ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΩΝ

ΜΑΥΡΑΚΗΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Μ. ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ

Δρ. Κ. ΚΑΚΛΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΑΠΡΙΛΗΣ 2013

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

Θερμές ευχαριστίες δίνονται στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ζ. Αγιουτάντη για την συνεργασία του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής, καθώς και στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Μ. Γαλετάκη και κ. Κ. Κακλή για τις διορθώσεις τους. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους βοηθούς Φ. Σταθογιάννη και Σ. Μαυριγιαννάκη για την βοήθεια που μου παρείχαν κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σύγκριση των πιο γνωστών εμπειρικών μεθόδων προσδιορισμού του φορτίου σε επιφανειακές ανατινάξεις.

Παρατίθενται πληροφορίες για την κατανόηση των επιφανειακών ανατινάξεων, των εκρηκτικών υλών που χρησιμοποιουνται και των ιδιοτήτων των πετρωμάτων.

Κατόπιν αναφέρονται οι πιο γνωστές εμπειρικές μέθοδοι εύρεσης του φορτίου όπως για παράδειγμα οι μέθοδοι Andersen, Fraenkel, Pearse, Ash, Langefors και Jimeno. Οι παραπάνω εξισώσεις συγκρίνονται μεταξύ τους με τη βοήθεια διαγραμμάτων για αντίστοιχες παραμέτρους πετρωμάτων, παραμέτρους εκρηκτικών και τιμές διαμέτρου διατρημάτων.

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη βοήθεια μεμονομένων και συγκεντρωτικών διαγραμμάτων.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Στην προσπάθεια να γίνει μία ανατίναξη, πιο αποδοτική, παραγωγική, ασφαλής και με λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον, (φυσικό και ανθρωπογενές) είναι αναγκαίο μαζί με την εμπειρία και την πρακτική γνώση να ενσωματώνονται οι τεχνολογικές εξελίξεις και η διαθέσιμη τεχνολογία

Για τον σχεδιασμό μιας ανατίναξης απαιτείται γνώση της γεωλογίας, των ιδιοτήτων του πετρώματος και της γεωμετρίας του μετώπου. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο έχουν οι ιδιότητες των εκρηκτικών που θα χρησιμοποιηθούν.Η γνώση της γεωλογίας δεν είναι κατ'ανάγκη όμοια με τη λεπτομερή περιγραφή των γεω-επιστημονικών μελετών, αλλά είναι γενική αφού ο θρυμματισμός του πετρώματος σχετίζεται με τη γεωλογία και τεκτονική του. Μεγάλη σημασία για την ανατίναξη έχει η γνώση της γεωμετρίας του μετώπου, διότι δονήσεις, θόρυβος, θρυμματισμός και εκτινάξεις βράχων εξαρτώνται από το σωστό φορτίο του μετώπου. Επίσης παρόμοιες επιπτώσεις με την ανομοιομορφία του μετώπου, έχει και η απόκλιση διατρημάτων που δημιουργεί μείωση του θρυμματισμού και αύξηση των δονήσεων.

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

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

Η ανατίναξη περιλαμβάνει μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση πολλών μεταβλητών, μερικές από τις οποίες είναι λίγο ως πολύ άγνωστες. Για το λόγο αυτό πολλές φορές έχει θεωρηθεί ως μία διεργασία που ακολουθεί εμπειρικούς κανόνες. Λογω της μεταβλητής φύσης των πετρωμάτων, των γεωλογικών δομών και των εκρηκτικών δεν είναι δυνατόν να γίνει ο σχεδιασμός μιάς ανατίναξης με βάση ορισμένους μαθηματικούς τύπους χωρίς δοκιμές επί τόπου. Σε πολλές περιπτώσεις ο αρχικός σχεδιασμός ενός έργου μεταβάλλεται κατα τη διάρκεια της ζωής του με μια συνεχή διαδικασία αξιολόγησης των ιδιοτήτων του πετρώματος, των αποτελεσμάτων που επιτυγχάνονται, των απαιτήσεων της παραγωγής και της τεχνολογίας των εκρηκτικών (Αγιουτάντης, 2009). Από τα προηγούμενα γίνεται κατανοητό ότι με τον κατάλληλο εξοπλισμό και μεθοδολογία είναι δυνατό να συλλεχθούν στοιχεία και με την κατάλληλη επεξεργασία τους να βελτιωθεί η όλη ανατίναξη.

Στη παρούσα εργασία, θα πραγματοποιηθει μία σύγκριση μεταξύ των πιο γνωστών εμπειρικών μεθόδων για το σχεδιασμο και πραγματοποίηση μιας ανατίναξης.

1.2 Βασικοί Ορισμοί

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

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

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

<u>Ανατίναξη</u>: Είναι η εξόρυξη εκείνη, που πραγματοποιείται με χρήση εκρηκτικών υλών.

<u>Μέτωπο εξόρυξης</u>: Είναι το περιορισμένο τμήμα του πετρώματος εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η εξόρυξή του. Το μέτωπο εξόρυξης μπορεί να είναι μία στοά,

ένα φρέαρ, μία υπαίθρια βαθμίδα ή ακόμη μία οποιαδήποτε φυσική επιφάνεια του πετρώματος.

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

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

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

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

Φορτίο: Το φορτίο ή καλύτερα ενεργό φορτίο ορίζεται ως η απόσταση ενός διατρήματος από την πλησιέστερη στατική ή δυναμική επιφάνεια.

1.3 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των πιο γνωστών εμπειρικών μεθόδων προσδιορισμού του φορτίου σε επιφανειακές ανατινάξεις.

Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται κάποιες γενικές πληροφορίες για τις εκρηκτικές ύλες και για τα πετρώματα αντιστοιχα. Στο τέταρτο κεφαλαιο γίνεται αναφορά στις εμπειρικές μεθόδους που θα χρησιμοποιθούν. Έπειτα στο πέμπτο κεφάλαιο οι εξισώσεις αυτές συγκρίνονται μεταξύ τους με τη βοήθεια διαγραμμάτων για αντίστοιχες παραμέτρους πετρωμάτων, παραμέτρους εκρηκτικών και τιμές διαμέτρου των διατρημάτων. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται εξαγωγή συμπερασμάτων και ακολουθούν καποιες προτάσεις για περαιτέρω εμβάθυνση επί του θέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ

2.1 Ορισμός εκρηκτικής ύλης

Εκρηκτική Ύλη: Ως εκρηκτική ύλη ορίζεται μία (χημική) ουσία ή μίγμα ουσιών, η οποία όταν ενεργοποιηθεί υπό την επίδραση θερμότητας ή με κρούση, λόγω της θερμοδυναμικής της αστάθειας στις συνθήκες που βρίσκεται, υφίσταται μία ταχύτατη και αυτοδιαδιδόμενη με σταθερή ταχύτητα εξώθερμη αντίδραση (οξείδωση), που καλείται έκρηξη. Κατά την έκρηξη, που αποτελεί την βιαιότερη στην φύση χημική αντίδραση, η χημική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια των προϊόντων της αντίδρασης, η οποία στην συνέχεια ως "μηχανική ενέργεια" με κρουστικό παλμό προκαλεί την θραύση του πετρώματος. Ανάλογα με την χημική σύνθεση της εκρηκτικής ύλης ο ρυθμός της αντίδρασης μέσα σε μια γόμωση στήλης μπορεί να είναι ταχύτατος (μέχρι 8000 m/s), οπότε έχουμε εκρηκτική αντίδραση (detonation), ή σχετικά βραδύς (μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα το δευτερόλεπτο), οπότε έχουμε ταχεία ανάφλεξη ή αλλιώς κατάκαυση (deflagration) (Τσουτρέλης, 1997).

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

Εκρηκτικό Μέσο: Χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε υλικό ή μίγμα, το οποίο έχει εκρηκτικές ιδιότητες, αλλά του οποίου τα συστατικά δεν χαρακτηρίζονται σαν εκρηκτικές ύλες. Σύμφωνα με τυποποιημένες δοκιμές του Γραφείου Μεταλλείων των ΗΠΑ, εκρηκτικά μέσα θεωρούνται τα υλικά τα οποία δεν είναι αρκετά ευαίσθητα ώστε να μπορεί να εναυθούν με εκρηκτικό καψύλλιο ισχύος No. 8 σε μη περιορισμένη κατάσταση (Dick, 1973, Αγιουτάντης, 2009).

2.2 Έναυση και πυροδότηση

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

Ύστερα από το σημείο έναρξης της έναυσης υπάρχει μία μεταβατική ζώνη, βραχύτατου μήκους στο πέρας της οποίας σταθεροποιούνται οι συνθήκες αντίδρασης. Η αντίδραση, μετά την ζώνη αυτή οδεύει αυτοδιαδιδόμενη και με σταθερή ταχύτητα εντός της στήλης. Άρρηκτα συνδεδεμένη με την έναυση είναι η πυροδότηση, που ορίζεται ως η επέμβαση (ή η πράξη) εκείνη με την οποία τίθεται σε ενέργεια ο μηχανισμός της έναυσης (Τσουτρέλης, 1997).

2.3 Ανάφλεξη και έκρηξη

Η χημική αντίδραση των εκρηκτικών υλών λαμβάνει χώρα κατά δύο τρόπους. Σε λίγες εκρηκτικές ύλες με ανάφλεξη ή αλλιώς κατάκαυση και στις υπόλοιπες με έκρηξη ή καλύτερα με εκρηκτική αντίδραση. Τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη είναι δύο ταχύτατες εξώθερμες χημικές αντιδράσεις, που έχουν όμως διαφορετικά χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικές ταχύτητες. Στην πρώτη περίπτωση η αντίδραση μέσα σε μια στήλη εκρηκτικής ύλης πραγματοποιείται με ταχύτητα μερικών εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο και στην δεύτερη με ταχύτητες μερικών χιλιάδων μέτρων το δευτερόλεπτο. Οι διαφορετικές αυτές ταχύτητες αντίδρασης οφείλονται στην διαφορά του μηχανισμού της ανάφλεξης από εκείνο της έκρηξης. Στην περίπτωση της ανάφλεξης η αντίδραση συμβαίνει με βραδύ σχετικά ρυθμό καθώς απαιτείται πρώτα αύξηση της θερμοκρασίας της μάζας της εκρηκτικής ύλης στην θερμοκρασία της αντίδρασης (καύσης). Η αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με αγωγιμότητα των θερμών μορίων της αντίδρασης προς τα μόρια της στερεάς εκρηκτικής ύλης τα οποία βρίσκονται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Πρόκειται, δηλαδή για μια ταχεία καύση, που εάν συμβεί σε ανοιχτό χώρο τα παραγόμενα προϊόντα, λόγω της βραδείας σχετικά έκλυσής τους, δεν θα προκαλέσουν ισχυρή πίεση στον περιβάλλοντα χώρο. Οι πιέσεις που δημιουργούνται στο τέλος της ζώνης αντίδρασης είναι μέχρι 3 kbar.

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

2.4 Ιδιότητες εκρηκτικών υλών

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

2.4.1 Ισχύς

Η ισχύς (strength) ενός εκρηκτικού είναι ένα μέτρο της ενέργειας που εκλύεται κατά την έκρηξη. Εκφράζει ποσοτικά την εκλυόμενη ενέργεια κατά την έκρηξη μιας εκρηκτικής ύλης. Κατά την έκρηξη η συσσωρευμένη χημική ενέργεια στο εκρηκτικό μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης που κατά ένα μέρος της καταναλώνεται για τη θραύση του πετρώματος ως κρουστικός παλμός ενώ το υπόλοιπο για την μετακίνηση του πετρώματος από την αρχική του θέση (Cook, 1974). Είναι προφανές ότι, όσο περισσότερη είναι η διαθέσιμη ενέργεια μιας εκρηκτικής ύλης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ικανότητά της για να πραγματοποιήσει ωφέλιμο έργο στο πέτρωμα, χωρίς όμως η σχέση τους να είναι ευθέως ανάλογη, λόγω των απωλειών ενέργειας, του μηχανισμού θραύσεως του πετρώματος και της συμπεριφοράς του πετρώματος. Η εκτίμηση της παραμέτρου αυτής είναι σημαντική διότι αφενός μεν χρειάζεται μεγάλη ισχύς για τον θρυμματισμό σκληρών πετρωμάτων αφετέρου υπάρχουν σημαντικές απώλειες ενέργειας από την εφαρμογή ισχυρών εκρηκτικών σε μαλακά ή θρυμματισμένα πετρώματα (Τσουτρέλης, 1997).

Η ισχής των διαφόρων εκρηκτικών μπορούν να εκφρασθεί με τους εξής 4 τρόπους :

- Η απόλυτη ισχύς κατά βάρος (Absolute Weight Strength-AWS) εκφράζει την ποσότητα ενέργειας (σε θερμίδες), που διαθέτει κάθε γραμμάριο εκρηκτικής ύλης. Το ANFO π.χ. διαθέτει 930 cal/g, μια συγκεκριμένη αμμωνιοδυναμίτιδα 1080 cal/g και ένα γαλάκτωμα 770 cal/g.
- Η απόλυτη ισχύς κατ' όγκον (Absolute Bulk Strength-ABS) εκφράζει την ποσότητα ενέργειας (σε θερμίδες), που διαθέτει κάθε κυβικό εκατοστό της εκρηκτικής ύλης. Η ABS προκύπτει με πολλαπλασιασμού της AWS με την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.
- 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).

2.4.2 Πίεση

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

2.4.3 Πυκνότητα

Ο όρος πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (density of explosive) αναφέρεται στην πυκνότητα του μίγματος ή της χημικής ένωσης όπως παρασκευάζεται από τον κατασκευαστή. Η παράμετρος αυτή επομένως καθορίζει την θεωρητική ποσότητα του εκρηκτικού που τοποθετείται σε ένα δεδομένο διάτρημα. Σε εκρηκτικά υλικά που διατίθενται χύδην διακρίνεται η πυκνότητα γόμωσης (bulk, loading density) που είναι η τελική πυκνότητα του υλικού μετά την γόμωση του διατρήματος. Η πυκνότητα γόμωσης εξαρτάται από τον τρόπο γόμωσης (πχ. χύδην, πνευματικά, με την βαρύτητα, κλπ), είναι συνήθως διαφορετική από την θεωρητική πυκνότητα του εκρηκτικού. Η εκτίμηση των ιδιοτήτων του εκρηκτικού σαν συνάρτηση της πυκνότητάς του γίνεται με βάση την πραγματική του πυκνότητα στο διάτρημα, δηλαδή την πυκνότητα γόμωσης. Η πυκνότητα γόμωσης παραμένει σταθερή όταν η εκρηκτική ύλη γομώνεται σε φυσίγγια (Αγιουτάντης, 2009). Για την καλύτερη θραύση του πετρώματος όταν το φορτίο είναι μεγάλο, απαιτείται η χρήση εκρηκτικών με μεγάλη πυκνότητα, ενώ όταν το πέτρωμα είναι μαλακό ή προτιμάται μία ομαλότερη κατανομή της ενέργειας του εκρηκτικού συνιστάται η χρήση εκρηκτικών με χαμηλή πυκνότητα. Η πυκνότητα των εκρηκτικών κυμαίνεται από 0,8 έως 1,6 g/m^3. Αν το εκρηκτικό έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το νερό (1 g/cm^3), τότε επιπλέει με συνέπεια να είναι δύσκολη η γόμωση του σε υγρά διατρήματα.

2.4.4 Ταχύτητα έκρηξης

Η ταχύτητα έκρηξης είναι η σπουδαιότερη ιδιότητα των εκρηκτικών, όταν αυτά αξιολογούνται από πλευράς απόδοσης, διότι εκφράζει τον ρυθμό εκλύσεως της χημικής ενέργειάς τους. Ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει ο κρουστικός παλμός κατά μήκος μίας κυλινδρικής στήλης εκρηκτικού ή η ταχύτητα της χημικής αντίδρασης. Μετά την εμφάνιση πλησίον του σημείου έναυσης μιας ασταθούς κατάστασης, σταθεροποιείται στην συνέχεια και οδεύει σε όλο το υπόλοιπο μήκος της γόμωσης με υπερηχητική ταχύτητα. Είναι μία σημαντική μεταβλητή η οποία χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της πίεσης έκρηξης ενός εκρηκτικού. Μετριέται σε πόδια ανά δευτερόλεπτο (fps) ή σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s).

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

2.5 Κατάταξη των εμπορικών εκρηκτικών υλών

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες κατατάξεις σε κατηγορίες και τύπους των εμπορικών εκρηκτικών υλών με κριτήρια ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά τους. Με τον τρόπο αυτό περιγράφονται καλύτερα και αποφεύγονται συγχύσεις μεταξύ της πληθώρας εκρηκτικών υλών, που διατίθενται στο εμπόριο. Η προτεινόμενη κατωτέρω κατάταξη βασίζεται σε διαιρέσεις και υποδιαιρέσεις των εκρηκτικών υλών σε κατηγορίες και τύπους με διάφορα κριτήρια, όπως είναι ο τρόπος και η ταχύτητα αντιδρασής τους, ο τρόπος έναυσής τους και η κύρια εκρηκτική ουσία, που περιέχουν (Τσουτρέλης, 1997).

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

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

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

- Εκείνες που εναύονται με φλόγα. Οι εκρηκτικές αυτές ύλες καλούνται πρωτογενείς εκρηκτικές ύλες (primary explosives). Τέτοιες είναι, π. χ. το αζίδιο του μολύβδου. Η χρήση των εκρηκτικών αυτών υλών περιορίζεται στην κατασκευή ορισμένων μέσων έναυσης.
- Εκείνες που απαιτούν κρουστικό κύμα (ασθενές έως ισχυρό) για να εναυθούν.

Αυτές οι εκρηκτικές ύλες ονομάζονται δευτερογενείς (secondary explosives). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι δυναμίτιδες, το ANFO, τα slurries κλπ.

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

- Με βάση την νιτρογλυκερίνη (NG). Στην ομάδα αυτή ανήκουν οι επόμενοι τύποι εκρηκτικών υλών:
    - Κοινή δυναμίτιδα (straight dynamite)
    - Ζελατίνη (gelatin dynamite)
    - Ζελατινοδυναμίτιδες (semi-gelatins)
    - Αμμωνιοδυναμίτιδες (ammonia dynamites)

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

- Με βάση το νιτρικό αμμώνιο (AN): Στην ομάδα αυτή ανήκουν οι επόμενοι τύποι εκρηκτικών υλών:
    - ANFO
    - Slurries (ή Gels)
    - Γαλακτώματα
    - Βαρύ ANFO (Heavy ANFO)
    - Αργιλούχο ANFO (Aluminized ANFO).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

3.1 Γενικά για τα πετρώματα

Το λιθολογικό φάσμα των πετρωμάτων καλύπτει γεωυλικά από σκληρά πολυμεταλλικά πυριγενή και μεταμορφωμένα, όπως ο γρανίτης και ο δολερίτης, έως μαλακά απολιθωμένα αργιλικά, όπως ο πηλίτης και ο ιλυόλιθος. Ο βαθμός οξείδωσης ή αποσάθρωσης έχει μία σημαντική επίδραση στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Άρρηκτα, μη αποσαθρωμένα πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα χαρακτηρίζονται γενικά από κοντινή επαφή κατά μήκος των ορίων των κρυστάλλων και περιέχουν το πολύ ασυνεχείς μακροπόρους, που έχουν μικρή μόνο σημασία στη συμπεριφορά τους. Στη μάζα τους εν τούτοις, η μηχανική συμπεριφορά κυριαρχείται από την παρουσία κατακλάσεων, ρωγμών και άλλων ατελειών. Σε μερικά μάλιστα πυριγενή πετρώματα, όπως ο βασάλτης που έχει ρεύσει μέσα σε νερό, είναι δυνατή η παρουσία φυσαλίδων που επιδρά στη συμπεριφορά τους.

Τα ψαμμιτικά και αργιλικά πετρώματα αποτελούνται από ορυκτά πρωτογενή ή δευτερογενή αργιλικά, συγκολλημένα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό στις επαφές τους, που όμως παραμένουν διαχωρισμένα από συνεχόμενους πόρους. Το νερό μέσα στους πόρους επηρεάζει τη συμπεριφορά του άρρηκτου πετρώματος. Πολλά από αυτά τα πετρώματα δείχνουν μία μείωση της αντοχής τους με την αύξηση της υγρασίας. Μείωση της αντοχής της τάξης του 30÷100% συμβαίνει σε πολλά πετρώματα σαν αποτέλεσμα της φθοράς της συγκολλητικής ή αργιλικής κονίας. Δείγματα αφημένα να ξεραθούν για αρκετούς μήνες, μπορούν να δώσουν μία λαθεμένη εντύπωση της αντοχής του πετρώματος. Οι εργαστηριακές δοκιμές θα πρέπει να γίνονται με υγρασία του δοκιμίου κοντά στη φυσική (Σοφιανός, 2008).

Αιτία μείωσης της αντοχής του πετρώματος είναι και η πίεση που εξασκεί το νερό των πόρων στο πέτρωμα. Η αρχή των ενεργών τάσεων του Terzaghi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις περισσότερες εντατικές καταστάσεις που συναντάμε στα γεωτεχνικά έργα, όμως σημαντικές αποκλίσεις μπορεί να συμβούν για πολύ υψηλές εντατικές καταστάσεις. Σε άρρηκτα πετρώματα με πολύ μικρό πορώδες μπορεί να θεωρηθεί ότι οι πιέσεις των πόρων δεν προλαβαίνουν να εκτονωθούν κατά την εξαίτηση των δοκιμίων. Αντίθετα, η πίεση του νερού των ασυνεχειών, σε διακλασμένη βραχομάζα, αναμένεται ότι θα διαχυθεί πιο γρήγορα από αυτή των πόρων του άρρηκτου πετρώματος. Σε κερματισμένα επομένως πετρώματα, στα οποία η αστοχία αναμένεται στις επιφάνειες των διακλάσεων, η αρχή των ενεργών τάσεων θα εφαρμόζεται για πίεση πόρων αυτή του νερού των ασυνεχειών.

Η μάζα των πετρωμάτων σπάνια είναι ομοιογενής, ισότροπη και συνεχής. Συνήθως διασχίζεται από ποικίλες επιφάνειες αδυναμίας, είναι ανομοιόμορφα καταπονημένη ή αποσαθρωμένη και η απόκριση της σε καταναγκασμούς εξαρτάται από τη διεύθυνση καταπόνησης. Επομένως η απόκριση του πετρώματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων, δηλ. των άρρηκτων τεμαχών πετρώματος και των γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών. Η πολύπλοκη και γενικά τυχηματική κατανομή των παραπάνω ιδιοτήτων καθιστά πρακτικά αδύνατη την προσδιορισμική εκτίμηση της απόκρισης του πετρώματος στις καταπονήσεις με βάση την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων. Αντί αυτού, η εκτίμηση της συμπεριφοράς του πετρώματος δύναται να γίνει με τη θεώρησή του ως σύνθετου ομοιογενούς υλικού, με χαρακτηριστικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του στέρεου σώματος. Οι ιδιότητες του σύνθετου αυτού υλικού καθορίζονται από την ταξινόμηση του πετρώματος, που προκειμένου να διακρίνεται από το άρρηκτο ομοιογενές πέτρωμα, ονομάζεται βραχομάζα. Τέτοια συστήματα ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί πολλά, επικρατέστερα των οποίων είναι τα συστήματα RMR (Bieniawski, 1989), Q, και GSI. Η δομή του πετρώματος και η ποιότητα της επαφής των ασυνεχειών αποτελούν κύρια χαρακτηριστικά στα οποία βασίζεται η ταξινόμηση και από τα τρία συστήματα.

Η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, που θεωρείται ένα σύνθετο υλικό, διέπεται από παραμέτρους παραμόρφωσης και παραμέτρους αστοχίας-διαρροής. Η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών μέσα στα πετρώματα αυτά επιτυγχάνεται με προσομοιώματα όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τα συνεχή μέσα (Σοφιανός, 2008).

3.2 Ιδιότητες πετρωμάτων

Τα πετρώματα είναι σύνθετα στερεά λόγω της ετερογένειας που παρουσιάζουν. Οι κρύσταλλοι του κάθε ορυκτού δεν είναι απαραίτητο να έχουν τον ίδιο βαθμό αποσάθρωσης, ενώ και οι συνδέσεις μεταξύ των κόκκων παρουσιάζουν ατέλειες (ύπαρξη κενών). Τέλος οι κρύσταλλοι έχουν τη δική τους χαρακτηριστική ανισοτροπία (τυχαία διάταξη και διανομή των προσανατολισμών των κρυστάλλων). Οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες εξετάζονται είτε επί τόπου (στο ύπαιθρο) στη φυσική θέση και κατάσταση του πετρώματος, είτε σε κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια στο εργαστήριο.

3.2.1 Φυσικές Ιδιότητες πετρωμάτων

Τα πετρώματα παρουσιάζουν φυσικές ιδιότητες που είναι: το μοναδιαίο βάρος, το ειδικό βάρος, το φαινόμενο βάρος, ο λόγος κενών, το πορώδες, η υδατοαπορροφητικότητα, ο βαθμός κορεσμού, η διαπερατότητα και η φυσική υγρασία.

3.2.1.1 Μοναδιαίο βάρος

Μοναδιαίο βάρος ενός πετρώματος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του σε ξηρή κατάσταση προς τον όγκο των στερεών συστατικών του. Το μοναδιαίο βάρος ενός πετρώματος έχει άμεση σχέση με το μοναδιαίο βάρος των ορυκτών του και την ποσοστιαία αναλογία αυτών στη δομή του πετρώματος. Στο μετρικό σύστημα, το μέγεθος αυτό εκφράζεται σε kN/m^3, ενώ επίσης εκφράζεται σε g/cm^3. Συνήθως το ειδικό βάρος των πετρωμάτων κυμαίνεται από 22 kN/m^3 μέχρι και 35 kN/m^3.

Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές ειδικού βάρους διάφορων πετρωμάτων.

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Είδος πετρώματος	Μοναδιαίο βάρος (kN/m^3)
Ορυκτό άλας	22
Ψαμμίτης	26
Ασβεστόλιθος	27
Γρανίτης	27

3.2.1.2 Ειδικό βάρος

Ειδικό βάρος ενός πετρώματος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους μοναδιαίου όγκου του υλικού προς το βάρος απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας 4 ^oC και επομένως είναι αδιάστατο μέγεθος.

3.2.1.3 Φαινόμενο βάρος

Φαινόμενο βάρος ενός πετρώματος είναι το βάρος του δοκιμίου σε ξηρή κατάσταση στη μονάδα του όγκου. Όταν το πέτρωμα είναι συμπαγές είναι προφανές ότι το ειδικό βάρος και το φαινόμενο βάρος θα έχουν μικρή διαφορά. Αντιθέτως η διαφορά είναι μεγάλη όταν το πέτρωμα είναι πορώδες, π.χ. ψαμμίτης με ατελή σύνδεση κόκκων (βλ. επόμενο πίνακα).

Πίνακας 3.2 Τυπικές τιμές φαινόμενου βάρους διάφορων πετρωμάτων

Είδος πετρώματος	Μοναδιαίο βάρος (kN/m^3)	Φαινόμενο Βάρος (kN/m^3)
Χαλαζίτης	26,5	26,4
Συμπαγής ψαμμίτης	26,5	22,0
Χαλαρός ψαμμίτης	26,5	20,0

3.2.1.4 Πορώδες

Ως πορώδες n χαρακτηρίζεται ο λόγος του όγκου των πόρων στη μάζα του πετρώματος προς το συνολικό του όγκο σε ποσοστό επί τοις εκατό. Διακρίνεται σε πρωτογενές που οφείλεται στον τρόπο σχηματισμού του πετρώματος και σε δευτερογενές που οφείλεται στη δημιουργία ρωγμών και διακλάσεων του πετρώματος λόγω τεκτονικής καταπόνησης. Το πορώδες του πετρώματος επηρεάζει την απόδοση της ανατίναξης. Πετρώματα με υψηλό πορώδες απορροφούν γρήγορα μεγάλο μέρος της εκρηκτικής ενέργειας γύρω από τον θάλαμο της έκρηξη προκαλώντας έντονη περιφερειακή ρωγμάτωση με αποτέλεσμα να παραχθούν λεπτά θραύσματα και να αναλωθεί σημαντική ενέργεια. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων επιλέγονται εκρηκτικές ύλες που περιέχουν σημαντικό ποσοστό της ενέργειας τους στην ωστική φάση και με συνδυασμό καλής επιγόμωσης και κατάλληλο φορτίο για να μην απελευθερωθούν τα αέρια της έκρηξης, επιτυγχάνεται αποδοτική ανατίναξη. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι πορώδη πετρώματα με γεμάτους τους πόρους τους νερό, θραύονται ευκολότερα.

Πίνακας 3.3 τιμές πορώδους για τα συνήθη πετρώματα.
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. (http://www.lib.uth.gr/LWS/el/el_hp.asp)

Τύπος πετρώματος	Πορώδες (%)
Πλουτώνεια	0,2-2
Ηφαιστειακά	0,5-6
Ηφαιστειακοί τόφφοι	30-45
Κίσσηρη	60-70
Συμπαγείς ασβεστόλιθοι	1-5
Πορώδεις ασβεστόλιθοι	6-40
Άμμοι και χαλίκια	30-48
Συμπαγής ψαμμίτης	2-5
Πορώδης ψαμμίτης	6-40
Άργιλος, ιλύς	30-60

.

3.2.1.5 Λόγος κενών

Λόγος κενών ενός πετρώματος ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών συστατικών του.

3.2.1.6 Υδατοαπορροφητικότητα

Όταν ένα τεμάχιο πετρώματος βυθισθεί μέσα σε νερό δε γίνεται πλήρωση όλων των κενών του με νερό γιατί πολλά από αυτά είναι απομονωμένα, αλλά και κάποια ποσότητα αέρα παραμένει εγκλωβισμένη από το νερό και δε διαφεύγει, ενώ επιπλέον αν υπάρχει και άργιλος εξίσου εμποδίζει την παραπέρα διείσδυση του νερού. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα πετρώματα ακόμη και αν έχουν το ίδιο πορώδες δεν παρουσιάζουν την ίδια ικανότητα απορρόφησης νερού. Συνεπώς η ικανότητα που έχει κάθε πέτρωμα να απορροφά νερό ονομάζεται υδατοαπορροφητικότητα και εκφράζεται ως ο λόγος μεταξύ του βάρους του απορροφούμενου νερού προς το βάρος του σώματος σε ξηρή κατάσταση.

Πίνακας 3.4 Τιμές πορώδους και υδροαπορροφητικότητας διάφορων πετρωμάτων. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. (http://www.lib.uth.gr/LWS/el/el_hp.asp)

Τύπος πετρώματος	Πορώδες(%)	Υδροαπορροφητικότητα (%)
Γρανίτης	0.4 – 3.8	0.07 – 0.30
Μάρμαρο	0.4 – 2.1	0.06 – 0.45
Αργιλικός σχιστόλιθος	0.1 – 1.7	0.01 – 0.60
Χαλαζίτης	1.5 – 2.9	0.10 – 2
Ψαμμίτης	1.9 – 27.3	2.00 – 12
Ασβεστόλιθος	1.1 – 31.0	0.20 – 30

.

3.2.1.7 Φυσική υγρασία

Φυσική υγρασία είναι η ποσότητα του νερού που περιέχεται σε ένα πέτρωμα στο φυσικό του περιβάλλον. Συνεπώς η τιμή της εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του ίδιου του πετρώματος, αλλά και του περιβάλλοντός του. Εκφράζεται με το λόγο του βάρους του περιεχόμενου στο πέτρωμα νερού προς το ξηρό βάρος του και παρουσιάζεται σε μονάδες %.

3.2.2 Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων

Άλλη κατηγορία ιδιοτήτων των πετρωμάτων είναι οι μηχανικές ιδιότητες οι οποίες είναι: το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, η αντοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής και η ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος.

3.2.2.1 Μέτρο ελαστικότητας

Όταν ένα φορτίο επενεργεί πάνω σε ένα δοκίμιο πετρώματος και έχει μικρότερη τιμή από την τιμή του φορτίου θραύσης του πετρώματος, προκαλεί παραμόρφωση που εκφράζεται με σμίκρυνση του αρχικού ύψους του δοκιμίου και αύξηση του αρχικού πλάτους του δοκιμίου. Όταν το φορτίο απομακρυνθεί και το δοκίμιο τείνει να αποκτήσει το αρχικό του σχήμα, τότε το πέτρωμα το χαρακτηρίζει ελαστική συμπεριφορά. Συνήθως όμως η αρχική φόρτιση συνοδεύεται και από παραμόρφωση που είναι μόνιμη. Αν η παραμόρφωση είναι ανάλογη του φορτίου που την προκάλεσε τότε το πέτρωμα ακολουθεί το νόμο Hooke και ισχύει η σχέση:

$$\mathrm{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

όπου:
Ε=μέτρο ελαστικότητας,
σ=φορτίο,
ε=παραμόρφωση.

Το μέτρο ελαστικότητας Ε έχει σταθερή τιμή προς όλες τις διευθύνσεις μόνο στα ισότροπα υλικά. Αντιθέτως στα υλικά όπου κυριαρχεί η ανισοτροπία, όπως στα πετρώματα, το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει διαφορετικές τιμές που εξαρτώνται από:

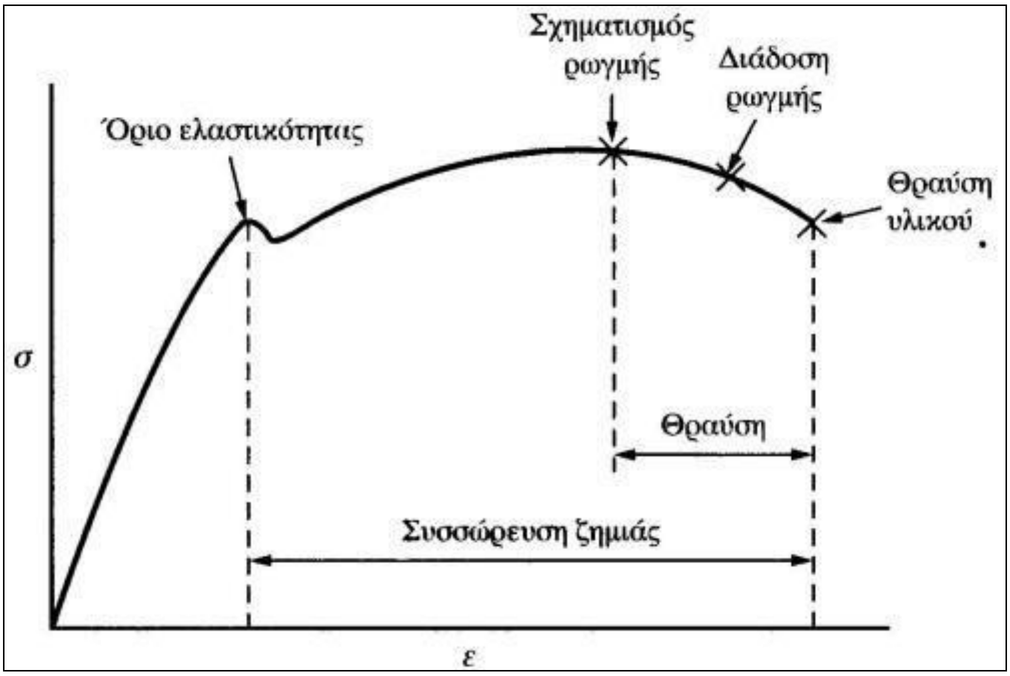
• την τιμή και τον τρόπο της επιβαλλόμενης τάσης,

• την ταχύτητα επιβολής,

• το νερό στους πόρους του πετρώματος,

• τη θερμοκρασία,

Όταν η τιμή του Ε είναι μεγάλη, η παραμόρφωση που θα προκληθεί θα είναι μικρή για δεδομένη τιμή τάσης και το υλικό θα παρουσιάζεται με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Σε απολύτως ελαστικά υλικά θα πρέπει το Ε να παρουσιάζει την ίδια τιμή είτε σε εφελκυσμό είτε σε θλίψη. Τα πετρώματα ως φυσικά υλικά αναπτύσσουν μη γραμμική συμπεριφορά και το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δεν είναι ευθεία γραμμή αλλά έχει καμπύλη μορφή.



Σχήμα 3.1 Διαδοχικές φάσεις στην αστοχία ενός υλικού σε διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε): Η ελαστική συμπεριφορά ακολουθείται από αυξανόμενη μη αντιστρέψιμη πλαστική παραμόρφωση έως το σχηματισμό ρωγμής, η διεύρυνση της οποίας οδηγεί τελικά στη θραύση του υλικού. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.

Τα πετρώματα εν γένει δεν έχουν ιδεατή ελαστική συμπεριφορά. Μερικά μόνο την προσεγγίζουν (πολύ μικρή παραμόρφωση και σχεδόν επιστροφή στην αρχική κατάσταση) όταν οι τάσεις που προκαλούνται από τα φορτία που εφαρμόζονται είναι μικρότερες από την τάση που αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής του πετρώματος, ενώ σε μεγαλύτερες τάσεις οι δεσμοί των κρυστάλλων υφίστανται μόνιμες παραμορφώσεις.

3.2.2.2 Λόγος Poisson

Όταν ένα δοκίμιο εφελκύεται στην μία διάσταση, τότε τείνει να γίνει λεπτότερο στις άλλες δύο διαστάσεις. Ο λόγος του poisson ορίζεται ως ο λόγος της σχετικής (ή ειδικής) εγκάρσιας παραμόρφωσης προς την σχετική (ή ειδική) διαμήκη παραμόρφωση. Στα πετρώματα κυμαίνεται από 0.15-0.4. Καθώς μειώνεται ο λόγος αυτός, μειώνεται και η ψαθυρότητα του πετρώματος. Ο θρυμματισμός βελτιώνεται με εκρηκτικά υψηλής ταχύτητας και πίεσης έκρηξης. Πετρώματα που έχουν χαμηλή αντοχή σε θλίψη χαρακτηρίζονται συνήθως από κάποια πλαστική συμπεριφορά, η οποία απορροφά ταχύτερα το κρουστικό κύμα σε σύγκριση με τα ψαθυρά πετρώματα με αποτέλεσμα να προκαλείται πολύ περιορισμένη θραύση λόγω ανάκλασης και κακός θρυμματισμός. Σε τέτοιες περιπτώσεις γίνεται χρήση εκρηκτικών με σημαντική ωστική ενέργεια (Τσουτρέλης, 2001).

3.2.2.3 Αντοχή

Η σημαντικότερη κατηγορία μηχανικών παραμέτρων πο χαρακτηρίζουν τα πετρώματα είναι αυτές που αναφέρονται στην αντοχή τους. Η αντοχή ενός φυσικού υλικού είναι η ικανότητά του να ανθίσταται σε εξωτερικές δυνάμεις (τάσεις) και εκφράζεται σε μονάδες τάσης. Η ικανότητα αυτή των υλικών εξαρτάται άμεσα από τον τύπο της καταπόνησης (Αγιουτάντης, 2002):

- καταπόνηση σε θλίψη,
- καταπόνηση σε εφελκυσμό,
- καταπόνηση σε διάτμηση,
- καταπόνηση σε κάμψη,
- καταπόνηση σε στρέψη,

Επομένως, τα πετρώματα χαρακτηρίζονται από τιμές αντοχής ανάλογα με τον τύπο των εξωτερικών δυνάμεων (ή τάσεων) που υφίστανται. Έτσι προκύπτουν:

- αντοχή σε θλίψη,
- αντοχή σε εφελκυσμό,
- αντοχή σε διάτμηση,
- αντοχή σε κάμψη,

καθώς και:

- αντοχή σε κρούση,
- αντοχή σε απότριψη,
- αντοχή σε αποσάθρωση,
- αντοχή στην επίδραση χημικών, κλπ.

Η αντοχή ενός πετρώματος εξαρτάται γενικά από:

- την αντοχή καθενός των ορυκτολογικών συστατικών του

- την αντοχή του υλικού σύνδεσης των κόκκων
- τη δομή του πετρώματος
- τις τυχόν υπάρχουσες επιφάνειες μικρής αντοχής (ρωγμές, ενστρώσεις κλπ.)

Επιπλέον στην αντοχή ενός πετρώματος μεγάλο ρόλο έχει και:

- ο τρόπος της φόρτισης (σταθερό ή μεταβαλλόμενοι φορτίο κλπ.)
- το είδος της φόρτισης (μονοαξονική ή διατμητική ή ολόπλευρη φόρτιση κλπ.)
- οι επικρατούσες φυσικές και χημικές συνθήκες.

3.2.2.4 Γωνία εσωτερικής τριβής

Η ιδιότητα η οποία διακρίνει τα λεγόμενα γεωυλικά, όπως τα εδάφη, τα πετρώματα, τα σκυροδέματα και άλλα συναφή υλικά από άλλα υλικά, όπως π.χ.τα μέταλλα, είναι η προεξάρχουσα ευαισθησία τους στην επιβαλλόμενη μέση ορθή τάση, η οποία αποδίδεται στην ύπαρξη "εσωτερικής" τριβής. Η εσωτερική τριβή αναπτύσσεται σε μικρο-δομικό επίπεδο είτε μεταξύ κόκκων είτε στα χείλη εσωτερικών μικρορωγμών, τυχαία κατανεμημένων μέσα στο υλικό. Στα εδάφη εκφράζει ουσιαστικά ένα μέτρο της γωνίας φυσικής απόθεσης του εδάφους.

3.2.2.5 Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος

Η ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος είναι χαρακτηριστική για κάθε πέτρωμα και αποτελεί ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του πετρώματος. Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος όπως ο βαθμός ρωγμάτωσης του, το πορώδες του, η διαπερατότητα του και η περιεκτικότητα του σε νερό επηρεάζουν τον ρυθμό απόσβεσης του κρουστικού κύματος. Πετρώματα με υψηλή ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος απαιτούν εκρηκτικές ύλες με μεγάλες ταχύτητες έκρηξης (Σοφιανος, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΥΠΑΙΘΡΙΕΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΙΣ

Το φορτίο είναι ο πιο κρίσιμος γεωμετρικός παράγοντας στο σχεδιασμό μιας ανατίναξης. Προκειμένου να προσδιοριστεί, πολυάριθμες μελέτες έχουν εκπονηθεί τις τελευταίες δεκαετίες και έχουν αναπτυχθεί διάφοροι εμπειρικοί. Η πολυπλοκότητα και η ακρίβεια καθε τύπου εξαρτάται απο τις παραμέτρους που έχουν ληφθεί υπ’ όψην. Παρακάτω παρατίθενται οι πιο γνωστές εμπειρικές εξισώσεις προσδιορισμού του φορτίου (Jimeno, 1995).

4.1 Εξίσωση κατά Andersen

Η εξίσωση κατά Andersen (Andersen, 1952, Jimeno, 1995) δίνεται από τη σχέση:

$$B = K \times \sqrt{D \times L}$$

όπου:

B= φορτίο σε m,

K= εμπειρική σταθερά ανάλογα τον τύπο του πετρώματος,

D= διάμετρος διατρήματος σε in,

L= μήκος διατρήματος σε ft.

4.2 Εξίσωση κατά Fraenkel

Η εξίσωση κατά Fraenkel (Faenkel, 1954, Jimeno, 1995) δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{R_v \times l^{0.3} \times h_c^{\;0.3} \times d^{\,0.8}}{50}$$

όπου:

B= φορτίο σε m,

R_v= συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση,

l= μήκος διατρήματος σε m,

h_c= μήκος γόμωσης σε m,

d= διάμετρος διατρήματος σε mm.

Όπου προκύπτουν υπερβολικά μεγάλες τιμές του φορτίου, πρέπει να ελαττωθεί ώστε να μην υπερβαίνει τα 2/3 του μήκους του διατρήματος.

4.3 Εξίσωση κατά Pearse

Η εξίσωση κατά Pearse (1955) (Jimeno, 1995, Αγιουτάντης, 2002) δίνεται από τη σχέση:

$$B = K \times D \times 10^{-3} \times \sqrt{\frac{P_d}{\sigma_t}}$$

όπου:

B= φορτίο σε m,

D=διάμετρος διατρήματος σε mm,

K= εμπειρική σταθερά ανάλογα τον τύπο του πετρώματος,

P_d= πίεση έκρηξης εκρηκτικού σε kgf/m^2,

σ_t= αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σε kgf/m^2.

4.4 Εξίσωση κατά Ash

Η εξίσωση κατά Ash (1963) (Jimeno, 1995, Αγιουτάντης, 2002) δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mathrm{K_b} \times d}{12}$$

όπου:

B= φορτίο σε ft,

d= διάμετρος διατρήματος σε in,

K_b= συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη.

Πίνακας 4.1 Πίνακας συντελεστή K_b (Jimeno, 1995)

Πυκνότητα και ισχύς εκρηκτικής ύλης	Έιδος πετρώματος		
	Χαμηλής Αντοχής	Μέτριας Αντοχής	Υψηλής Αντοχής
Χαμηλής πυκνότητητας (0,8-0,9g/cm^3) και ισχύος	30	25	20
Μέσης πυκνότητητας (1-1,2g/cm^3) και ισχύος	35	30	25
Υψηλής πυκνότητητας (1,3-1,6 g/cm^3) και ισχύος	40	35	30

Για περιπτώσεις όπου τα χαρακτηριστικά του εκρηκτικού ή/και του πετρώματος είναι διαφορετικά ο συντελεστής K_b υπολογίζεται με βάση την σχέση:

$$\mathrm{K}_B = 30 \times [\frac{\gamma_0}{\gamma_r}]^{1/3} \times [\frac{P_1 \times V_1^{\,2}}{P_0 \times V_0^{\,2}}]^{1/3}$$

όπου:

γ_0= ειδικό βάρος πετρώματος αναφοράς (2,57g/cm^3= 160lb/ft^3),

γr= ειδικό βάρος πετρώματος που εξορύσσεται σε σε g/cm^3,

P_0*V_0= παράμετρος ανατίναξης (πυκνότητα, ταχύτητα) του εκρηκτικού αναφοράς (P_0=1,3 g/cm^3, V_0=1200ft/s=3650m/s),

P_1*V_1= παράμετρος ανατίναξης (πυκνότητα, ταχύτητα) του εκρηκτικού που χρησιμοποιείται.

4.5 Εξίσωση κατά Langefors

Η εξίσωση κατά Langefors (1963) (Jimeno, 1995, Αγιουτάντης, 2002) δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{d}{33} \times \sqrt{\frac{\rho_{\varepsilon} \times RWS}{c \times f \times (\frac{S}{B})}}$$

όπου:

B= φορτίο σε m,

d= διάμετρος διατρήματος σε mm,

ρ_{ε}= πυκνότητα γόμωσης σε kg/dm^3,

RWS= σχετική ισχύς κατα βάρος της εκρηκτικής ύλης,

c= ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης. Η ποσότητα εκρηκτικού που απαιτείται σε μέτωπο μορφής βαθμίδας και συμπαγούς πετρώματος για να εξορύξει όγκο ενός κυβικού μέτρου μετρώματος,

f= βαθμός πάκτωσης,

$\frac{S}{B}$ = επιθυμητή σχέση απόστασης διατρημάτων προς φορτίο.

Η εξίσωση αναπτύχθηκε για διατρήματα 30-75mm και για εκρηκτικά με βάση τη νιτρογλυκερίνη.

4.6 Εξίσωση κατά Jimeno

Ο Jimeno (1980) (Jimeno, 1995, Αγιουτάντης, 2002) βασίστηκε στην εξίσωση του Ash που χρησιμοποιεί την ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος στη βραχομάζα:

$$B = 0.76 \times D \times F$$

όπου:

B= φορτίο σε m,

D= διάμετρος διατρήματος σε in,

F= συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο πετρώματος και εκρηκτικού,

$$F = F_r \times F_e$$

$$F_r = \left[\frac{2.7 \times 3500}{\rho_r \times VC} \right]^{0.33}$$

$$F_e = \left[\frac{\rho_e \times VD}{1.3 \times 3660} \right]^{0.33}$$

όπου:

ρ_r= ειδικό βάρος του πετρώματος σε g/cm^3.

VC= ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα σε m/s,

ρ_e= ειδικό βάρος του εκρηκτικού σε g/cm^3,

VD= ταχύτητα έκρηξης του εκρηκτικού σε m/s.

Η εξίσωση χρησημοποιείται για διατρήματα 165-250mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φορτία κάθε μεθόδου για τιμές σχεδιασμού μια θεωρητικής ανατίναξης και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση λαμβάνονται σταθερά :

- Ύψος διατρήματος 10m
- Ύψος εκρηκτικής στήλης 7m
- Διατρήματα κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο f=1
- Σχέση απόστασης διατρημάτων προς φορτίο $S/B=1.5$

ενώ οι παράμετροι που μεταβάλλονται είναι :

- Διάμετρος διατρήματος
- Τύπος πετρώματος
- Είδος εκρηκτικού

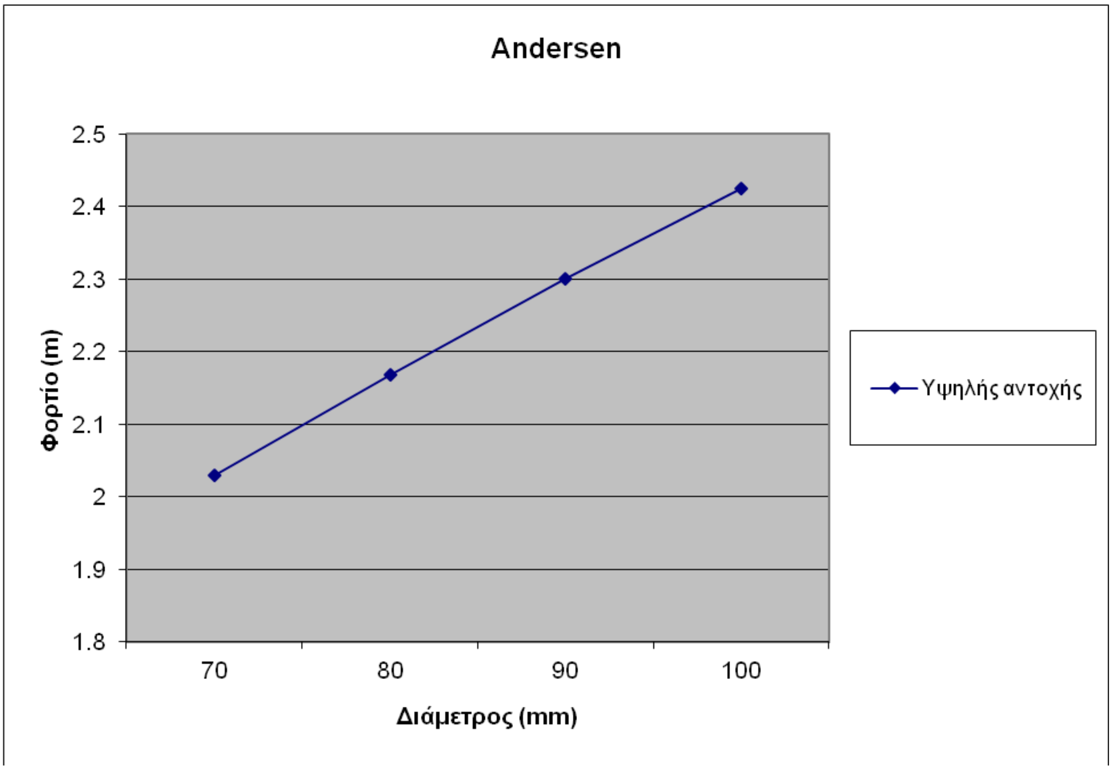
5.1 Διάμετρος διατρήματος

Επιλέχθηκαν τιμές διατρημάτων 70-100mm για θεωρημένο υψηλής αντοχής πέτρωμα και χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO. Ως πέτρωμα υψηλής αντοχής επιλέχθηκε ο γρανίτης του οποίου η εμπειρική σταθερά K και ο συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θράυση R_v επιλέχθηκε το ανώτατο όριο από το εύρος που δίδεται από τη βιβλιογραφια. Πιο συγκεκριμένα έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- Εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.7
- Συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θράυση
  R_v =1.5

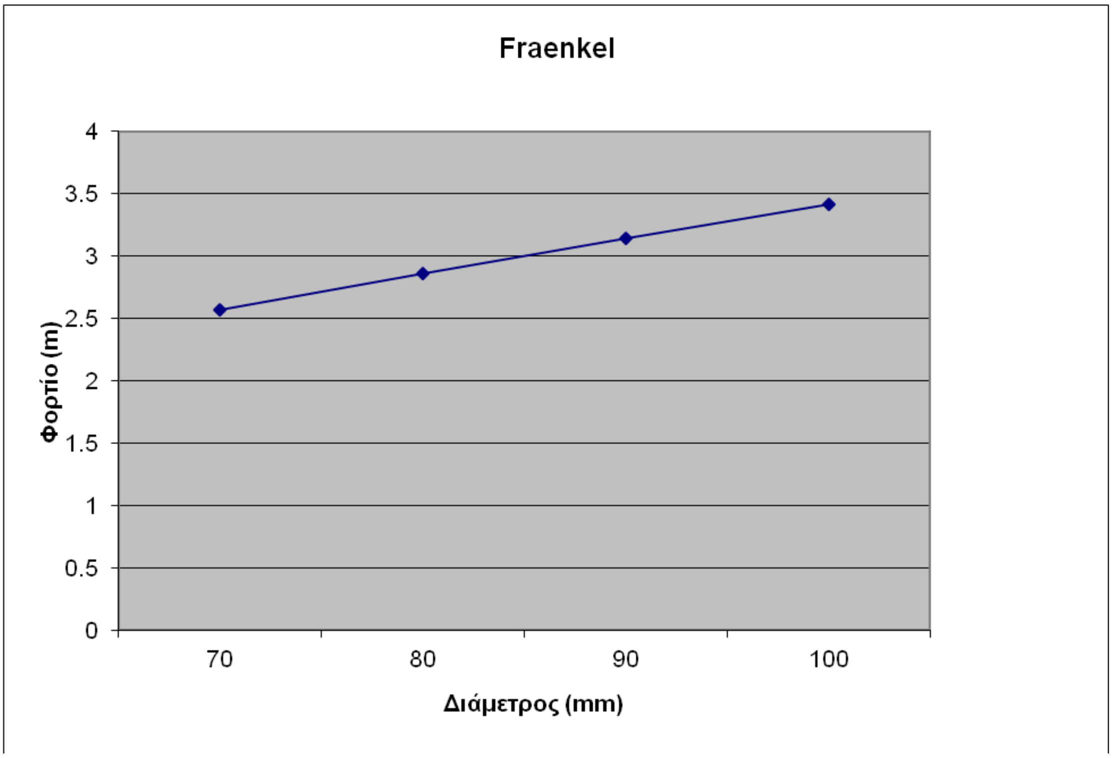
- Συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη
  K_b =20
- Πίεση έκρηξης ANFO P_d =45275 kg/m^2
- Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t = 1298 kg/m^2
- Ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης c=0,35
- Μοναδιαίο βάρος του πετρώματος ρ_r =2,7 g/cm^3
- Ειδικό βάρος του ANFO ρ_e =0.84 g/cm^3
- Σχετική ισχύς κατα βάρος ANFO RWS=1
- Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s
- Ταχύτητα έκρηξης ANFO VD=3600 m/s

Στο διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Andersen για διάμετρο διατρημάτων 2.76-3.94in (70-100mm), ύψος διατρήματος 32.8ft (10m) και εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.7. Η τιμή για το K λήφθηκε με παραδοχή για υψηλής αντοχής πέτρωμα.



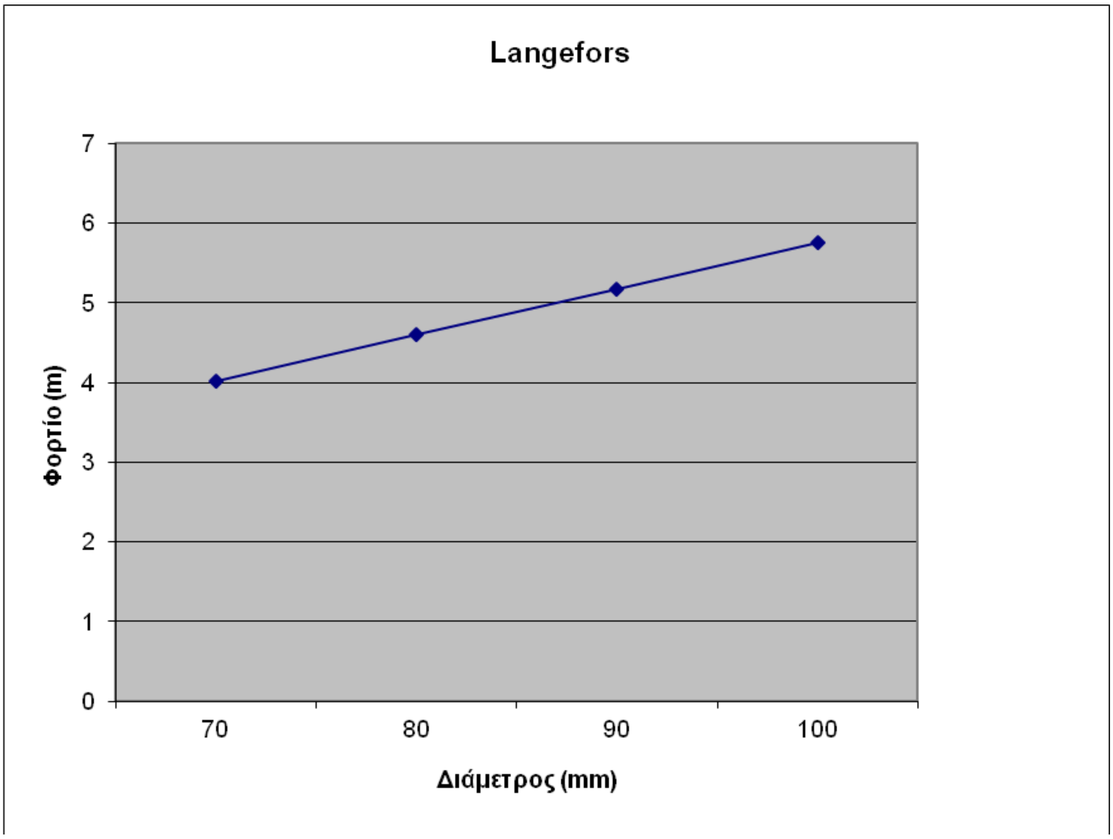
Σχ. 5.1 Υπολογισμός του φορτίου με βάση τη διάμετρο του διατρήματος κατά Andersen για πέτρωμα που χαρακτηρίζεται σκληρό.

Στο διάγραμμα 5.2 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Fraenkel για διάμετρο διατρημάτων 70-100mm, συντελεστή αντίστασης του πετρώματος στη θράυση R_v=1.5, ύψος διατρήματος 10m και ύψος εκρηκτικής στήλης 7m. Η τιμή για το R_v λήφθηκε με παραδοχή για υψηλής αντοχής πέτρωμα.



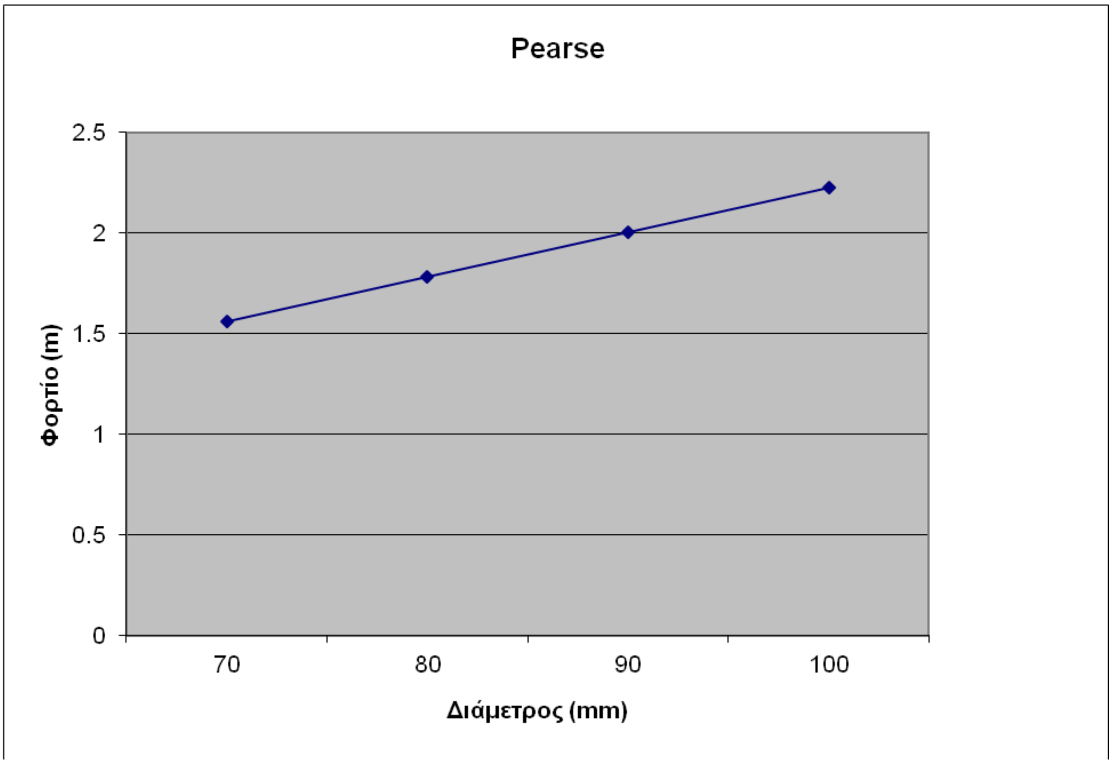
Σχ. 5.2 Υπολογισμός του φορτίου με βάση τη διάμετρο του διατρήματος κατά Faenkel για πέτρωμα που χαρακτηρίζεται σκληρό.

Στο διάγραμμα 5.3 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Langefors για διάμετρο διατρημάτων 70-100mm, σχέση απόστασης διατρημάτων προς φορτίο S/B=1.5, ειδική κατανάλωση εκρηκτικής ύλης c=0.35, ειδικό βάρος του ANFO ρ_e=0.84kg/dm^3 (0.84 g/cm^3), σχετική ισχύ κατά βάρος ANFO RWS=1, διάτρημα κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο f=1, και ύψος διατρήματος 10m. Η τιμή για το c λήφθηκε με παραδοχή ότι το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως σκληρό.



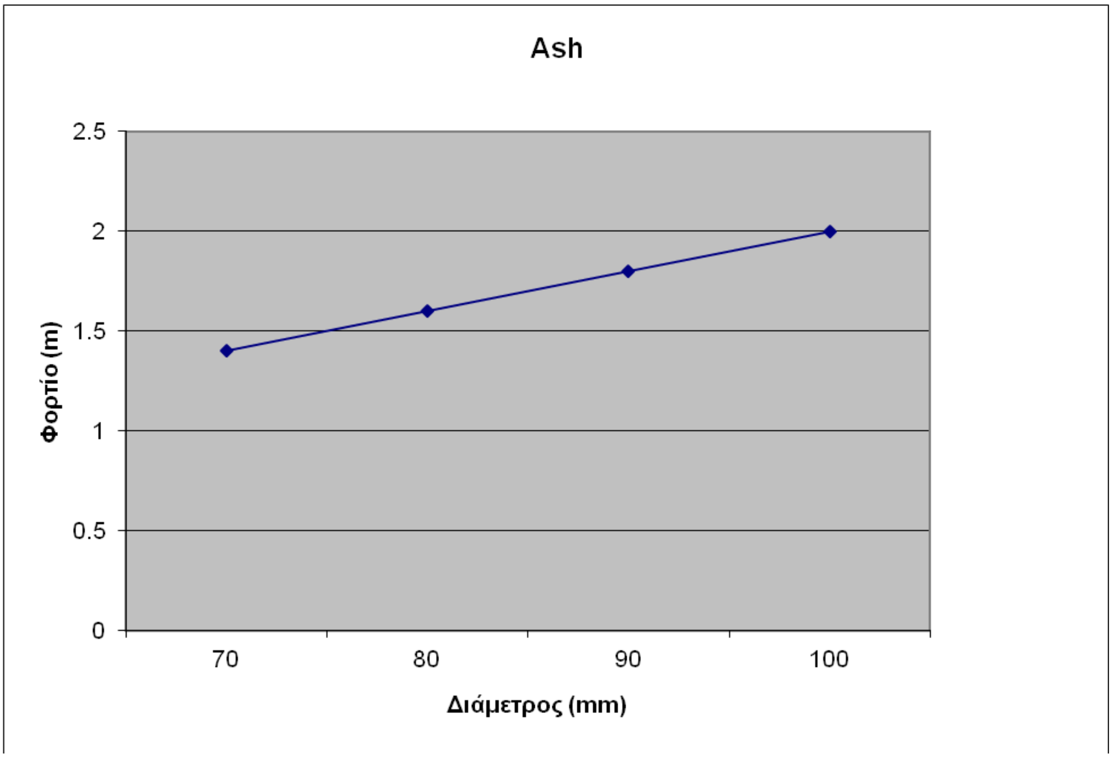
Σχ. 5.3 Υπολογισμός του φορτίου με βάση τη διάμετρο του διατρήματος κατά Langefors για πέτρωμα που χαρακτηρίζεται σκληρό.

Στο διάγραμμα 5.4 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Pearse για διάμετρο διατρημάτων 70-100mm, εμπειρική σταθερά ανάλογα τον τύπο του πετρώματος K=0.7, αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t=1298kg/m^2 (0.01279MPa), πίεση έκρηξης εκρηκτικού P_d=45275kg/cm^2 (4440MPa) και ύψος διατρήματος 10m. Η τιμή για το K λήφθηκε με παραδοχή για υψηλής αντοχής πέτρωμα.



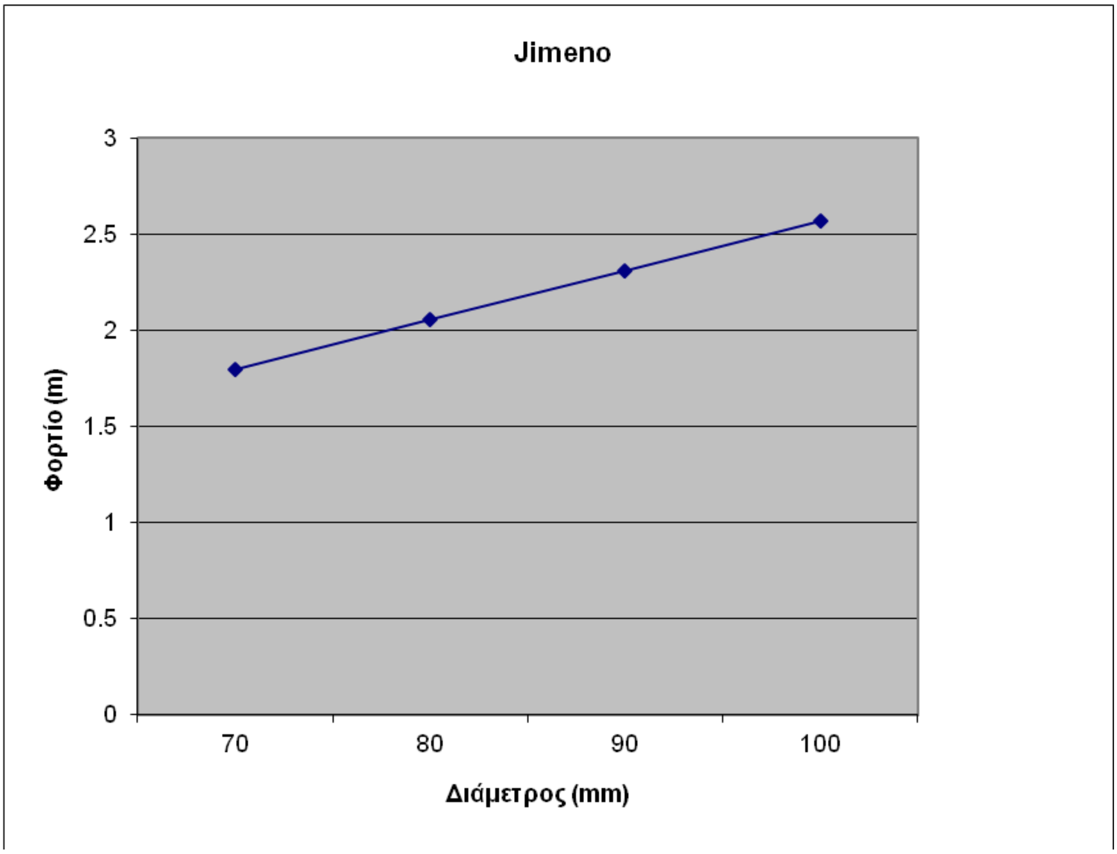
Σχ. 5.4 Υπολογισμός του φορτίου με βάση τη διάμετρο του διατρήματος κατά Pearse για πέτρωμα που χαρακτηρίζεται σκληρό.

Στο διάγραμμα 5.5 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Ash για διάμετρο διατρημάτων 2.76-3.94in (70-100mm), και εμπειρική σταθερά πετρώματος K_b=20. Η τιμή για το K_b λήφθηκε με παραδοχή για υψηλής αντοχής πέτρωμα, χαμηλής πυκνότητας και ισχύος εκρηκτικο (ANFO ρ_e =0.84 g/cm^3), σύμφωνα με τον πίνακα 4.1.

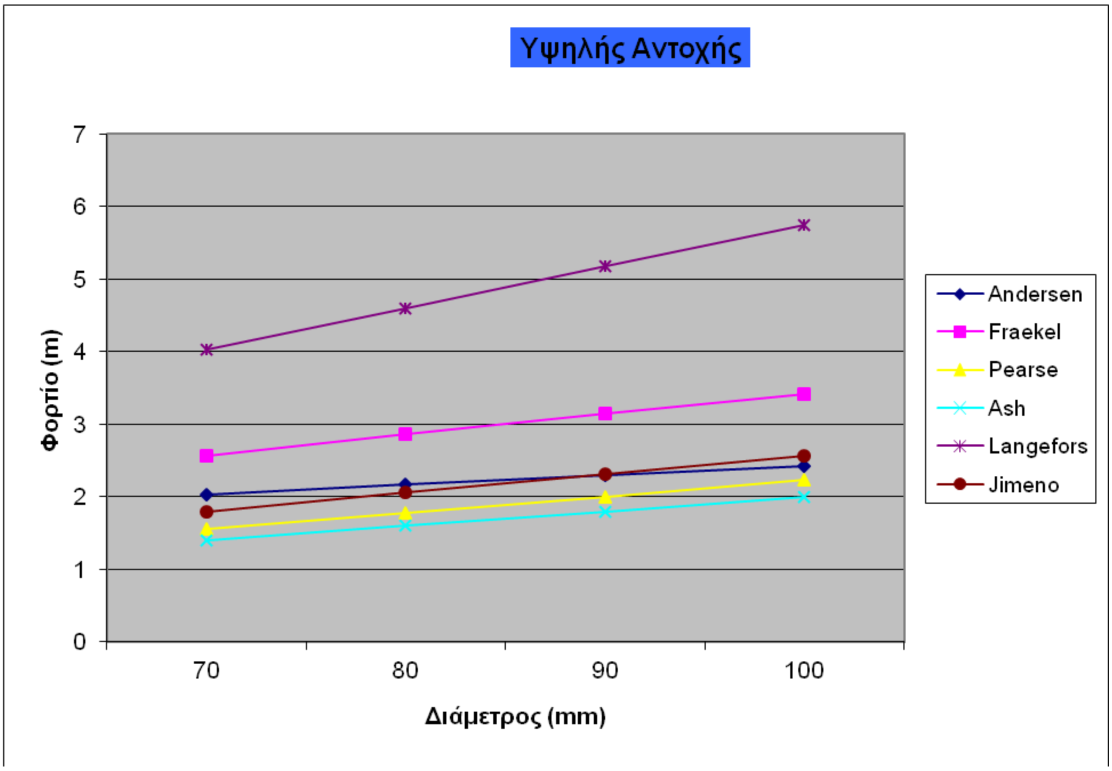


Σχ. 5.5 Υπολογισμός του φορτίου με βάση τη διάμετρο του διατρήματος κατά Ash για πέτρωμα που χαρακτηρίζεται σκληρό.

Στο διάγραμμα 5.6 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Jimeno για διάμετρο διατρημάτων 2.76-3.94in (70-100mm), ειδικό βάρος πετρώματος ρ_r=2.7g/cm^3, ειδικό βάρος εκρηκτικού ρ_e=0.84g/cm^3, ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s και ταχύτητα έκρηξης του εκρηκτικού (ANFO) VD=3600m/s.



Σχ. 5.6 Υπολογισμός του φορτίου με βάση τη διάμετρο του διατρήματος κατά Jimeno για πέτρωμα που χαρακτηρίζεται σκληρό.



Σχ. 5.7 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των μεθόδων για υψηλής αντοχής πέτρωμα.

Παρατηρείται οτι η μέθοδος Pearse δίνει το μικρότερο φορτίο για υψηλής αντοχής πέτρωμα, ενώ οι Jimeno και Andersen δίνουν παραπλήσιο. Σχετικά αυξημένο φορτίο προβλέπεται κατά Fraenkel, ενώ ο Langefors αποκλίνει απο τις παραπάνω με μια αρκετά υψηλή τιμή φορτίου. Επίσης φαίνεται οτι ο Langefors έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία όσον αφορά τη μεταβλητή διάμετρο του διατρήματος, καθώς καλύπτει το μεγαλύτερο εύρος τιμών φορτίου απο τις άλλες μεθόδους, για το ίδιο εύρος τιμών διαμέτρου. Το αντίθετο μπορεί να παρατηρηθεί για την μέθοδο Andersen καθώς καλύπτει το μικρότερο εύρος τιμών φορτίου απο τις άλλες μεθόδους, για το ίδιο εύρος τιμών διαμέτρου.

5.2 Διάμετρος διατρήματος και είδος πετρώματος

Επιλέχθηκαν τιμές διατρημάτων 70-100mm για χαμηλής, μέτριας και υψηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO. Πιο συγκεκριμένα έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

Για υψηλής αντοχής πέτρωμα:

- Εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.7
- Συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση R_v =1.5
- Συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη K_b =20
- Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t = 1298 kg/m^2
- Ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης c=0,35
- Ειδικό βάρος του πετρώματος ρ_r =2,7 g/cm^3
- Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s

Για μέτριας αντοχής πέτρωμα:

- Εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.8
- Συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση R_v =4
- Συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη K_b =25
- Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t = 480 kg/m^2
- Ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης c=0,26
- Ειδικό βάρος του πετρώματος ρ_r =2,7 g/cm^3
- Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s

Για χαμηλής αντοχής πέτρωμα:

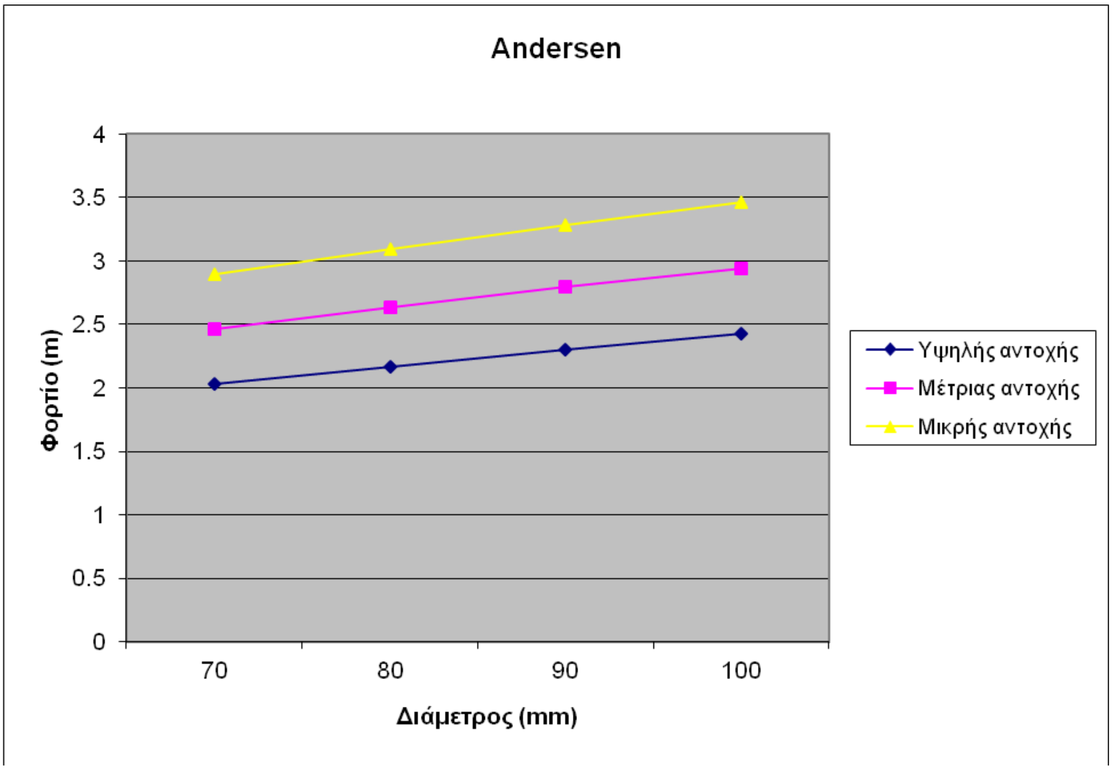
- Εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.1
- Συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση R_v =6
- Συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη K_b =30
- Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t = 280 kg/m^2
- Ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης c=0,17
- Ειδικό βάρος του πετρώματος ρ_r =2,7 g/cm^3

- Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s

Καθώς επίσης και:

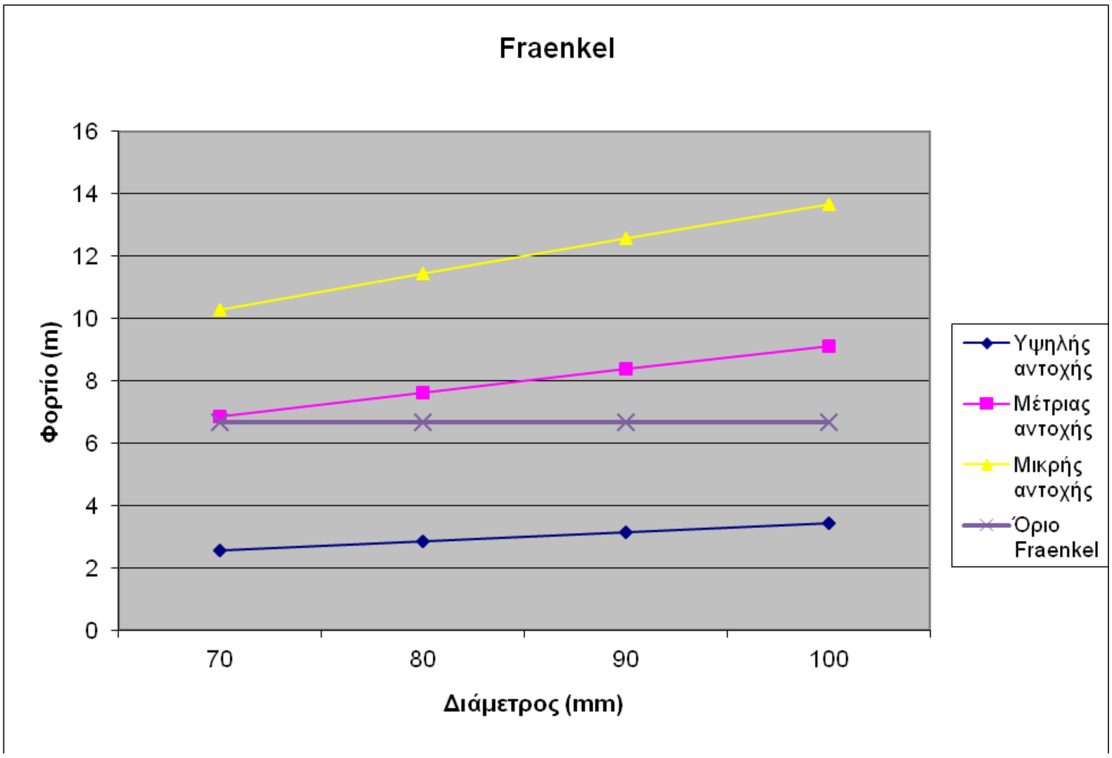
- Ειδικό βάρος του ANFO ρ_e =0.84 g/cm^3
- Σχετική ισχύς κατα βάρος ANFO RWS=1
- Ταχύτητα έκρηξης ANFO VD=3600 m/s
- Πίεση έκρηξης ANFO P_d =45275 kg/m^2

Στο διάγραμμα 5.8 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Andersen για διάμετρο διατρημάτων 2.76-3.94in (70-100mm), ύψος διατρήματος 32.8ft (10m) και εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.7,0.8,1. Η τιμές για το K ελήφθησαν με παραδοχή για υψηλής 0.7) , μέτριας (0.8) και χαμηλής (1) αντοχής πετρώματα.



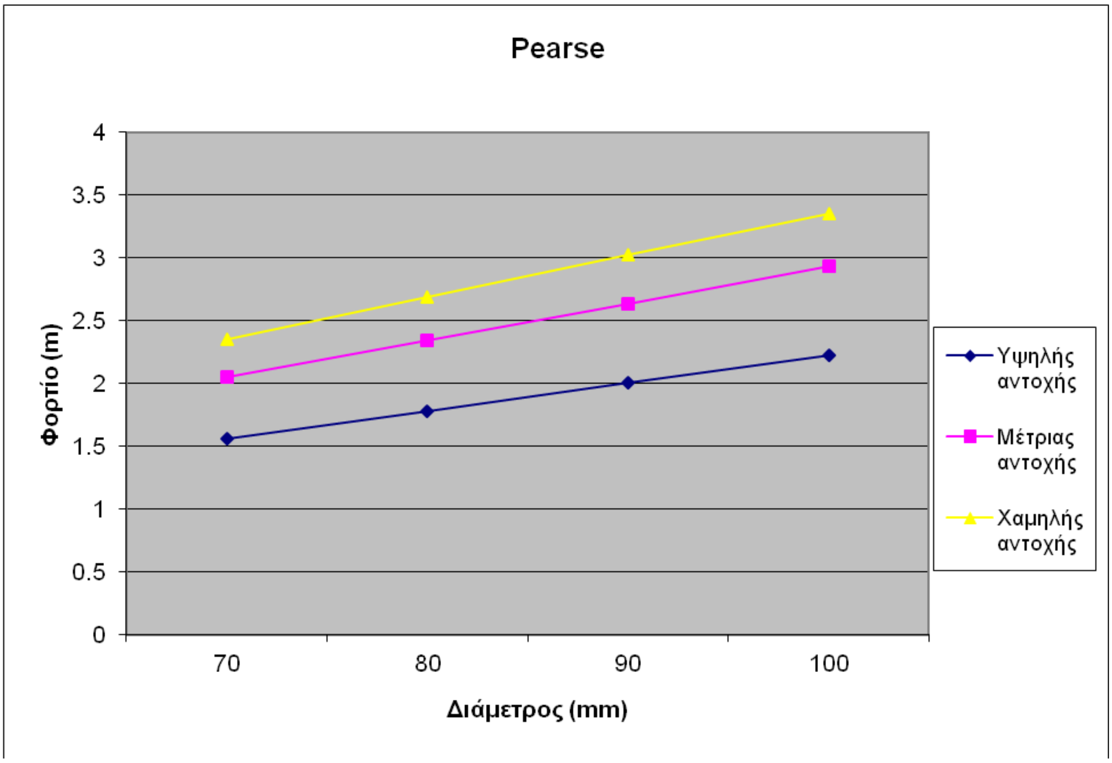
Σχ. 5.8 Εξίσωση Andersen.

Στο διάγραμμα 5.9 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Fraenkel για διάμετρο διατρημάτων 70-100mm, ύψος διατρήματος 10m, ύψος εκρηκτικής στήλης 7m και συντελεστές αντίστασης του πετρώματος στη θράυση R_v=1.5,4,6. Η τιμές για το R_v ελήφθησαν με παραδοχή για υψηλής (1.5) , μέτριας (4) και χαμηλής (6) αντοχής πετρώματα. Η μέγιστη τιμή του φορτίου που είχε ορίσει ο Fraenkel ως όριο ισούται με 2/3 του ύψους διατρήματος.



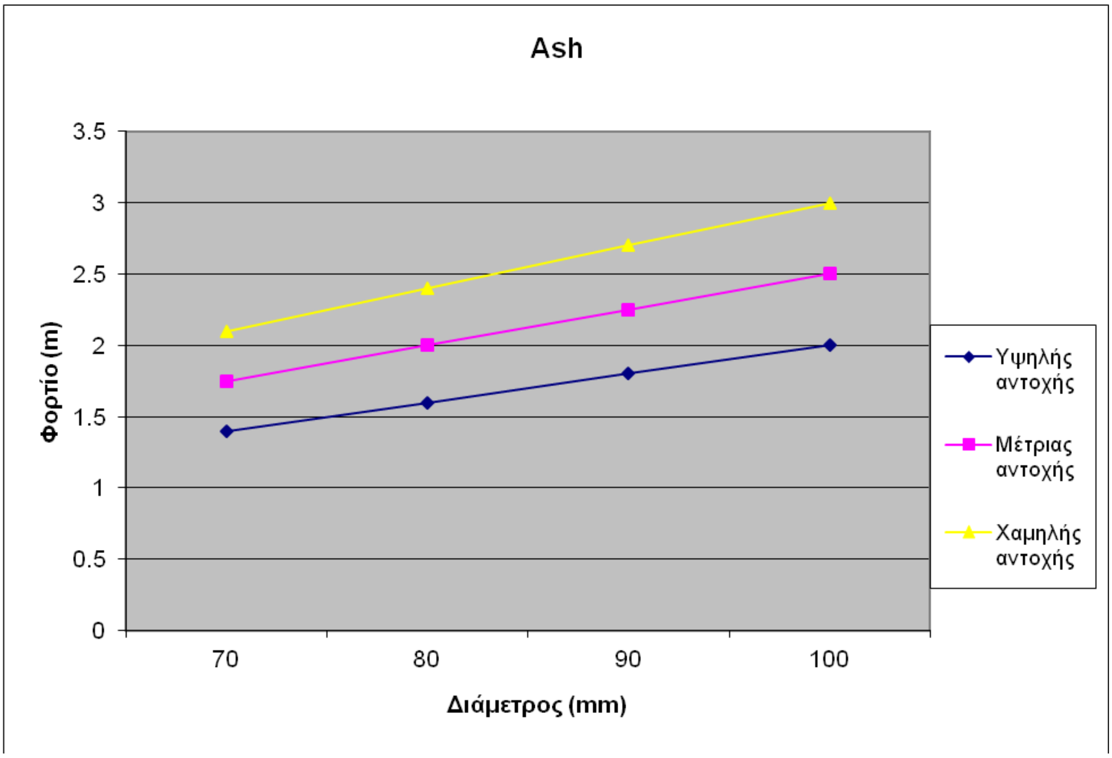
Σχ. 5.9 Εξίσωση Fraenkel.

Στο διάγραμμα 5.10 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Pearse για διάμετρο διατρημάτων 70-100mm, πίεση έκρηξης εκρηκτικού P_d=45275kg/cm^2 (4440MPa), ύψος διατρήματος 10m και εμπειρικές σταθερές ανάλογα τον τύπο του πετρώματος K=0.7,0.8,1. Η τιμές για το K ελήφθησαν με παραδοχή για υψηλής (1.5), μέτριας (4) και χαμηλής (1) αντοχής πετρώματα. Οι αντοχές τ πετρώματος σε εφελκυσμό έχουν τιμή σ_t=1298kg/m^2 (0.01279MPa), 480kg/m^2 (0.004707MPa), 280kg/m^2 (0.002746MPa) αντιστοιχα.



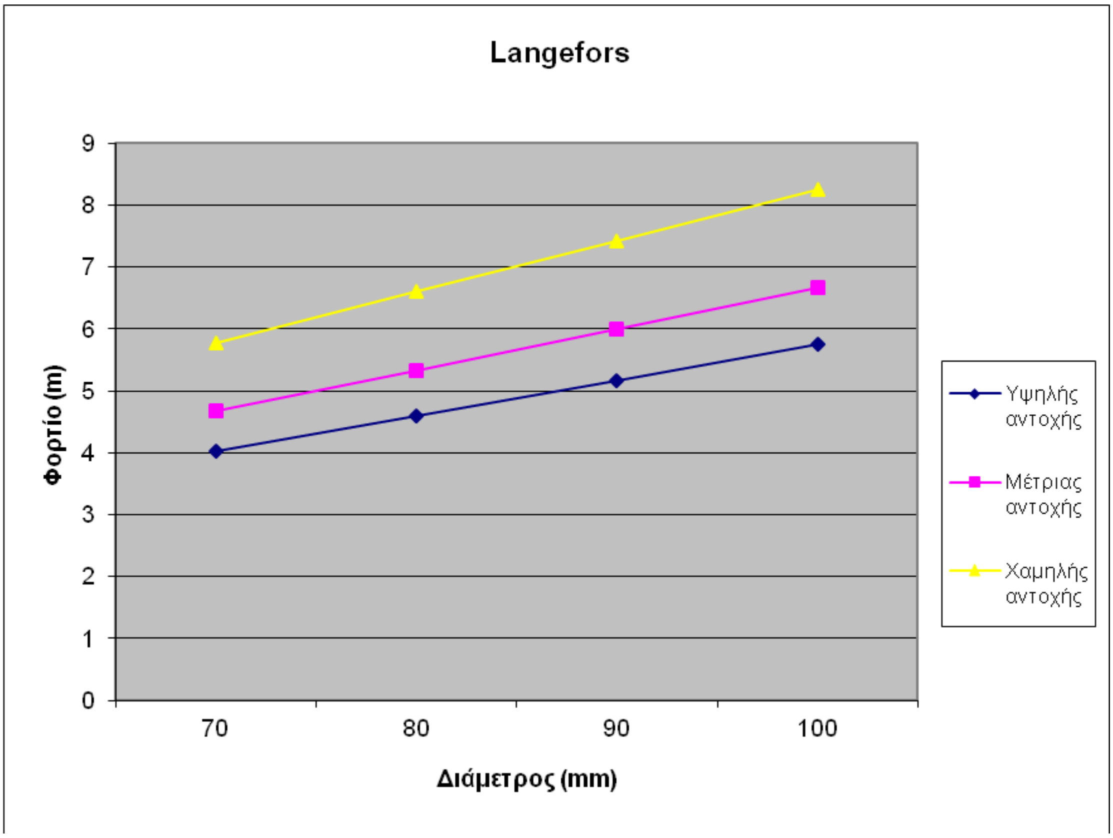
Σχ. 5.10 Εξίσωση Pearse.

Στο διάγραμμα 5.11 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Ash για διάμετρο διατρημάτων 2.76-3.94in (70-100mm), και εμπειρικές σταθερές πετρώματος K_b=20,25,30. Η τιμές για το K_b ελήφθησαν με παραδοχή για υψηλής (20), μέτριας (25), χαμηλής (30) αντοχής πετρώματα και χαμηλής πυκνότητας και ισχύος εκρηκτικο (ANFO ρ_e =0.84 g/cm^3), σύμφωνα με τον πίνακα 4.1.



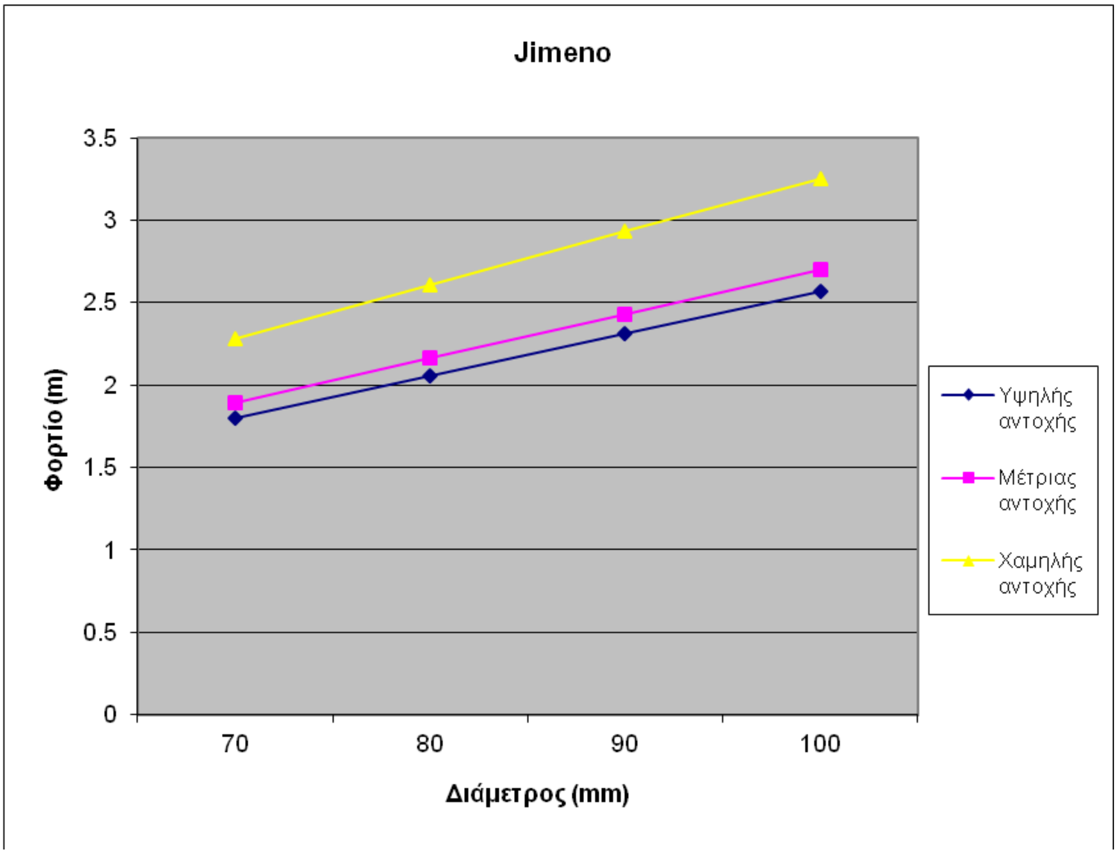
Σχ. 5.11 Εξίσωση Ash.

Στο διάγραμμα 5.12 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Langefors για διάμετρο διατρημάτων 70-100mm, σχέση απόστασης διατρημάτων προς φορτίο S/B=1.5, ειδικό βάρος του ANFO ρ_e=0.84kg/dm^3 (0.84 g/cm^3), σχετική ισχύ κατά βάρος ANFO RWS=1, διάτρημα κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο f=1, ύψος διατρήματος 10m και , ειδική κατανάλωση εκρηκτικής ύλης c=0.35,0.26,0.17. Η τιμές για το c ελήφθησαν με παραδοχή για υψηλής (0.35) , μέτριας (0.26) και χαμηλής (0.17) αντοχής πετρώματα.



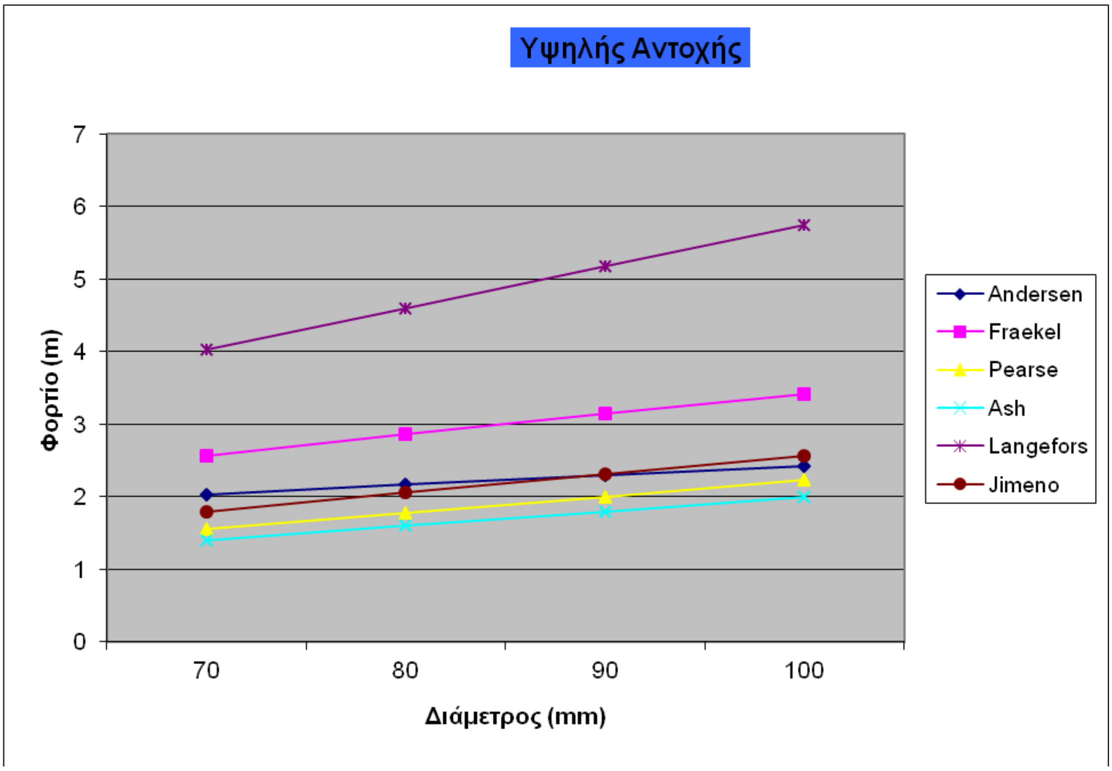
Σχ. 5.12 Εξίσωση Langefors.

Στο διάγραμμα 5.13 παρουσιάζεται το φορτίο με τη μέθοδο Jimeno για διάμετρο διατρημάτων 2.76-3.94in (70-100mm), ειδικό βάρος εκρηκτικού ρ_e=0.84g/cm^3 και ταχύτητα έκρηξης του εκρηκτικού (ANFO) VD=3600m/s. Χρησιμοποιήθηκαν ειδικό βάρος πετρώματος ρ_r=2.7g/cm^3, ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s για υψηλής αντοχής πέτρωμα, ειδικό βάρος πετρώματος ρ_r=2.7g/cm^3, ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=3600m/s για μέτριας αντοχής πέτρωμα και ειδικό βάρος πετρώματος ρ_r=2.3g/cm^3, ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=2400m/s για χαμηλής αντοχής πέτρωμα.

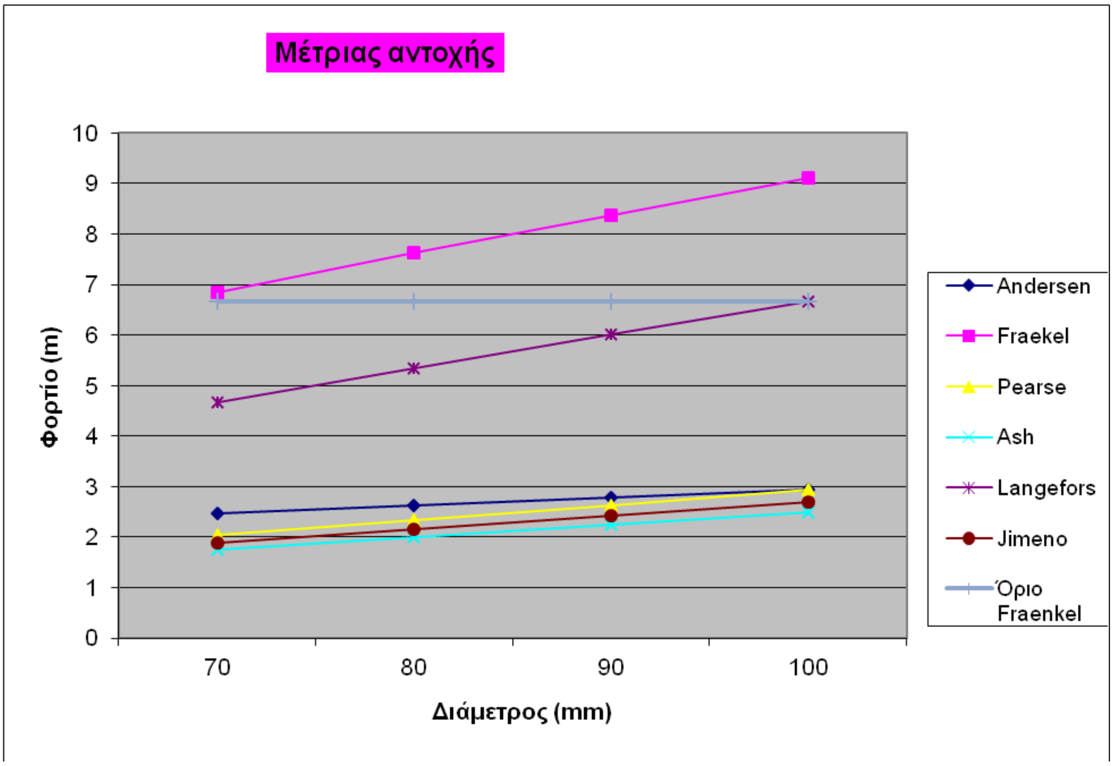


Σχ. 5.13 Εξίσωση Jimeno.

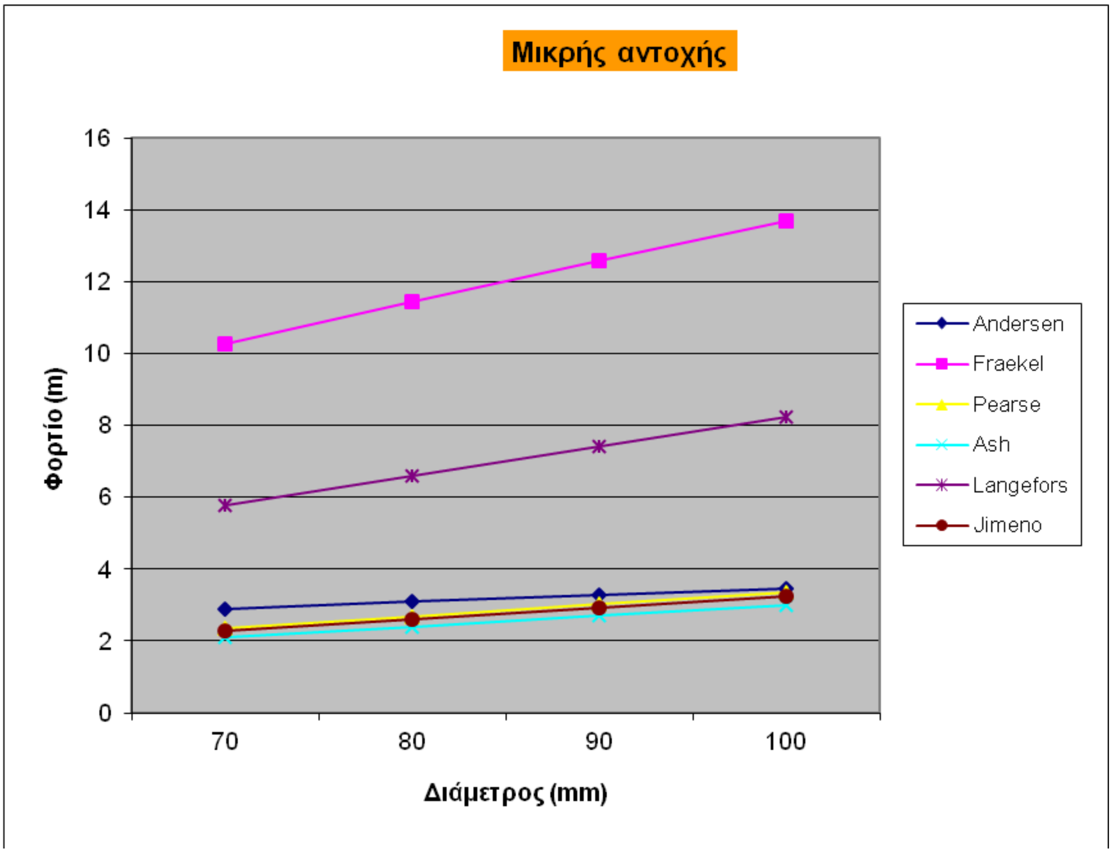
Στους παρακάτω πίνακες εμφανίζονται οι τιμές φορτίου όλων των μεθόδων για χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO για υψηλής αντοχής πέτρωμα (διάγραμμα 5.14), για μέτριας αντοχής πέτρωμα (διάγραμμα 5.15) και για χαμηλής αντοχής πέτρωμα (διάγραμμα 5.16).



Σχ. 5.14 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των μεθόδων για υψηλής αντοχής πέτρωμα.



Σχ. 5.15 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των μεθόδων για μέτριας αντοχής πέτρωμα.



Σχ. 5.16 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των μεθόδων για χαμηλής αντοχής πέτρωμα.

Οι τιμές φορτίου που προκύπτουν απο τις μέθόδους Ash, Pearse, Jimeno και Andersen έχουν διαφοροποίηση λιγότερης του ενός μέτρου για το μέτριας αντοχής πέτρωμα και λιγότερης των δύο μέτρων για μαλακό. Σε κάθε περίπτωση η Langefors ξεχωρίζει απο τις προηγούμενες με εμφανή αύξηση. Η Fraenkel είναι υπερβολικά ευαίσθητη στην αλλαγή τύπου πετρώματος και με κάθε μείωση της αντοχής του πετρώματος παρατηρείται τεράστια αύξηση της τιμής του φορτίου, με αποτέλεσμα να παίρνει ακραίες τιμές. Έτσι αντι της τιμής που προκύπτει μαθηματικά, χρησημοποιούμε τη μέγιστη των 2/3 του μήκους διατρήμματος που είχε θέσει ως όριο ο Fraenkel.

5.3 Διάμετρος διατρήματος, είδος πετρώματος και είδος εκρηκτικού

Επιλέχθηκαν τιμές διατρημάτων 70-100mm για χαμηλής, μέτριας και υψηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά τα ANFO και η ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder. Πιο συγκεκριμένα έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

Για υψηλής αντοχής πέτρωμα:

- Εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.7
- Συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση R_v =1.5
- Συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη K_b =20
- Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t = 1298 kg/m^2
- Ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης c=0,35
- Ειδικό βάρος του πετρώματος ρ_r =2,7 g/cm^3
- Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s

Για μέτριας αντοχής πέτρωμα:

- Εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.8
- Συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση R_v =4
- Συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη K_b =25
- Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t = 480 kg/m^2
- Ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης c=0,26
- Ειδικό βάρος του πετρώματος ρ_r =2,5 g/cm^3
- Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s

Για χαμηλής αντοχής πέτρωμα:

- Εμπειρική σταθερά πετρώματος K=0.1
- Συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση R_v =6
- Συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη K_b =30
- Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό σ_t = 280 kg/m^2
- Ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης c=0,17

- Ειδικό βάρος του πετρώματος ρ_r =2,7 g/cm^3
- Ταχύτητα διάδοσης σεισμικού κύματος στο πέτρωμα VC=4200m/s

Καθώς επίσης και:

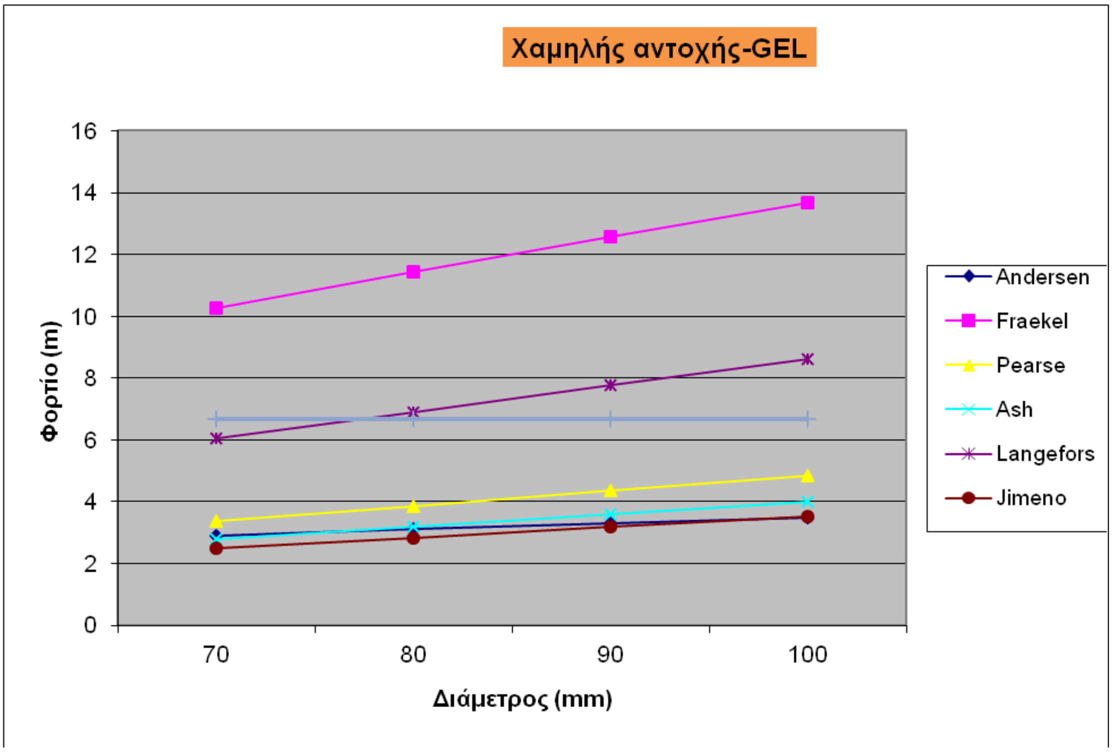
Για χρησιμοποιούμενο εκρηκτικο το ANFO:

- Ειδικό βάρος του ANFO ρ_e =0.84 g/cm^3
- Σχετική ισχύς κατα βάρος ANFO RWS=1
- Ταχύτητα έκρηξης ANFO VD=3600 m/s
- Πίεση έκρηξης ANFO P_d =45275 kg/m^2

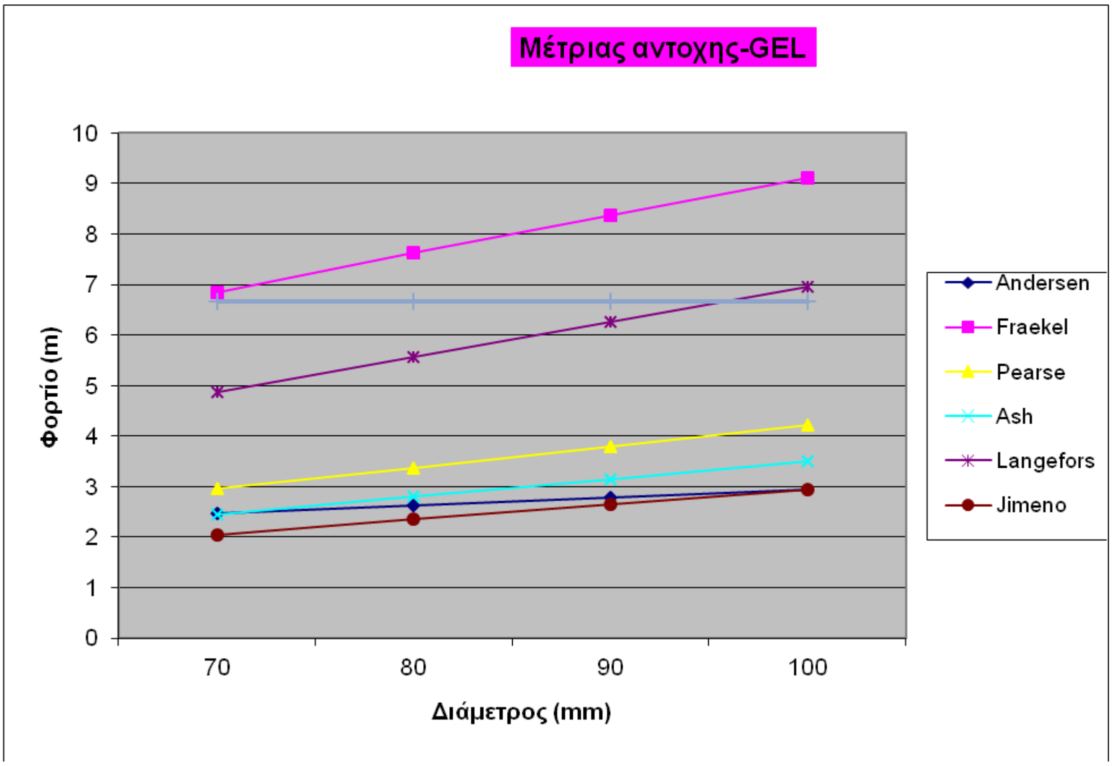
Χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό η ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder:

- Ειδικό βάρος ζελατοδυναμίτιδας ρ_e =1.43 g/cm^3
- Σχετική ισχύς κατα βάρος ζελατοδυναμίτιδας RWS=1.15
- Πίεση έκρηξης ζελατοδυναμίτιδας P_d = 93813.9 kg/m^2
- Ταχύτητα έκρηξης ζελατοδυναμίτιδας VD=5400 m/s

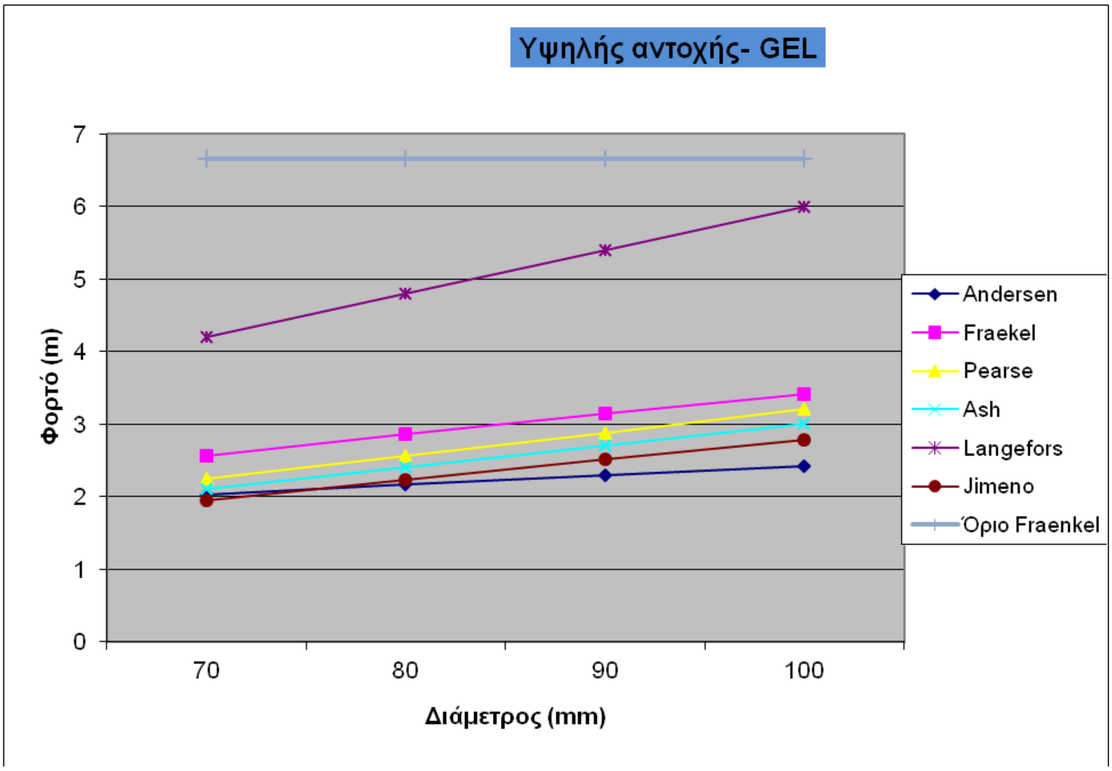
Παρακάτω εμφανίζονται οι τιμές φορτίου όλων των μεθόδων για χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό τη ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder για χαμηλής αντοχής πέτρωμα (διάγραμμα 5.17), για μέτριας αντοχής πέτρωμα (διάγραμμα 5.18) και για υψηλής αντοχής πέτρωμα (διάγραμμα 5.19). Τα χαρακτηριστικά του εκρηκτικού είναι ειδικό βάρος ρ_e =1.43 g/cm^3, σχετική ισχύς κατα βάρος RWS=1.15, πίεση έκρηξης P_d=93813.9 kg/m^2 και ταχύτητα έκρηξης VD=5400 m/s.



Σχ. 5.17 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των μεθόδων για χαμηλής αντοχής πέτρωμα και ζελατοδυναμίτιδα.

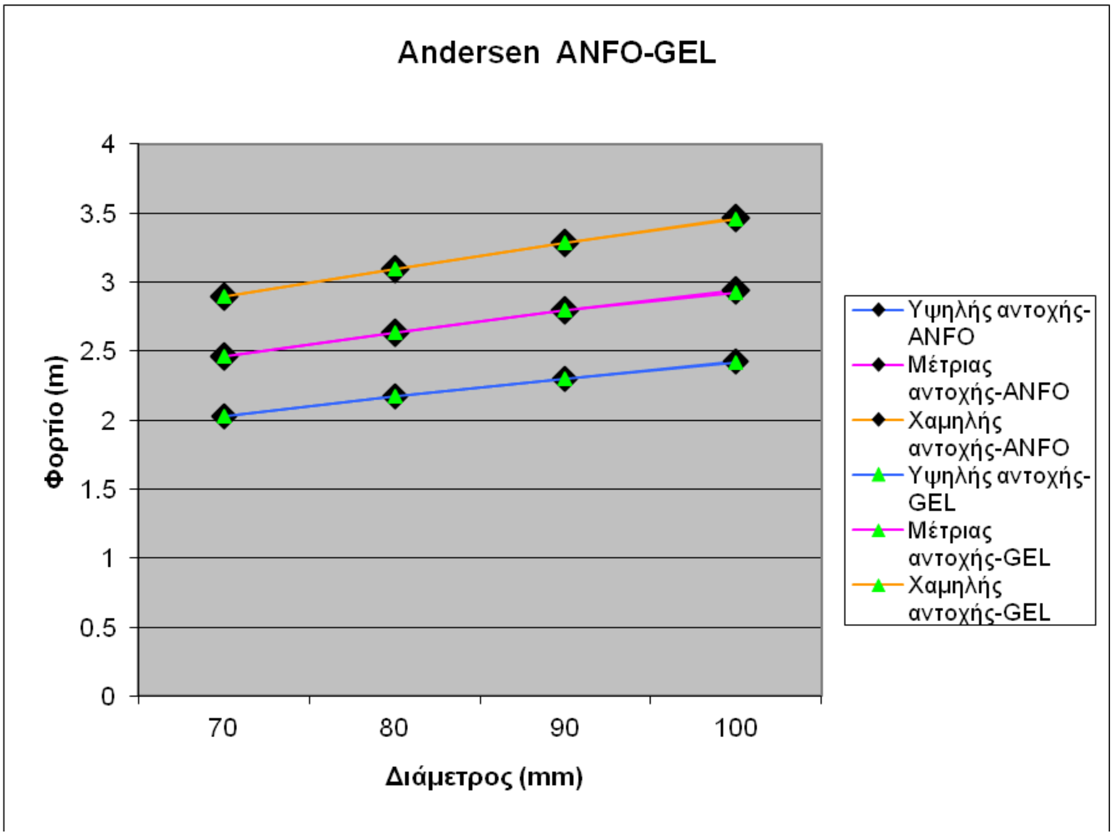


Σχ. 5.18 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των μεθόδων για μέτριας αντοχής πέτρωμα και ζελατοδυναμίτιδα.



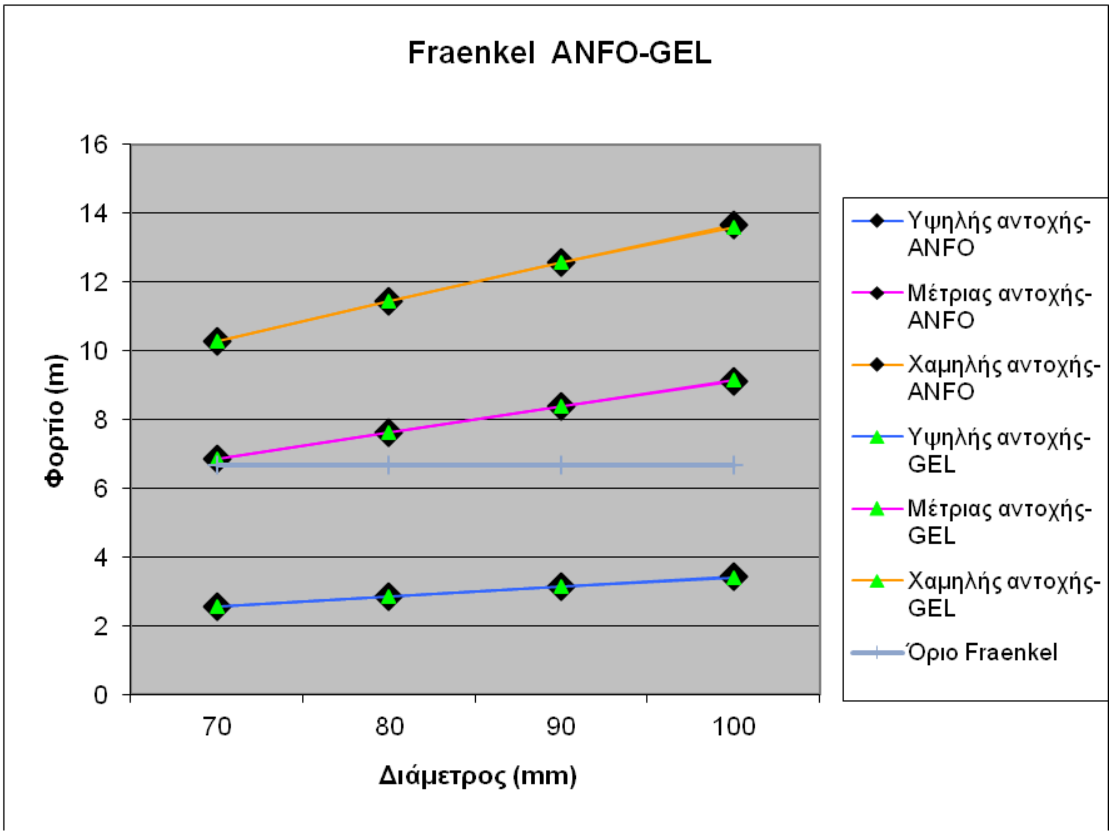
Σχ. 5.19 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των μεθόδων για υψηλής αντοχής πέτρωμα και ζελατοδυναμίτιδα.

Στο διάγραμμα 5.20 παρουσιάζονται οι τιμές φορτίου με τη μέθοδο Andersen για υψηλής, μέτριας και χαμηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO και τη ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder. Τα γραφήματα ίδιας αντοχής για τα δύο εκρηκτικά ταυτίζονται.



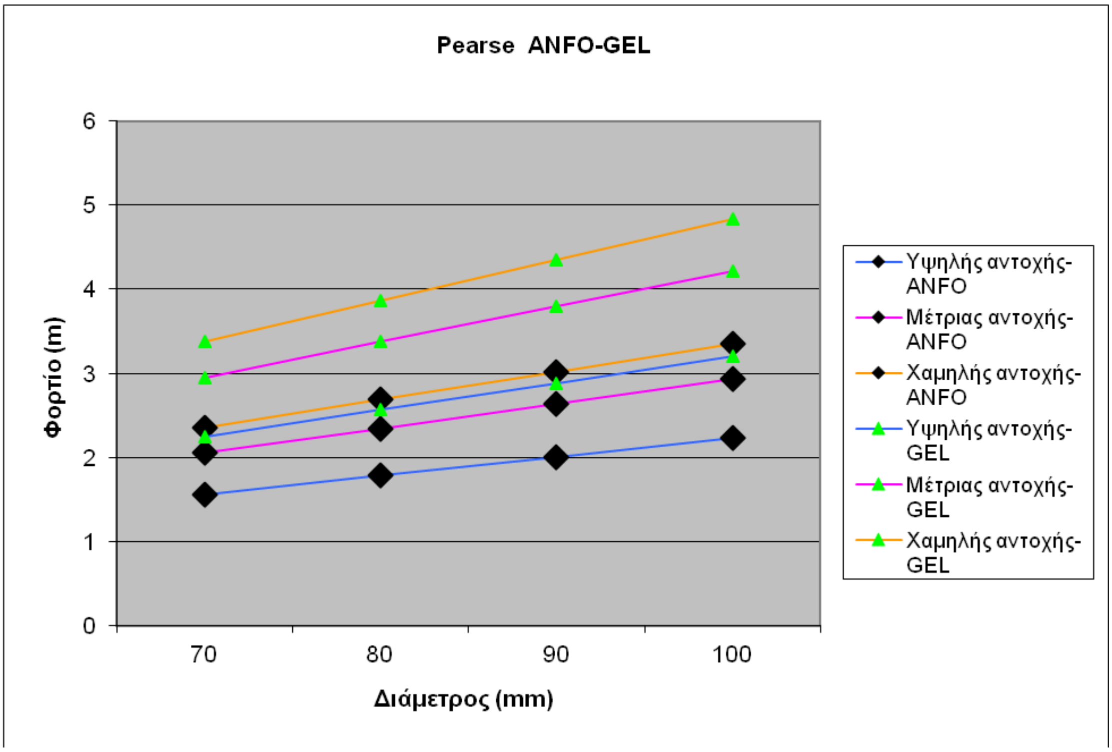
Σχ. 5.20 Συγκριτικό διάγραμμα Andersen για τους τρεις τύπους πετρώματος και δύο τύπους εκρηκτικών.

Στο διάγραμμα 5.21 παρουσιάζονται οι τιμές φορτίου με τη μέθοδο Fraenkel για υψηλής, μέτριας και χαμηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO και τη ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder. Τα γραφήματα ίδιας αντοχής για τα δύο εκρηκτικά ταυτίζονται.



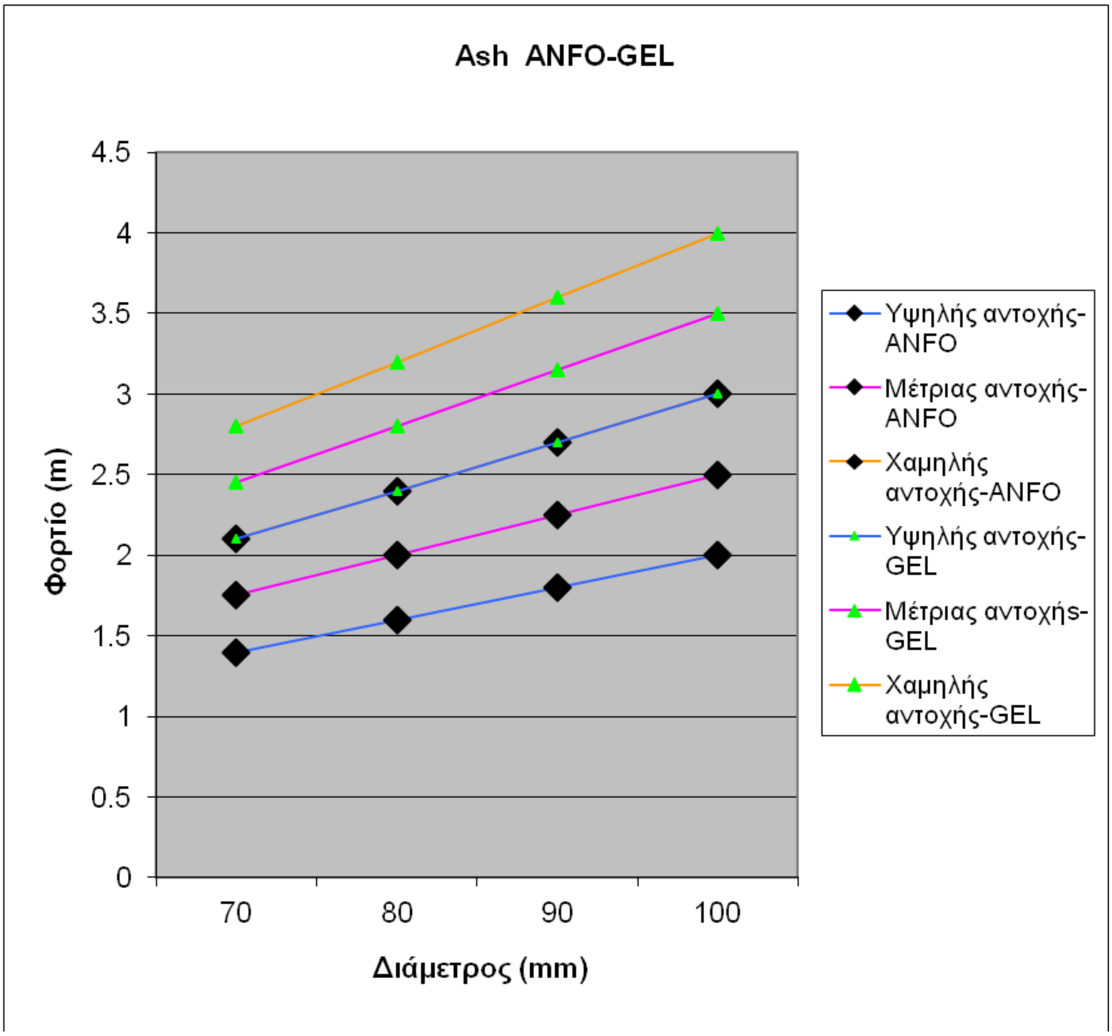
Σχ. 5.21 Συγκριτικό διάγραμμα Fraenkel για τους τρεις τύπους πετρώματος και δύο τύπους εκρηκτικών.

Στο διάγραμμα 5.22 παρουσιάζονται οι τιμές φορτίου με τη μέθοδο Pearse για υψηλής, μέτριας και χαμηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO και τη ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder.



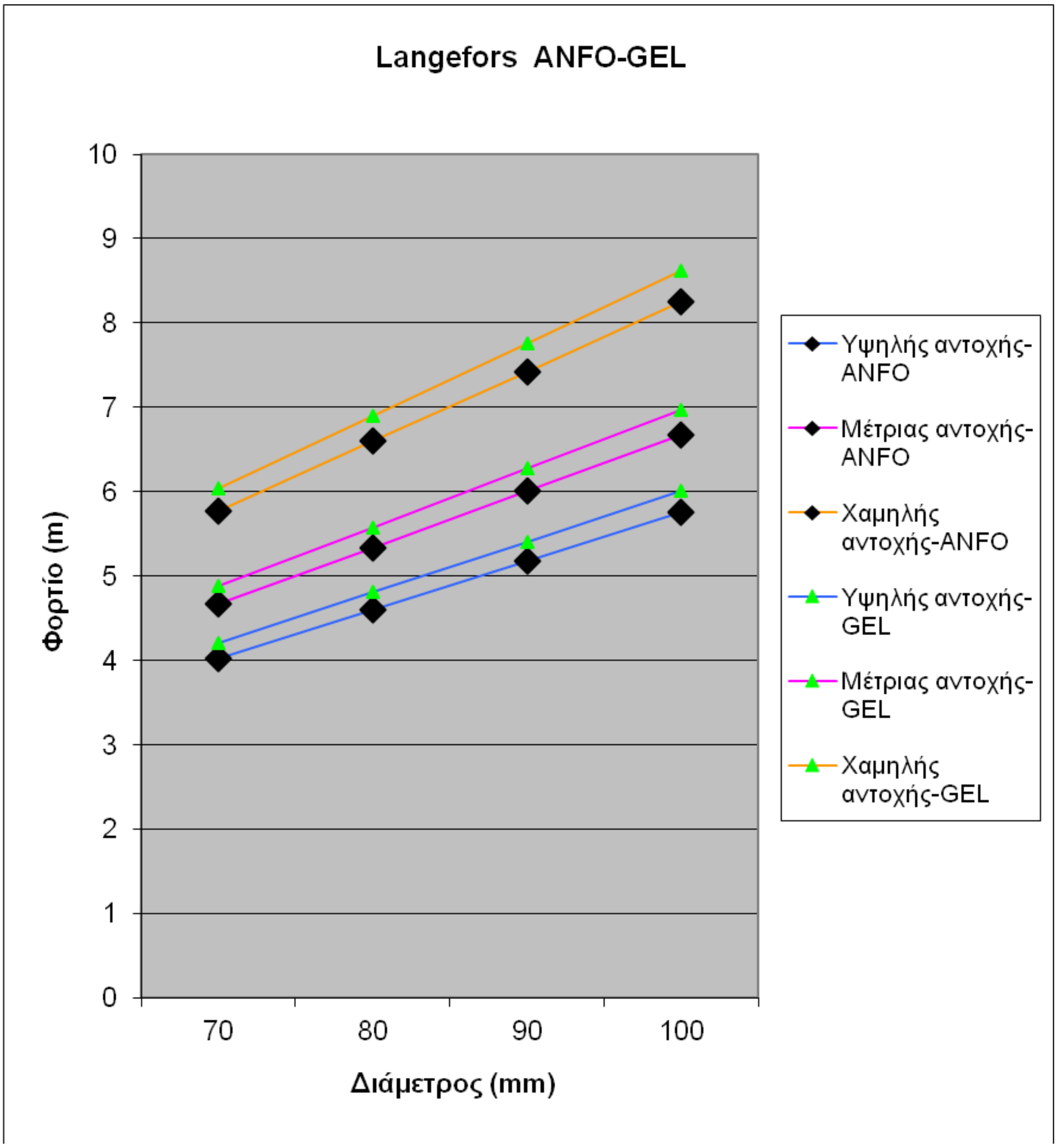
Σχ. 5.22 Συγκριτικό διάγραμμα Pearse για τους τρεις τύπους πετρώματος και δύο τύπους εκρηκτικών.

Στο διάγραμμα 5.23 παρουσιάζονται οι τιμές φορτίου με τη μέθοδο Ash για υψηλής, μέτριας και χαμηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO και τη ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder.



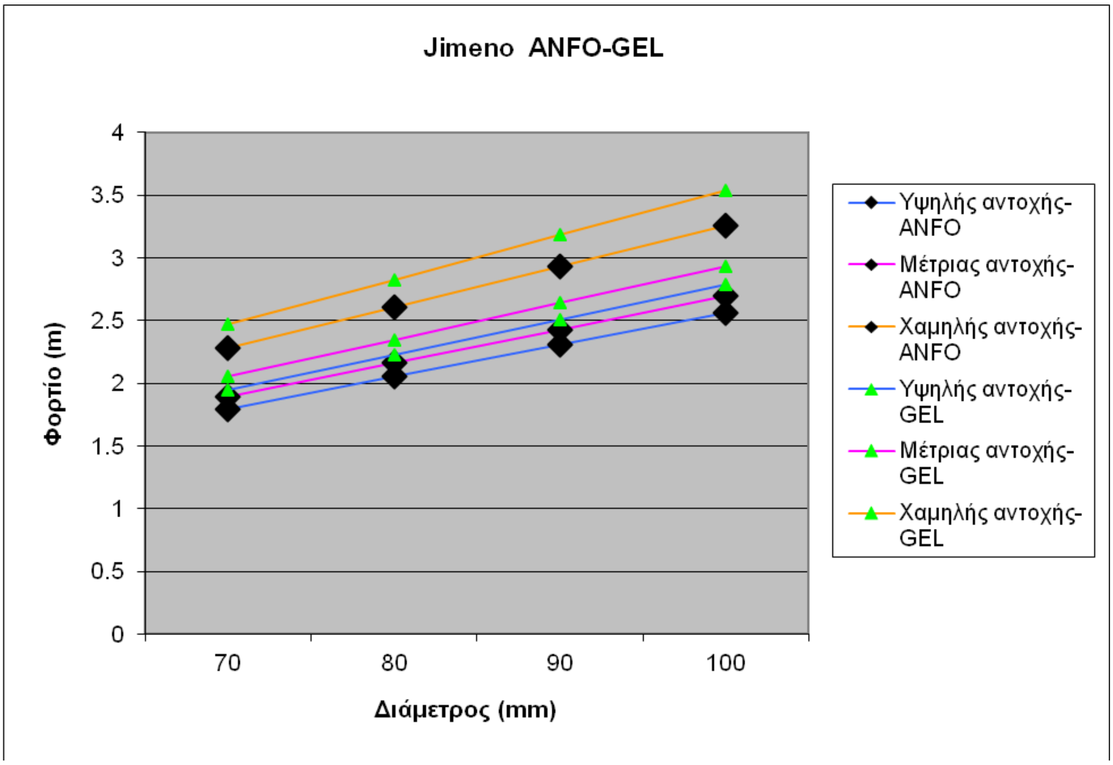
Σχ. 5.23 Συγκριτικό διάγραμμα Ash για τους τρεις τύπους πετρώματος και δύο τύπους εκρηκτικών.

Στο διάγραμμα 5.24 παρουσιάζονται οι τιμές φορτίου με τη μέθοδο Langefors για υψηλής, μέτριας και χαμηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO και τη ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder.



Σχ. 5.24 Συγκριτικό διάγραμμα Langefors για τους τρεις τύπους πετρώματος και δύο τύπους εκρηκτικών.

Στο διάγραμμα 5.25 παρουσιάζονται οι τιμές φορτίου με τη μέθοδο Jimeno για υψηλής, μέτριας και χαμηλής αντοχής πετρώματα με χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό το ANFO και τη ζελατοδυναμίτιδα 60% Extra Gelatin της εταιρίας Austin Powder.



Σχ. 5.25 Συγκριτικό διάγραμμα Jimeno για τους τρεις τύπους πετρώματος και δύο τύπους εκρηκτικών.

Στα διαγράμματα Andersen και Fraenkel δεν παρατηρείται διαφοροποίηση των τιμών φορτίου ίδιας αντοχής ανάμεσα στους τύπους εκρηκτικών πράγμα αναμενόμενο εφόσον οι εξισώσεις τους δεν το λαμβάνουν υπ’ όψην.

Πίνακας 5.1 Αύξηση του φορτίου σε m με εναλλαγή εκρηκτικής ύλης απο ANFO σε ζελατοδιναμίτιδα

Διαφορά φορτίου GEL-ANFO (m)					
d (mm)	**Pearse**	**Ash**	**Lang**	**Jimeno**	Πέτρωμα
70	0,69	0,7	1,63	0,53	Σκληρό
80	0,79	0,8	1,87	0,6	
90	0,89	0,9	2,1	0,68	
100	0,98	1	2,33	0,76	
70	0,9	0,7	1,9	0,62	Μέτριο
80	1,03	0,8	2,16	0,71	
90	1,16	0,9	2,43	0,8	
100	1,29	1	2,7	0,89	
70	1,03	0,7	2,34	0,67	Μαλακό
80	1,18	0,8	2,67	0,77	
90	1,33	0,9	3	0,86	
100	1,48	1	3,35	0,96	

Από τις υπόλοιπες μεθόδους οι Pearse, Ash και Jimeno παρουσιάζουν διαφορές της τάξης του 0,5 ως 1,5 m, ενώ η Langefors από 1,6 ως 3,3 m επιδεικνύοντας τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην αλλαγή εκρηκτικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Ο υπολογισμός (εκτίμηση) του φορτίου σε μια ανατίναξη είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Αυτό συμβαίνει γιατί σε καθε περίπτωση υπάρχει μεγάλος αριθμός παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη καθώς και διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού του φορτίου.

Αρχικά λοιπόν χρειάζεται να γίνει επι τόπου αξιολόγηση του προς ανατίναξη σχηματισμού και συγκεκριμένα να προσδιοριστούν οι φυσικές και μηχανικές παράμετροι που το χαρακτηρίζουν (όπως για παράδειγμα η αντοχή σε εφελκυσμό, το μοναδιαίο βάρος και η ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων) και η ύπαρξη τυχόν ασυνεχειών η διακλασεων. Η αξιολόγηση αυτή μπορεί να γίνει με επι τόπου μετρήσεις και δειγματοληψία καθώς και εργαστηριακές δοκιμές.

Επιπλέον πρέπει να προσδιοριστεί μια άλλη ομάδα παραμέτρων οι οποίες προκύπτουν από την επιλογή της γεωμετρίας της ανατίναξης και του εκρηκτικού, όπως η διάμετρος του διατρήματος, το μήκος του διατρήματος, το ύψος γόμωσης, η κλίση του διατρήματος, η σχέση της απόστασης διατρημάτων προς φορτίο, η πυκνότητα, η πίεση έκρηξης και η ισχύς του εκρηκτικού.

Στη συνέχεια, και για καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος, συνήθως γίνεται ένας πρώτος υπολογισμός του φορτίου με όλες τις διαθέσιμές μεθόδους, όπου πρέπει να ληφθούν υπ’ όψην οι ιδιαιτερότητες κάθε μεθόδου ενώ υπάρχει περίπτωση κάποιες να μην ενδείκνυνται για τη μελετούμενη περίπτωση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού του φορτίου σε μια επιφανειακή ανατίναξη των Andersen, Fraenkel, Ash, Pearse, Langefors και Jimeno. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε κάθε μέθοδο.

Πίνακας 6.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των μεθόδων ως προς τις παραμέτρους που χρησιμοποιούν.

	Andersen	Fraenkel	Pearse	Ash	Langefors	Jimeno
Διάμετρος διατρήματος	X	X	X	X	X	X
Ύψος διατρήματος	X	X				
Ύψος εκρηκτικής στήλης		X				
Κλίση διατρήματος					X	
Πυκνότητα πετρώματος						X
Αντοχη πετρώματος σε θλίψη ή ανάλογος συντελεστής		X	X			
Συντελεστές για το πέτρωμα	X		X	X	X	
Διάδοση σεισμικών κυμάτων στο πέτρωμα						X
Πυκνότητα εκρηκτικού				X	X	X
Ταχύτητα έκρηξης				X		X
Πίεση έκρηξης			X			
Σχέση φορτίου/απόστασης διατρημάτων					X	
Σχετική ισχύς κατα βάρος εκρηκτικού					X	

Οι μέθοδοι αυτές συγκρίθηκαν ως προς το φορτίο που δίδουν για διάφορες τιμές διαμέτρου διατρήματος, τύπου πετρώματος και τύπου εκρηκτικού. Από την παραμετρική ανάλυση εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Οι μέθοδοι Andersen, Ash, Pearse και Jimeno δίνουν παραπλήσιες τιμές φορτίου σε κάθε περίπτωση.
- Η μέθοδος Ash δίνει κατά μέσο όρο τις μικρότερες τιμές φορτίου απ’ όλες τις μεθόδους.

- Η μέθοδος Langefors αποκλίνει από την ομάδα των Andersen, Ash, Pearse και Jimeno με εμφανή αύξηση τιμής φορτίου σε όλες τις περιπτώσεις.
- Η μέθοδος Langefors έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην αλλαγή εκρηκτικού.
- Η μέθοδος Fraenkel για σκληρά πετρώματα έχει μια μικρή αύξηση τιμής φορτίου σε σχέση με την ομάδα των Andersen, Ash, Pearse και Jimeno.
- Η μέθοδος Fraenkel για μέτριας και χαμηλής αντοχής πετρώματα αποκλίνει από την ομάδα των Andersen, Ash, Pearse και Jimeno με εμφανή αύξηση τιμής φορτίου.
- Η μέθοδος Jimeno παρόλο που αναπτύχθηκε για μεγάλες διαμέτρους (165-250mm) διατρήματος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και για πολύ μικρότερες (60-100mm).
- Η μέθοδος Langefors έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία όσον αφορά τη μεταβλητή διάμετρο του διατρήματος.
- Η μέθοδος Andersen έχει τη μικρότερη ευαισθησία όσον αφορά τη μεταβλητή διάμετρο του διατρήματος.

6.2 Προτάσεις

Είναι σημαντικό να γίνεται συνεχής αξιολόγηση του σχεδιασμού ανατίναξης με βάση το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται κάθε φορά, καθώς και διορθωτικές κινήσεις όπου απαιτούνται, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις της παραγωγής.

Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού φορτίου προτείνονται τα ακόλουθα:

- Μετρήσεις κατά την εφαρμογή της κάθε μεθόδου για τον ακριβή προσδιορισμό των παρακάτω εμπειρικών συντελεστών ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται και ανάλογα με τη διάμετρο του διατρήματος, τον τύπο πετρώματος και το είδος εκρηκτικού:
  - K= εμπειρική σταθερά ανάλογα τον τύπο του πετρώματος (Andersen, Pearse),
  - R_v= συντελεστής αντίστασης του πετρώματος στη θραύση (Fraenkel),
  - K_b= συντελεστής ανάλογα το πέτρωμα και την εκρηκτική ύλη (Ash),
  - c= ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης (Langefors).

- Μελετη των μεθόδων με αλλαγή των παραμέτρων με βάση τη μέθοδο συστηματικού σχεδιασμού (Design of Experiment).
- Έλεγχος της αποτελεσματικότητας κάθε μεθόδου με πειραματικές ανατινάξεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία:

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Στοιχεία Διάτρησης – Ανατίναξης. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.σελ. 229

2. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.σελ. 285

3. Σοφιανός Α. (2008). Σχεδιασμός Υπογείων Έργων. Ε.Μ.Π. Αθήνα.

4. Τσουτρέλης, Χ. (1997). Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων, Τόμος 1, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.σελ. 457.

5. Τσουτρέλης, Χ. (2001). Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων, Τόμος 2, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.σελ. 417.

Διεθνής βιβλιογραφία:

6. Abegg M.T. and Fisher H.J. and Lawton H.C.and Weatherill W.T. (1974). Low detonation pressure explosives, New Mexico. p. 490.

7. Andersen O. (1952). Blast Hole Burden Design. Introducing a Formula.

8. Afrouz A., Hassani F.P. and Ucar R. (1988). An investigation into blasting design for mining excavations. Mining Science and Technology, 7 45-62. Amsterdam.

9. Agne Rustan, (1998). Rock Blasting Terms and Symbols: A Dictionary of Symbols and Terms in Rock Blasting and Related Areas like Drilling, Mining and Rock Mechanics.pp 510.

10. Ashutoh Mishra (2009). Design of surface blasts - A computational approach, Bachelor of Technology in Mining Engineering, Rourkela.

11. Carlos Lopez Jimeno, Emilio Lopez Jimeno and Francisco Javier Ayala Carcedo. (1995). Drilling and blasting of rocks.pp. 389.

12. Fahrang Sereshki and Mohammad Ataei and Seyed Hadi Hoseinie. (2010). Comparison and analysis of burden design methods in blasting: a case study on Sungun copper mine in Iran.
13. Fraenkel K. H. (1953). Manual on Rock Blasting. Stockholm.p. 535
14. Hustrulid W. A. (1999). Blasting Principles for Open Pit Mining.p 636.
15. Holmberg R. (2000). Explosives and blasting technique. Germany, Munich.
16. Kaushik Dey and Phalguni Sen. (1992). Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms, Hacettepe University Department of Mining Engineering, India.
17. Kaushik Dey & Phalguni Sen. (2003). The indian mining and engineering journal, Vol-42, No.-8&9. Archived in http://dspace.nitrkl.ac.in:8080/dspace.
18. Vlastimir D. Pavlović, Zoran S. Veličković. (1998). Measurment of the seismic waves propagation velocity in the real medium. Facta Universatis, Physics, Chemistry and Technology Vol. 1, No 5, 1998 pp. 63 – 73. Yugoslavia.

Διαδικτυακές πηγές:

19. Blasting and Explosives Quick Reference Guide (2010), http://apac.dynonobel.com/files/2010/02/dyno-blasters-handbook-v4.pdf
20. Coal Mining Questions and Answers. (2003). Yangon Technological Uiversity Department of Mining Engineering, Yangon.
21. Global Security. http://www.globalsecurity.org/index.html
22. National Technical University of Athens. Laboratory of Geomaterials. http://geolab.mechan.ntua.gr/
23. Hurst G. L. (1999). Detonation velocity and pressure, http://yarchive.net/explosives/detonation_pressure.html