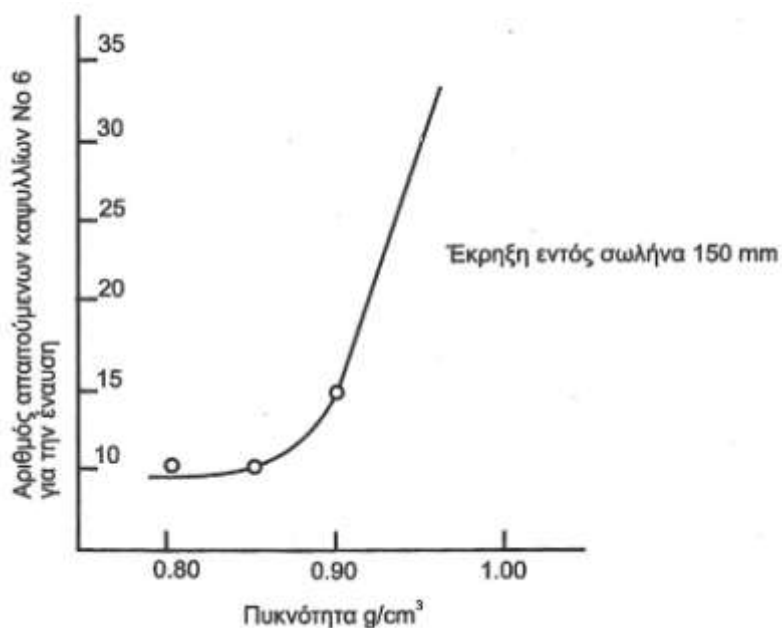


Διάγραμμα 34 : Σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης του ANFO και της ταχύτητας έκρηξής του

Στο Διάγραμμα 16 δίνεται η σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης και ευαισθησίας έναυσης του ANFO. Όπως δείχνει το σχήμα αυτό, που αναφέρεται σε διάμετρο γομώσεως 6 in (150 mm), η ευαισθησία του ANFO μειώνεται γρήγορα καθώς αυξάνει η πυκνότητα γόμωσης του πέραν του 0,90 g/cm³.

Ιδιαίτερη συνεπώς προσοχή πρέπει να δίνεται για πνευματικά γομούμενο ANFO ειδικά σε διατρήματα μικρής διαμέτρου. Οι περισσότερες συσκευές γομώσεως λειτουργούν σε χαμηλές πιέσεις αέρα και δίνουν πυκνότητες ANFO μεταξύ 0,90-0,95 g/cm³. Οι γομώσεις όμως, που διαθέτουν σύστημα εκτόξευσης (ejector type loaders), όταν λειτουργούν με πίεση 100lb/in² (7 bar) δύναται να πετύχουν πυκνότητα 1,20 έως 1,25 g/cm³, στις οποίες το ANFO εναύεται δύσκολα. Για τον λόγο αυτό οι εν λόγω συσκευές πρέπει να λειτουργούν με μειωμένη πίεση αέρα για να δίνουν πυκνότητες περίρι του 1,0 -1, 05 g/cm³.





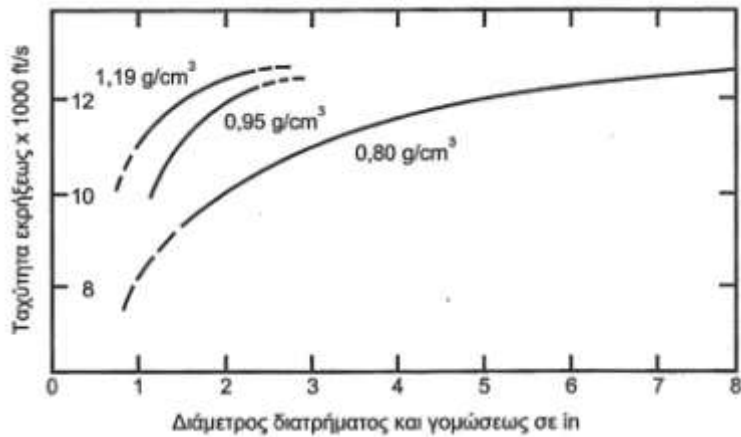
Διάγραμμα 35: Σχέση μεταξύ πυκνότητας γόμωσης και ευαισθησίας έναυσης του ANFO

7. Διάμετρος διατρήματος

Η επίδραση της διαμέτρου του διατρήματος στην ταχύτητα έκρηξης είναι πολύ έντονη. Η κρίσιμη διάμετρος, δηλαδή η ελάχιστη εκείνη διάμετρος υπό την οποία διαδίδεται σταθερά η έκρηξη 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 είναι στην περιοχή των 4 in (100 mm) για πυκνότητα γόμωσης 0,8, που μειώνεται σε 1,5 in (38 mm) για την περίπτωση έναυσής του σε περιορισμένες συνθήκες.

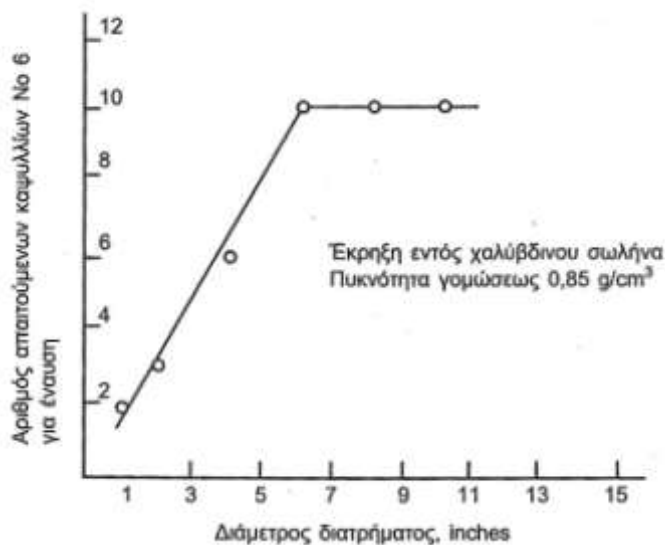
Όπως δείχνει το Διάγραμμα 17 αύξηση της διαμέτρου του διατρήματος οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας έκρηξης μέχρι διάμετρο 5 περίπου ιντσών (125 mm) για πυκνότητα γόμωσης 0,90 g/cm³ και μέχρι διάμετρο 11 in (275 mm) για πυκνότητα γόμωσης 0,79-0,83 g/cm³. Είναι συνεπώς επιβεβλημένο κατά την επιλογή της κατάλληλης διαμέτρου του διατρήματος για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ταχύτητας έκρηξης (να πλησιάζει δηλαδή την ιδανική) να εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας γόμωσης, που μπορεί να επιτευχθεί με βάση τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νιτρικού αμμωνίου και του τρόπου γόμωσης. (σημειώνεται ότι 1 m = 3.281 ft)





Διάγραμμα 36: Επίδραση της διαμέτρου του διατρήματος στην ταχύτητα έκρηξης του ANFO για διάφορες πυκνότητες γόμωσης

Το Διάγραμμα 18 δείχνει ότι η ευαισθησία έναυσης του ANFO ελαττώνεται με την αύξηση της διαμέτρου μέχρι 6 in (150 mm) και μετά σταθεροποιείται. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη πρακτική σημασία, διότι ένα μέσον επιτυχούς έναυσης μιας γόμωσης, π.χ. για διάμετρο 3 in (75 mm) μπορεί να μην είναι επαρκές για την έναυση γόμωσης μεγαλύτερης διαμέτρου.



Διάγραμμα 37: Μεταβολή της ευαισθησίας έναυσης του ANFO σε σχέση με τη διάμετρο του διατρήματος

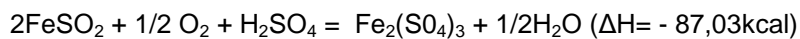
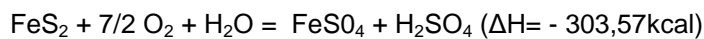


10.4. Η ασφάλεια του ANFO

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.

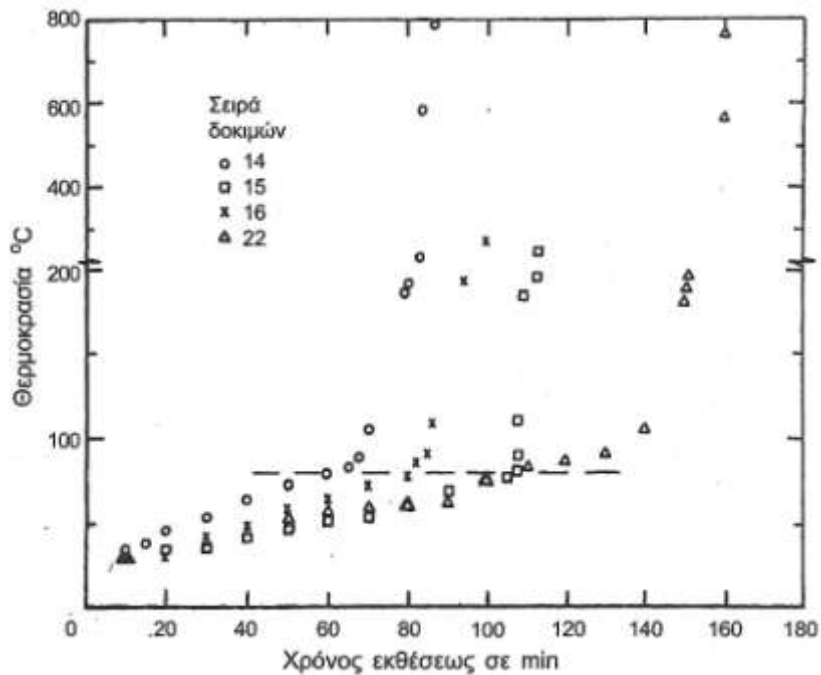
Από τα μέσα της 10ετίας του 1960 μέχρι πρόσφατα, μετά από μία σειρά προώρων εκρήξεων, που σημειώθηκαν σε μεταλλεία θειούχων μεταλλευμάτων, το Γραφείο Μεταλλείων των Η.Π.Α. σε σειρά δημοσιεύσεών του έχει επισημάνει αφ' ενός τον υφιστάμενο κίνδυνο και διερευνήσει αφ' ετέρου τις συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι δυνατόν να συμβεί ανεξέλεγκτη έκρηξη διατρήματος, που έχει γομωθεί με ANFO ή ακόμη με μίγμα ANFO/γαλακτώματος.

Σύμφωνα με τα πορίσματα του Γραφείου αυτού ο σιδηροπυρίτης (FeS_2) και τα άλλα θειούχα μεταλλεύματα, όταν εκτίθενται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, υφίστανται οξειδωση, η οποία για την περίπτωση του σιδηροπυρίτη ή του μαρκεσίτη γίνεται σύμφωνα με τις επόμενες αντιδράσεις:



Οι αντιδράσεις αυτές, που συνολικά έχουν εξώθερμο καθαρό αποτέλεσμα επιταχύνονται πολύ παρουσία βακτηρίων, όπως είναι ο *Thiobacillus ferrooxidans*, που ενεργεί ως καταλύτης και επιταχύνει πολύ τις αντιδράσεις, ειδικότερα όταν οι θερμοκρασίες και η οξύτητα είναι στην κλίμακα εντόνου δράσεως του βακτηρίου αυτού. Τα κύρια προϊόντα των αντιδράσεων αυτών είναι ο θειικός σίδηρος και το θειικό οξύ. Τα προϊόντα αυτά αντιδρούν στην συνέχεια εξώθερμα με το ANFO με ρυθμό εξαρτώμενο από τις σχετικές ποσότητες τους και το βαθμό αναμίξεώς τους. Η εξώθερμη αυτή αντίδραση μπορεί να προκαλέσει κατευθείαν έκρηξη του ANFO ή πυροδότηση του μέσου έναυσης, όταν η θερμοκρασία φθάσει περί τους $120^\circ - 130^\circ \text{C}$, που εκρήγνυνται ορισμένα μέσα έναυσης. Στο διάγραμμα 19 δίνονται τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών του Γραφείου Μεταλλείων των Η.Π.Α., τα οποία δείχνουν την σχέση μεταξύ χρόνου εκθέσεως και θερμοκρασίας, που αναπτύσσεται στο ANFO, όταν βρίσκεται σε επαφή με μίγμα ενός θειούχου μεταλλεύματος και θειούχου σιδήρου.





Διάγραμμα 38: Σχέση χρόνου έκθεσης του ANFO και θερμοκρασίας σε μείγμα ενός θειούχου μεταλλεύματος και θειούχου σιδήρου

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 στην κλίμακα 32°-38°C ο χρόνος μεταξύ γόμωσης και έκρηξης πρέπει να περιορισθεί σε 4 έως 6 ώρες, εάν δε είναι μέχρι 43° C, τότε πρέπει να περιορισθεί σε 2 - 4 ώρες. Καθαρισμός του διατρήματος για την απομάκρυνση όλων των θρυμμάτων του θειούχου μεταλλεύματος από την διάτρηση καθώς και του νερού είναι επίσης επιθυμητός, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με επένδυση του διατρήματος με φύλλο πολυαιθυλαινίου πριν από τη γόμωση.



Κεφάλαιο 11: Η συσκευή μέτρησης Handitrap VOD recorder

11.1 Γενικές πληροφορίες

Το Handitrap είναι ένα μια φορητή συσκευή για τη μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης που διαθέτει ένα υψηλής ανάλυσης καταγραφικό της ταχύτητας έκρηξης. Είναι κατάλληλο για μετρήσεις της ταχύτητας είτε σε δείγματα εκρηκτικών είτε σε γομωμένα διατρήματα.

Το Handitrap αποτελείται από μια μονοκάναλη, υψηλής ανάλυσης συσκευή συνεχούς καταγραφής της ταχύτητας έκρηξης. Σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι η αξιοπιστία του κάτω από ακραίες συνθήκες (ζέστη, υγρασία, παγετός, σκόνη) που χαρακτηρίζουν συνήθως το περιβάλλον που γίνονται οι μετρήσεις. Συνοδεύεται από το κατάλληλο λογισμικό που επιτρέπει στον χρήστη να αποτυπώσει, να αναλύσει, να αποθηκεύσει και να εκτυπώσει τις μετρήσεις που έχουν καταγραφεί από τη συσκευή.

Το όλο σύστημα κατασκευάζεται από την εταιρία MREL(Specialty Explosive Products Limited)

11.2. Ασφαλής χρήση

Το Handitrap είναι εύκολο και ασφαλές στην χρήση. Κατά τη λειτουργία του η χαμηλή τάση (λιγότερο από 5V) και η χαμηλή ένταση (λιγότερο από 50mA) εξόδου εξασφαλίζουν ότι το Handitrap δεν θα δημιουργήσει ανασφαλείς συνθήκες κατά την έναυση – πυροδότηση της εκρηκτικής ύλης.

Ωστόσο επειδή η χρήση του σχετίζεται με τη χρήση εκρηκτικών το Handitrap απευθύνεται σε άτομα με την κατάλληλη γνώση κι εμπειρία.

11.3. Αρχή λειτουργίας

Το Handitrap καταγράφει συνεχώς την ταχύτητα έκρηξης σε όλο το μήκος μιας στήλης εκρηκτικού. Έχει τη δυνατότητα να μετρήσει ταχύτητες ακόμα και σε σχετικά μικρά δείγματα όπως φυσίγγια εκρηκτικών. Επιπλέον μπορεί να μετρήσει την ταχύτητα έκρηξης εκρηκτικών τα οποία έχουν γομωθεί σε επιφανειακά ή υπόγεια διατρήματα. Για να το πετύχει αυτό το Handitrap παρέχει ένα ηλεκτρικά σταθερό και συνεχές σήμα εξόδου σε ειδικούς αισθητήρες αγωγούς (καλώδια PROBROD ή PROBECABLE-HT) και στη συνέχεια καταγράφει την πτώση τάσης κατά μήκος των αγωγών αυτών καθώς αυτοί κονταίνουν καταστρεφόμενοι από το πλάσμα του μετώπου της έκρηξης.

Η MREL έχει κατασκευάσει ειδικούς αγωγούς (καλώδια PROBROD ή PROBECABLE-HT) γνωστής γραμμικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι οποίοι τοποθετούνται αξονικά κατά μήκος του



δείγματος του εκρηκτικού ή της εκρηκτικής στήλης της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την ταχύτητα. Καθώς το μέτωπο της έκρηξης καταναλώνει τους αγωγούς, η συνολική αντίσταση του κυκλώματος μειώνεται αναλογικά με την μείωση του μήκους του εκάστοτε αγωγού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης στα άκρα του αγωγού σε συνάρτηση με τον χρόνο την οποία και καταγράφει το Handitrap.

Το ειδικό λογισμικό το οποίο παρέχει η MREL αυτόματα μετατρέπει τις καταγεγραμμένες πληροφορίες σε γραφική παράσταση της απόστασης σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εφαιπόμενη αυτής της γραφικής παράστασης σε οποιοδήποτε σημείο θα είναι η ταχύτητα έκρηξης του εκρηκτικού στο συγκεκριμένο σημείο. Το λογισμικό περιλαμβάνει ρυθμίσεις που υπολογίζουν αυτόματα τη ταχύτητα έκρηξης σε οποιοδήποτε περιοχή του γραφήματος.

11.4. Εφαρμογές

Οι βασικές εφαρμογές του Handitrap είναι οι μετρήσεις σε δείγματα εκρηκτικών και εκρηκτικών γομώνσεων στο διάτρημα.

Για μετρήσεις σε δείγματα εκρηκτικών πετυχαίνουμε:

- Συσχετισμό της μετρούμενης απόδοσης των εκρηκτικών με αυτήν που λέει ο κατασκευαστής
- Μέτρηση της χρονικής ακρίβειας της πυροδότησης
- Καθορισμό της ευαισθησίας κενού της εκρηκτικής ύλης (gap sensitivity)
- Μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης στο μήκος της εναυσματικής γόμωσης
- Καθορισμός της ελάχιστης εναυσματικής γόμωσης μετρώντας τις ενδεχόμενες διακυμάνσεις της ταχύτητας στην στήλη του εκρηκτικού
- Μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης δείγματος ακαριαίας θρυαλλίδας

Για μετρήσεις σε εκρηκτικά γομωμένα στο διάτρημα πετυχαίνουμε:

- Μέτρηση της συνεχούς ταχύτητας έκρηξης σε κάθε διάτρημα οποιασδήποτε διαμέτρου, υγρασίας και είδους πετρώματος
- Προσδιορισμό έκρηξης, ανάφλεξης ή αποτυχίας και καθορισμό του σημείου της στήλης στο οποίο αυτά συμβαίνουν
- Έλεγχο της προβλεπόμενης από τον κατασκευαστή ταχύτητας έκρηξης σε πραγματικές συνθήκες
- Μέτρηση της επίδρασης εξωγενών παραγόντων (νερό, σκόνη που έχει αναμειχθεί με την εκρηκτική ύλη κατά τη διάρκεια της γόμωσης κτλ.) στην έκρηξη



11.5. Συγκρότηση της συσκευής Handitrap

Το Handitrap^{II} περιλαμβάνει:

1. Τη βασική συσκευή Handitrap^{II} (Εικόνα 12)η οποία αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα κι εσωτερικά επαναφορτιζόμενη μπαταρία μέσα σε προστατευτική πλαστική θήκη διαστάσεων 12 × 6,5 × 4cm και βάρους 0,3kg. Η θήκη παρέχει προστασία από το νερό, το χιόνι, τη σκόνη και άλλες παρόμοιες σκληρές συνθήκες. Επιπλέον η θήκη παρέχει προστασία από υψηλές θερμοκρασίες και κραδασμούς.



Εικόνα 12: Συσκευή Handitrap^{II}



2. Τον φορτιστή με ένδειξη 120VAC ή 230VAC ο οποίος χρησιμοποιείται για την φόρτιση της εσωτερικής επαναφορτιζόμενης μπαταρίας.



Εικόνα 13 : Φορτιστής Handitrap[®]

3. Το καλώδιο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για να συνδέεται το Handitrap με ηλεκτρονικό υπολογιστή και να μεταφέρονται τα καταγεγραμμένα δεδομένα. Εφαρμόζει στη θύρα COM/CHARGE στην μπροστινή πλευρά του Handitrap και στην αντίστοιχη υποδοχή COM του υπολογιστή.



Εικόνα 14 : Καλώδιο επικοινωνίας Handitrap[®] με Η/Υ



4. Τον BNC αντάπτορα που παρέχεται για την σύνδεση του Handitrap και του μονοαξονικού καλωδίου RG – 58/U που οδηγεί στον αγωγό PROBEROD ή PROBCABLE- HT.



Εικόνα 15: Αντάπτορας BNC

Επίσης για τη χρήση της συσκευής, ανάλογα με την πειραματική μέτρηση, απαιτούνται οι παρακάτω **αισθητήρες - αγωγοί**

1. Αισθητήρας-Αγωγός VOD PROBEROD

Είναι ένας άκαμπτος αγωγός που αποτελείται από υψηλής αντοχής μονωμένο καλώδιο το οποίο περιβάλλεται από έναν μεταλλικό σωλήνα μικρής διαμέτρου που λειτουργεί σαν αγωγός για το κύκλωμα.

Το PROBEROD είναι ειδικά σχεδιασμένο για να μετρά ταχύτητες δειγμάτων εκρηκτικών σε ελεύθερες ή υπό περιορισμό συνθήκες. Οι αγωγοί αυτοί είναι διαθέσιμοι από την MREL με συγκεκριμένο μήκος (0,9m) και ειδικά διαμορφωμένοι για να συνδέονται με το RG-58 μονοαξονικό καλώδιο που οδηγεί στο Handitrap



Εικόνα 16 : Αισθητήρας - Αγωγός VOD PROBERODE



2. Αισθητήρας - Αγωγός VOD PROBECABLE-HT

Είναι ένας εύκαμπτος αγωγός που εσωτερικά περιλαμβάνει ένα υψηλής αντοχής καλώδιο το οποίο είναι μονωμένο και περιφερειακά υπάρχει ένα σωληνωτό μεταλλικό πλέγμα που κλείνει το κύκλωμα. Το PROBECABLE-HT είναι ειδικά σχεδιασμένο για να μετρά ταχύτητες εκρηκτικών μέσα στο διάτρημα. Είναι διαθέσιμο από τη MREL σε συγκεκριμένο μήκος (30m) το ένα άκρο του οποίου είναι κατάλληλα διαμορφωμένο για να τοποθετείται στον πυθμένα του διατρήματος και το άλλο για να συνδέεται στο RG-58/U καλώδιο και από εκεί στο Handitrap.



Εικόνα 17 : Αισθητήρας - Αγωγός VOD PROBECABLE – HT

3. Αγωγός RG-58/U

Η MREL διαθέτει 101m μονοαξονικού καλωδίου RG-58/U σε καρούλια για τη σύνδεση των αγωγών PROBEROD ή PROBECABLE-HT με το Handitrap. Για την σύνδεση αυτή υπάρχει και ο κατάλληλος BNC αντάπτορας. Ο αγωγός RG-58/U διατίθεται και στο εμπόριο.



Εικόνα 18: Αγωγός RG-58/U



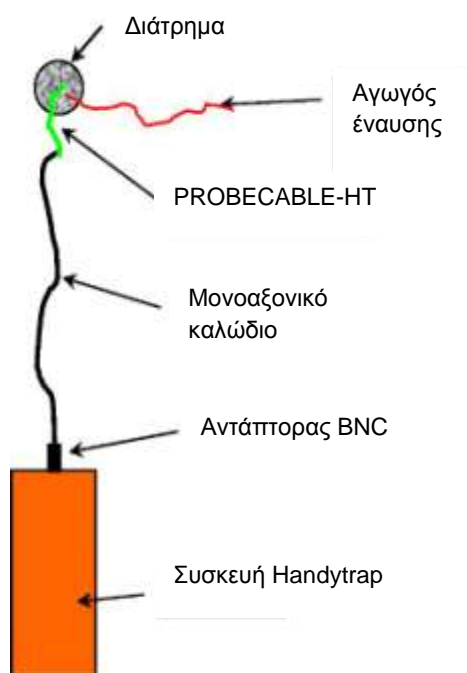
11.6. Προετοιμασία του Handitrap για μέτρηση ταχύτητας έκρηξης στο διάτρημα με τη χρήση PROBECABLE-HT

Απαραίτητος εξοπλισμός:

1. Η συσκευή Handitrap
2. Ένα καρούλι PROBECABLE-HT
3. Μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U που ενώνει την συσκευή Handitrap με το ελεύθερο άκρο του PROBECABLE-HT
4. Κόφτης καλωδίου και μονωτική ταινία
5. Τα εκρηκτικά για την γόμωση

Διαδικασία εγκατάστασης του εξοπλισμού

(Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει μετρήσεις ταχύτητας έκρηξης σε ένα γομωμένο διάτρημα με ύψος στήλης εκρηκτικού πάνω από την εναυσματική γόμωση, μεγαλύτερο από 6m με την χρήση PROBECABLE-HT)

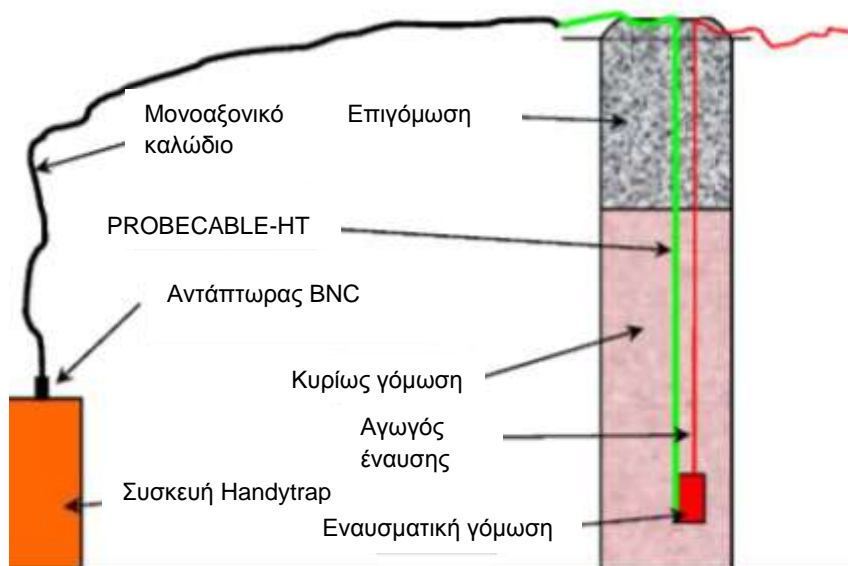


1. Το καρούλι ελευθερώνεται με τη χρήση του κόφτη έτσι ώστε το PROBECABLE-HT να ξετυλιχθεί πλήρως. Έχει μήκος 30m και είναι ειδικά διαμορφωμένο στην άκρη που θα τοποθετηθεί στον πυθμένα του διατρήματος

Εικόνα 19 : Στοιχεία του εξοπλισμού μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης που βρίσκονται εκτός διατρήματος



2. Το ειδικά διαμορφωμένο άκρο του PROBECABLE-HT δένεται με τη μονωτική ταινία στο φυσίγγιο της εναυσματικής γόμωσης ή σε μια πέτρα και κατεβαίνει στο διάτρημα. Στη περίπτωση πυροδότησης της γόμωσης με ακαριαία θρυαλλίδα το PROBECABLE-HT πρέπει να κατέβει σε απόσταση από αυτό, για να αποφευχθεί ο τραυματισμός του PROBECABLE-HT από την ακαριαία θρυαλλίδα.
3. Σε περίπτωση που το διάτρημα έχει μήκος μεγαλύτερο από 30m το PROBECABLE-HT μπορεί να επιμηκυνθεί με μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή, μετρήσεις θα υπάρχουν μόνο για τα 30m εκρηκτικής στήλης που θα διατρέχει το PROBECABLE-HT.
4. Στη συνέχεια το διάτρημα γομώνεται με εκρηκτικά, προσέχοντας να διατηρείται το PROBECABLE-HT τεντωμένο αποφεύγοντας τα τσακίσματα και τις αναδιπλώσεις μέσα στο διάτρημα.
Στο τέλος της διαδικασίας προτείνεται μέτρηση με γαλβανόμετρο της αντίστασης του PROBECABLE-HT προκειμένου να ελεγχθεί τυχόν φθορά στο μονωτικό του περίβλημα. Η αντίσταση του PROBECABLE-HT είναι περίπου 326 Ohms (± 6 Ohms).



Εικόνα 20 : Στοιχεία του εξοπλισμού μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης που βρίσκονται εντός διατρήματος

5. Χρησιμοποιώντας τον κόφτη και την μονωτική ταινία συνδέεται κατάλληλα το PROBECABLE-HT με το μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U.
6. Το Handytrap τοποθετείται σε μέρος μακριά από το χώρο της έκρηξη και καλύπτεται κατάλληλα. Η καταγραφή των δεδομένων από την συσκευή γίνεται αυτόματα και δεν απαιτεί την παρουσία του χειριστή.
7. Το μονοαξονικό καλώδιο ενώνεται με το Handytrap με τη βοήθεια του αντάππορα BNC.



8. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε και η συσκευή είναι έτοιμη για χρήση.
9. Είναι πολύ σημαντική η προστασία του αγωγού RG-58/U από καταστροφές που μπορούν να προκληθούν από πέτρες που εκτοξεύονται κατά την έκρηξη. Ιδιαίτερη προστασία χρειάζεται το τμήμα του καλωδίου που βρίσκεται περιφερειακά της οπής του διατρήματος. Υπάρχουν πολλοί τρόποι προστασίας. Ο πιο συνηθισμένος είναι η κάλυψη των καλωδίων με μερικά εκατοστά χώμα.



Κεφάλαιο 12 : Μέτρηση ταχύτητας έκρηξης σε διάτρημα

Προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση των παραμέτρων που διαμορφώνουν την πραγματική ταχύτητα έκρηξης, στο σύνολό τους, πραγματοποιήθηκε μέτρηση ταχύτητας έκρηξης της γόμωσης ενός διατρήματος διαμέτρου 165 mm (6 ½ in) στο λατομείο της ΧΑΛΥΨ Α.Ε.

Το διάτρημα έφερε γόμωση αποτελούμενη από ένα (1) φυσίγγιο ζελατινοδυναμίτιδας διαστάσεων $\Phi 65 \times 550$ mm και βάρους 2,5 kg με την εμπορική ονομασία "Poladyn 31 Eco", στο οποίο είχε εμφυτευθεί ένα καψύλλιο Nonel και χύμα ANFO συνολικού βάρους 350 kg, πυκνότητας $0,8 \text{ gr/cm}^3$ και ονομαστικής ταχύτητας έκρηξης 3000 m/s.

Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του χώρου και της διαδικασίας της μέτρησης και ακολουθεί ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν.

12.1. Λατομείο ΧΑΛΥΨ

Το Λατομείο ΧΑΛΥΨ βρίσκεται στην θέση Κεραμιδεζα, στην Μάνδρα Αττικής. Απέχει 5 χλμ από την πόλη της Μάνδρας και 33 χλμ από το κέντρο της Αθήνας. Είναι από τα μεγαλύτερα λατομεία αδρανών υλικών στην Ελλάδα με ετήσια ικανότητα παραγωγής μεγαλύτερη των 10,000,000 τόνων. Το λατομείο ΧΑΛΥΨ ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1981 με την ονομασία ΑΦΟΙ ΑΝΑΓΝΩΣΤΑΚΗ ΑΛΒΕΕ. Το 1989 αγοράστηκε από την εταιρία Ciments Francais και από το 1992 που η Ciments Francais εξαγοράστηκε από τον όμιλο Italcementi τα λατομεία συγχωνεύτηκαν με την εταιρία ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε. και αποτελούν το λατομικό κλάδο αυτής.



Εικόνα 21 : Αποτύπωση του λατομείου ΧΑΛΥΨ (πάνω και αριστερά) μέσω του Google maps



Οι εργασίες εξόρυξης πραγματοποιούνται εργολαβικά από τη εταιρία ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΤΣΟΚΑΝΗ Α.Ε. Ο Όμιλος Τσοκανή είναι από τους μεγαλύτερους ομίλους στην Ελλάδα με ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων σε τομείς όπως η παραγωγή και η εμπορία αδρανών υλικών, οι εργολαβίες σε λατομεία και ορυχεία, οι χωματουργικές και οι ασφαλτικές διαδικασίες καθώς και η ναυτιλία. Από την ίδρυση του στράφηκε αποκλειστικά στο χονδρικό εμπόριο προμηθεύοντας με αδρανή υλικά τσιμεντοβιομηχανίες, βιομηχανίες σκυροδέματος, τεχνικές εταιρείες καθώς και οργανισμούς του Δημοσίου. Σήμερα ο Όμιλος Τσοκανή έχει επεκταθεί σε 3 χώρες του εξωτερικού και συνολικά απαριθμεί 9 εταιρείες.

Τα προϊόντα που παράγει (Πίνακας 2) διατίθενται στη παραγωγή,

- του σκυροδέματος
- του ασφαλτικού σκυροδέματος
- του τσιμέντου

αλλά και ως προϊόντα έτοιμα προς χρήση για την κατασκευή λιμενικών και δομικών έργων.

Το λατομείο λειτουργεί σε μια έκταση 1,300,000m², διαθέτοντας δύο μονάδες παραγωγής αδρανών υλικών, πλήρως αυτοματοποιημένων με ικανότητα παραγωγής 3,000 τόνων ανά ώρα, και 20 σιλό για την φόρτωση των τελικών προϊόντων.

Γεωμορφολογικά, η ευρύτερη περιοχή παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο με υψηλά όροι να διαδέχονται βαθιές κοιλάδες. Κατά το μέγιστο τμήμα της αποτελείται είτε από λευκούς έως λευκότεφρους, κατά τόπους ροδίζοντες ασβεστόλιθους, άστρωτους έως παχυστρωματώδεις, ισχυρώς διερρηγμένους και κερματισμένους του Μέσου – Ανώτερου Τριαδικού, είτε από βαθύτεφρους έως μελανότεφρους ασβεστόλιθους λεπτοπλακώδεις έως μεσοπλακώδεις, στο μεγαλύτερο μέρος δολομιτικούς του Ανώτερου Τριαδικού.

Το έδαφος του χώρου του λατομείου προέρχεται από αποσάθρωση του ασβεστόλιθου, ο οποίος άλλωστε αποτελεί το μητρικό πέτρωμα. Το χρώμα του εδάφους είναι ερυθρό πράγμα που οφείλεται στη παρουσία τρισθενούς σιδήρου. Τα εδάφη αυτά εντάσσονται στη κατηγορία terra rosa.

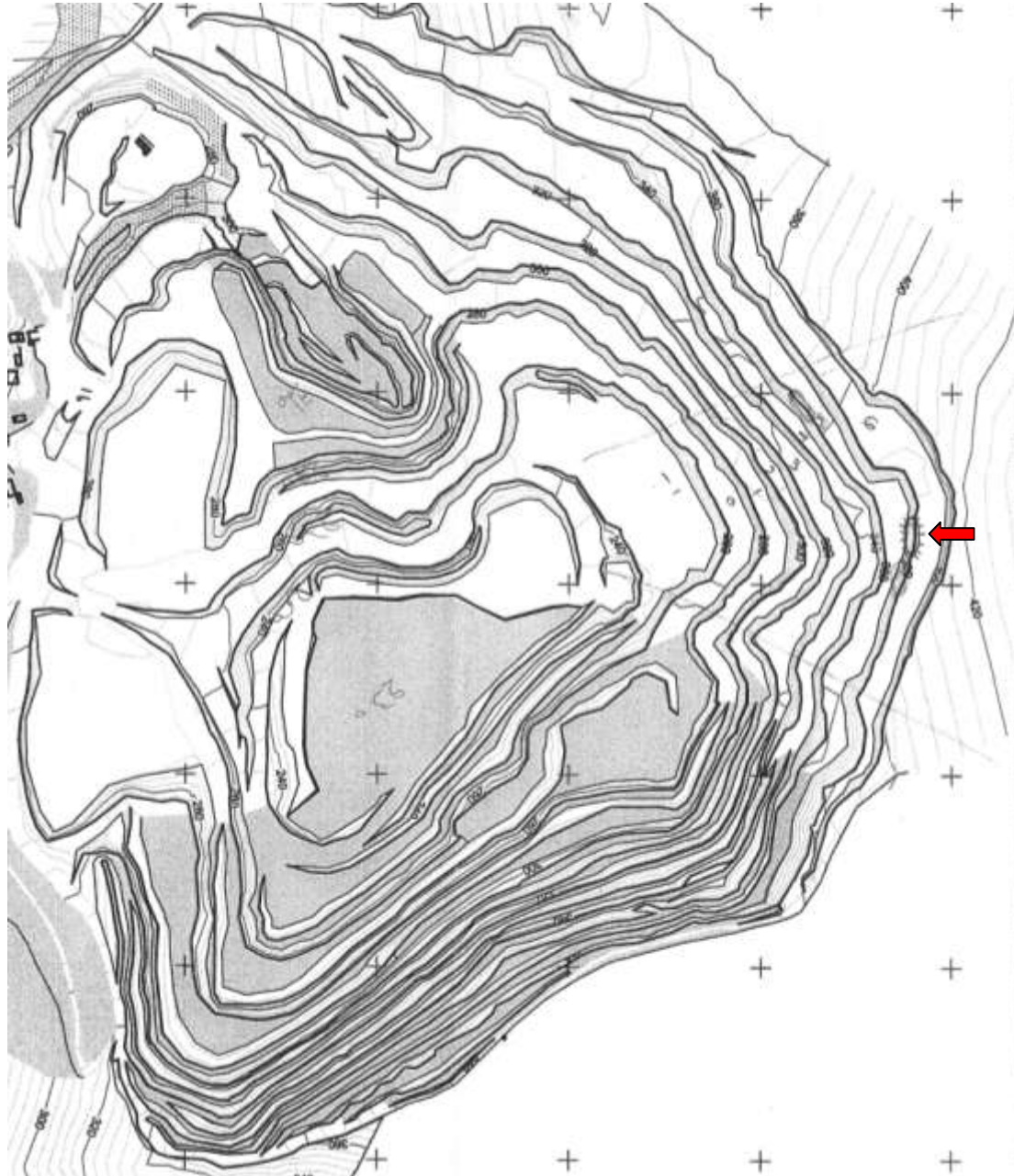
Πίνακας 2: Προϊόντα που παράγονται στο λατομείο ΧΑΛΥΨ

προϊόντα	Κοκκομετρία (mm)
1. Άμμος σκυροδέματος	0 - 4
2. Άμμος χτισίματος	0 - 4
3. Γαρμπίλι	4 - 16
4. Χαλίκι	11 - 32
5. Χαλίκι Α' ασβεστοποιίας	50 - 100
6. Χαλίκι Β' ασβεστοποιίας	28 - 50
7. Πέτρα ασβεστοποιίας	90 - 180
8. Σκύρο γραμμής	32 - 50
9. 3 - Α οδοποιίας	0 - 22 (ή όπως απαιτείται)
10. 3 - Α (πρόσπασμα)	0- 10
11. Πέτρα βουνού	100 - 1000 (ή όπως απαιτείται)
12. Βουνό ανατιναγμένο	0 - 1000



12.2. Το σχέδιο της ανατίναξης

Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε στην πρότελευταία βαθμίδα η οποία βρίσκεται όπως φαίνεται και σημειώνεται με κόκκινο βέλος στην Εικόνα 22 στην υψομετρική καμπύλη των τρακοσίων ογδόντα μέτρων (380).



Εικόνα 22 : Τμήμα χάρτη της ευρύτερης περιοχής του λατομείου στον οποίο φαίνονται και οι υψομετρικές καμπύλες

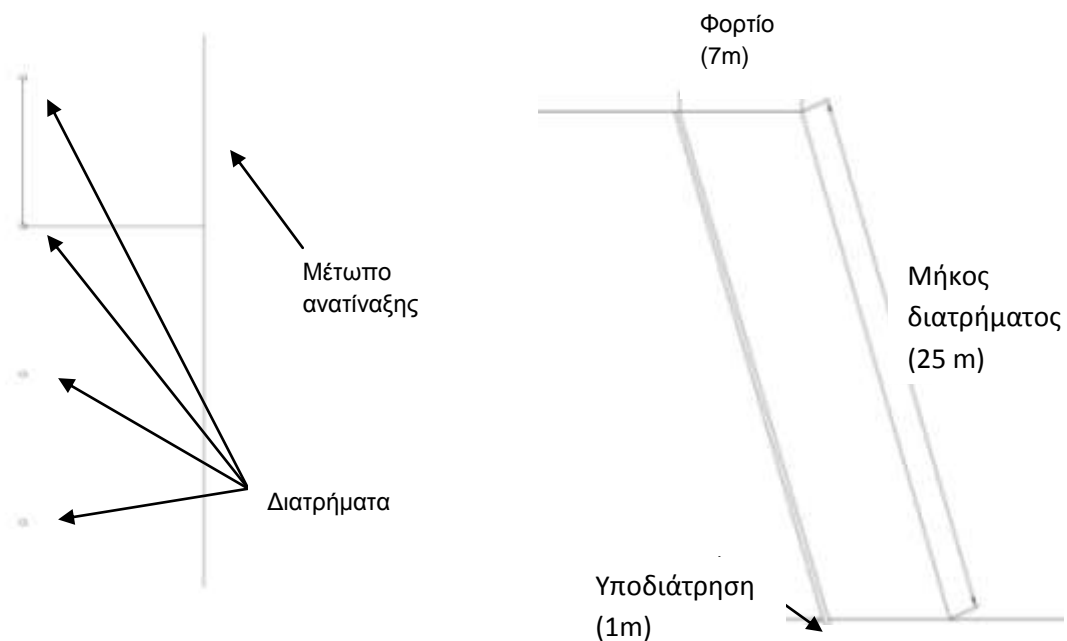


Εκεί τέσσερα (4) διατρήματα είχαν ήδη ορυχθεί από το ειδικό μηχάνημα διάτρησης δημιουργώντας κάναβο ανατίναξης ,τεσσάρων (4) διατρημάτων σε σειρά, διαμέτρου εκατόν εξήντα πέντε χιλιοστών (165 mm), με φορτίο επτά μέτρων (7m), απόσταση μεταξύ τους επτά μέτρων (7m), συνολικού ύψους εικοσιέξι μέτρων (26m) - από αυτά τα 25 μέτρα (25m) ήταν το κυρίως διάτρημα και το ένα μέτρο (1m) υποδιάτρηση - και με κλίση είκοσι μοιρών (20⁰).



Εικόνα 23 : Διατρητικό μηχάνημα της Atlas copco

Ο κάναβος που είχε δημιουργηθεί όπως φαίνεται στην εικόνα 24 όριζε μια περιοχή εικοσιένα (21) μέτρων μήκους και επτά (7) μέτρων πλάτους. Οι συντεταγμένες που μετρήθηκαν στο κέντρο της επιφάνειας αυτής με ηλεκτρονική συσκευή GPS ήταν Βορράς 38⁰ 07,041' , Ανατολή 23⁰ 28,45'.



Εικόνα 24 : Κάτοψη κανάβου ανατίναξης (αριστερά) και τομή διατρήματος ανατίναξης (δεξιά)



12.3. Η διαδικασία της μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης

Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή ακολουθήθηκε βήμα προς βήμα η διαδικασία εγκατάστασης και συνδεσμολογίας των εξαρτημάτων της συσκευής Handitrap[®] VOD Recorder.

Βήμα 1_ο: Με τη χρήση μονωτικής ταινίας στο φυσίγγιο της εναυσματικής γόμωσης (εμπορική ονομασία εκρηκτικού Poladyn 31 Eco) δέθηκε ο αισθητήρας PROBLECABLE-HT όπως φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25 : Φυσίγγιο εναυσματικής γόμωσης Poladyn 31 Eco και αισθητήρας PROBLECABLE-HT (πράσινο καλώδιο)

Βήμα 2_ο: Στη συνέχεια ο πυροκροτητής Nonel τοποθετήθηκε στο φυσίγγιο και δέθηκε κατάλληλα όπως φαίνεται στις Εικόνες 26 και 27.





Εικόνα 26: Ο πυροκροτητής Nonel τοποθετείται στο φυσίγγιο της εναυσματικής γόμωσης



Εικόνα 27: Ο πυροκροτητής Nonel δένεται κατάλληλα στο φυσίγγιο της εναυσματικής γόμωσης

Βήμα 3ο : Το φυσίγγιο της εναυσματικής γόμωσης ενωμένο με τον αισθητήρα – αγωγό PROBLECABLE-HT και τον σωλήνα του πυροκροτητή Nonel τοποθετούνται στο διάτρημα όπως φαίνονται στην Εικόνα 28. Κατά τη διαδικασία αυτή δίνεται προσοχή ώστε ο αισθητήρας, μέχρι να φτάσει μαζί με το φυσίγγιο στον πυθμένα του διατρήματος, να παραμείνει τεταμένος χωρίς να τσακίσει ή να τραυματιστεί στις παριές του διατρήματος.





Εικόνα 28 : Το φυσίγγιο ο αγωγός PROBLECABLE-HT και ο σωλήνας Nonel κατεβαίνουν στο διάτρημα



Βήμα 4ο: Ακολουθεί η γόμωση του διατρήματος με ANFO. Το διάτρημα γομώνεται με δεκατέσσερα (14) σακιά των εικοσιπέντε (25) κιλών ANFO. Κατά τη διαδικασία αυτή, δίνεται έμφαση ώστε ο αγωγός να παραμείνει τεταμένος και να μην τραυματιστεί ενώ παράλληλα μετριέται το ύψος της στήλης της εκρηκτικής ύλης ANFO, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29 : Γόμωση διατρήματος με ANFO



Βήμα 5_ο : Αφού τοποθετηθεί και η επιγόμωση (στο συγκεκριμένο διάτρημα ήταν τέσσερα και μισό (4,5) μέτρα) μετριέται η σταθερή αντίσταση του αισθητήρα PROBLECABLE-HT όπως φαίνεται στην Εικόνα 30 η οποία βρίσκεται στα τριακόσια είκοσι οκτώ (328) Ohm.

Σημειώνεται ότι το εύρος της αντίστασης του αισθητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι τριακόσια είκοσι έξι συν πλην έξι 326 ± 6 Ohm.



Εικόνα 30 : Μέτρηση της αντίστασης του αισθητήρα PROBLECABLE-HT

Βήμα 6_ο : Ο αισθητήρας PROBLECABLE-HT ενώνεται με το μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U με μονωτική ταινία το οποίο στη συνέχεια ενώνεται με τον ίδιο τρόπο με τον αντάπτορα BNC ώστε να συνδεθεί στη συνέχεια με τη συσκευή Handitrap, όπως φαίνεται στις Εικόνες 31, 32, 33.





Εικόνα 31 : Ο αισθητήρας PROBLECABLE-HT ενώνεται με τον μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U



Εικόνα 32 : Το μονοαξονικό καλώδιο RG-58/U ενώνεται με τον αντάππορα BNC





Εικόνα 33 : Ο αντάπτορας BNC συνδέεται με το Handitrap^{II}

Βήμα 6_ο : Το Handitrap^{II} ενεργοποιείται και τοποθετείται σε πλαστική σωλήνα για προστασία όπως φαίνεται στην Εικόνα 34. Οι αγωγοί σκεπάζονται με μερικά εκατοστά χώμα για να προστατευτούν από τυχόν πτώσεις πετρών κατά την έκρηξη.





Εικόνα 34 : Το Handytrap τοποθετείται σε πλαστική σωλήνα για προστασία

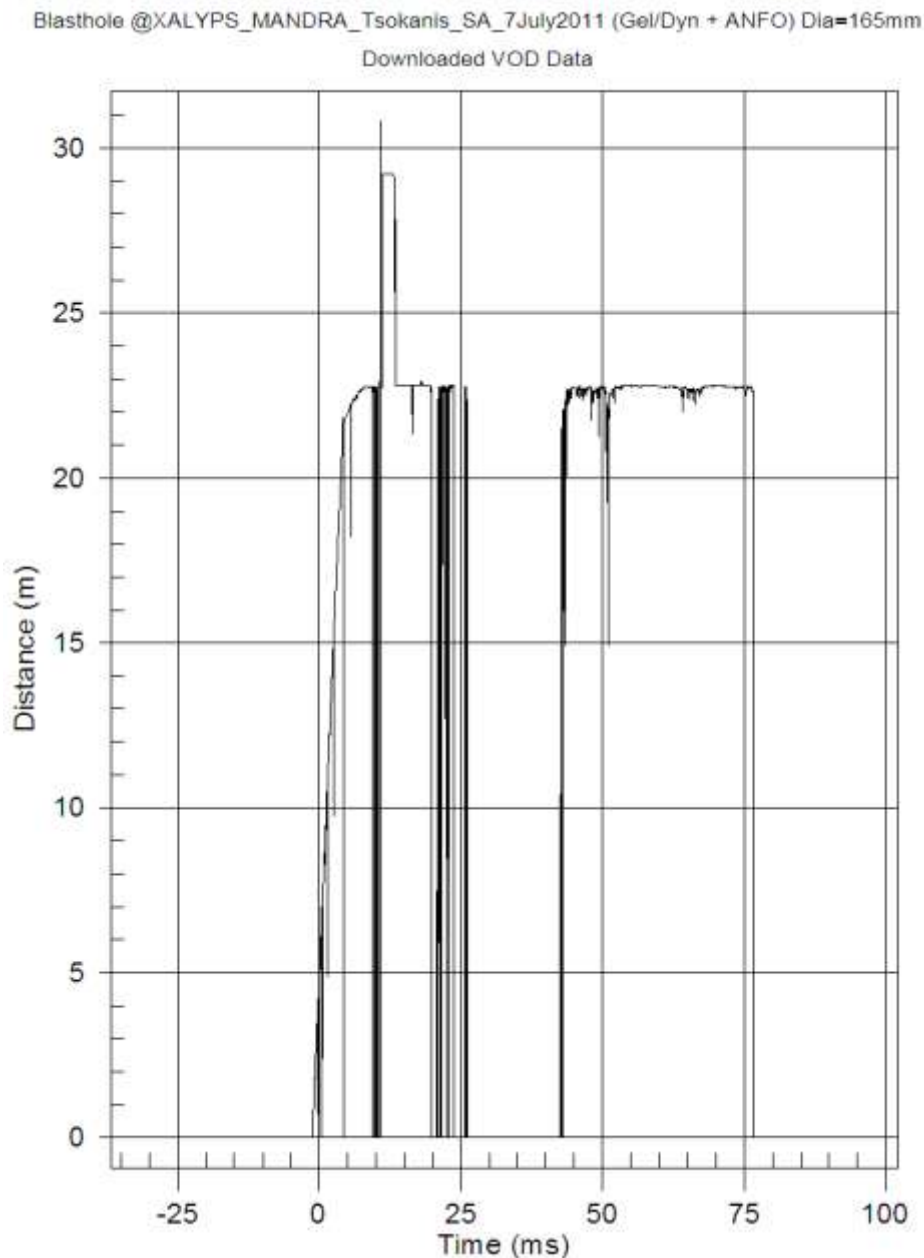
Βήμα 7ο : Η περιοχή εκενώνεται και τα διατρήματα είναι έτοιμα για ανατίναξη. Το Handytrap είναι σε λειτουργία αναμονής περιμένοντας την έναυση για να καταγράψει την ταχύτητα έκρηξης της γόμωσης του διατρήματος.

Τα δεδομένα θα παραμείνουν στη συσκευή ώστε να μεταφερθούν για περαιτέρω επεξεργασία σε Η/Υ.



12.4. Ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης

Τα δεδομένα της μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης που αποθηκεύτηκαν στη μνήμη της συσκευής Handitrap[®] μεταφέρθηκαν σε προσωπικό υπολογιστή, με τη βοήθεια του προγράμματος Handitrap[®] software ver.2.0 που συνοδεύει τη συσκευή και στη συνέχεια έγινε επεξεργασία και ανάλυση αυτών με τη βοήθεια του ίδιου προγράμματος.



Διάγραμμα 39 : Ανεπεξέργαστα δεδομένα μέτρησης Handitrap[®]



Στο Διάγραμμα 20 παρουσιάζονται τα ανεπεξέργαστα δεδομένα της μέτρησης. Ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στο χρόνο (ms) καταγραφής των δεδομένων, δηλαδή στον χρόνο κατά τον οποίο η συσκευή Handitrap^{II} λαμβάνει ηλεκτρικό σήμα από τον αισθητήρα PROBECABLE – HT, καθώς αυτός καταστρέφεται - βραχύνεται από το μέτωπο της έκρηξης και μεταβάλλεται η αντίσταση του ηλεκτρικού κυκλώματος. Ο κάθετος άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στην απόσταση από το άκρο του αισθητήρα PROBECABLE – HT, που συνήθως αντιστοιχεί στον πυθμένα του διατρήματος, όπως στη δική μας μέτρηση (distance = 0) μέχρι το σημείο στο οποίο τελειώνει η γόμωση και αρχίζει η επιγύμωση του διατρήματος.

Επομένως η κλίση του διαγράμματος Απόσταση – Χρόνος μας δίνει την ταχύτητα έκρηξης (VOD) της γόμωσης διατρήματος.

Ωστόσο παρατηρούμε ότι η καμπύλη απόσταση – χρόνος δεν έχει ομαλή μορφή αλλά παρουσιάζει έντονες καθοδικές αιχμές (downward spikes) κατά θέσεις. Αυτό οφείλεται σε ηλεκτρικό “θόρυβο” του κυκλώματος μέτρησης που προκύπτει από το “ατελές” κλείσιμο του ηλεκτρικού κυκλώματος κατά θέσεις στο μήκος του αισθητήρα και είναι πιο σύνηθες σε εκρηκτικές ύλες χαμηλής ταχύτητας έκρηξης όπως το ANFO. Μετά το πέρας της έκρηξης της γόμωσης, που δεν υπάρχει μεταβολή στο μήκος του αισθητήρα, στο διάγραμμα ο ηλεκτρικός θόρυβος είναι πιο έντονος λόγω του ατελούς βραχυκυκλώματος των αγωγών του μήκους του αισθητήρα που βρίσκεται μέσα στην επιγύμωση.

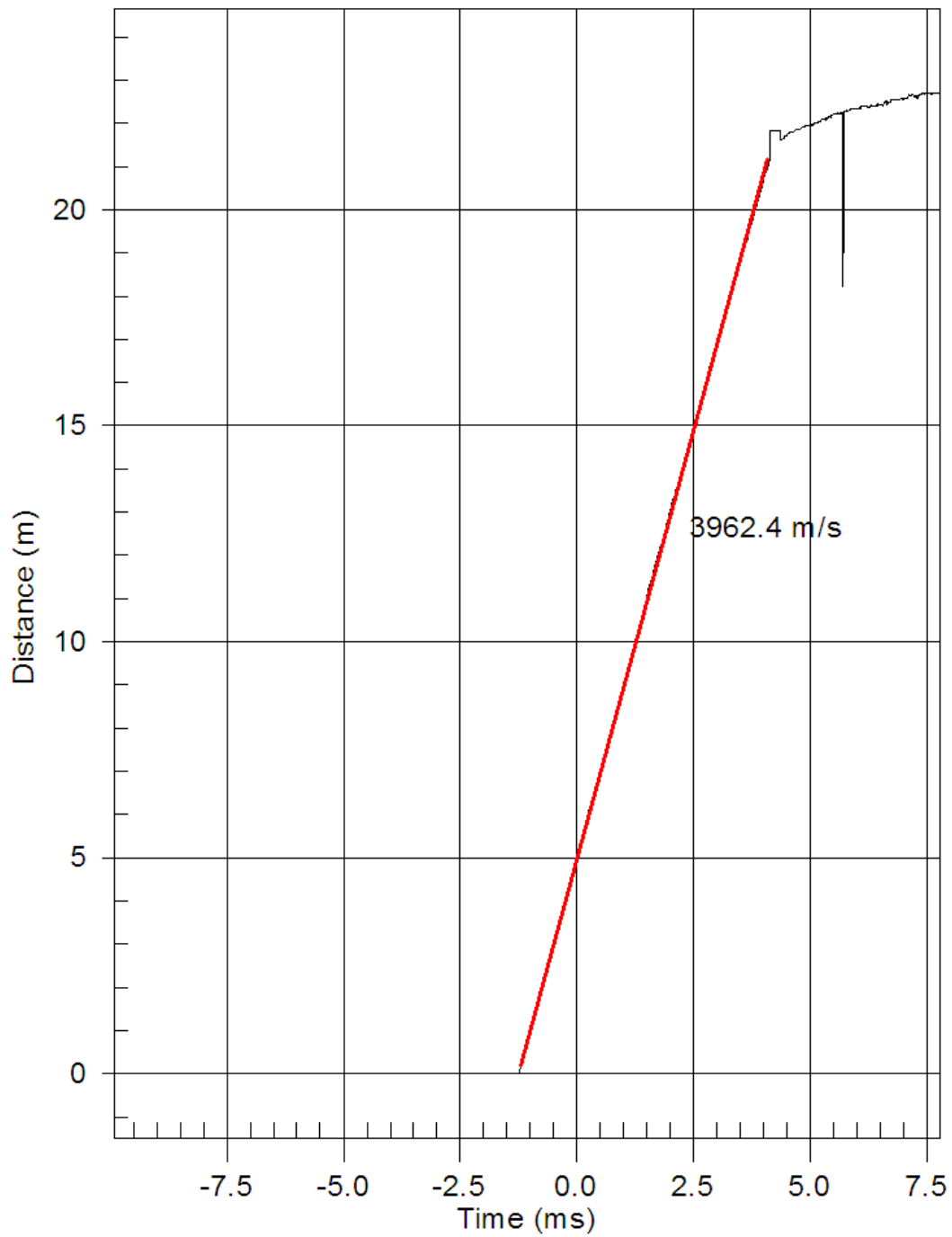
Επίσης παρατηρούμε στον άξονα του χρόνου ότι η καταγραφή του χρόνου αρχίζει νωρίτερα από τον χρόνο $t = 0$, δηλαδή υπάρχουν και αρνητικές τιμές χρόνου. Αυτό οφείλεται στο ότι το Handitrap^{II} αρχίζει να καταγράφει τα σήματα που λαμβάνει από τον αισθητήρα, στη μνήμη του, όταν αυτά αποκτήσουν κάποια ένταση (trigger). Ο χρόνος $t = 0$ αντιστοιχεί στο trigger – time. Προκειμένου όμως να καταγράψει το πλήρες διάγραμμα χρόνου – απόστασης διαθέτει ένα “έξυπνο” σύστημα μνήμης (pre – trigger data memory) που καταγράφει δεδομένα από τη στιγμή της έναρξης της έκρηξης μέχρι την στιγμή αρχής καταγραφής του Handitrap^{II} που θεωρείται ότι χρόνος ίσον με μηδέν. Το μήκος του αισθητήρα που καταστρέφεται κατά αυτήν τη χρονική περίοδο αντιστοιχεί σε “αρνητικό” χρόνο στο διάγραμμα VOD.

Στο Διάγραμμα 21 παρουσιάζεται το τμήμα των καταγραφών του Handitrap^{II} που αντιστοιχεί στο συνολικό μήκος της γόμωσης. Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του λογισμικού υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα έκρηξης της γόμωσης που είναι 3962 m/s. Προκειμένου να εξετασθεί η επίδραση της εναυσματικής γόμωσης (ζελατινοδυναμίτιδα) στην έναυση του ANFO, από το Διάγραμμα 21 απομονώθηκε και μεγεθύνθηκε η περιοχή του πυθμένα του διατρήματος, μήκος 1m, που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 22.

Υπολογίστηκε η ταχύτητα έκρηξης της εναυσματικής γόμωσης (6226 m/s) και η ταχύτητα έκρηξης του ANFO αμέσως μετά την έναυση του από την εναυσματική γόμωση (3743 m/s). Μεταξύ της εναυσματικής γόμωσης και της στήλης του ANFO παρατηρείται μια περιοχή έντονης αστάθειας – θορύβου που αντιστοιχεί στη ζώνη μετάβασης του μετώπου της έκρηξης από τη ζελατινοδυναμίτιδα στο ANFO.



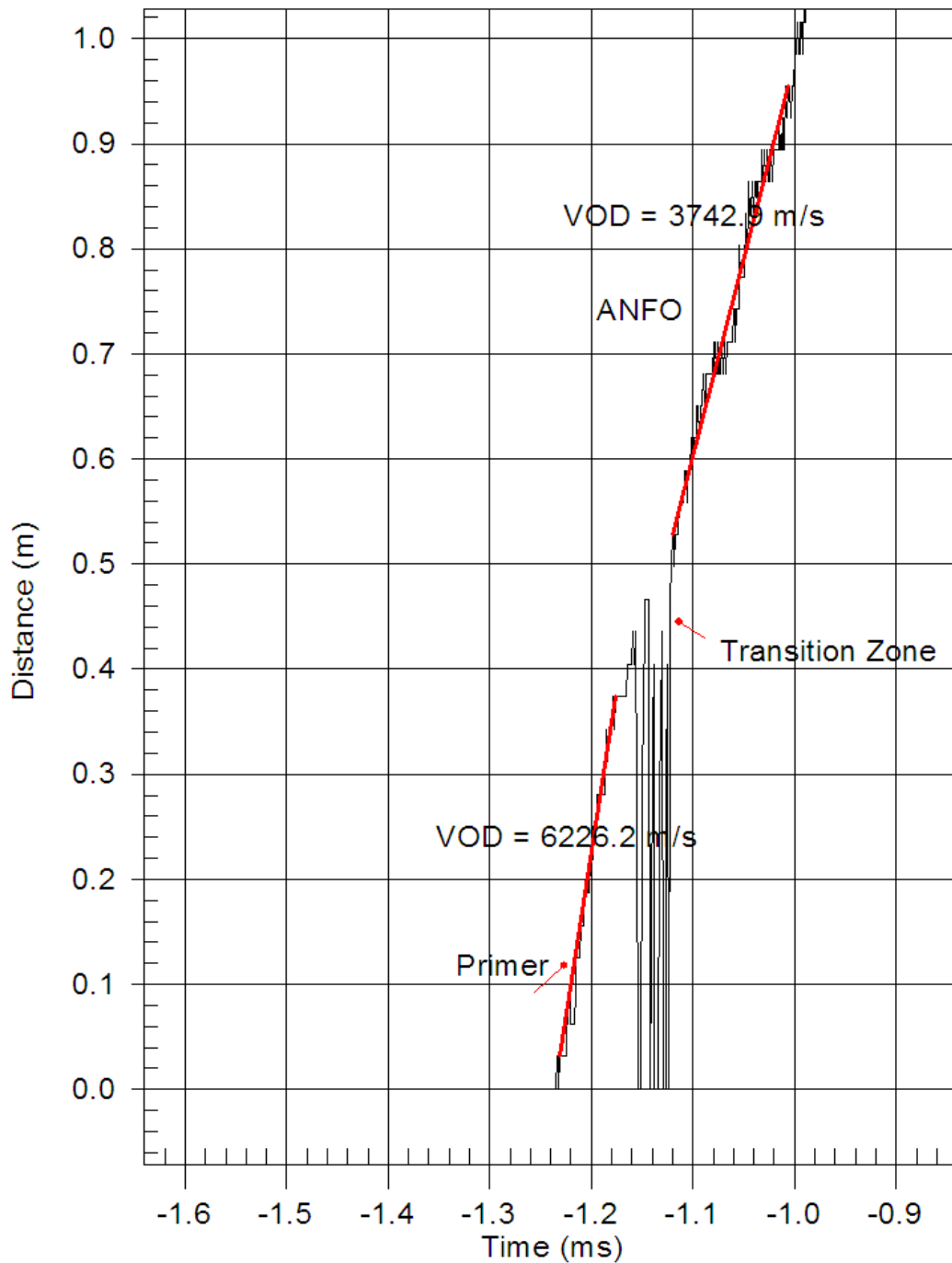
Average VOD Data



Διάγραμμα 40 : Καταγραφές του Handitrap[®] που αντιστοιχούν στο συνολικό μήκος της γόμωσης



Primer Area VOD Data

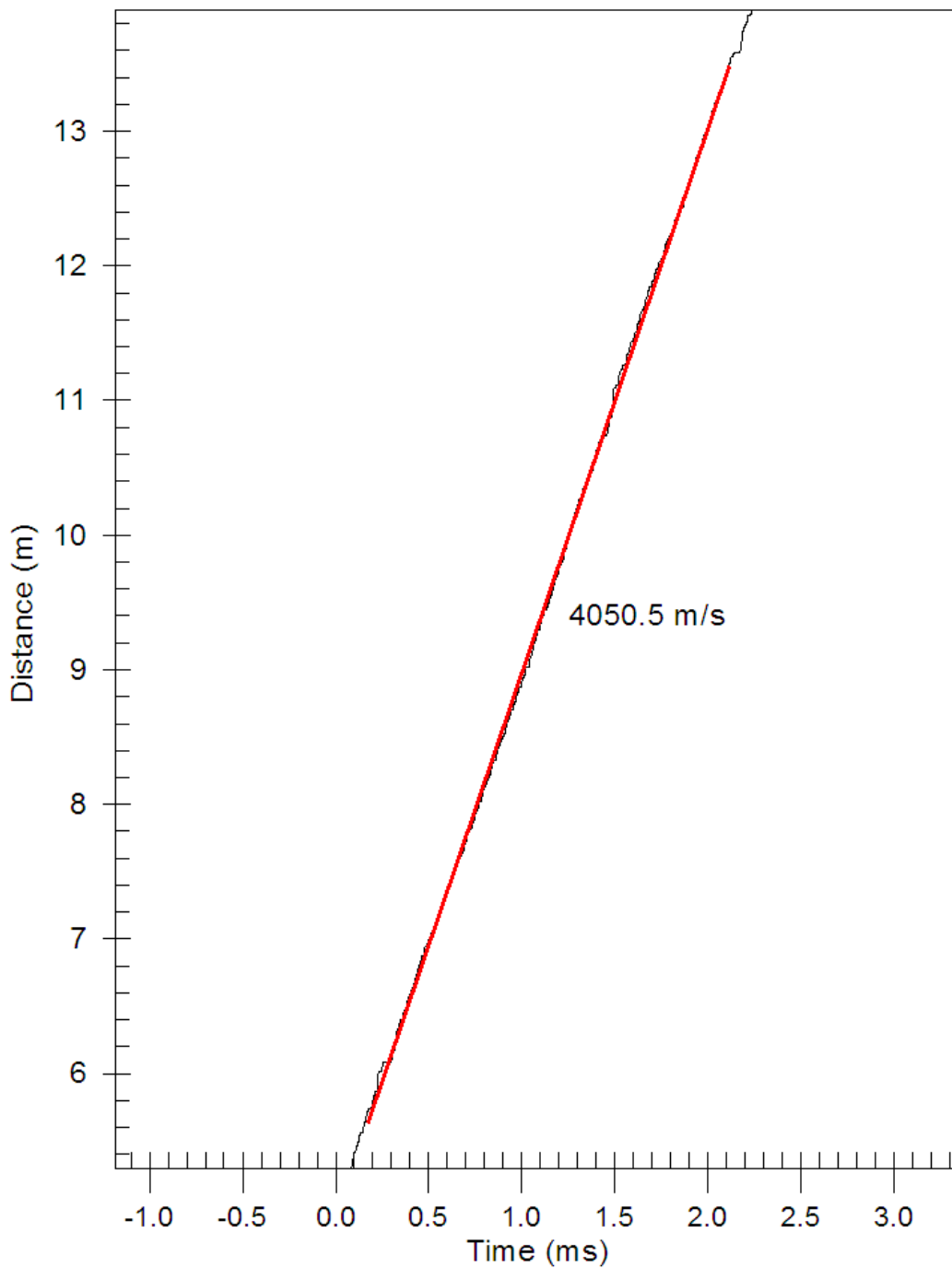


Διάγραμμα 41 : Καταγραφές του Handitrap " που αντιστοιχούν στην περιοχή του πυθμένα



Στο Διάγραμμα 23 παρουσιάζεται τμήμα της γόμωσης του ANFO στην περιοχή 6 με 12 μέτρα από τον πυθμένα του διατρήματος. Η ταχύτητα έκρηξης του ANFO στην περιοχή αυτή είναι 4050 m/s που συμφωνεί με την αναμενόμενη ταχύτητα έκρηξης του ANFO για διάμετρο γόμωσης 165 mm.(βλέπε Διάγραμμα 17 σελ. 45)

Blasthole @XALYPS_MANDRA_Tsokanis_SA_7July2011 (Gel/Dyn + ANFO) Dia=165mm
ANFO (6-12m) VOD Data



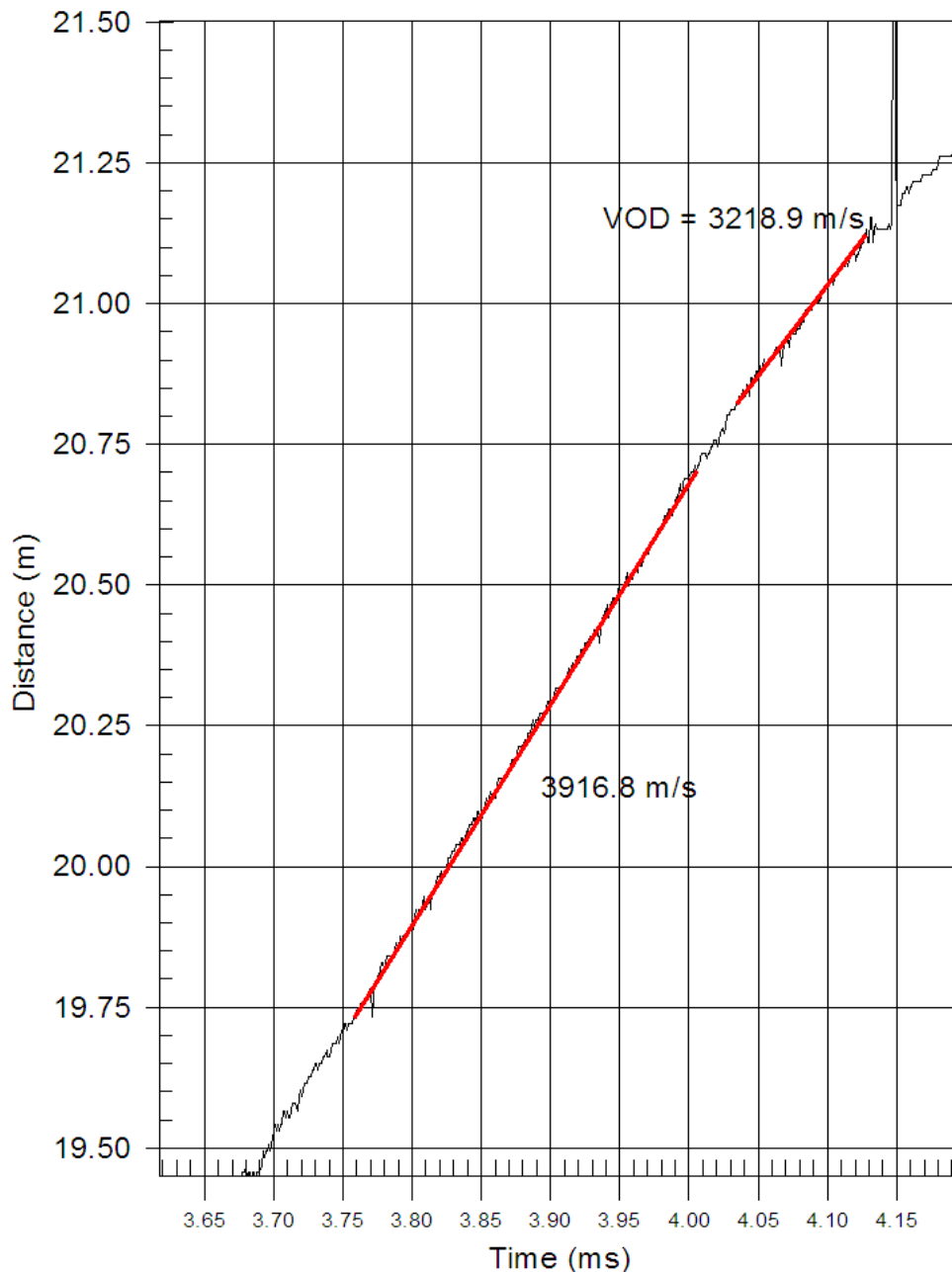
Διάγραμμα 42 : Τμήμα της γόμωσης του ANFO στην περιοχή 6 με 12 μέτρα από τον πυθμένα του διατρήματος



Τέλος ,στο Διάγραμμα 24 παρουσιάζεται τμήμα της γόμωσης ANFO στην περιοχή 19 με 21 μέτρα από τον πυθμένα του διατρήματος πριν το ANFO έρθει σε επαφή με το υλικό της επιγόμωσης. Η ταχύτητα στην περιοχή αυτή είναι 3910 m/s και βαίνει μειούμενη (3220 m/s). Η μείωση της ταχύτητας έκρηξης του ANFO σε γομώσεις μεγάλου μήκους είναι αναμενόμενη και οφείλεται στη σταδιακή ελάττωση της ισχύος του εκρηκτικού κύματος που αυτοδιατηρεί την αντίδραση της έκρηξης. Η μείωση της ταχύτητας της έκρηξης του ANFO προς το τέλος της στήλης γόμωσης έχει ως σύνηθες αποτέλεσμα την παρουσία στο σωρό του εξορυγμένου πετρώματος τεμαχών πετρώματος μεγάλου μεγέθους γεγονός που παρατηρήθηκε και στον σωρό αυτής της ανατίναξης.

Blasthole @XALYPS_MANDRA_Tsokanis_SA_7July2011 (Gel/Dyn + ANFO) Dia=165mm

ANFO (19-21m) VOD Data



Διάγραμμα 43 : Τμήμα της γόμωσης ANFO στην περιοχή 19 με 21 μέτρα από τον πυθμένα του διατρήματος



12.5. Συμπεράσματα

Μετά από αυτήν τη προσέγγιση στο θέμα της ταχύτητας έκρηξης επιβεβαιώνεται η μεγάλη σημασία της πειραματικής μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης επι τόπου στο διάτρημμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτό φαίνεται από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας έκρηξης του ANFO κατά την εκρηκτική αντίδραση στο μήκος της στήλης της γόμωσης. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται σε παράγοντες που σχετίζονται κυρίως με τον σχεδιασμό της ανατίναξης (μέγεθος διατρήματος, τρόπος έναυσης, τοπικοί γεωλογικοί παράγοντες). *Σημειώνεται ότι η ονομαστική ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης ANFO που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, σύμφωνα με τον παρασκευαστή ήταν 3000 m/s.*

Επιπλέον, φαίνεται η σημασία της ισχυρής εναυσματικής γόμωσης που απαιτεί το ANFO για να διατηρήσει την ισχύ του σε όλο το μήκος της στήλης της γόμωσης. Η εξασθένηση του ισχυρού κρουστικού κύματος κατά τα τελευταία μέτρα της γόμωσης μειώνει την ταχύτητα έκρηξης του ANFO το οποίο δεν διαθέτει την απαραίτητη ισχύ για τον κατάλληλο θρυμματισμό του πετρώματος. Έτσι εξηγούνται ορισμένα μεγάλα κομμάτια πετρώματος στο σωρό της ανατίναξης.

Τέλος μέσα από την πειραματική μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης αποτυπώνεται σαφώς η εικόνα των μεταβολών της ταχύτητας έκρηξης του ANFO κατά μήκος της στήλης της γόμωσης. Αρχικά στη περιοχή κοντά στην εναυσματική γόμωση (μετά τη μεταβατική ζώνη) από τα 0,5 έως τα 0,95 m παρουσιάζεται σχετικά χαμηλή τιμή ταχύτητας έκρηξης 3743 m/s. Στη συνέχεια η ταχύτητα αυξάνεται για να σταθεροποιηθεί στα 4050 m/s στο κεντρικό και μεγαλύτερο κομμάτι της γόμωσης από τα 5,5 έως τα 13,5 m. Πλησιάζοντας στην επιγόμωση από τα 19 έως τα 21 m η ταχύτητα μειώνεται ελαφρώς στα 3910 m/s και βαίνει μειούμενη εξαιτίας της εξασθένησης του κρουστικού κύματος που αυτοδιατηρεί την αντίδραση.



Βιβλιογραφία

1. Τσουτρέλης Χ. , “Εκρηκτικές ύλες και τεχνική ανατινάξεων”, Τόμος 1_{ος}, Εκρηκτικές ύλες, Αθήνα 1997
2. Πολυχρονόπουλος Ι., “Εκρηκτικές ύλες τεχνική εξορύξεως των πετρωμάτων καθαίρεση κατασκευών” , Γ΄ έκδοση, Αθήνα 2001
3. Παναγιώτου Γ. “Αρχικός σχεδιασμός ανατίναξης υπαίθριου μετώπου μορφής βαθμίδας με τη βοήθεια προσωπικού υπολογιστή” , Αθήνα 1989
4. National institute of rock mechanics (an autonomous research institute under Ministry of mines,govt. of India), “evaluation of explosives performance through in the hole detonation velocity measurement” , India 2001
5. Ρήγας Φ. , “Τεχνολογία εκρηκτικών υλών” Αθήνα 1990
6. Παναγιώτου Γ. “Εξόρυξη Πετρωμάτων 1 – Εξόρυξη με Εκρηκτικές Ύλες ”
7. Mrel specialty explosive products limited, “Handitrap ⁱⁱ vod recorder operation manual” edition 1,2, Canada

Διαδίκτυο

1. <http://www.mrel.com/>
2. http://www.extraco.gr/extraco/index.php?option=com_content&task=view&id=66&Itemid=1
3. <http://www.halyps.gr/GR/%CE%94%CF%81%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B5%CF%82/%CE%9B%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%BF+%CE%A7%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%88/>
4. <http://www.tsokanisgroup.com/default.asp>

