



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**«Παράμετροι που επηρεάζουν τον θρυμματισμό του
πετρώματος κατά την εξόρυξη του με εκρηκτικές ύλες»**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αλέξανδρος Βουλγαράκης

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΓΙΚΗΣ

**«Παράμετροι που επηρεάζουν τον θρυμματισμό του
πετρώματος κατά την εξόρυξη του με εκρηκτικές ύλες»**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αλέξανδρος Βουλγαράκης

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός, Ε.Μ.Π.

Συμβουλευτική επιτροπή: Γ.Ν. Παναγιώτου, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)

Κ. Τσακαλάκης, Καθ. Ε.Μ.Π.

Θ. Μιχαλακόπουλος, Επίκ. Καθ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή στις	/	/
Γ.Ν. Παναγιώτου, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)		
Κ. Τσακαλάκης, Καθ. Ε.Μ.Π.		
Θ. Μιχαλακόπουλος, Επίκ. Καθ. Ε.Μ.Π.		
Α. Σοφριανός, Καθ. Ε.Μ.Π.		
Γ. Τσιαμπάος, Καθ. Ε.Μ.Π.		
Α. Μπενάρδος, Επίκ. Καθ. Ε.Μ.Π.		
Π. Νομικός, Επίκ. Καθ. Ε.Μ.Π.		

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2014

Copyright © Αλέξανδρος Βουλγαράκης, 2014
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Στους γονείς μου,

στην αδερφή μου,

στην Γκέλη,

στον Πλάτωνα...

Περίληψη

Η εξόρυξη των πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών αποσκοπεί στην κατάτμηση του επιτόπου πετρώματος σε τεμάχια μικρότερου μεγέθους, την μετακίνηση του από την φυσική του θέση και την απόθεση του υπό την μορφή σωρού μπροστά από το νέο μέτωπο. Κατά τον σχεδιασμό ανατινάξεων πλήρους κλίμακας, ιδιαίτερη βαρύτητα πρέπει να δίνεται στην προσαρμογή της κοκκομετρίας των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία των εργασιών φόρτωσης, μεταφοράς και θραύσης, που έπονται της ανατίναξης. Αντικειμενικός στόχος είναι η επίτευξη της μεγίστης δυνατής παραγωγής επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα το ελάχιστο δυνατό κόστος. Ως εκ τούτου, η λειτουργία μιας εξορυκτικής επιχείρησης κρίνεται επιτυχημένη, όταν το ύψος της παραγωγής βρίσκεται εντός του επιθυμητού στόχου και το κόστος υλοποίησης των επιμέρους διεργασιών δεν ξεπερνά τον οικονομικό προϋπολογισμό.

Η ύπαρξη μιας τεχνικής ελέγχου της κοκκομετρικής κατανομής που πρόκειται να επιτευχθεί έπειτα από την πραγματοποίηση μιας ανατίναξης, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τον μηχανικό που τις σχεδιάζει. Η δυνατότητα άμεσης και αποτελεσματικής εκτίμησης της ορθότητας των τιμών που έχουν επιλεγεί για κάθε μια από τις παραμέτρους που ορίζουν ένα σχέδιο ανατίναξης, συντελεί στη συσχέτιση της συνολικής παραγωγικότητας του μεταλλείου/λατομείου με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε μετώπου.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής καταγράφηκαν τα δεδομένα δέκα ανατινάξεων πλήρους κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στο λατομείο ασβεστολίθου Μάνδρας Αττικής, της Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε. Μελετώντας τα δεδομένα αυτά, προέκυψαν συσχετίσεις αναφορικά με τον τρόπο αλληλεπίδρασης των διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με την εξόρυξη του πετρώματος με χρήση εκρηκτικών υλών και δημιουργήθηκαν σχέσεις για τον υπολογισμό του μεγέθους τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (x_{50}) αλλά και ολόκληρης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος. Εν συνεχεία, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της διαστασιακής ανάλυσης δημιουργήθηκε μια σχέση υπολογισμού του λόγου κατάτμησης RR_{50} , συναρτήσεως του ελάχιστου χρόνου απόκρισης του μετώπου (T_{min}), της ειδικής κατανάλωσης της εκρηκτικής ύλης (q) και της τιμής του «τοπικού» φορτίου (B_L). Τέλος, αποσκοπώντας στη διαχείριση της αβεβαιότητας που εμπεριέχεται στους υπολογισμούς

που πραγματοποιούνται μέσω των ντετερμινιστών εξισώσεων των μαθηματικών μοντέλων εκτίμησης που κατά καιρούς έχουν προταθεί, μελετήθηκαν μια σειρά από υποθετικά σενάρια με τη βοήθεια της μεθόδου πιθανολογικής προσομοίωσης Monte Carlo.

Μέσω της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, κατέστη εφικτή η δημιουργία ενός εργαλείου εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, προσαρμοσμένου στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των λατομείων ασβεστολίθου. Το εργαλείο αυτό παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής της κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής, συνεισφέροντας με τον τρόπο αυτό την αποδοτικότερη και ταυτόχρονα οικονομικότερη λειτουργία όλων των διεργασιών που έπονται μιας ανατίναξης.

Abstract

The purpose of rock blasting operations is to transform in situ rock mass into the blasted rock of a muckpile. While designing large scale blasting operations, great consideration should be given to tailor the degree of fragmentation in order to fulfill the requirements of production, ensuring at the same time the efficient and economical operation of loading, hauling, crushing and grinding circuits. The main objective is to achieve both, maximum productivity and cost effectiveness. Such an operation is considered successful, as long as production target is met, retaining at the same time the cost of all downstream processes within budget.

Controlling the degree of rock fragmentation is of major importance for the explosives engineer. Direct and efficient evaluation of the blast design parameters allows the correlation of fragmentation and the achieved productivity with the specific properties of each blasting domain.

For the purposes of the present Ph.D thesis, ten large scale blasting rounds conducted in Halyps' Building Materials S.A. limestone quarry, were monitored. The collected data were used to create bivariate correlations, concerning the interaction between the various parameters that determine fragmentation by blasting. Equations for the calculation of blasted rock passing size x_{50} , as well as for the construction of the whole fragment size distribution, were created. Further processing of the collected data using the engineering tool of dimensional analysis resulted in the establishment of a mathematical relation for the calculation of the 50% cumulative's passing reduction ratio (RR_{50}), as a function of the minimum response time (T_{min}), the powder factor (q) and the "local" burden of the blasthole (B_L). Finally, a stochastic modeling technique using the Monte Carlo simulation technique was implemented for a number of blast design scenarios, in order to quantify the associated changes on the fragment size distribution of the muckpile.

Through the methodology introduced in this thesis, it was made possible to develop a tool for the estimation of the size distribution of blasted rock, based on the particular characteristics of limestone quarries, contributing in the efficient operation of all the downstream processes.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γ.Ν. Παναγιώτου, δίχως τις γνώσεις και την ουσιαστική καθοδήγηση του οποίου θα ήταν αδύνατη η επιτυχής ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκ. Καθηγητή κ. Θ. Μιχαλακόπουλο και τον Καθηγητή κ. Κ. Τσακαλάκη, μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για την στενή συνεργασία και τις πολύτιμες συμβουλές τους καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστώ τον Καθ. κ. Α. Σοφιανό, τον Καθ. κ. Γ. Τσιαμπάο, τον Επίκ. Καθ. κ. Α. Μπενάρδο και τον Επίκ. Καθ. κ. Π. Νομικό για την προθυμία τους να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την διεύθυνση της εταιρίας Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε. που επέτρεψε την πραγματοποίηση μετρήσεων για την καταγραφή δεδομένων από τις ανατινάξεις πλήρους κλίμακας στο λατομείο ασβεστολίθου, το οποίο βρίσκεται στη θέση Κεραμιδέζα στη Μάνδρα Αττικής. Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Π. Πετροχείλου, Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργό της εταιρίας Βασιλική Τσοκανή Α.Ε., εργολάβο εξόρυξης του ανωτέρω λατομείου, για την υπομονή της και τις διευκολύνσεις που μου προσέφερε κατά την διαδικασία καταγραφής των δεδομένων των ανατινάξεων καθώς και τους εργαζόμενους στο λατομείο για την πολύτιμη βοήθεια τους.

Ευχαριστώ το προσωπικό του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων και ιδιαίτερα τον κ. Εμ. Τσιαβό, Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργό, Ε.Τ.Ε.Π., που με τις γνώσεις του στον χειρισμό των εξειδικευμένων συσκευών που διαθέτει το εργαστήριο συνέβαλε καθοριστικά στην διαδικασία της καταγραφής των δεδομένων των ανατινάξεων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Αντώνη, τον Μιχάλη, τον Γιώργο και τον Βασίλη για την συμπαράσταση και το ενδιαφέρον τους.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη, την αδιάκοπη στήριξη και κατανόηση, εκφράζεται στους γονείς μου, οι οποίοι μου έμαθαν να αγωνίζομαι με αξιοπρέπεια, στην αδερφή μου και στην Γκέλη.

Τέλος, ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας του Ε.Μ.Π, για την οικονομική στήριξη που μου παρείχε επί 3 έτη με την χορήγηση υποτροφίας για την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

.

Αλέξανδρος Βουλγαράκης

Ιούλιος 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	III
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	4
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	15
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 Εξόρυξη πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών	19
1.2 Αντικειμενικός στόχος της ανατίναξης των πετρωμάτων	20
1.3 Σκοπός της διατριβής.....	21
1.4 Μεθοδολογία εργασίας.....	23
1.5 Δομή της διατριβής	24
1.6 Παραδοχές.....	25
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ.....	26
2.1 Εξόρυξη πετρωμάτων	26
2.2 Μηχανισμός θραύσης του πετρώματος	28
2.2.1 Γενικές θεωρίες θραύσης.....	28
2.2.2 Θραύση του πετρώματος με τη χρήση εκρηκτικών υλών	31
2.2.3 Ιδιότητες του πετρώματος	45
2.2.4 Μακροδομή του πετρώματος	49
2.2.5 Μικροδομή του πετρώματος	50
2.3 Το κόστος του μεγέθους.....	51
2.3.1 Γενικά	51
2.3.2 Βέλτιστη ανατίναξη	56
2.4 Μοντέλα εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής.....	60
2.4.1 Το μοντέλο εκτίμησης Kuz-Ram.....	62

2.4.2	Τα μοντέλα εκτίμησης του JKMRC	69
2.4.3	Η εξίσωση Swabrec και το μοντέλο εκτίμησης KCO	76
2.4.4	Σύγκριση των μοντέλων εκτίμησης.....	83
2.5	Λογισμικά επεξεργασίας εικόνων	85
2.5.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των λογισμικών επεξεργασίας εικόνων	86
2.5.2	Τεχνική ανάλυσης φωτογραφιών	89
2.5.3	Αιτίες πρόκλησης σφαλμάτων.....	93
2.5.4	Διαφορά μεταξύ της «ακρίβειας» και της «συνέπειας» ενός υπολογισμού	96
3	ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ – ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΤΗΣ ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε. ...	99
3.1	Γενικά	99
3.2	Γεωλογία του λατομικού χώρου.....	99
3.3	Χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης.....	101
3.4	Μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης του ANFO εντός διατρήματος.....	119
3.5	Καταγραφή αποτελεσμάτων των ανατινάξεων.....	123
3.5.1	Εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των in situ τεμαχίων πετρώματος.....	123
3.5.2	Βιντεοσκόπηση των ανατινάξεων με τη βοήθεια κάμερας ταχείας λήψεως	127
3.5.3	Εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος.....	135
4	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΕΞΟΡΥΓΜΕΝΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	140
4.1	Γενικά	140
4.2	Εκτίμηση κοκκομετρίας με τη χρήση των μοντέλων Kuz-Ram και KCO..	141
4.3	Κατασκευή της κοκκομετρικής κατανομής.....	153
4.4	Συσχέτιση παραμέτρων.....	168

5 ΔΙΑΣΤΑΣΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	175
5.1 Εισαγωγή.....	175
5.2 Ανάλυση.....	179
6 ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	188
6.1 Μέθοδος Monte Carlo.....	188
6.2 Προσομοίωση.....	189
6.3 Κατασκευή Μοντέλου.....	191
6.4 Προσδιορισμός των στατιστικών κατανομών των εισόδων του μοντέλου. .	195
6.5 Ανάλυση δεδομένων των σεναρίων προσομοίωσης.....	203
6.6 Προσομοιώσεις	205
6.6.1 Επίδραση του λόγου H/B	205
6.6.2 Επίδραση του λόγου B/d	209
6.6.3 Επίδραση του λόγου B/H_0	211
6.6.4 Επίδραση του λόγου S/B	215
6.7 Αξιολόγηση προσομοιώσεων.....	221
7 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	233
7.1 Σύννοψη του προβλήματος.....	233
7.2 Μεθοδολογική προσέγγιση - Αποτελέσματα.....	234
7.3 Προτάσεις.....	237
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	239
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	251
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	254

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Ειδική επιφανειακή ενέργεια κατάτμησης διαφόρων πετρωμάτων (Berta, 1990).....	29
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες εκρηκτικών υλών (Τσουτρέλης 2001).	37
Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #1.	105
Πίνακας 3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #2.	106
Πίνακας 3.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #3.	106
Πίνακας 3.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #4.	107
Πίνακας 3.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #5.	107
Πίνακας 3.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #6.	108
Πίνακας 3.7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #7.	108
Πίνακας 3.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #8.	109
Πίνακας 3.9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #9.	109
Πίνακας 3.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #10.	110
Πίνακας 3.11: Μέση τιμή του ύψους βαθμίδας (H_{av}), του φορτίου (B_{av}), της απόστασης διατρημάτων (S_{av}), του μήκους διατρήματος (L_{tot}) και του μήκους γόμωσης (L_c), της κάθε ανατίναξης.	111
Πίνακας 3.12: Απόκλιση μεταξύ των τιμών που προέβλεπε το σχέδιο ανατίναξης και των μετρούμενων τιμών, για το φορτίο (B) και την απόσταση διατρημάτων (S) και το ύψος βαθμίδας (H).	111
Πίνακας 3.13: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ANFO (EXTRACO A.E.).....	111
Πίνακας 3.14: Ποσότητα ANFO (Q σε kg) ανά διάτρημα (Δ), για κάθε ανατίναξη.	112
Πίνακας 3.15: Γραμμική πυκνότητας γόμωσης (ρ_L σε kg/m) ανά διάτρημα (Δ), για κάθε ανατίναξη.....	112
Πίνακας 3.16: Μέση ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα (Q_{av}) και μέση γραμμική πυκνότητα γόμωσης (ρ_{Lav}), για κάθε ανατίναξη.	113
Πίνακας 3.17: Απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής και της μετρούμενης τιμής της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης για κάθε ανατίναξη.	113

Πίνακας 3.18: Η τιμή της ειδικής κατανάλωση E.Y. (q σε kg/m^3) για κάθε ανατίναξη...	114
Πίνακας 3.19: Τεχνικά χαρακτηριστικά ζελατινοδυναμίτιδας (EXTRACO A.E.).....	114
Πίνακας 3.20: Το μέγεθος τεμαχίου in situ πετρώματος που αντιστοιχεί στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 50% και 75% καθώς και μέγιστο μέγεθος in situ τεμαχίου, για κάθε μέτωπο.	127
Πίνακας 3.21: Ελάχιστος χρόνος απόκρισης ($T_{\min}$) και τιμή του «τοπικού» φορτίου (B_L) στη θέση για την οποία μετρήθηκε ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης.	133
Πίνακας 3.22: Μεγέθη τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου των 20, 50 75 και 90%.....	138
Πίνακας 3.23: Λόγοι κατάτμησης που αντιστοιχούν στο 50% αθροιστικά διερχόμενο κάθε ανατίναξης.	139
Πίνακας 4.1: Συντελεστής ομοιομορφίας (n) και μεγέθη τεμαχίων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου Kuz-Ram.	142
Πίνακας 4.2: Συντελεστής κυματοειδούς μορφής (b) και μεγέθη τεμαχίων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου KCO.....	142
Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών μεγέθους (σε m) που αντιστοιχούν στα ποσοστά διερχόμενου 25%, 50% και 75%, οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag, Kuz-Ram και KCO.	147
Πίνακας 4.4: Εκατοστιαία διαφορά (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO.	147
Πίνακας 4.5: Μέγεθος τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, συναρτήσει του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της πυροδότησης διαδοχικών διατρημάτων.	153
Πίνακας 4.6: Συντέλεσης b' που υπολογίστηκε μέσω ανάδρομης ανάλυσης.	157
Πίνακας 4.7: Συσχέτιση των τιμών μεγέθους που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO, οι οποίες αντιστοιχούν στο 50% αθροιστικά διερχόμενο.	160
Πίνακας 4.8: Συσχέτιση των τιμών μεγέθους που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO, οι οποίες αντιστοιχούν στο 75% αθροιστικά διερχόμενο.	161

Πίνακας 4.9: Συσχέτιση του συντελεστή b που υπολογίστηκε από το τυπολόγιο του μοντέλου KCO και του b' που προέκυψε με τη διαδικασία της ανάδρομης ανάλυσης....	162
Πίνακας 4.10: Στατιστικά δεδομένα της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του 50% αθροιστικά διερχόμενου (x_{50C}).....	163
Πίνακας 4.11: Στατιστικά δεδομένα της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του συντελεστή b_C	164
Πίνακας 4.12: Σημαντικότερες συσχετίσεις του χρόνου T_{min} με ορισμένες από τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης.....	168
Πίνακας 4.13: Σημαντικότερες συσχετίσεις του λόγου κατάτμησης RR_{50} με ορισμένες από τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης.	172
Πίνακας 5.1: Μονάδες μέτρησης και διαστασιακοί τύποι των βασικών μεταβλητών.....	181
Πίνακας 5.2: Εκλυόμενη ενέργεια $E.Y.$ (GJ).	182
Πίνακας 5.3: Μάζα εξορυγμένου πετρώματος (t).	182
Πίνακας 5.4: Μονάδες μέτρησης και διαστασιακοί τύποι των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της διαστασιακής ανάλυσης.	183
Πίνακας 5.5: Συσχέτιση μεταξύ των αδιάστατων ομάδων Π_1 και Π_2	185
Πίνακας 6.1: Στατιστικά στοιχεία των μεταβλητών εισόδου.....	196
Πίνακας 6.2: Τύπος και χαρακτηριστικά των στατιστικών κατανομών που περιγράφουν τις μεταβλητές εισόδου.....	199
Πίνακας 6.3: Η μέση τιμή μεγέθους και τα διαστήματα πρόβλεψης 25%, 50% και 95%, που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50% και 75%.	202
Πίνακας 6.4: Λόγοι συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης.	203
Πίνακας 6.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B	206
Πίνακας 6.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B , για $H=19m$ και $H=15m$	208
Πίνακας 6.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/d	210

Πίνακας 6.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/d , διατηρώντας σταθερή την τιμή του B	212
Πίνακας 6.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/d , διατηρώντας σταθερή την τιμή του H_0	214
Πίνακας 6.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , διατηρώντας σταθερή την τιμή του S	215
Πίνακας 6.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , διατηρώντας σταθερή την τιμή του B	217
Πίνακας 6.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή των S και B , διατηρώντας τον λόγο $S/B=1$	218
Πίνακας 6.13: Επί τοις εκατό μεταβολές των τεχνικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, του συντελεστή ομοιομορφίας και των τιμών μεγέθους, μεταξύ των σεναρίων #28 και #29, #30, #31.	219
Πίνακας 6.14: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , για $B/H_0=1,5$	220
Πίνακας 6.15: Επί τοις εκατό μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, του συντελεστή ομοιομορφίας και των τιμών μεγέθους, μεταξύ του σχεδίου ανατίναξης που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ και των 37 υποθετικών σεναρίων.	Error! Bookmark not defined. 223
Πίνακας 6.16: Η μέση τιμή μεγέθους και τα διαστήματα πρόβλεψης 25%, 50% και 95%, που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50% και 75% των 37 υποθετικών σεναρίων.	228

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της εξόρυξης πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών (Saharan <i>et al.</i> 2006).	32
Εικόνα 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σχεδίου ανατίναξης.	33
Εικόνα 2.3: Διαχωρισμός της ενέργειας που παράγεται κατά την ανατίναξη της εκρηκτικής ύλης σε ωφέλιμη και μη (Pijush P.R. 2005).	34
Εικόνα 2.4: Στάδια του μηχανισμού θραύσης (Παναγιώτου, χ.χ.).	35
Εικόνα 2.5: Βραδυδραστικές και διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες.	36
Εικόνα 2.6: α) Ακτινική διάδοση κρουστικού κύματος, β) Εκτόνωση των αερίων της έκρηξης (JKMRC 1996).	38
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα εξασθένισης της θλιπτικής τάσης σε συνάρτηση με την απόσταση από το διάτρημα (Onederra <i>et al.</i> 2004a).	39
Εικόνα 2.8: Διάδοση των ρωγμών λόγω συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων (Persson <i>et al.</i> 1994).	41
Εικόνα 2.9: α) Εσφαλμένη επιλογή χρόνου επιβράδυνσης, β) Ορθή επιλογή χρόνου επιβράδυνσης.	45
Εικόνα 2.10: Επίπεδα αδυναμίας (Scott <i>et al.</i> 1996).	47
Εικόνα 2.11: Συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε θραύση και του ρυθμού φόρτισης (Zhang <i>et al.</i> , 1999)).	48
Εικόνα 2.12: Η ροή των εργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα λατομείο αδρανών, προκειμένου να δημιουργηθεί το τελικό προς πώληση προϊόν (Παναγιώτου, χ.χ.).	51
Εικόνα 2.13: Μεταβολή του κόστους διάτρησης ανάλογα με τον επιδιωκόμενο βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).	53
Εικόνα 2.14: Μεταβολή του κόστους ανατίναξης ανάλογα με τον επιδιωκόμενο βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).	53
Εικόνα 2.15: Μεταβολή του κόστους δευτερογενούς θραύσης ανάλογα με το μέγεθος των τεμαχίων πετρώματος (Παναγιώτου, χ.χ.).	54

Εικόνα 2.16: Μεταβολή του κόστους φόρτωσης ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).	54
Εικόνα 2.17: Μεταβολή του κόστους μεταφοράς ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).	55
Εικόνα 2.18: Μεταβολή του κόστους θραύσης/ταξινόμησης ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).	56
Εικόνα 2.19: Μεταβολή του συνολικού κόστους εξόρυξης με τη χρήση εκρηκτικών υλών ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).	56
Εικόνα 2.20: Μεταβολή των επιμέρους κόστων ανάλογα με τον βαθμό αποτελεσματικότητας της ανατίναξης (Kanchibotla, 2003).	58
Εικόνα 2.21: Μετατροπή της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του in situ πετρώματος σε κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου (Παναγιώτου, χ.χ.).	60
Εικόνα 2.22: Απεικόνιση της κοκκομετρικής κατανομής των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος σε σύστημα ορθογώνιων αξόνων.	63
Εικόνα 2.23: Ορθογώνια και εναλλασσόμενη διάταξη διατρημάτων.	68
Εικόνα 2.24: Σημείο τομής της καμπυλών των λεπτομερών και των χονδρομερών τεμαχίων για το CZM (Ouchterlony, 2003).	70
Εικόνα 2.25: Ακτίνα της ζώνης θραύσης που δημιουργείται περιμετρικά του διατρήματος (Ouchterlony, 2003).	72
Εικόνα 2.26: Προσαρμογή της εξίσωσης Swebrec στα αποτελέσματα κοσκίνισης (Ouchterlony, 2005a).	79
Εικόνα 2.27: Σύγκριση της προσαρμογής των εξισώσεων Swebrec και R-R στα αποτελέσματα κοσκίνισης για τα μεγέθη +90 mm και εφαρμογή προβολής για την κατασκευή της κατανομής των λεπτομερών τεμαχίων (Ouchterlony, 2005a).	80
Εικόνα 2.28: Προέλευση χονδρομερών τεμαχίων πετρώματος (Kanchibotla, 1999).	90
Εικόνα 2.29: Χρήση δύο αντικειμένων γνωστού μεγέθους για τον καθορισμό της κλίμακας φωτογραφίας.	92
Εικόνα 2.30: Εσφαλμένη σχεδίαση δικτύου.	95
Εικόνα 2.31: Διαφορά μεταξύ της «συνέπειας» και της «ακρίβειας».	97

Εικόνα 2.32: Διόρθωση της ακρίβειας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων μέσω βαθμονόμησης.	98
Εικόνα 3.1: Τοπογραφική αποτύπωση λατομείου Χάλυψ.	102
Εικόνα 3.2: Σχέδιο ανατίναξης.	103
Εικόνα 3.3: Η συσκευή LacerAce 3D Burden Finder του οίκου MDL.	104
Εικόνα 3.4: Αποτελέσματα σάρωσης του προφίλ του προς εξόρυξη μετώπου με τη βοήθεια της συσκευής LacerAce 3D Burden Finder.....	104
Εικόνα 3.5: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #1.	105
Εικόνα 3.6: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #2.	106
Εικόνα 3.7: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #3.	106
Εικόνα 3.8: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #4.	107
Εικόνα 3.9: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #5.	107
Εικόνα 3.10: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #6.	108
Εικόνα 3.11: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #7.	108
Εικόνα 3.12: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #8.	109
Εικόνα 3.13: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #9.	109
Εικόνα 3.14: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #10.	110
Εικόνα 3.15: Εναυσματική γόμωση.	114
Εικόνα 3.16: Έναυση του ANFO με τη χρήση εκρηκτικής θρυαλλίδας.	116
Εικόνα 3.17: Έναυση του ANFO με τη χρήση του συστήματος NONEL.	117
Εικόνα 3.18:Σύστημα NONEL.....	118
Εικόνα 3.19: Διέγερση του ANFO με τη χρήση ισχυρής εναυσματικής γόμωσης (Olofsson 1990).....	119
Εικόνα 3.20: Μεταβολή της ταχύτητας του ANFO ανάλογα με τον βαθμό εγκλεισμού και τη διάμετρο (Kent 2007).....	120
Εικόνα 3.21: Συσχέτιση μεταξύ της πυκνότητας του AFNO και της ταχύτητας με την οποία αυτό εκρήγνυται.	121

Εικόνα 3.22: Η συσκευή Handitrap II του οίκου MREL.	121
Εικόνα 3.23: Υπολογισμός ταχύτητας έκρηξης (VOD) του ANFO.....	122
Εικόνα 3.24: Φωτογραφία μετώπου που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των in situ τεμαχίων, μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνων WipFrag.	124
Εικόνα 3.25: Δημιουργία δικτύου περιμετρικά των in situ τεμαχίων του μετώπου, από το λογισμικό WipFrag.....	126
Εικόνα 3.26: Κοκκομετρική κατανομή των in situ τεμαχίων του μετώπου, η οποία υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού WipFrag.	126
Εικόνα 3.27: Η συσκευή Blaster's Ranger High Speed Camera του οίκου MREL.	128
Εικόνα 3.28: Υπολογισμός του ελάχιστου χρόνου απόκρισης T_{min}	130
Εικόνα 3.29: Υπολογισμός του ελάχιστου χρόνου απόκρισης T_{min}	131
Εικόνα 3.30: Συνολικός χρόνος επιβράδυνσης για κάθε διάτρημα.	132
Εικόνα 3.31: Στιγμιότυπα μιας βιντεοσκοπημένης ανατίναξης, τα οποία ελήφθησαν με τη βοήθεια της συσκευής Blaster's Ranger High Speed Camera.	134
Εικόνα 3.32: Φωτογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των in situ τεμαχίων, μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνων WipFrag.....	135
Εικόνα 3.33: Δημιουργία δικτύου περιμετρικά των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, από το λογισμικό WipFrag.....	136
Εικόνα 3.34: Κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, η οποία υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού WipFrag.	137
Εικόνα 4.1: Κοκκομετρικές κατανομές των ανατινάξεων #1, #2, #3 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.....	143
Εικόνα 4.2: Κοκκομετρικές κατανομές των ανατινάξεων #4, #5, #6 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.....	144
Εικόνα 4.3: Κοκκομετρικές κατανομές των ανατινάξεων #7, #8, #9 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.....	145
Εικόνα 4.4: Κοκκομετρικές κατανομές της ανατίναξης #10 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.	146

Εικόνα 4.5: Θηκογράμματα ποσοστιαίας διαφοράς (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO, για το 25% αθροιστικά διερχόμενο.	148
Εικόνα 4.6: Θηκογράμματα ποσοστιαίας διαφοράς (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO, για το 50% αθροιστικά διερχόμενο.	149
Εικόνα 4.7: Θηκογράμματα ποσοστιαίας διαφοράς (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO, για το 75% αθροιστικά διερχόμενο.	150
Εικόνα 4.8: Επίδραση του χρόνου επιβράδυνσης στην κοκκομετρία του θραυσμένου πετρώματος (Onederra, 2007).	151
Εικόνα 4.9: Μεθοδολογία βαθμονόμησης των εξίσωσεων υπολογισμού της κοκκομετρικής κατανομής του λατομείου Χάλυψ.	156
Εικόνα 4.10: Μεγέθη τεμαχίων που αντιστοιχούν στα P_{50} και x_{50S}	157
Εικόνα 4.11: Τιμές των παραμέτρων b και b'	158
Εικόνα 4.12: Γραφική απεικόνιση της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του 50% αθροιστικά διερχόμενου (x_{50C}).	163
Εικόνα 4.13: Γραφική απεικόνιση της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του συντελεστή b_C	164
Εικόνα 4.14: Σύγκριση των τιμών μεγέθους της κοκκομετρικής κατανομής των καταγεγραμμένων ανατινάξεων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25% και 50%, με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO.	165
Εικόνα 4.15: Σύγκριση των τιμών μεγέθους της κοκκομετρικής κατανομής των καταγεγραμμένων ανατινάξεων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25% και 50%, με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO.	166
Εικόνα 4.16: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και της ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικής ύλης (q).	169

Εικόνα 4.17: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και του «τοπικού» φορτίου (B_L).	170
Εικόνα 4.18: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και της τιμής μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του εξορυγμένου πετρώματος (P_{50}) που υπολογίστηκε με τη βοήθεια του WipFrag.	170
Εικόνα 4.19: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και της τιμής μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του εξορυγμένου πετρώματος (x_{50s}) που υπολογίστηκε με τη χρήση του μοντέλου KCO.	171
Εικόνα 4.20: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και του λόγου κατάτμησης RR_{50}	171
Εικόνα 4.21: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του λόγου κατάτμησης (RR_{50}) και του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}).	172
Εικόνα 4.22: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του λόγου κατάτμησης (RR_{50}) και της ειδικής κατανάλωσης E.Y. (q).	173
Εικόνα 4.23: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του λόγου κατάτμησης (RR_{50}) και του «τοπικού» φορτίου (B_L).	174
Εικόνα 5.1: Συσχέτιση μεταξύ των αδιάστατων ομάδων Π1 και Π2.	185
Εικόνα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος.	189
Εικόνα 6.2: Σχηματική αναπαράσταση μοντελοποίησης.	191
Εικόνα 6.3: Δομή μοντέλου.	194
Εικόνα 6.4: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει την απόσταση των διατρημάτων.	196
Εικόνα 6.5: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το φορτίο.	197
Εικόνα 6.6: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το ύψος βαθμίδας.	197
Εικόνα 6.7: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το μέγιστο μέγεθος των in situ τεμαχίων.	197
Εικόνα 6.8: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος.	198

Εικόνα 6.9: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει τη γραμμική πυκνότητα γόμωσης.....	198
Εικόνα 6.10: Τμήμα του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.	200
Εικόνα 6.11: Μεγέθη θραυσμένου πετρώματος που εκτιμώνται από το μοντέλο για 100000 επαναλήψεις της μεθόδου Monte Carlo.	201
Εικόνα 6.12: Διαστήματα πρόβλεψης 25%, 50% και 95% γύρω από τη μέση τιμή.	202
Εικόνα 6.13: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B	207
Εικόνα 6.14: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B για $H=19m$	209
Εικόνα 6.15: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B για $H=15m$	209
Εικόνα 6.16: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/d	211
Εικόνα 6.17: Κοκκομετρική κατανομή των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/H_0 , διατηρώντας σταθερή την τιμή του B	213
Εικόνα 6.18: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/H_0 , διατηρώντας σταθερή την τιμή του H_0	214
Εικόνα 6.19: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , διατηρώντας σταθερή την τιμή του S	216
Εικόνα 6.20: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , διατηρώντας σταθερή την τιμή του B	217
Εικόνα 6.21: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή των S και B , διατηρώντας τον λόγο $S/B=1$	219
Εικόνα 6.22: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , για σταθερή τιμή του B και για $B/H_0=1,5$	221
Εικόνα 6.23: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , για σταθερή τιμή του S και για $B/H_0=1,5$	221

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A	= συντελεστής εξορυξιμότητας του πετρώματος
a	= μέσο μέγεθος τεμαχίων που δημιουργούνται πέρα από τη ζώνη θρυμματισμού (m)
a_t	= συντελεστής που σχετίζεται με τη χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών πυροδοτήσεων
a_t	= συντελεστής που σχετίζεται με τη χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών πυροδοτήσεων
B	= φορτίο (m)
b	= σταθερά ομοιομορφίας που σχετίζεται με τα τεμάχια που δημιουργούνται πέρα από τη ζώνη θρυμματισμού
b	= παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη κυματοειδή μορφή της εξίσωσης (curve-undulation parameter)
B_L	= «τοπικό» φορτίο
C	= σταθερά που η τιμή της εξαρτάται από το σύστημα κατάτμησης και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού
c	= μέσο μέγεθος τεμαχίων που δημιουργούνται εντός της ζώνης θρυμματισμού (m)
C_K	= σταθερά του Kick
C_R	= σταθερά του Rittinger
C_B	= σταθερά του Bond
Γ	= τιμή της συνάρτησης Γ (gamma factor)
d	= διάμετρος του διατρήματος (mm)
d	= σταθερά ομοιομορφίας που σχετίζεται με τα τεμάχια που δημιουργούνται εντός της ζώνης θρυμματισμού
d_t	= χρόνος επιβράδυνσης μεταξύ γειτονικών διατρημάτων (ms)
$EEEEY$	= εκλυόμενη ενέργεια εκρηκτικής ύλης ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
ε	= ειδική ενέργεια κατάτμησης
ε_K	= ειδική ενέργεια κατάτμησης κατά τον Kick
ε_R	= ειδική ενέργεια κατάτμησης κατά τον Rittinger
ε_B	= ειδική ενέργεια κατάτμησης κατά τον Bond
ε_B	= ειδική ενέργεια κατάτμησης κατά τον Bond (kWh/t)
F	= μη διορθωμένος συντελεστής αποδοτικότητας της ανατίναξης

$F(D,d)$	= συνάρτηση του μεγέθους του υλικού τροφοδοσίας (D) και του μεγέθους του προϊόντος (d)
F_{50}	= μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των in situ τεμαχίων πετρώματος (m)
F_c	= κλάσμα του λεπτομερούς υλικού που δημιουργείται από την ανατίναξη ενός διατρήματος
F^t	= διορθωμένος συντελεστής αποδοτικότητας της ανατίναξης
$g(n)$	= συντελεστής διόρθωσης
H	= ύψος βαθμίδας (m)
HF	= δείκτης σκληρότητας (Hardness Factor)
JF	= δείκτης κερματισμού (Joint Factor)
JPA	= δείκτης που σχετίζεται με την κλίση των ασυνεχειών (Joint Plane Angle)
JPS	= δείκτης που σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (Joint Plane Spacing)
L_B	= μήκος γόμωσης πυθμένα (m)
L_C	= μήκος γόμωσης στήλης (m)
L_{tot}	= συνολικό μήκος γόμωσης του διατρήματος (m)
mean block size	= μέσο μέγεθος των τεμαχίων in situ πετρώματος (m).
n	= συντελεστής ομοιομορφίας (uniformity index)
n_{coarse}	= συντελεστής ομοιομορφίας του τμήματος που περιγράφει τα χονδρομερή τεμάχια
n_{fines}	= συντελεστής ομοιομορφίας του τμήματος που περιγράφει τα λεπτομερή τεμάχια
$P(x)$	= κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος x
$P(x_c)$	= κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος ίσο με εκείνο του χαρακτηριστικού μεγέθους x_c
P_{50}	= μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος (m)
P_b	= πίεση στο μέτωπο της έκρηξης (Pa)
Q	= ποσότητα της εκρηκτικής ύλης TNT που ισοδυναμεί σε ενέργεια με τη χρησιμοποιούμενη σε κάθε διάτρημα εκρηκτική ύλη (kg)

q	= ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης (powder factor, kg/m^3), δηλ η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό μέτρο του προς εξόρυξη πετρώματος
Q_e	= ποσότητα της εκρηκτικής ύλης η οποία βρίσκεται τοποθετημένη εντός του διατρήματος (kg)
r	= ακτίνα του διατρήματος (m)
r_c	= ακτίνα της ζώνης θρυμματισμού (m)
RDI	= δείκτης που σχετίζεται με το ειδικό βάρος της βραχομάζας (Rock Density Influence)
RMD	= δείκτης περιγραφής της βραχομάζας (Rock Mass Description)
RR_{50}	= λόγος κατάτμησης
RWS	= σχετική κατά βάρος ισχύς της εκρηκτικής ύλης ως προς το ANFO
ρ	= ειδικό βάρος του υλικού (kg/m^3)
ρ_c	= πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (kg/m^3)
S	= απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της ίδιας σειράς (m)
σ_c	= θλιπτική αντοχή του πετρώματος (Pa)
σ_t	= εφελκυστική αντοχή του πετρώματος (MPa)
$T_{\min}$	= ελάχιστος χρόνος απόκρισης του μετώπου (ms)
$TS_{\text{in situ}}$	= εφελκυστική αντοχή του in situ πετρώματος (Pa)
UCS	= αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (Unconfined Compressive Strength)
V	= ταχύτητα του ηχητικού κύματος στο υλικό (m/s)
V_b	= όγκος του εξορυγμένου πετρώματος ανά διάτρημα (m^3)
V_c	= όγκος της ζώνης θραύσης (m^3)
V_o	= όγκος του εξορυσσόμενου πετρώματος ανά διάτρημα (m^3)
VOD	= ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης (m/s)
W	= τυπική απόκλιση της ακρίβειας με την οποία έγινε η όρυξη ενός διατρήματος (m)
w_i	= δείκτης έργου κατάτμησης (kWh/t)
x	= μέγεθος του θραυσμένου πετρώματος (m)
x_{50}	= μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος (cm)
x_{50S}	= μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος κατά τον Spathis (cm)

X_c	= σημείο τομής των δύο καμπυλών (m)
X_{insitu}	= μέγεθος των in situ τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (m)
X_{max}	= μέγεθος του μεγαλύτερου τεμαχίου θραυσμένου πετρώματος (m)
X_{50}^t	= μέγεθος τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχούν στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, συναρτήσει του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της πυροδότησης διαδοχικών διατρημάτων (m)
Z	= ακουστική εμπέδιση (kg/m^2s)

1 Εισαγωγή

1.1 Εξόρυξη πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών

Σε κάθε δραστηριότητα της καθημερινότητας τους οι άνθρωποι έρχονται σε επαφή με αντικείμενα τα οποία αποτελούν το τελικό προϊόν της επεξεργασίας ορυκτών ή μεταλλευμάτων. Η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού σε συνδυασμό με την υψηλού επιπέδου κατανάλωση υλικών αγαθών στις ανεπτυγμένες χώρες και τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση στις αναπτυσσόμενες χώρες, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής χρήσης φυσικών πόρων μέσα στον 20ό αιώνα. Σύμφωνα με μια πρόσφατη έκθεση του Περιβαλλοντικού Προγράμματος του ΟΗΕ (UNEP, 2012), η ετήσια κατά κεφαλή κατανάλωση φυσικών πόρων το έτος 2000 έφτασε τους 8-10 ton., δηλαδή διπλάσια σε σχέση με το έτος 1900, ενώ όπως προβλέπεται από την ίδια έκθεση το 2050 η ανθρωπότητα θα χρειάζεται ετησίως 140 δισεκατομμύρια τόνους ορυκτών καυσίμων, μεταλλευμάτων και ορυκτών.

Τα ορυκτά/μεταλλεύματα βρίσκονται στην επιφάνεια της γης ή στο υπέδαφος και απαιτούνται συγκεκριμένες διαδικασίες προκειμένου να αποσπαστούν από τη φυσική τους θέση. Παρά τις μεγάλες τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια στον τομέα της εξόρυξης των πετρωμάτων με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, η χρήση εκρηκτικών υλών για την εξόρυξη των περισσότερων τύπων πετρωμάτων εξακολουθεί να είναι η οικονομικότερη λύση και επομένως στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελεί μονόδρομο.

Οι εκρηκτικές ύλες είναι χημικές ουσίες ή συνηθέστερα μίγματα χημικών ουσιών, που με κατάλληλη διέγερση (μηχανική/κρούση ή θερμική/φλόγα), λόγω της θερμοδυναμικής αστάθειας στην οποία βρίσκονται, υφίστανται μια ταχύτατη εξώθερμη χημική αντίδραση κατά την οποία παράγονται αέρια προϊόντα μεγάλου όγκου και απελευθερώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας εντός εξαιρετικά σύντομου χρονικού διαστήματος. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται έκρηξη. Κατά την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης απελευθερώνεται χημική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε μηχανική και με τη μορφή κυματοπαλμών (θλιπτικών, εφελκυστικών) και αερίων υπό πίεση, ασκεί τάσεις στη μάζα του προς εξόρυξη πετρώματος προκαλώντας τον τεμαχισμό του και την απόσπαση του από τη φυσική του θέση.

1.2 Αντικειμενικός στόχος της ανατίναξης των πετρωμάτων

Η πραγματοποίηση μιας ανατίναξης είναι συνήθως το πρώτο στάδιο μιας σειράς διεργασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα προκειμένου το πέτρωμα να αποσπαστεί από τη φυσική του θέση, να υποστεί επεξεργασία και να μετασχηματιστεί στο τελικό προς πώληση προϊόν. Κάθε μια από τις επιμέρους διεργασίες έχει το δικό της κόστος υλοποίησης. Αντικειμενικός στόχος μιας εξορυκτικής επιχείρησης είναι η επίτευξη της μεγίστης δυνατής παραγωγής εξασφαλίζοντας το ελάχιστο δυνατό κόστος, τηρώντας όλους τους προβλεπόμενους νόμους και κανονισμούς που σχετίζονται με την ασφάλεια των ανθρώπων, του περιβάλλοντος, του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων και σε πλήρη συμφωνία με τις απαιτήσεις της επιστήμης, της τεχνολογίας και των τεχνών.

Προκειμένου το κόστος του συστήματος εξόρυξης-φόρτωσης-μεταφοράς-θραύσης να είναι το ελάχιστο δυνατό, το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος θα πρέπει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων, γεγονός το οποίο αναδεικνύει την επίδραση που έχει το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος στη διαδικασία της εξόρυξης πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών.

Η ύπαρξη μιας τεχνικής ελέγχου της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τον μηχανικό που σχεδιάζει ανατινάξεις, καθότι επιτρέπει τη γρήγορη και αποτελεσματική εκτίμηση της ορθότητας των τιμών που έχουν επιλεγεί για κάθε μια από τις παραμέτρους που ορίζουν ένα σχέδιο ανατίναξης, ενώ επιπλέον συντελεί στο να συσχετιστεί η παραγωγικότητα του μεταλλείου με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε μετώπου.

Για τον σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος ($P_{(x)}$). Τα μοντέλα αυτά συνήθως εκτιμούν το μέγεθος των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (x_{50}), χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης, τον τύπο της εκρηκτικής ύλης αλλά και στοιχεία που σχετίζονται με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η προς εξόρυξη βραχομάζα.

Τα δεδομένα που σχετίζονται με τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης και τον τύπο της εκρηκτικής ύλης μπορούν να καταγραφούν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, σε αντίθεση με εκείνα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, η καταγραφή των οποίων στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εξαιρετικά δύσκολη και συνήθως μη ακριβής. Για τον λόγο αυτό γίνεται η παραδοχή ότι το πέτρωμα είναι ένα ασυνεχές υλικό

του οποίου τα μηχανικά χαρακτηριστικά έχουν σταθερή τιμή στον όγκο της βαθμίδας. Η παραδοχή αυτή έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται απόκλιση μεταξύ των τιμών μεγέθους που εκτιμώνται μέσω των διαφόρων μοντέλων και εκείνων που λαμβάνονται έπειτα από την πραγματοποίηση κοκκομετρικής ανάλυσης (κοσκίνιση) του εξορυγμένου όγκου.

Η κοσκίνιση ωστόσο αποτελεί μια πρακτικά μη εφαρμόσιμη διαδικασία καθώς, πέραν όλων των άλλων, παρεμποδίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του λατομείου/μεταλλείου, ενώ επιπλέον το κόστος υλοποίησης της είναι ιδιαίτερα υψηλό. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα εκτίμησης αποτελούν ένα σπουδαίο εργαλείο για τον μηχανικό που σχεδιάζει ανατινάξεις, καθότι επιτρέπουν την εκτίμηση της μεταβολής της κοκκομετρικής κατανομής των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος μετά από την πραγματοποίηση αλλαγών στο σχέδιο ανατίναξης.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες σημαντικά βήματα προόδου έχουν γίνει στον τομέα της πραγματοποίησης υπολογισμών εκτίμησης της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος με τη χρήση λογισμικών επεξεργασίας εικόνων (image analysis systems). Αποτέλεσμα αυτής της προόδου είναι η εκτενής πλέον χρήση των λογισμικών αυτών από όλο και περισσότερες εξορυκτικές επιχειρήσεις.

1.3 Σκοπός της διατριβής

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος υπό πραγματικές συνθήκες. Βασική επιδίωξη είναι η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα αποδίδει την κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, των ιδιοτήτων της εκρηκτικής ύλης (E.Y) καθώς και των μηχανικών χαρακτηριστικών του προς εξόρυξη πετρώματος.

Ως εκ τούτου κρίθηκε σκόπιμη η εύρεση μιας κατανομής η οποία θα μπορεί να περιγράφει με αυξημένη ακρίβεια την κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος των καταγεγραμμένων ανατινάξεων. Η σπουδαιότητα της ύπαρξης μιας τέτοιας κατανομής είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς επιτρέπει την αποτελεσματικότερη σχεδίαση μελλοντικών ανατινάξεων, συντελώντας στην αποδοτικότερη και ταυτόχρονα οικονομικότερη λειτουργία όλων των επιμέρους διεργασιών που έπονται της ανατίναξης. Ο καθορισμός του σχεδίου ανατίναξης, ο οποίος γίνεται έχοντας ως κύρια παράμετρο την κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος, θα μπορεί να υλοποιείται περιορίζοντας

σημαντικά τον βαθμό αβεβαιότητας που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη διαδικασία, αφού πλέον θα υπάρχουν μαθηματικές σχέσεις που θα συνδέουν τα χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης με την κοκκομετρία του εξορυγμένου όγκου.

Σε ότι αφορά τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την εφαρμογή των μοντέλων εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος, έγινε μια συστηματική προσπάθεια να καταγραφεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερος όγκος στοιχείων από ανατινάξεις πλήρους κλίμακας, προκειμένου τα αποτελέσματα να προσεγγίζουν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τις πραγματικές τιμές μεγέθους. Για τον σκοπό αυτό καταγράφηκαν τα δεδομένα δέκα (10) ανατινάξεων παραγωγής κάνοντας χρήση εξειδικευμένων συσκευών σύγχρονης τεχνολογίας που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων του Ε.Μ.Π.

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στον λατομικό χώρο προέκυψαν ορισμένες συσχετίσεις αναφορικά με τον τρόπο που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι διάφορες παράμετροι που σχετίζονται με την εξόρυξη του πετρώματος με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Εν συνεχεία δημιουργήθηκαν βαθμονομημένες σχέσεις υπολογισμού της τιμής μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (x_{50}), αλλά και ολόκληρης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος.

Επιπλέον εφαρμόζοντας τη μέθοδο της διαστασιακής ανάλυσης (Buckingham Pi Theorem) προέκυψε μια σχέση υπολογισμού του λόγου κατάτμησης RR_{50} , συναρτήσεως του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}), της ειδικής κατανάλωσης της εκρηκτικής ύλης (q) και της τιμής του «τοπικού» φορτίου (B_L). Τέλος με τη βοήθεια της μεθόδου πιθανολογικής προσομοίωσης Monte Carlo μελετήθηκαν μια σειρά από υποθετικά σχέδια ανατίναξης προκειμένου να καταγραφούν τα αποτελέσματα που επιφέρουν στην κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος οι μεταβολές των τεχνικών χαρακτηριστικών ενός σχεδίου ανατίναξης.

Τα ανωτέρω εφαρμόστηκαν σε πλήρους κλίμακας ανατινάξεις που πραγματοποιήθηκαν στο λατομείο ασβεστολίθου της Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε., το οποίο βρίσκεται στη θέση Κεραμιδέζα στη Μάνδρα Αττικής.

1.4 Μεθοδολογία εργασίας

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της διατριβής, περιελάμβανε τα ακόλουθα στάδια:

Λήψη και επεξεργασία φωτογραφιών του προς εξόρυξη μετώπου και του σωρού του εξορυγμένου πετρώματος: Φωτογραφίες οι οποίες ελήφθησαν από το προς εξόρυξη μέτωπο και από τον σωρό των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος, επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος WipFrag προκειμένου να υπολογιστεί η κοκκομετρική κατανομή των *in situ* τεμαχίων και των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος αντίστοιχα.

Καταγραφή των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης: Για την καταγραφή των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένες συσκευές σύγχρονης τεχνολογίας προκειμένου η ακρίβεια των υπολογισμών να είναι η μέγιστη δυνατή.

Βαθμονόμηση (calibration) των εμπειρικών μοντέλων εκτίμησης: Η αποτελεσματική χρήση των εξισώσεων των εμπειρικών μοντέλων εκτίμησης κοκκομετρικών κατανομών προϋποθέτει τη βαθμονόμηση τους βάσει των συνθηκών που επικρατούν στον εκάστοτε λατομικό χώρο. Αξιοποιώντας τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές, δημιουργήθηκαν βαθμονομημένες σχέσεις οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου λατομικού χώρου και αποτυπώνουν καλύτερα τον βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και της κοκκομετρίας που επιτυγχάνεται.

Δημιουργία εξίσωσης υπολογισμού του λόγου κατάτμησης RR_{50} (Reduction Ratio): Αρχικά δημιουργήθηκε ένας πίνακας συσχετίσεων (correlation matrix) προκειμένου να εξεταστεί η αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της μεθόδου της διαστασιακής ανάλυσης δημιουργήθηκε μια σχέση για τον υπολογισμό του λόγου κατάτμησης RR_{50} .

Πραγματοποίηση πιθανολογικής προσομοίωσης Monte Carlo. Αρχικά δημιουργήθηκε το μοντέλο το οποίο αποδίδει την κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, των ιδιοτήτων της Ε.Υ καθώς και των μηχανικών χαρακτηριστικών του προς εξόρυξη πετρώματος. Προκειμένου να συνυπολογιστεί η έννοια της αβεβαιότητας, στο μοντέλο χρησιμοποιούνται στατιστικές κατανομές για εκείνες τις παραμέτρους εισόδου για τις οποίες είτε έχει παρατηρηθεί μεταβλητότητα είτε τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί δεν είναι επαρκή. Ως παράμετρος εξόδου ορίστηκε η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων

του εξορυγμένου πετρώματος, ενώ επιπλέον δημιουργήθηκε μια περιβάλλουσα γύρω από τη μέση τιμή μεγέθους που αντιστοιχεί στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα αθροιστικά διερχόμενου (predictive fragmentation envelope). Με τη βοήθεια της πιθανολογικής προσομοίωσης μελετήθηκαν διάφορα υποθετικά σενάρια σχεδίων ανατίναξης και ποσοτικοποιήθηκε η μετατόπιση της κοκκομετρικής κατανομής των εξορυγμένων τεμαχίων πετρώματος, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα των διαφόρων υποθετικών σεναρίων.

1.5 Δομή της διατριβής

Στο παρόν *Κεφάλαιο 1* δίνονται οι βασικές επιδιώξεις της εργασίας καθώς και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε.

Στο *Κεφάλαιο 2* γίνεται αναφορά στην εξόρυξη των πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών, στον μηχανισμό θραύσης του πετρώματος με τη χρήση εκρηκτικών, στα σημαντικότερα μοντέλα εκτίμησης της κοκκομετρίας του θραυσμένου πετρώματος καθώς και στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φωτογραφικών μεθόδων προσδιορισμού της κοκκομετρίας.

Στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του λατομικού χώρου και του εφαρμοζόμενου σχεδίου ανατίναξης καθώς επίσης και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την καταγραφή των δεδομένων των δέκα ανατινάξεων παραγωγής.

Στο *Κεφάλαιο 4* αρχικά πραγματοποιείται υπολογισμός των κοκκομετρικών κλασμάτων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, κάνοντας χρήση των εμπειρικών μοντέλων Kuz-Ram και KCO. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με εκείνα τα οποία προέκυψαν μέσω του λογισμικού προγράμματος WipFrag και πραγματοποιείται βαθμονόμηση ορισμένων εξισώσεων από το τυπολόγιο του μοντέλου KCO, προκειμένου αυτές να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη σχεδίαση μελλοντικών ανατινάξεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στον συγκεκριμένο λατομικό χώρο. Στο τέλος του κεφαλαίου εξετάζεται η αλληλεπίδραση που παρατηρείται μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και παρουσιάζονται οι σημαντικότερες συσχετίσεις που προέκυψαν.

Στο *Κεφάλαιο 5* πραγματοποιείται διαστασιακή ανάλυση προκειμένου να υπολογιστεί ο λόγος κατάτμησης RR_{50} , ο οποίος αποτελεί το πηλίκο του 50% αθροιστικά

διερχόμενου των *in situ* τεμαχίων (F_{50}) προς το 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος (P_{50}). Εν συνεχεία δίδεται μια εξίσωση υπολογισμού του μεγέθους των τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του εξορυγμένου πετρώματος συναρτήσει της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το *in situ* πέτρωμα από πλευράς κερματισμού, της μάζας του προς εξόρυξη πετρώματος (M_o), της τιμής του «τοπικού» φορτίου (B_L), του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και της εκλυόμενης ενέργειας της εκρηκτικής ύλης (EEEEY).

Στο *Κεφάλαιο 6* δημιουργείται ένα στοχαστικό μοντέλο και πραγματοποιείται πιθανολογική προσομοίωση Monte Carlo για διάφορα υποθετικά σενάρια ανατίναξης, προκειμένου να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο μετατοπίζεται η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος ως αποτέλεσμα της αλλαγής των τεχνικών χαρακτηριστικών του εφαρμοζόμενου σχεδίου ανατίναξης.

Στο *Κεφάλαιο 7* παρατίθενται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής, ενώ προτείνονται ορισμένα νέα πεδία έρευνας, με στόχο τον αποτελεσματικότερο έλεγχο του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος μετά από την πραγματοποίηση αλλαγών σε ένα σχέδιο ανατίναξης.

1.6 Παραδοχές

Τα δεδομένα που σχετίζονται με τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης και με τον τύπο της εκρηκτικής ύλης μπορούν να καταγραφούν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια σε αντίθεση με τα στοιχεία τα οποία σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, η καταγραφή των οποίων στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εξαιρετικά δύσκολη. Για τον λόγο αυτό γίνεται η παραδοχή ότι το πέτρωμα είναι μεν ένα ασυνεχές υλικό, οι μηχανικές ιδιότητες του οποίου (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μέτρο ελαστικότητας, πυκνότητα), καθώς και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, έχουν σταθερή τιμή στον όγκο της βαθμίδας ανατίναξης.

2 Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική τεκμηρίωση

2.1 Εξόρυξη πετρωμάτων

Η εξόρυξη πετρωμάτων περιλαμβάνει όλες εκείνες τις διεργασίες που πραγματοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η τμηματική απόσπαση του πετρώματος από τη φυσική του θέση.

Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους πραγματοποιείται η εξόρυξη ενός όγκου πετρώματος είναι (Παναγιώτου, χ.χ.):

- Η οικονομική αξία που ενδεχομένως να έχει ένα πέτρωμα. Ο όγκος του πετρώματος σε αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται ως κοίτασμα.
- Η δημιουργία κενού χώρου στη μάζα ενός πετρώματος προκειμένου ο χώρος αυτός να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση ενός τεχνικού έργου (π.χ. διέλευση δρόμου, κατασκευή υπόγειου έργου κ.α.). Στην περίπτωση αυτή, συνήθως, το πέτρωμα μεταφέρεται σε κατάλληλους χώρους απόθεσης λόγω του ότι δεν έχει κάποια οικονομική αξία.

Στις περιπτώσεις που η εξόρυξη γίνεται στο πλαίσιο της εκμετάλλευσης λατομείων/μεταλλείων, βασική επιδίωξη είναι η εξόρυξη της μέγιστης δυνατής ποσότητας πετρώματος με το ελάχιστο κόστος. Το υλικό το οποίο εξορύσσεται μπορεί να είναι κάποιο ορυκτό με οικονομική αξία ή υπερκείμενα/ενδιάμεσα άγονα τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν ώστε να γίνει η αποκάλυψη του κοιτάσματος. Ο προς εξόρυξη όγκος πετρώματος θραύεται σε τεμάχια μικρότερου μεγέθους τα οποία εν συνεχεία θα υποστούν κατάλληλη επεξεργασία, που ενδεχομένως να περιλαμβάνει τον εμπλουτισμό και μια σειρά από μεταλλουργικές διεργασίες, αποσκοπώντας στο να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν το οποίο θα αποτελέσει το αντικείμενο εμπορίας. Προκειμένου το κόστος του κυκλώματος εξόρυξης-φόρτωσης-μεταφοράς-θραύσης να είναι το ελάχιστο δυνατό, το μέγεθος των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος θα πρέπει να βρίσκεται, κατά περίπτωση, εντός συγκεκριμένων ορίων. Ο περιορισμός αυτός καθιστά τον προσεκτικό σχεδιασμό της εξόρυξης επιτακτική ανάγκη.

Στις περιπτώσεις τεχνικών έργων, η εξόρυξη πραγματοποιείται με σκοπό την απόσπαση ενός όγκου πετρώματος, συνήθως αυστηρά καθορισμένων διαστάσεων και

μορφής, από τη φυσική του θέση. Βασική επιδίωξη είναι η γρήγορη και όσο το δυνατόν οικονομικότερη δημιουργία του κενού χώρου, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι αυτός θα μπορεί είτε να αυτοϋποστηρίζεται είτε να παραμένει στη θέση του λαμβάνοντας την ελάχιστη δυνατή ενίσχυση/υποστήριξη. Και σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιασμός της εξόρυξης επιβάλλεται να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός και λεπτομερής.

Η εξόρυξη των πετρωμάτων πραγματοποιείται είτε με τη χρήση εκρηκτικών υλών είτε με τη χρήση μηχανικών μέσων. Στην περίπτωση της εξόρυξης με τη χρήση εκρηκτικών υλών, η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση και την απόσπαση του πετρώματος από τη φυσική του θέση προέρχεται από τη χημική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση έκρηξης της εκρηκτικής ύλης. Η εκρηκτική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και με τη μορφή κυματοπαλμών (θλιπτικών, εφελκυστικών) και αερίων υπό πίεση, ασκεί τάσεις στη μάζα του προς εξόρυξη όγκου προκαλώντας τον τεμαχισμό του. Στην περίπτωση της μηχανικής εξόρυξης, ο τεμαχισμός του πετρώματος επιτυγχάνεται λόγω των τάσεων που ασκούν σε αυτό τα κοπτικά εργαλεία της μηχανής εξόρυξης. Η συγκέντρωση μεγάλης δύναμης σε περιορισμένη επιφάνεια δημιουργεί μια εντατική κατάσταση η οποία τελικά οδηγεί στην αστοχία του πετρώματος τη στιγμή που οι τάσεις ξεπερνούν τη μηχανική του αντοχή.

Η επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα γίνει η εξόρυξη είναι μια ιδιαίτερος πολύπλοκη εργασία και προϋποθέτει την πραγματοποίηση λεπτομερούς τεχνικο-οικονομικής μελέτης στην οποία θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ένας πολύ μεγάλος αριθμός παραμέτρων που σχετίζονται με την εξορυξιμότητα του πετρώματος. Η ορθή εφαρμογή και των δύο μεθόδων απαιτεί ειδικές γνώσεις και ιδιαίτερα προσεκτικούς χειρισμούς από εξειδικευμένο προσωπικό. Ο μηχανικός που σχεδιάζει την εξόρυξη πρέπει πάντοτε να μεριμνεί ώστε το πέτρωμα που περιβάλλει τον όγκο που εξορύσσεται να υφίσταται την ελάχιστη δυνατή καταπόνηση, προκειμένου να εξασφαλίζονται οι ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια που το εργοτάξιο/λατομείο/μεταλλείο βρίσκεται σε λειτουργία.

Πολύ σοβαρά πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη και οι διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνοδεύουν τη διαδικασία της εξόρυξης. Η επέκταση οικισμών σε περιοχές που άλλοτε αποτελούσαν χώρους λατομικής και μεταλλευτικής εκμετάλλευσης καθώς και η ανάγκη για την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων εντός κατοικημένων περιοχών, σε συνδυασμό με την αυξημένη πλέον ευαισθησία των

ανθρώπων για το περιβάλλον, καθιστούν το θέμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ιδιαίτερα σημαντικό.

2.2 Μηχανισμός θραύσης του πετρώματος

2.2.1 Γενικές θεωρίες θραύσης

Ανεξαρτήτως του ποια από τις δύο παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιείται, για να πραγματοποιηθεί εξόρυξη απαιτείται η ανάλωση ενέργειας, προκειμένου να επιτευχθεί η άσκηση έντονης δυναμικής φόρτισης στον προς εξόρυξη όγκο και με τη μορφή ενέργειας παραμορφώσεως να προκληθεί τελικά η θραύση του. Είναι προφανές ότι για να δημιουργηθούν καινούριες επιφάνειες εντός της μάζας του πετρώματος και το πέτρωμα να σπάσει σε μικρότερα τεμάχια, οι ασκούμενες δυνάμεις θα πρέπει να υπερβαίνουν τις δυνάμεις που συγκρατούν το πέτρωμα σε συμπαγή μορφή.

Τα περισσότερα μεταλλεύματα/πετρώματα/ορυκτά, στις συνηθισμένες συνθήκες φόρτισης, συμπεριφέρονται ως ψαθυρά υλικά. Ψαθυρά καλούνται εκείνα τα υλικά τα οποία θραύονται χωρίς να έχουν προηγουμένως υποστεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση καθώς και εκείνα τα οποία μέχρι το σημείο θραύσης τους έχουν ελαστική συμπεριφορά.

Η διαδικασία της ελάττωσης του μεγέθους των τεμαχίων πετρώματος/ορυκτού/μεταλλεύματος σε μεγέθη κατάλληλα για επεξεργασία ή χρήση, ονομάζεται κατάτμηση. Η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία νέων επιφανειών καλείται «ειδική ενέργεια κατάτμησης» (specific fracture surface energy) και οι τιμές που λαμβάνει για τους διάφορους τύπους πετρώματος δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Η γενική μορφή της εξίσωσης που δίνει την ειδική ενέργεια κατάτμησης ενός υλικού είναι (όπως αναφέρεται από τον Σταμπολτζή, 1994):

$$\varepsilon = C \cdot F(D, d) \quad (2.1)$$

όπου:

ε = ειδική ενέργεια κατάτμησης

- C = σταθερά που η τιμή της εξαρτάται από το σύστημα κατάτμησης και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού
- F(D,d) = συνάρτηση του μεγέθους του υλικού τροφοδοσίας (D) και του μεγέθους του προϊόντος (d).

Πίνακας 2.1: Ειδική ενέργεια κατάτμησης διαφόρων πετρωμάτων (Berta, 1990)

Πέτρωμα	Ειδική ενέργεια κατάτμησης (10^{-3} MJ/m ²)
Γρανίτης	1,68
Βασάλτης	1,65
Διαβάσης	1,92
Ψαμμίτης	1,18
Χαλαζίτης	1,63
Ασβεστόλιθος	1,47
Δολομίτης	1,54
Μάργα	1,10
Κροκαλοπαγή	0,60-1,60

Σύμφωνα με τον Rittinger (όπως αναφέρεται από τον Σταμπολτζή, 1994), η ενέργεια που καταναλώνεται για την κατάτμηση ενός ψαθυρού υλικού είναι ανάλογη της νέας επιφάνειας που δημιουργείται. Επομένως η ειδική ενέργεια κατάτμησης είναι ανάλογη της νέας ειδικής επιφάνειας που παράγεται, δηλ. της επιφάνειας ανά μονάδα όγκου του υλικού και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\varepsilon_R = C_R \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (2.2)$$

όπου:

- ε_R = ειδική ενέργεια κατάτμησης κατά τον Rittinger
- C_R = σταθερά του Rittinger
- d = το μέγεθος των τεμαχίων προϊόντος
- D = το μέγεθος των τεμαχίων τροφοδοσίας.

Σύμφωνα με τον Kick (όπως αναφέρεται από τον Σταμπολτζή, 1994), η ενέργεια που απαιτείται να καταναλωθεί προκειμένου να παραχθούν ανάλογες μεταβολές στην κατάτμηση όμοιων γεωμετρικών σωμάτων κάτω από τις ίδιες τεχνολογικές συνθήκες,

είναι ανάλογη προς τον όγκο V ή το βάρος των σωμάτων. Ως εκ τούτου η ειδική ενέργεια κατάρτισης (παραμόρφωσης) παραμένει σταθερή για ένα δεδομένο λόγο κατάρτισης (reduction ratio) και δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_K = C_K \cdot \ln \frac{D}{d} \quad (2.3)$$

όπου:

ε_K = ειδική ενέργεια κατάρτισης κατά τον Kick

C_K = σταθερά του Kick

D = το μέγεθος των τεμαχίων τροφοδοσίας

d = το μέγεθος των τεμαχίων προϊόντος.

Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα ο Bond (όπως αναφέρεται από τον Σταμπολτζή, 1994), ανέπτυξε μία θεωρία σύμφωνα με την οποία η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση ενός στερεού είναι ανάλογη του συνολικού μήκους των ρωγμών που αναπτύσσονται σε αυτό. Το μήκος μιας ρωγμής μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της επιφάνειας που τελικά δημιουργήθηκε. Ως εκ τούτου το συνολικό μήκος των ρωγμών στη μονάδα όγκου του υλικού είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της ειδικής επιφάνειας και η ειδική ενέργεια κατάρτισης ανάλογη της αύξησης του συνολικού μήκους των ρωγμών της μονάδας όγκου του υλικού. Η σχέση που περιγράφει τα παραπάνω είναι η εξής:

$$\varepsilon_B = C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (2.4)$$

όπου:

ε_B = ειδική ενέργεια κατάρτισης κατά τον Bond

C_B = σταθερά του Bond

d = το μέγεθος των τεμαχίων προϊόντος

D = το μέγεθος των τεμαχίων τροφοδοσίας.

Η τιμή της σταθεράς C_B προσδιορίστηκε πειραματικά:

$$C_B = 10w_i \quad (2.5)$$

Η σταθερά w_i ονομάζεται δείκτης έργου κατάτμησης (work index) ή δείκτης έργου Bond (Bond index) και σχετίζεται με την αντοχή του υλικού και επομένως με την ενέργεια που απαιτείται να καταναλωθεί προκειμένου να ελαττωθεί το μέγεθος των τεμαχίων του. Τόσο το μέγεθος της τροφοδοσίας (D), όσο και το μέγεθος του προϊόντος (d), αντιστοιχούν στο ποσοστό του 80% αθροιστικά διερχόμενου.

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (2.4) και (2.5) προκύπτει:

$$\varepsilon_B = 10w_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (6)$$

όπου:

ε_B = ειδική ενέργεια κατάτμησης κατά τον Bond (kWh/t)

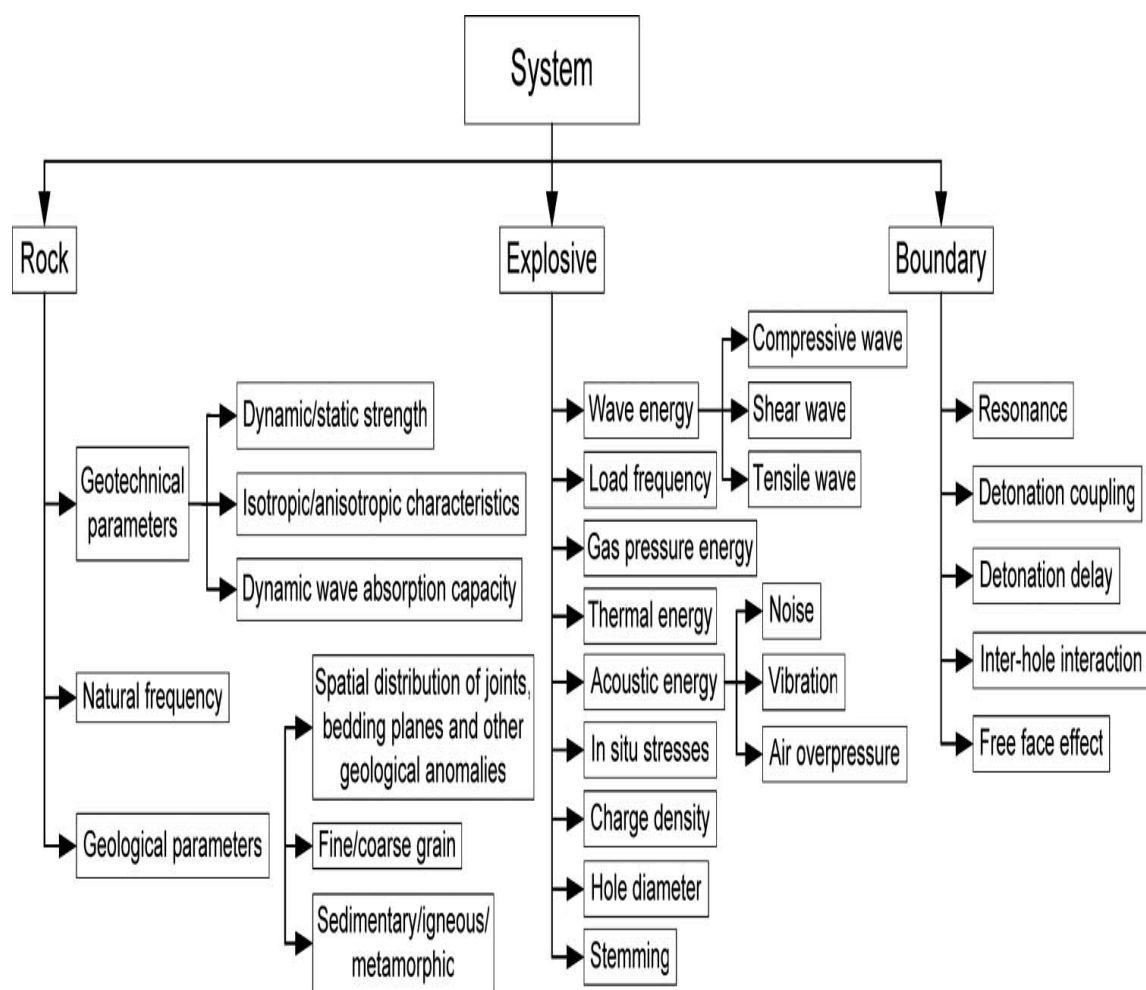
w_i = δείκτης έργου κατάτμησης (kWh/t)

d = το μέγεθος του προϊόντος (μm)

D = μέγεθος της τροφοδοσίας (μm).

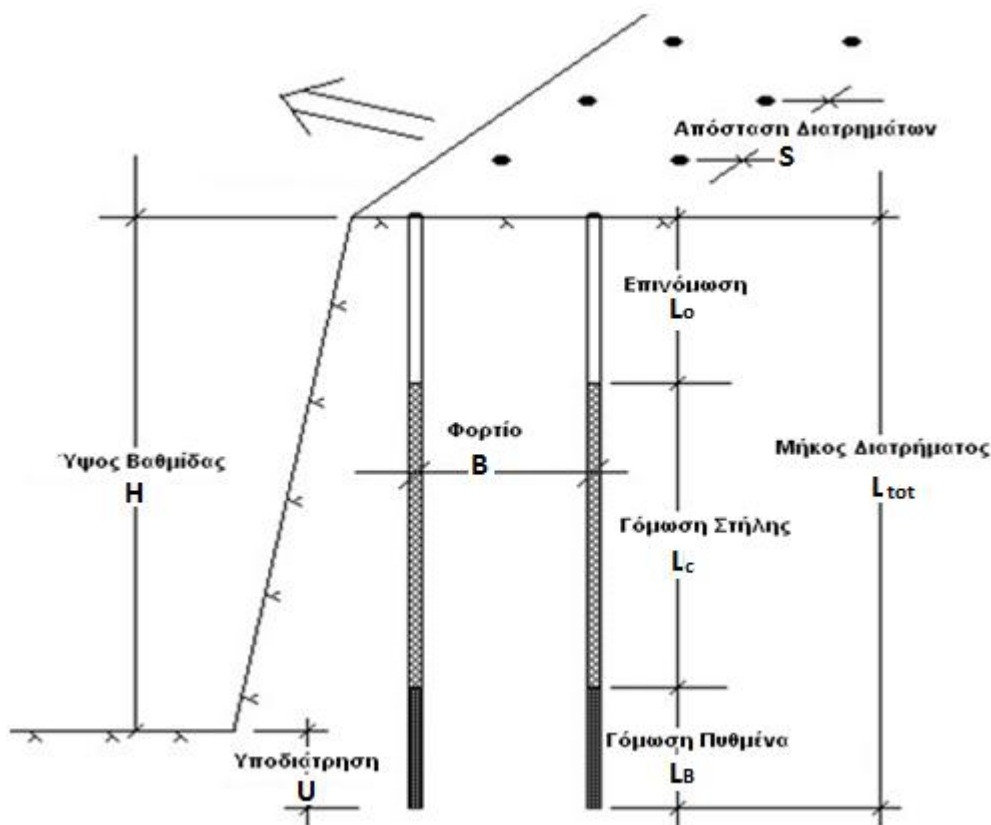
2.2.2 Θραύση του πετρώματος με τη χρήση εκρηκτικών υλών

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 2.1, η θραύση των πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών είναι μια ιδιαιτέρως πολύπλοκη διαδικασία, για την αποτελεσματική υλοποίηση της οποίας απαιτείται η συνεκτίμηση μιας σειράς παραγόντων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους διαμορφώνοντας το τελικό αποτέλεσμα της εξόρυξης.



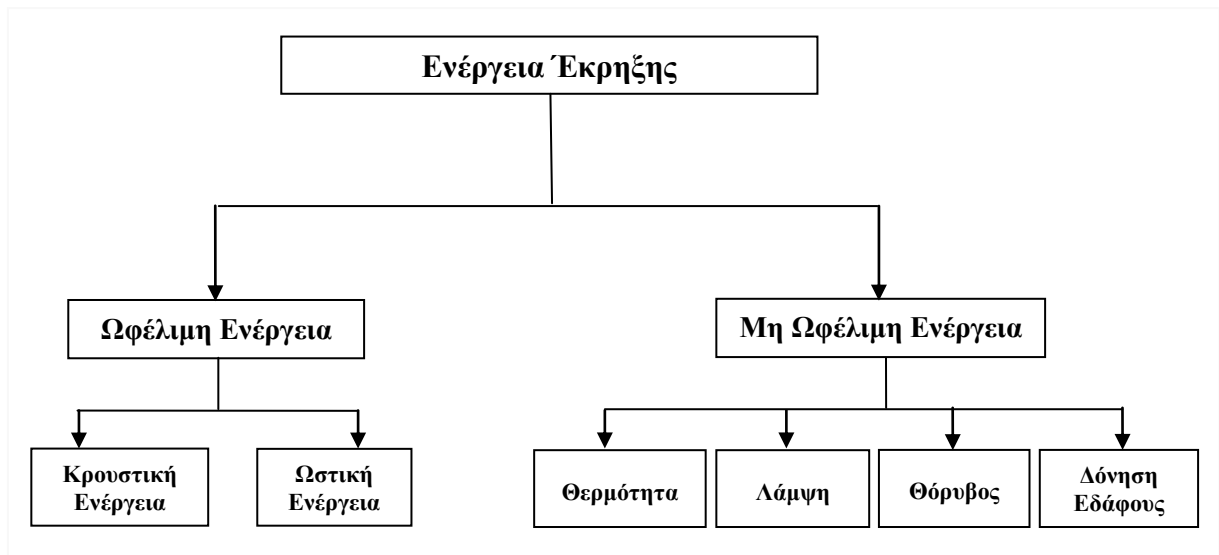
Εικόνα 2.1: Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της εξόρυξης πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών (Saharan *et al.* 2006).

Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ενός σχεδίου ανατίναξης, κατά την εξόρυξη των πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών σε υπαίθρια μέτωπα μορφής ορθής βαθμίδας. Μια ή περισσότερες σειρές κατακόρυφων ή ελαφρώς κεκλιμένων διατρημάτων ορύσσονται με τη χρήση κατάλληλου διατρητικού εξοπλισμού. Εντός του διατρήματος τοποθετούνται τα μέσα έναυσης, η έναυσματική γόμωση/γόμωση πυθμένα, η γόμωση στήλης και η επιγόμωση, στη συνέχεια πραγματοποιείται η συνδεσμολογία των μέσων έναυσης με τη γραμμή πυροδότησης και τέλος γίνεται η πυροδότηση τους. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να δίνεται ώστε οι παραπάνω εργασίες να πραγματοποιούνται με μεγάλη προσοχή και αφού πρώτα έχουν ληφθεί όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας, καθώς ο μη προσεκτικός χειρισμός των εκρηκτικών υλών ενέχει αυξημένους κινδύνους για την ασφάλεια τόσο των εργαζομένων όσο και αυτού του ίδιου του έργου.



Εικόνα 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σχεδίου ανατίναξης.

Η ενέργεια που εκλύεται κατά την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης, ανάλογα με το εάν συνεισφέρει στη διαδικασία της εξόρυξης ή όχι, διακρίνεται σε «ωφέλιμη» και μη. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 που ακολουθεί, η «ωφέλιμη ενέργεια» αναφέρεται σε εκείνο το ποσοστό της ενέργειας το οποίο επιφέρει τη θραύση του πετρώματος και τη μετακίνηση του από τη φυσική του θέση, ενώ η «μη ωφέλιμη ενέργεια» αναφέρεται στο ποσοστό της ενέργειας που διαχέεται στον περιβάλλοντα του μετώπου της εξόρυξης χώρο, προκαλώντας στις περισσότερες των περιπτώσεων όχληση.

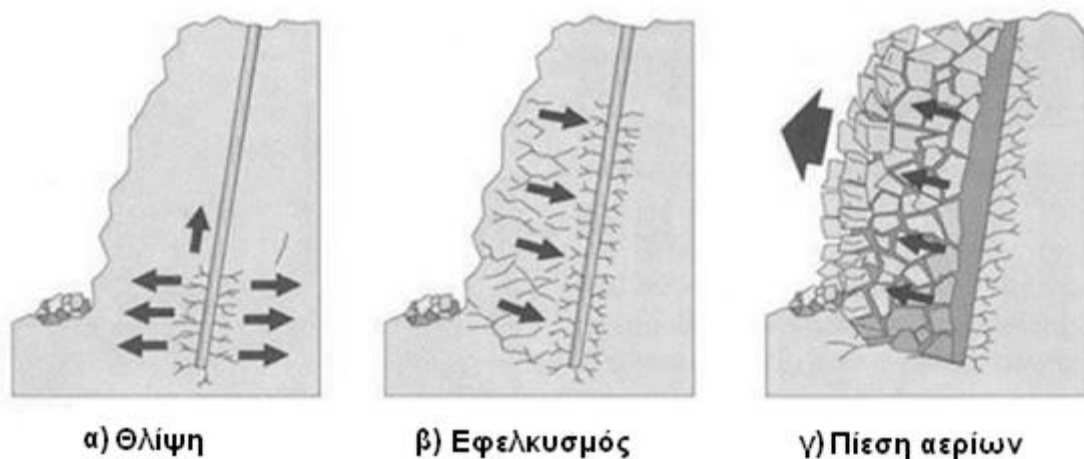


Εικόνα 2.3: Διαχωρισμός της ενέργειας που παράγεται κατά την ανατίναξη της εκρηκτικής ύλης σε ωφέλιμη και μη (Pijush P.R. 2005).

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός σύζευξης της εκρηκτικής ύλης με τα τοιχώματα του διατρήματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της εκρηκτικής ενέργειας που μεταφέρεται στο πέτρωμα. Εάν η εκρηκτική ύλη βρισκόταν τοποθετημένη στην επιφάνεια του πετρώματος και όχι εγκλεισμένη εντός του διατρήματος, τότε το μεγαλύτερο ποσοστό της εκλυόμενης εκρηκτικής ενέργειας θα διοχετευόταν στον περιβάλλοντα χώρο και μόνο ένα μικρό ποσοστό της θα συνεισέφερε στη θραύση του πετρώματος (δημιουργία κρατήρα). Η ποσότητα εκρηκτικής ύλης στην περίπτωση αυτή, θα ήταν πολύ μεγαλύτερη από εκείνη που θα χρειαζόταν να πυροδοτηθεί εάν η τοποθέτηση γινόταν εντός ενός διατρήματος, προκειμένου να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός θρυμματισμού και για τις δύο περιπτώσεις (Konya 2003). Ως εκ τούτου η τοποθέτηση των εκρηκτικών υλών μέσα σε διατρήματα κρίνεται σκόπιμη και αποτελεί μονόδρομο, καθότι εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή κατανομή της εκρηκτικής ενέργειας εντός της βραχομάζας.

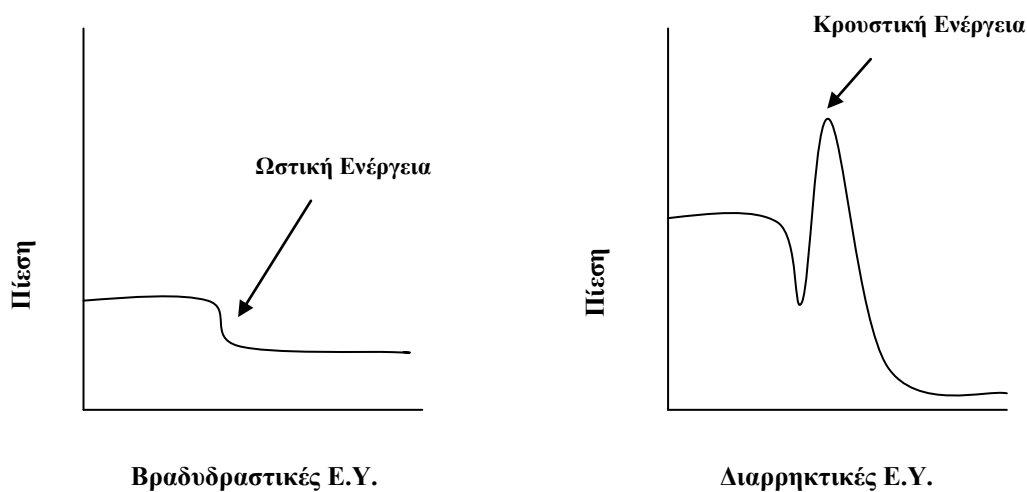
Κατά την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης εντός των διατρημάτων, παράγεται ενέργεια η οποία προκαλεί αρχικά την θραύση του πετρώματος που βρίσκεται μεταξύ της πρώτης σειράς διατρημάτων και της ελεύθερης επιφάνειας του μετώπου και εν συνεχεία την απόσπαση και μετακίνηση του τμήματος αυτού από τη φυσική του θέση. Στην Εικόνα 2.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα στάδια του μηχανισμού που επιφέρει τη θραύση και μετακίνηση του πετρώματος. Τα στάδια αυτά είναι:

- Δημιουργία θλιπτικών κυμάτων τα οποία διαδίδονται μέσω του πετρώματος με ταχύτητα που εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος στο υπόψη πέτρωμα (2500-6000 m/s), δημιουργώντας μικρορωγμές περιμετρικά του διατρήματος.
- Ανάκλαση των θλιπτικών κυμάτων στις ελεύθερες επιφάνειες (πρανές μετώπου, προϋπάρχουσες ασυνέχειες) και επιστροφή αυτών με τη μορφή εφελκυστικών κυμάτων, δημιουργώντας εκτεταμένο δίκτυο ρωγμών στον χώρο μεταξύ του πρανούς του μετώπου και της γραμμής διατρημάτων.
- Τα παραγόμενα κατά την έκρηξη αέρια εκτονώνονται διευρύνοντας τις προϋπάρχουσες φυσικές ρωγμές του πετρώματος καθώς και τις ρωγμές που δημιουργούνται κατά τα δύο προηγούμενα στάδια, με αποτέλεσμα την απόσπαση, μετακίνηση και απόθεση του πετρώματος υπό τη μορφή σωρού μπροστά από το μέτωπο.



Εικόνα 2.4: Στάδια του μηχανισμού θραύσης (Παναγιώτου, χ.χ.).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5 που ακολουθεί, οι εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε βραδυδραστικές και διαρρηκτικές, ανάλογα με το εάν ο ρυθμός που γίνεται η αντίδραση της έκρηξης (VOD, Velocity Of Detonation), είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος από την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο υλικό της εκρηκτικής ύλης, η οποία συνήθως είναι μικρότερη από 1500 m/s.



Εικόνα 2.5: Βραδυδραστικές και διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες.

Στην περίπτωση των βραδυδραστικών εκρηκτικών υλών (Low Explosives-LE), λόγω της σχετικά μικρής ταχύτητας έκρηξης (600-1200 m/s) αναπτύσσονται μικρές πιέσεις η ενέργεια των οποίων είναι βραδεία και σταδιακή (ωστική ενέργεια). Η μοναδική βραδυδραστική εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιείται για την εξόρυξη κυρίως διακοσμητικών λίθων, είναι η μαύρη πυρίτιδα, η διέγερση της οποίας γίνεται με θερμότητα (φλόγα).

Σε ότι αφορά τις διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες (High Explosives – HE), η ταχύτητα με την οποία αυτές εκρήγνυνται είναι πολύ μεγάλη (1800-8000m/s), με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ιδιαίτερα υψηλών πιέσεων σε ελάχιστο χρόνο (κρουστική ενέργεια). Οι εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας αυτής διακρίνονται σε:

- Πρωτογενείς (primary HE), οι οποίες διεγείρονται προς έκρηξη με θερμότητα (π.χ. αζίδιο του μολύβδου) και χρησιμοποιούνται για τη γόμωση των καψυλλίων.
- Δευτερογενείς (secondary HE), οι οποίες διεγείρονται προς έκρηξη με μηχανικό τρόπο (κρουστικό κύμα) και αποτελούν τη συντριπτική πλειονότητα των εμπορικών

εκρηκτικών υλών που χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη πετρωμάτων (π.χ. ANFO, δυναμίτιδες, αμμωνίτιδες, γαλακτώματα).

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των συνηθισμένων εμπορικών εκρηκτικών υλών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 .

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες εκρηκτικών υλών (Τσουτρέλης 2001).

Εκρηκτική Ύλη	Ποκνότητα (kg/m ³)	Διατιθέμενη Ενέργεια (MJ/kg)	Ταχύτητα Έκρηξης (m/s)
Ζελατίνη	1550	6,74	7500
Ζελατινοδυναμίτδα	1420	4,44	6100
Αμμωνιοδυναμίτδα	1200	3,52	3500
Αμμωνίτης	1200	3,00	3000
ANFO	800	3,66	2700
Slurry	1100	4,20	3500

Οι Ouchterlony *et al.* (2003), έπειτα από μετρήσεις που πραγματοποίησαν κατά τη διάρκεια ανατινάξεων παραγωγής σε ασβεστολιθικό πέτρωμα, κατέληξαν ότι το 3-12% της εκρηκτικής ενέργειας μετατρέπεται σε σεισμική, το 3-12% σε κινητική και μόλις το 0,1-0,2% επιφέρει τη θραύση του πετρώματος. Από τα αποτελέσματα μελέτης που πραγματοποιήθηκε από τους Sanchidrian *et al.* (2007a/b), προκύπτει ότι το ποσοστό της εκρηκτικής ενέργειας που καταναλώνεται για τη θραύση του πετρώματος κυμαίνεται από 2-6%, το ποσοστό που μετατρέπεται σε σεισμική κυμαίνεται μεταξύ 1-3%, ενώ αυτό το οποίο μετατρέπεται σε κινητική κυμαίνεται από 3-21%. Σύμφωνα με τον Berta (1990), το 15% της εκρηκτικής ενέργειας καταναλώνεται για τη θραύση του πετρώματος, το 4% για τη μετατόπιση του, ένα ποσοστό μικρότερο του 1% επιφέρει τη ρωγμάτωση του τμήματος του μετώπου που βρίσκεται πίσω από τη γραμμή των διατρημάτων (backbreak), ενώ το υπόλοιπο 80% της εκρηκτικής ενέργειας διαχέεται στον περιβάλλοντα χώρο προκαλώντας όχληση (εδαφικές δονήσεις και υπερπίεση αερίων).

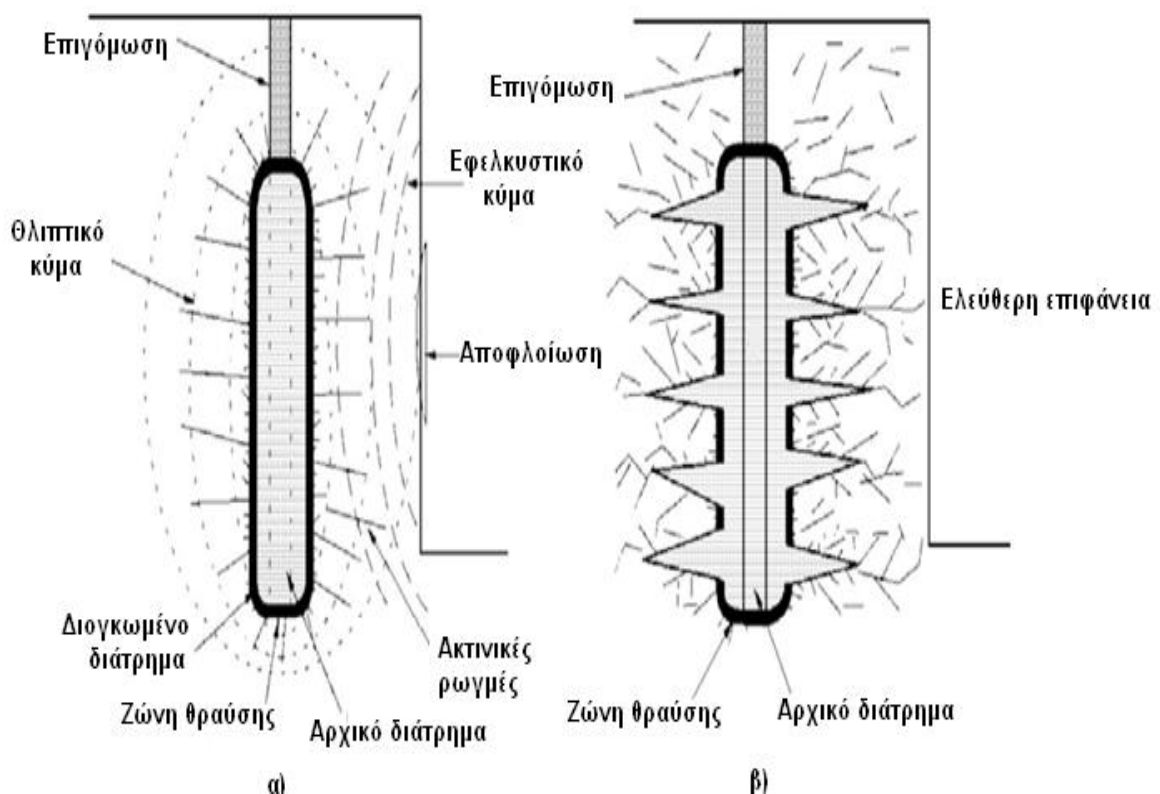
Τα αέρια τα οποία απελευθερώνονται κατά την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης εξασκούν εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις στα τοιχώματα του διατρήματος εξαιτίας του περιορισμού τους εντός ενός χώρου ο οποίος είναι περίπου 1000 φορές μικρότερος από εκείνον που θα καταλάμβαναν υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας των αερίων (1650-3850°C), έχει ως αποτέλεσμα τον εκατονταπλασιασμό του όγκου τους, με αποτέλεσμα η πίεση που τελικά ασκείται στα

τοιχώματα του διατρήματος να κυμαίνεται από 2000 έως 10000 MPa ανάλογα με τον τύπο της εκρηκτικής ύλης.

Η δημιουργία τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος οφείλεται (Scott 1996):

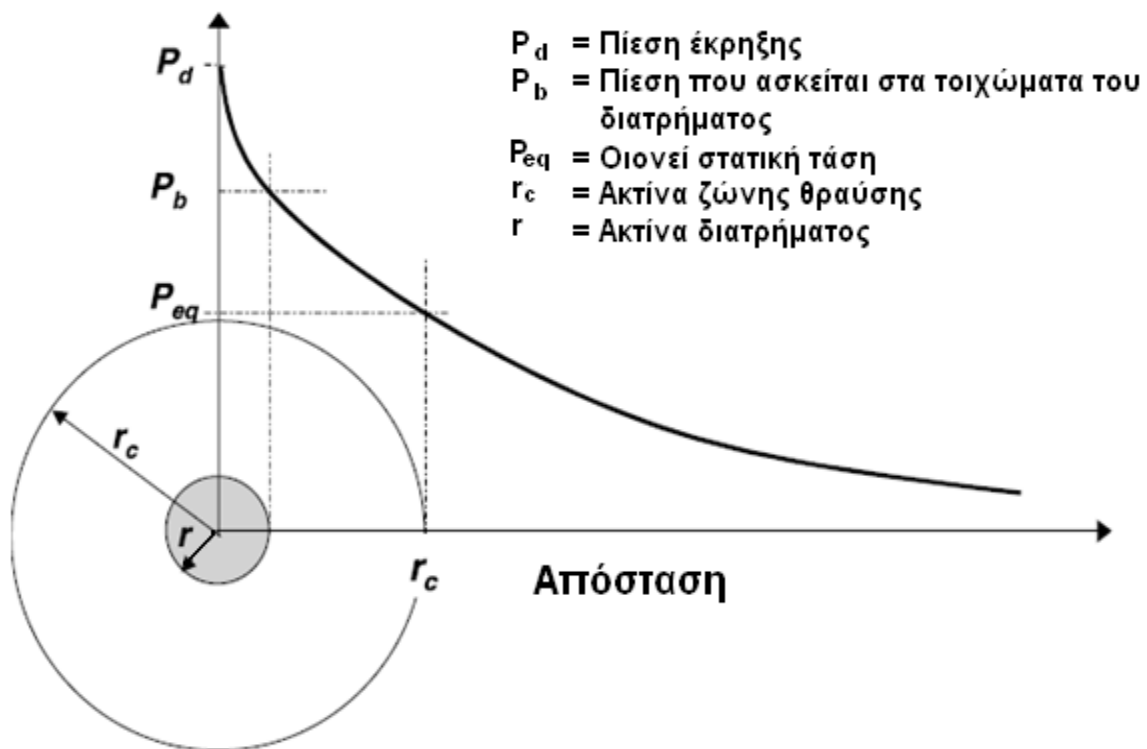
- Στη θραύση του άρρηκτου πετρώματος.
- Στη απελευθέρωση των in situ τεμαχίων.
- Στην επιμήκυνση των ρωγμών που προϋπάρχουν στο πέτρωμα.

Η έκρηξη της εκρηκτικής ύλης εντός του διατρήματος δημιουργεί μια κατάσταση δυναμικής εντατικής φόρτισης (dynamic stress), η οποία αρχικά προκαλεί τη θραύση του πετρώματος που βρίσκεται περιμετρικά του διατρήματος. Τα τοιχώματα του διατρήματος υπόκεινται σε ακτινική θλιπτική επιτάχυνση (radial compression acceleration), το αποτέλεσμα της οποίας είναι η δημιουργία ενός κρουστικού κύματος (shock wave) το οποίο διαδίδεται ακτινικά, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.6α.



Εικόνα 2.6: α) Ακτινική διάδοση κρουστικού κύματος, β) Εκτόνωση των αερίων της έκρηξης (JKMRC 1996).

Το τμήμα του πετρώματος το οποίο βρίσκεται πλησιέστερα στο διάτρημα (crushing zone), υφίσταται έντονο θρυμματισμό λόγω του ότι η θλιπτική τάση που ασκείται σε αυτό ξεπερνά κατά πολύ την τιμή της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη. Καθώς το πέτρωμα θρυμματίζεται ο όγκος του διατρήματος διαστέλλεται και τελικά δημιουργείται μια κατάσταση οιονεί στατικής ισορροπίας (quasi-static equilibrium state) (Jaeger *et al.* 2007). Η τιμή της οιονεί στατικής τάσης είναι μικρότερη της μέγιστης τάσης που δημιουργείται εξαιτίας του κρουστικού κύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα εξασθένησης της θλιπτικής τάσης σε συνάρτηση με την απόσταση από το διάτρημα (Onederra *et al.* 2004a).

Η έντονη κονιορτοποίηση και η μεγάλη έκταση της ζώνης θραύσης έχουν ως αποτέλεσμα την άμεση ελάττωση της ασκούμενης φόρτισης, ελάττωση η οποία πραγματοποιείται με μικρότερο ρυθμό πέρα από τα όρια της ζώνης αυτής λόγω της ελαστικής συμπεριφοράς του πετρώματος (Hagan 1979). Σύμφωνα με τους Langefors *et al.* (1963), για τα σκληρά πετρώματα η ζώνη θραύσης δεν μπορεί να έχει έκταση μεγαλύτερη της ακτίνας του διατρήματος. Οι Brady *et al.* (1993), θεωρούν ότι η ακτίνα της ζώνης αυτής είναι της τάξεως του διπλάσιου της ακτίνας του διατρήματος, ενώ ο Bhandari (1997) αναφέρει ότι το πάχος της ισούται με το διπλάσιο της διαμέτρου του

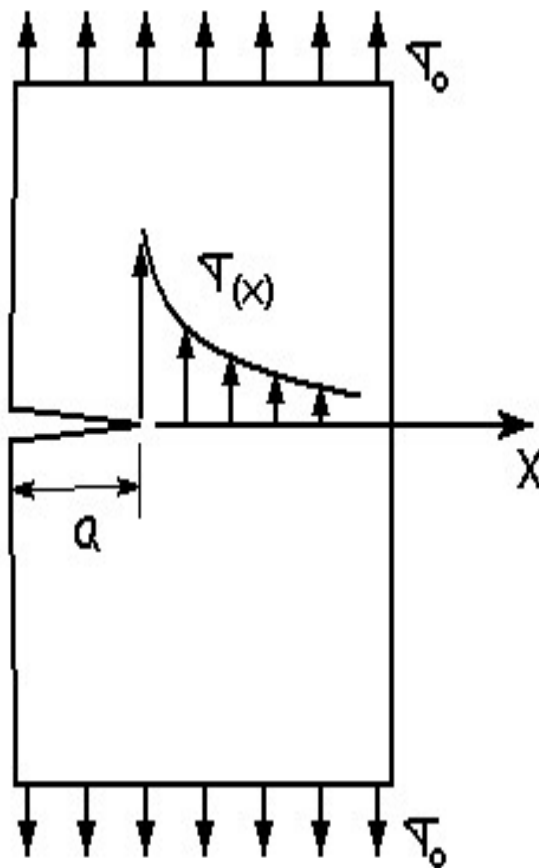
διατρήματος. Οι Esen *et al.* (2003), κατέληξαν στο ότι η ακτίνα της ζώνης θραύσης αποτελεί συνάρτηση της ακτίνας του διατρήματος και του δείκτη CZI (Crushing Zone Index), ο οποίος σχετίζεται με την πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του διατρήματος, τη θλιπτική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson του πετρώματος. Για πετρώματα τα οποία είναι μαλακά και περισσότερο πορώδη, οι Liu *et al.* (1993), κατέληξαν ότι η ακτίνα της ζώνης θραύσης ισούται με 2-4 φορές την ακτίνα του διατρήματος, για εκείνες τις περιπτώσεις όπου η εξόρυξη γίνεται με τη χρήση των κοινών εμπορικών εκρηκτικών υλών. Περίπου το 30% της κρουστικής ενέργειας που παράγεται από την ανατίναξη της εκρηκτική ύλης, καταναλώνεται προκειμένου να γίνει η θραύση της συγκεκριμένης ζώνης, ενώ η συμμετοχή της σε ότι αφορά τον συνολικό όγκο του εξορυγμένου πετρώματος είναι της τάξης του 0,1% ανά διάτρημα (Hagan 1979).

Πέραν της ακτινικής θλιπτικής τάσης, στα τοιχώματα του διατρήματος ασκείται και εφαπτομενική εφελκυστική τάση (tangential tension stress), η οποία προκαλεί ακτινική ρωγμάτωση στο πέτρωμα λόγω της χαμηλής αντοχής του σε εφελκυσμό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6β. Καθώς τα αέρια τη έκρηξης εισχωρούν στις ρωγμές του πετρώματος, αυτές επιμηκύνονται με ταχύτητα που αντιστοιχεί στο 10-30% της ταχύτητας διάδοσης του κρουστικού κύματος, επιφέροντας τον επιπλέον θρυμματισμό του πετρώματος. Το μήκος των ακτινικών ρωγμών είναι συνήθως ίσο με 8-20 φορές τη διάμετρο του διατρήματος (Persson *et al.* 1994) και μια από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες τους είναι ότι έχουν την τάση να διακλαδώνονται κατά την εξάπλωση τους, με ρυθμό ο οποίος είναι ανάλογος με την ταχύτητα διάδοσης τους (Hagan 1979).

Παρόλο που η παραπάνω θεωρία δημιουργίας ακτινικών ρωγμών έχει τύχει ευρείας αποδοχής, έχουν διατυπωθεί και άλλες όπως αυτή του Brinkmann (1990), ο οποίος θεωρεί το κρουστικό κύμα υπεύθυνο για τη ρωγμάτωση που παρατηρείται στο τμήμα του μετώπου πίσω από τη γραμμή των διατρημάτων (backbrake) και τα αέρια της έκρηξης υπεύθυνα για τη θραύση του φορτίου της προς εξόρυξη βαθμίδας. Οι Olsson *et al.* (2002), πραγματοποίησαν περαιτέρω έρευνα επιβεβαιώνοντας το σκέλος της θεωρίας του Brinkmann που σχετίζεται με τη δημιουργία ρωγμών, θεωρούν όμως ότι τα αέρια της έκρηξης είναι υπεύθυνα μόνο για τη μετακίνηση του θραυσμένου πετρώματος.

Παρόλο που κάποιος θα περίμενε οι ρωγμές να ξεκινούν από το διάτρημα και να εκτείνονται συνεχώς σε ολόκληρο τον όγκο της βαθμίδας, πειραματικές ανατινάξεις μικρής κλίμακας έδειξαν ότι αρχικά το δίκτυο των ρωγμών δεν είναι ενιαίο, το μήκος αυτών είναι σχετικά μικρό ενώ η παρουσία τους περιορίζεται μόνο γύρω από το διάτρημα.

Οι ρωγμές επιμηκύνονται και τελικά ενώνονται μεταξύ τους λόγω της αύξησης της τάσης στις απολήξεις τους (Hagan 1979). Η στατική δυσθραυστότητα (static fracture toughness, K_{IC}), αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα για κάθε πέτρωμα και είναι δείκτης της ικανότητας του να αντιστέκεται στη δημιουργία και την εξάπλωση ρωγμών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8. Η τιμή της στατικής δυσθραυστότητας είναι ανάλογη της υπό περιορισμό πίεσης που ασκείται στο πέτρωμα (Al-Shayea 2002) και αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των κόκκων των ορυκτών (grain size) (Huang *et al.* 1985).



Εικόνα 2.8: Διάδοση των ρωγμών λόγω συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων (Persson *et al.* 1994).

Όσο αυξάνει το μήκος μιας ρωγμής, τόσο πιο ασταθής αυτή γίνεται και η πίεση που απαιτείται να ασκηθεί προκειμένου να επιμηκυνθεί, είναι μικρότερη εκείνης που απαιτείται για την επιμήκυνση μιας ρωγμής μικρότερου μήκους. Ως εκ τούτου οι ρωγμές με μεγάλο μήκος επιμηκύνονται και διαδίδονται εντός του πετρώματος γρηγορότερα. Σύμφωνα με τον Hagan (1979), όταν μια ρωγμή αρχίζει να επιμηκύνεται το ίδιο ακριβώς

συμβαίνει και με τη ρωγμή που βρίσκεται αντιδιαμετρικά αυτής ως προς τον θάλαμο το διατρήματος. Το μήκος το οποίο τελικά θα αποκτήσει εξαρτάται από τη μέγιστη πίεση που ασκείται στο διάτρημα, από την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος και από την ικανότητα του να απορροφά ενέργεια. Σύμφωνα με τους Kutter *et al.* (1971), η τιμή της ελάχιστης πίεσης που απαιτείται για την επέκταση ακτινικών ρωγμών δεδομένου μήκους, αυξάνει όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των ρωγμών.

Όταν το θλιπτικό κύμα κατά τη διέλευση του δεν συναντά κάποια ελεύθερη επιφάνεια, τότε η διάδοση του εντός του πετρώματος συνεχίζεται έως ότου τελικά αυτό εξασθενήσει. Στις περιπτώσεις αυτές η θραύση δεν είναι καθόλου ικανοποιητική, αφού το μόνο που επιτυγχάνεται είναι η μερική διεύρυνση της διαμέτρου του διατρήματος και δημιουργία μικρορωγμών στη ζώνη θραύσης (Langefors *et al.* 1963). Ως εκ τούτου η ύπαρξη ελεύθερων επιφανειών κρίνεται αναγκαία προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική θραύση του πετρώματος.

Όταν κατά τη διέλευση του το θλιπτικό κύμα συναντήσει μια διεπιφάνεια με ένα άλλο υλικό (π.χ. τη διεπιφάνεια εκρηκτικής ύλης/αέρα, εκρηκτικής ύλης/πετρώματος, πετρώματος/αέρα ή πετρώματος/ασυνέχειας/πετρώματος), τότε ένα ποσοστό της ενέργειας του διαδίδεται στο δεύτερο υλικό, ενώ ένα άλλο ποσοστό ανακλάται και επιστρέφει στο πρώτο υλικό με τη μορφή εφελκυστικού κύματος. Το ποσοστό της ενέργειας που διαδίδεται μεταξύ των δύο υλικών ή που ανακλάται, εξαρτάται από την ακουστική εμπέδιση ή σύνθετη αντίσταση (impedance) του κάθε υλικού. Η ακουστική εμπέδιση δίνεται από την σχέση (όπως αναφέρεται από τον Παναγιώτου, χ.χ):

$$Z = \rho \cdot V \quad (2.7)$$

όπου:

Z = η ακουστική εμπέδιση ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

ρ = το ειδικό βάρος του υλικού (kg/m^3)

V = η ταχύτητα του ηχητικού κύματος στο υλικό (m/s).

Στην περίπτωση που το θλιπτικό κύμα, κατά τη διάδοση, προσπέσει σε μια ελεύθερη επιφάνεια (διεπιφάνεια πετρώματος/αέρα), τότε πρακτικά όλη η ενέργεια του

επιστρέφει στο πέτρωμα υπό τη μορφή εφελκυστικού κύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ακουστική εμπίδση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι κατά πολύ μικρότερη από εκείνη του πετρώματος.

Εάν η ένταση του εφελκυστικού κύματος ξεπερνά την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, τότε προκαλείται διάρρηξη του πετρώματος και απόσπαση τεμαχίων από την ελεύθερη επιφάνεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6α. Το φαινόμενο αυτό καλείται αποφλοΐωση (spalling). Η ένταση του εφελκυστικού κύματος είναι μικρότερη από εκείνη του θλιπτικού, ωστόσο είναι ικανή να θραύσει το πέτρωμα αφού η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι κατά πολύ μικρότερη της αντοχής του σε θλίψη. Ακόμα και όταν η ένταση του εφελκυστικού κύματος είναι μικρότερη από την τιμή της εφελκυστικής του αντοχής, η παρουσία των κυμάτων αυτών συνεισφέρει σημαντικά στην επιμήκυνση των ρωγμών που προϋπάρχουν στο πέτρωμα. Η ενέργεια που δαπανάται για τη δημιουργία των νέων ρωγμών και για την επιμήκυνση εκείνων που προϋπάρχουν ισοδυναμεί περίπου με το 11% της θεωρητικής τιμής της εκρηκτικής ενέργειας (Hamdi *et al.* 2008).

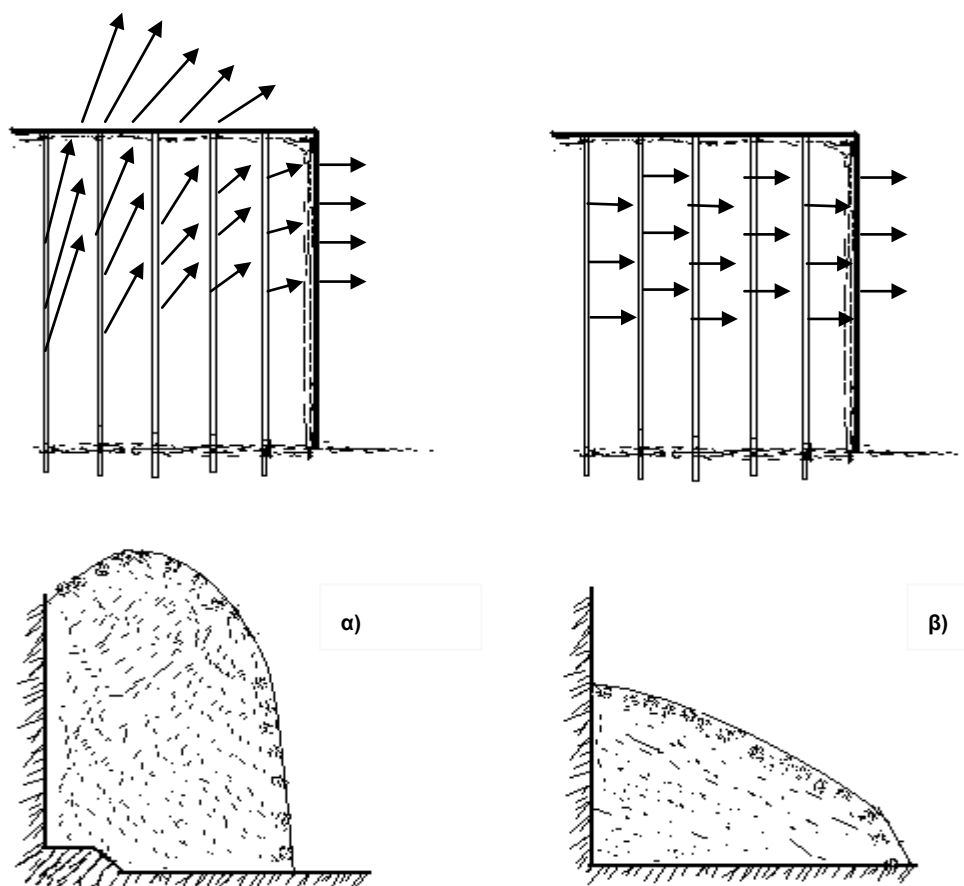
Ελεύθερη επιφάνεια δεν αποτελεί μονάχα το μέτωπο (πρανές) της βαθμίδας, αλλά και οποιοδήποτε μεγάλο άνοιγμα συναντάται εντός της μάζας του πετρώματος, το οποίο πληρούται με κάποιο διαφορετικό εδαφικό υλικό, με νερό ή με αέρα. Επομένως το θλιπτικό κύμα είναι δυνατόν να ανακλαστεί ακόμα και όταν κατά τη διέλευση του εντός του πετρώματος συναντήσει μια διευρυμένη ρωγμή ή μια ασυνέχεια.

Η δημιουργία ακτινικών ρωγμών και ο θρυμματισμός του πετρώματος λόγω της διάδοσης του κρουστικού κύματος αποτελούν τις δύο πρώτες φάσεις του μηχανισμού θραύσης. Η διάρκεια των φάσεων αυτών περιορίζεται σε λίγα μόνο milliseconds, σε αντίθεση με την τρίτη φάση η οποία εξελίσσεται πολύ πιο αργά. Κατά τη φάση αυτή τα αέρια της έκρηξης ασκούν μεγάλες πιέσεις στα τοιχώματα του διατρήματος, εισέρχονται εντός των ρωγμών και τις διαστέλλουν προκαλώντας έτσι τη διόγκωση (swelling) της μάζας του πετρώματος (JKMRC 1996).

Μέσω της διαδικασίας αυτής ενισχύεται ο μηχανισμός εξάπλωσης του δικτύου των ρωγμών, λόγω της εφελκυστικής φόρτισης που ασκείται σε αυτές, ενώ ταυτόχρονα το πέτρωμα τίθεται σε κίνηση και αποτίθεται τελικά με τη μορφή σωρού μπροστά από το μέτωπο. Κατά τη διάρκεια της τρίτης αυτής φάσης, λαμβάνει επίσης χώρα η απελευθέρωση των *in situ* τεμαχίων πετρώματος, αλλά και η θραύση λόγω σύγκρουσης των εκτοξευόμενων τεμαχίων (αυτογενής θραύση).

Καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματικότερη θραύση του πετρώματος είναι η ύπαρξη ικανοποιητικής επιγόμωσης. Με την επιγόμωση επιτυγχάνεται ο περιορισμός της πρόωρης εκτόνωσης των αερίων της έκρηξης από το στόμιο του διατηρήματος, μέχρις ότου αυτά αποκτήσουν την πίεση που απαιτείται προκειμένου να ενισχυθεί η θραύση και η μετακίνηση του εξορυσσόμενου όγκου. Το υλικό της επιγόμωσης, το οποίο συνήθως συνίσταται από τα τρίμματα της διάτρησης, δεχόμενο την πίεση των αερίων της έκρηξης συμπιέζεται εξασφαλίζοντας τον καλύτερο εγκλεισμό των αερίων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος κατά τον οποίο τα αέρια βρίσκονται εντός του διατηρήματος, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η συνεισφορά τους στη θραύση και μετακίνηση του εξορυσσόμενου όγκου.

Όταν το σχέδιο ανατίναξης περιλαμβάνει περισσότερες από μια σειρές διατηρημάτων, ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει να δίδεται στην επιλογή κατάλληλου χρόνου επιβράδυνσης για την πυροδότηση της κάθε σειράς (Jimeno *et al.* 1995, Onederra *et al.* 2003, Chavez *et al.* 2003). Οι χρόνοι επιβράδυνσης πρέπει να επιτρέπουν τη μετακίνηση του τμήματος του πετρώματος που βρίσκεται μπροστά από κάθε σειρά διατηρημάτων, προτού να ανατιναχθεί η επόμενη. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9, στην περίπτωση που δεν εξασφαλίζεται κάτι τέτοιο, ο βαθμός θραύσης που επιτυγχάνεται δεν είναι ο επιθυμητός, η μετακίνηση του εξορυγμένου πετρώματος πραγματοποιείται κατακόρυφα και όχι οριζόντια, η θραύση του «ποδιού» της βαθμίδας δεν είναι ικανοποιητική, το αέριο ωστικό κύμα είναι ισχυρό και οι εδαφικές δονήσεις έντονες. Οι χρόνοι επιβράδυνσης που επιλέγονται κυμαίνονται από 10ms/m φορτίου για την περίπτωση των «μαλακών» πετρωμάτων, έως 30ms/m φορτίου για την περίπτωση των «σκληρών», με συνηθέστερες τιμές εκείνες των 15-25ms/m φορτίου (Παναγίωτου, χ.χ.).



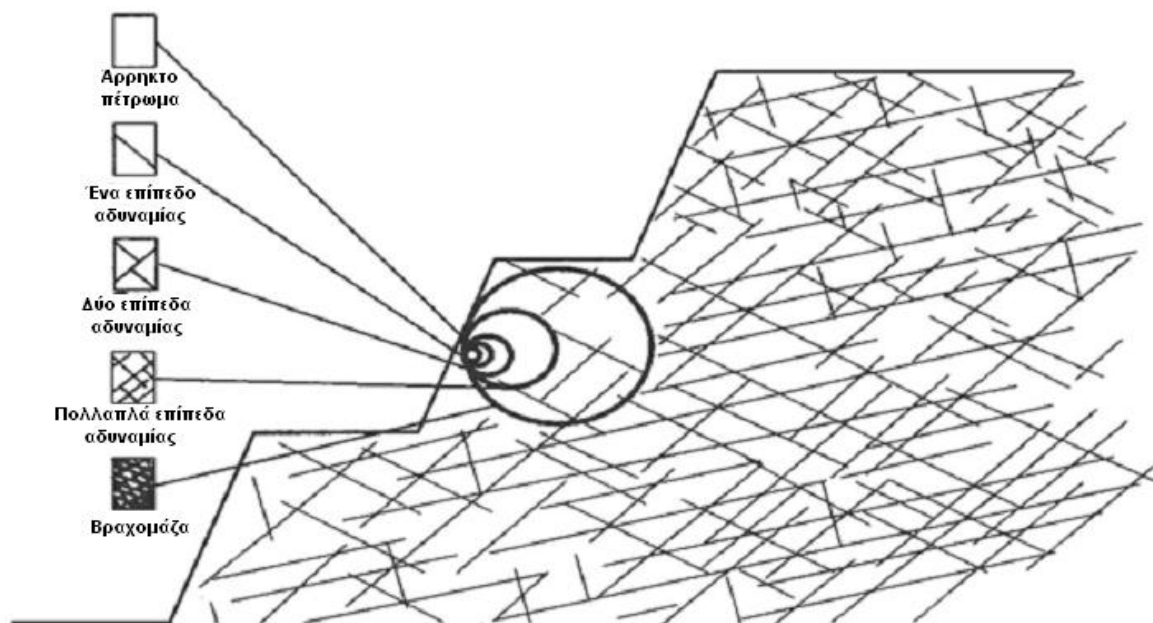
Εικόνα 2.9: α) Εσφαλμένη επιλογή χρόνου επιβράδυνσης, β) Ορθή επιλογή χρόνου επιβράδυνσης.

2.2.3 Ιδιότητες του πετρώματος

Τα αποτελέσματα τα οποία επιφέρει η έκρηξη μιας εκρηκτικής ύλης είναι άμεσα συνυφασμένα με τις ιδιότητες του υλικού που την περιβάλλει. Τα πετρώματα είναι εκ της φύσεως τους ανομοιογενή υλικά τα οποία παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις σε ότι αφορά τη σύσταση και τη δομή τους. Ως εκ τούτου η βελτιστοποίηση της εξόρυξης με τη χρήση εκρηκτικών υλών είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, καθώς εμπεριέχεται σε αυτήν το στοιχείο της αβεβαιότητας του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται το ανομοιογενές πέτρωμα σε συνθήκες υψηλής φόρτισης (Hagan, 1979). Ο τρόπος με τον οποίο οι ιδιότητες του πετρώματος επηρεάζουν την εξόρυξη του με τη χρήση εκρηκτικών υλών, καθώς και η εισαγωγή «δεικτών εξορυξιμότητας», έχει αποτελέσει επανειλημμένα το αντικείμενο έρευνας πολλών μελετητών (Just 1972, Kuznetsov 1973, Lilly 1986, Latham *et al.* 1999, Kaushik *et al.* 2003, Hamdi *et al.* 2005).

Η αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, η ύπαρξη ή όχι ασυνεχειών και ρωγμών, ο βαθμός ψαθυρότητας, το πορώδες και η πυκνότητα, είναι ορισμένα μόνο από τα χαρακτηριστικά ενός πετρώματος, τα οποία θα πρέπει να προσδιοριστούν προκειμένου να σχεδιαστεί μια αποτελεσματική ανατίναξη. Κάθε ένα χαρακτηριστικό σχετίζεται με διαφορετικό τρόπο με το σχέδιο ανατίναξης και με τον μηχανισμό που επιφέρει τη θραύση του. Η δυναμική θλιπτική αντοχή σχετίζεται με τη θραύση του τμήματος που βρίσκεται γύρω από το διάτρημα, η δυναμική εφελκυστική αντοχή με τη δημιουργία και την επιμήκυνση των ρωγμών, ο βαθμός ρωγμάτωσης με την εξασθένιση του κρουστικού κύματος, ενώ η γενικότερη δομή της βραχομάζας με την ακρίβεια με την οποία ορύσσονται τα διατρήματα. Ο Rakishev (1982), θεωρεί ότι το σημαντικότερο από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος που σχετίζονται με την εξορυξιμότητα του είναι το ειδικό του βάρος, η ταχύτητα διάδοσης των θλιπτικών κυμάτων, ο λόγος του Poisson, το μέτρο ελαστικότητας, η θλιπτική και εφελκυστική του αντοχή, ο βαθμός ρωγμάτωσης καθώς και οι ιδιότητες του υλικού πλήρωσης των ρωγμών.

Κατά τη μελέτη για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του πετρώματος θα πρέπει πάντα να συνυπολογίζεται η έννοια της κλίμακας (scale). Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής που π.χ. υπολογίζεται μέσω της δοκιμής Brazilian, δεν μπορεί να είναι σταθερή για το σύνολο του προς εξόρυξη όγκου. Τα χαρακτηριστικά ενός δοκιμίου είναι πιο κοντά σε εκείνα του άρρηκτου παρά σε αυτά του κερματισμένου πετρώματος, αφού στη μάζα του δεν εμπεριέχονται τα επίπεδα αδυναμίας τα οποία απαντώνται στη βραχομάζα. Ως εκ τούτου η αντοχή ενός δοκιμίου σχετίζεται μόνο με τη μικροδομή του, ενώ στην πραγματικότητα η αντοχή της βραχομάζας καθορίζεται τόσο από τη μικρο- όσο και από τη μακροδομή της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10.



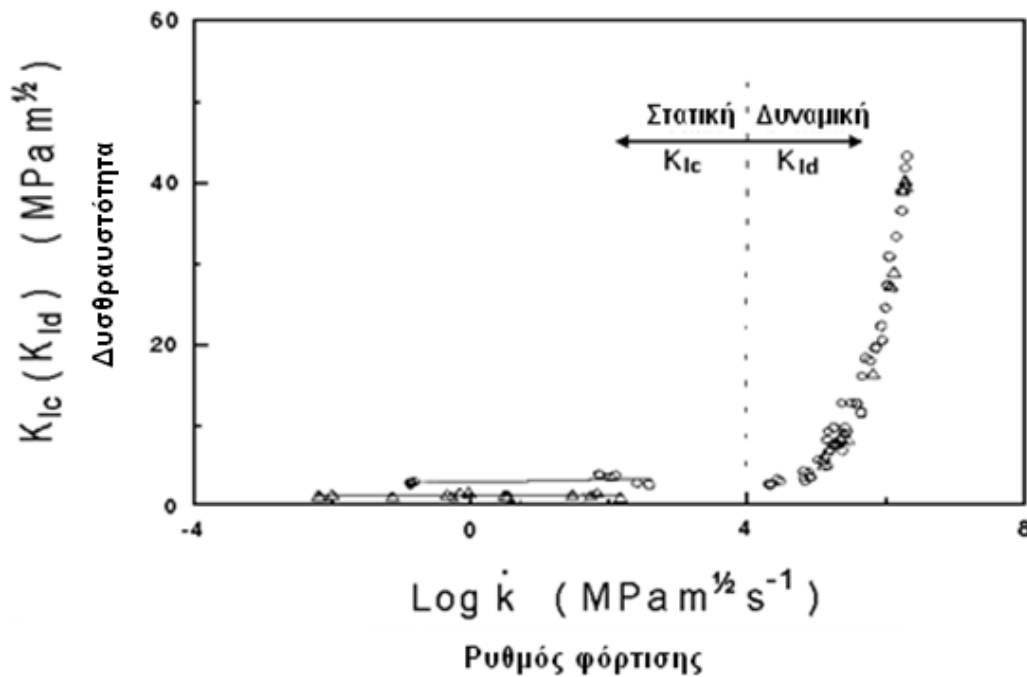
Εικόνα 2.10: Επίπεδα αδυναμίας (Scott et al. 1996).

Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες (JKMRC, 1996):

- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αντοχή του.
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις μηχανικές του ιδιότητες.
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ικανότητα του να απορροφά ενέργεια.
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη δομή του.
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τον θρυμματισμό του.

Στις περισσότερες από τις δοκιμές που πραγματοποιούνται για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του πετρώματος, η φόρτιση η οποία εφαρμόζεται στα δοκίμια είναι στατική και επομένως όχι αντιπροσωπευτική της φόρτισης που ασκείται κατά την πραγματοποίηση μιας ανατίναξης. Η αντοχή των πετρωμάτων, όπως και της πλειοψηφίας των υλικών, σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιείται η φόρτιση και αυξάνεται όσο αυτός αυξάνει (Persson et al. 1994). Ως εκ τούτου, η δυναμική αντοχή των πετρωμάτων παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τη στατική τους αντοχή. Η τιμή της δυναμικής αντοχής είναι από 5-13 φορές μεγαλύτερη της στατικής. Έπειτα από την πραγματοποίηση δοκιμών, οι Zhang et al. (1999, 2000), κατέληξαν στο

συμπέρασμα ότι η τιμή της στατικής δυσθραυστότητας παραμένει σχεδόν σταθερή για ρυθμούς φόρτισης που κυμαίνονται από 10^{-2} - 10^4 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$, σε αντίθεση με την τιμή της δυναμικής δυσθραυστότητας (dynamic fracture toughness, K_{Id}), η οποία αυξάνεται σημαντικά για τιμές του ρυθμού φόρτισης μεγαλύτερες του 10^4 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11: Συσχέτιση μεταξύ της δυσθραυστότητας και του ρυθμού φόρτισης (Zhang *et al.*, 1999)).

Δυο χαρακτηριστικά που επίσης σχετίζονται με τον τρόπο που συμπεριφέρεται το πέτρωμα σε συνθήκες φόρτισης, είναι ο λόγος Poisson (Poisson's ratio) και το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus), ο υπολογισμός των οποίων γίνεται μέσω της ταχύτητας διάδοσης των θλιπτικών και διατμητικών κυμάτων. Το μέτρο ελαστικότητας συνδέεται με την ακαμψία και την ανθεκτικότητα του πετρώματος και αυξάνεται όταν ασκείται πίεση υπό περιορισμό, λόγω του ότι κλείνουν οι μικρορωγμές που απαντώνται σε αυτό (Brady *et al.* 1993), ενώ σε ότι αφορά τον λόγο Poisson, όσο αυτός μειώνεται τόσο πιο ψαθυρό γίνεται ένα πέτρωμα. Για την ικανοποιητική θραύση πετρωμάτων με υψηλές τιμές μέτρου ελαστικότητας απαιτείται η χρήση εκρηκτικών υλών με ισχυρή κρουστική φάση.

2.2.4 Μακροδομή του πετρώματος

Η μακροδομή της βραχομάζας καθορίζεται από τα επίπεδα αδυναμίας που απαντώνται σε αυτήν και επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τον θρυμματισμό που επιτυγχάνεται μετά την ολοκλήρωση μιας ανατίναξης. Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος μιας ασυνέχειας, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της ενέργειας που απορροφά, γεγονός το οποίο επιφέρει είτε την πλήρη εξασθένηση των εκρηκτικών κυμάτων, είτε τη μερική ανάκλαση αυτών και τη μετατροπή τους σε εφελκυστικά. Οι ασυνέχειες είναι επίσης υπεύθυνες και για την εκτόνωση σημαντικής ποσότητας των αερίων της έκρηξης, γεγονός το οποίο τελικά οδηγεί σε απώλεια μέρους της ωφέλιμης ενέργειας που συνεισφέρει στη θραύση του πετρώματος.

Ο βαθμός με τον οποίο μια ασυνέχεια ανθίσταται στη διάδοση των εκρηκτικών κυμάτων εξαρτάται από το άνοιγμα της, το υλικό πλήρωσης (Fordyce *et al.* 1993), καθώς και από τη γωνία την οποία σχηματίζει η ασυνέχεια με την ελεύθερη επιφάνεια (Lewandowski *et al.* 1996). Η διάδοση του κύματος είναι αποτελεσματικότερη όταν το υλικό πλήρωσης είναι «σκληρό», με αποτέλεσμα ο θρυμματισμός που επιτυγχάνεται στις περιπτώσεις αυτές να είναι λεπτομερέστερος εκείνου που επιτυγχάνεται όταν το υλικό είναι «μαλακό» ή δεν υπάρχει καθόλου (Bhandari 1996). Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών είναι επίσης μια παράμετρος η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό μιας ανατίναξης, καθώς επηρεάζει τον θρυμματισμό που επιτυγχάνεται αλλά και τον βαθμό ρωγμάτωσης του πρανούς και του δαπέδου της νέας βαθμίδας (Bhandari *et al.* 1990, Bhandari 1997, Mortazavi *et al.* 2001).

Η ανομοιομορφία που παρουσιάζει η δομή του πετρώματος κατά θέσεις, ακόμα και μέσα στα όρια ενός λατομικού χώρου, καθιστά τη διαδικασία του σχεδιασμού μιας ανατίναξης ιδιαιτέρως απαιτητική. Το σχέδιο ανατίναξης θα πρέπει να τροποποιείται κατάλληλα κάθε φορά που μεταβάλλονται οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στο τμήμα της βραχομάζας το οποίο πρόκειται να εξορυχθεί. Οι περισσότερες από τις τροποποιήσεις που γίνονται, όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο, είναι αποτέλεσμα γνώσης και εμπειρίας η οποία προκύπτει έπειτα από την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού ανατινάξεων, στο πλαίσιο της αρχής «της δοκιμής και του σφάλματος» (trial and error). Τέλος, ο μηχανικός ανατινάξεων θα πρέπει πάντοτε να έχει κατά νου, ότι οποιαδήποτε αλλαγή πραγματοποιείται σε κάποιο σχέδιο ανατίναξης, σχετίζεται αποκλειστικά με τον συγκεκριμένο χώρο εξόρυξης και δεν πρέπει να θεωρείται ότι θα επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα εάν εφαρμοσθεί οπουδήποτε αλλού.

2.2.5 Μικροδομή του πετρώματος

Η ορυκτολογική σύνθεση και το μέγεθος των κόκκων ενός πετρώματος, σχετίζονται άμεσα με τον μηχανισμό διάδοσης των ρωγμών και επομένως με τον μηχανισμό θραύσης του, καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό το πόσο εύκολα ή δύσκολα αυτό εξορύσσεται με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Επιπλέον, η δημιουργία νέων ρωγμών καθώς και η εξάπλωση εκείνων που προϋπάρχουν στο πέτρωμα, φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα των εργασιών που έπονται της ανατίναξης (απόδοση του θραυστήρα, λειοτρίβηση, κ.α.) (Workman *et al.* 2003).

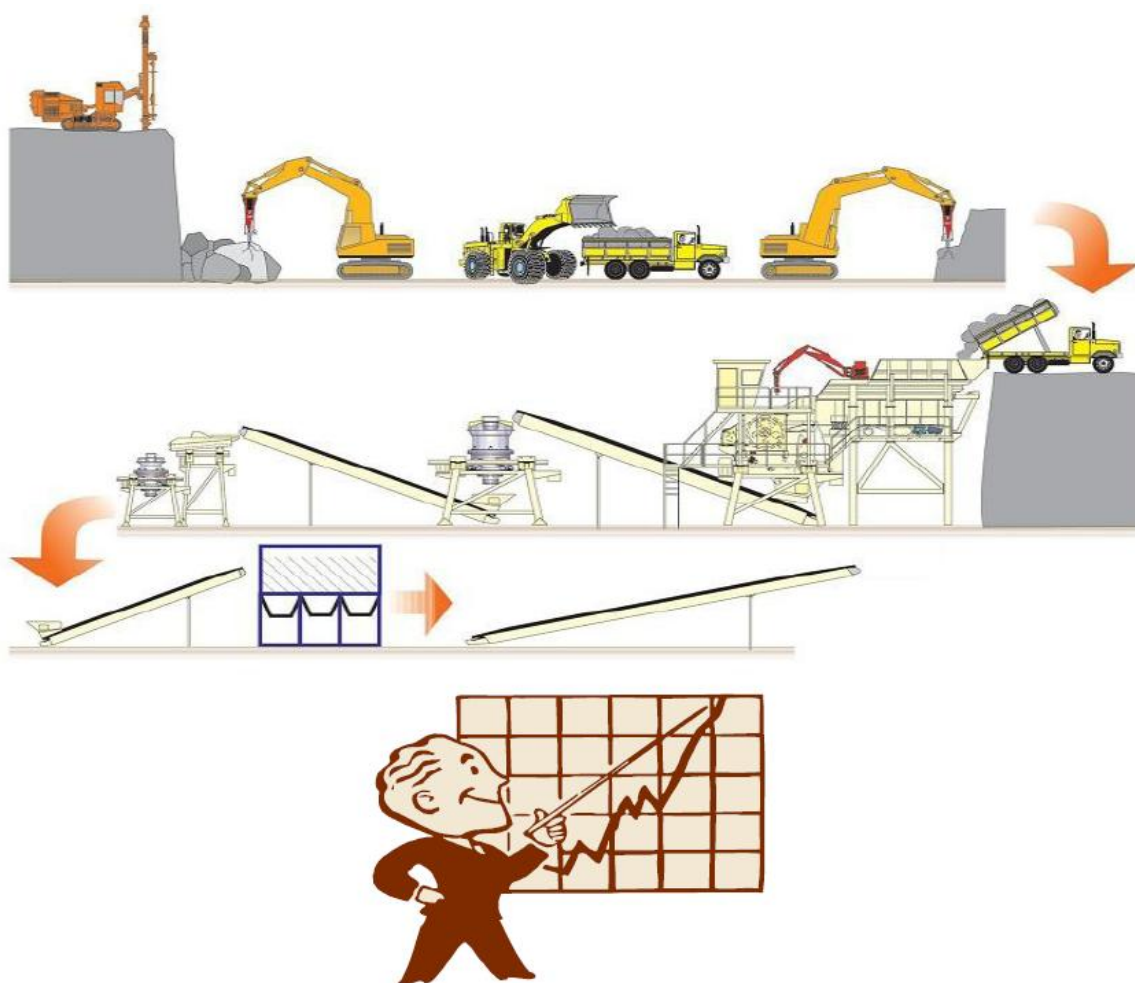
Έπειτα από πειράματα που πραγματοποίησε ο Jern (2001) για τη μελέτη του μηχανισμού διάδοσης των ρωγμών, προέκυψε ότι οι ακτινικές μικρορωγμές διέρχονται μέσα από του κόκκους των ορυκτών του πετρώματος, ενώ οι μη ακτινικές εξαπλώνονται περιμετρικά από αυτούς. Εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης που έγιναν σε πετρώματα με διαφορετικά μεγέθη κόκκου, έδειξαν ότι η τιμή της τάσης που απαιτείται να ασκηθεί προκειμένου να δημιουργηθεί μια νέα ρωγμή, σχετίζεται κυρίως με την αντοχή του ορυκτού και λιγότερο με το μέγεθος του κόκκου (Eberhardt *et al.*, 1999). Το μέγεθος το κόκκου φαίνεται να επηρεάζει τον μηχανισμό διάδοσης των ρωγμών αφότου αυτές έχουν δημιουργηθεί. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ίδιων εργαστηριακών δοκιμών, όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος ενός κόκκου τόσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο αδυναμίας κατά μήκος του οποίου μπορεί να εξαπλωθεί μια ρωγμή. Η πυκνότητα και το εύρος που τελικά θα αποκτήσουν οι μικρορωγμές, σχετίζονται με την αντοχή του πετρώματος καθώς και με την τιμή της ειδικής κατανάλωσης της εκρηκτικής ύλης (Mohanty *et al.* 2007).

Το πορώδες είναι μια ακόμα ιδιότητα του πετρώματος που σχετίζεται με την εξορυξιμότητα του. Το θλιπτικό κύμα το οποίο δημιουργείται λόγω της έκρηξης της εκρηκτικής ύλης, διαδίδεται εντός του πετρώματος, με ταχύτητα η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού μέσα από το οποίο διέρχεται. Όσο λιγότερο κερματισμένο είναι ένα πέτρωμα τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα διάδοσης του εκρηκτικού κύματος. Πετρώματα με υψηλό πορώδες απορροφούν μεγάλο μέρος της εκρηκτικής ενέργειας, προκαλώντας την έντονη ρωγμάτωση γύρω από το διάτρημα και τη δημιουργία πολύ λεπτομερών τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος.

2.3 Το κόστος του μεγέθους

2.3.1 Γενικά

Η πραγματοποίηση μιας ανατίναξης είναι συνήθως το πρώτο στάδιο μιας σειράς διεργασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα προκειμένου το πέτρωμα να αποσπαστεί από τη φυσική του θέση, να υποστεί επεξεργασία και να μετασχηματιστεί στο τελικό προς πώληση προϊόν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Κάθε μια από τις διεργασίες έχει το δικό της επιμέρους κόστος. Κατά κανόνα, ο αντικειμενικός στόχος είναι η επίτευξη της μεγίστης δυνατής παραγωγής, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα το ελάχιστο δυνατό κόστος. Ως εκ τούτου, η αποδοτικότητα των διεργασιών εκτιμάται ως ικανοποιητική, όταν το κόστος υλοποίησης τους δεν ξεπερνά τον οικονομικό προϋπολογισμό και το ύψος της παραγωγής βρίσκεται εντός του επιθυμητού στόχου.



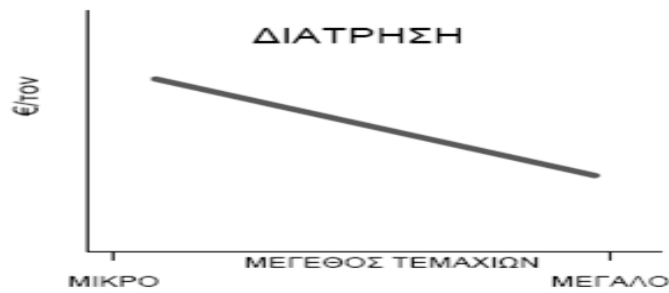
Εικόνα 2.12: Η ροή των εργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα λατομείο αδρανών, προκειμένου να δημιουργηθεί το τελικό προς πώληση προϊόν (Παναγιώτου, χ.χ.).

Τα αποτελέσματα μιας ανατίναξης αξιολογούνται και βελτιστοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη, αφενός τις απαιτήσεις των διεργασιών που ακολουθούν (φόρτωση, μεταφορά με φορτηγά ή ταινιόδρομους, ανάλογα με το εάν χρησιμοποιείται ασυνεχές ή συνεχές σύστημα μεταφοράς, θραύση-ταξινόμηση), αφετέρου το ότι μετά την ολοκλήρωση της το νέο πρανές θα πρέπει να πληροί τους κανονισμούς ασφαλείας που προβλέπονται από τη λατομική νομοθεσία. Επομένως, όλες οι επιμέρους διεργασίες που συνθέτουν τη διαδικασία της εξόρυξης θα πρέπει να αξιολογούνται ως προς την αποδοτικότητα τους έχοντας κατά νου και τις διεργασίες που έπονται αυτών.

Παρόλα αυτά, στις περισσότερες περιπτώσεις επιδιώκεται η βελτιστοποίηση των επιμέρους διεργασιών, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη, αν τελικά βελτιώνεται στο σύνολο της η αποδοτικότητα της διαδικασίας εξόρυξης. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε μια από της επιμέρους διεργασίες αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστό κέντρο κόστους (cost center). Ο επικεφαλής κάθε διεργασίας επικεντρώνεται στο να επιτευχθεί η απαιτούμενη παραγωγή, διατηρώντας ταυτόχρονα το κόστος σε επιθυμητά επίπεδα, χωρίς όμως να διασφαλίζεται πάντα, ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά των προϊόντων της συγκεκριμένης διεργασίας ικανοποιούν τις απαιτήσεις εκείνων που ακολουθούν.

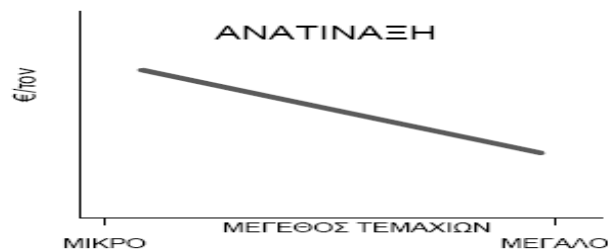
Έπειτα από μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε επιφανειακά μεταλλεία καθώς και σε λατομεία αδρανών υλικών, στα μέσα της δεκαετίας του '60 από τον McKenzie, προέκυψαν μια σειρά από γραφήματα τα οποία σαν κεντρική παράμετρο χρησιμοποιούν το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων (θρυμματισμό), εκφραζόμενο ως συνάρτηση του λειτουργικού κόστους κάθε επιμέρους εργασίας ανά μονάδα βάρους ή όγκου του πετρώματος (όπως αναφέρεται από τον Παναγιώτου, χ.χ.).

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.13, το κόστος διάτρησης αυξάνεται όσο μικραίνει το μέγεθος τεμαχίων το οποίο επιθυμούμε να έχουμε μετά την ολοκλήρωση μιας ανατίναξης. Η πρακτική που συνήθως εφαρμόζεται προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερος θρυμματισμός, είναι αυτή της πύκνωσης του κάνναβου των διατρημάτων, αποτέλεσμα της οποίας είναι η αύξηση του συνολικού μήκους διάτρησης που απαιτείται να ορυχθεί.



Εικόνα 2.13: Μεταβολή του κόστους διάτρησης ανάλογα με τον επιδιωκόμενο βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).

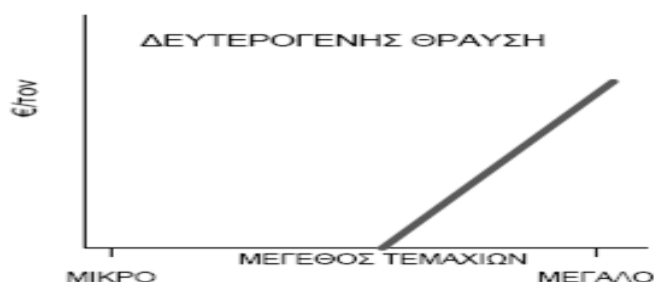
Σε ότι αφορά το κόστος της ανατίναξης, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός θρυμματισμού απαιτείται είτε η χρήση ισχυρότερης εκρηκτικής ύλης υψηλότερου κόστους, στην περίπτωση που ο κάνναβος των διατρημάτων διατηρείται ως έχει, είτε η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας εκρηκτικής ύλης, στην περίπτωση που η διάταξη του κάνναβου γίνει πυκνότερη. Στη δεύτερη μάλιστα περίπτωση το κόστος αυξάνεται σημαντικά λόγω των επιπλέον μέσων έναυσης που χρησιμοποιούνται, καθώς και των πρόσθετων ωρών εργασίας που απαιτούνται για τη γόμωση των διατρημάτων, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.14.



Εικόνα 2.14: Μεταβολή του κόστους ανατίναξης ανάλογα με τον επιδιωκόμενο βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).

Σε εκείνες τις περιπτώσεις που είτε δεν έγινε ορθός σχεδιασμός της ανατίναξης, είτε η διαδικασία δεν εξελίχθηκε ομαλά, ο θρυμματισμός που επιτυγχάνεται είναι πιο χονδρομερής από εκείνον που αρχικά είχε εκτιμηθεί. Το μέγεθος των τεμαχίων σε ορισμένες περιπτώσεις είναι τόσο μεγάλο, που η φόρτωση και η μεταφορά τους δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον αντίστοιχο εξοπλισμό τον οποίο διαθέτει η εξορυκτική επιχείρηση. Για τον λόγο αυτό τα υπερμεγέθη τεμάχια πετρώματος θα πρέπει να

συγκεντρωθούν στο δάπεδο της βαθμίδας και να υποστούν δευτερογενή θραύση, είτε με τη χρήση εκρηκτικών, είτε με τη χρήση υδραυλικής σφύρας. Η διαδικασία αυτή αφενός είναι χρονοβόρα, αφετέρου έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος, το οποίο μάλιστα αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των τεμαχίων αυτών και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός τους, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.15.



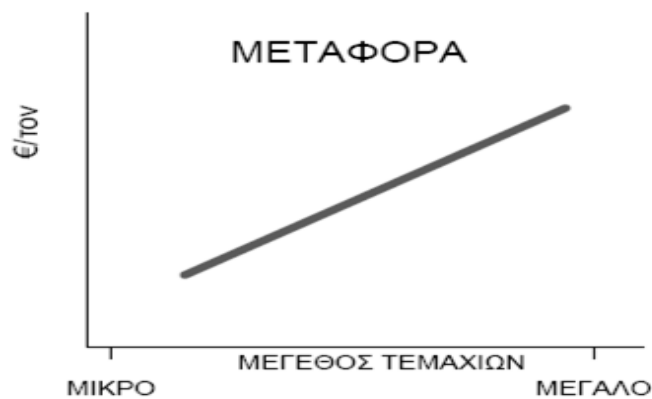
Εικόνα 2.15: Μεταβολή του κόστους δευτερογενούς θραύσης ανάλογα με το μέγεθος των τεμαχίων πετρώματος (Παναγιώτου, χ.χ.).

Η παρουσία τεμαχίων μικρού μεγέθους εντός του σωρού του θραυσμένου πετρώματος διευκολύνει τη διαδικασία της φόρτωσης, καθότι το ποσοστό πλήρωσης του κάδου στις περιπτώσεις αυτές είναι πολύ μεγαλύτερο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό του χρόνου που απαιτείται για τη φόρτωση του πετρώματος και επομένως τη μείωση του κόστους φόρτωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.16. Επιπλέον, περιορίζονται τόσο οι φθορές που προκαλούνται στα «δόντια» των κάδων των φορτωτών, όσο και οι φθορές των ελαστικών τους, συνεισφέροντας στην περαιτέρω ελάττωση του λειτουργικού κόστους φόρτωσης.



Εικόνα 2.16: Μεταβολή του κόστους φόρτωσης ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).

Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τη μεταφορά των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.17, το μικρό μέγεθος καθιστά οικονομικότερη τη διαδικασία μεταφοράς, καθότι ο μειωμένος χρόνος φόρτωσης επιτρέπει την πραγματοποίηση μεγαλύτερου αριθμού δρομολογίων ανά μονάδα χρόνου. Επιπλέον, το ποσοστό πλήρωσης του κάδου των χωματουργικών οχημάτων είναι μεγαλύτερο, γεγονός το οποίο μεταφράζεται σε μικρότερο αριθμό μετακινήσεων, για τη μεταφορά μιας ορισμένης ποσότητας θραυσμένου πετρώματος. Μείωση του κόστους παρατηρείται και στις περιπτώσεις όπου η μεταφορά πραγματοποιείται με τη χρήση μεταφορικών ταινιών, καθώς ο όγκος μεταφερόμενου προϊόντος ανά μέτρο ταινίας είναι μεγαλύτερος και οι φθορές που προκαλούνται σε αυτές είναι σημαντικά λιγότερες.



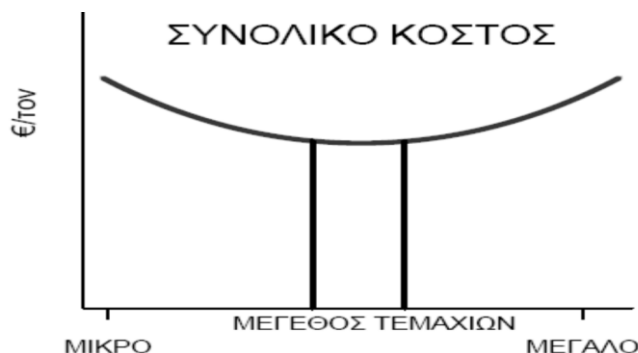
Εικόνα 2.17: Μεταβολή του κόστους μεταφοράς ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).

Αναφορικά τώρα με το κόστος θραύσης και ταξινόμησης, όσο μικραίνει το μέγεθος των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος, τόσο μεγαλώνει το ποσοστό της τροφοδοσίας που διέρχεται από τον σπαστήρα χωρίς να υφίσταται θραύση (by-pass). Το γεγονός αυτό μεταφράζεται σε εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς και σε μειωμένες φθορές των εξαρτημάτων του σπαστήρα, με αποτέλεσμα το λειτουργικό κόστος θραύσης/ταξινόμησης να διατηρείται σε χαμηλότερα επίπεδα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.18.



Εικόνα 2.18: Μεταβολή του κόστους θραύσης/ταξινόμησης ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).

Από τη σύνθεση των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτει ένα νέο, το οποίο απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το κόστος της εξόρυξης πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών, συναρτήσει του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχίων πετρώματος. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.19, για ένα ορισμένο εύρος τιμών μεγέθους τεμαχίων το κόστος της εξόρυξης ελαχιστοποιείται. Ωστόσο, το εύρος αυτό είναι διαφορετικό για τον εκάστοτε λατομικό/μεταλλευτικό χώρο και επομένως απαιτείται η πραγματοποίηση προσεκτικής μελέτης προκειμένου να γίνει ο προσδιορισμός του.



Εικόνα 2.19: Μεταβολή του συνολικού κόστους εξόρυξης με τη χρήση εκρηκτικών υλών ανάλογα με τον βαθμό θρυμματισμού (Παναγιώτου, χ.χ.).

2.3.2 Βέλτιστη ανατίναξη

Ο όρος «βέλτιστη ανατίναξη» (optimum blasting), έχει προταθεί προκειμένου να περιγράψει εκείνες τις ανατινάξεις οι οποίες αποφέρουν τον επιθυμητό βαθμό θρυμματισμού, εξασφαλίζοντας την ελάχιστη τιμή του συνδυασμένου κόστους διάτρησης,

ανατίναξης, φόρτωσης, μεταφοράς και θραύσης. Αντικειμενικός στόχος κάθε επιχείρησης είναι η αύξηση του ρυθμού με τον οποίο η επένδυση που έχει πραγματοποιήσει, αποφέρει έσοδα. Το λειτουργικό προ φόρων κέρδος που αποκομίζει μια εξορυκτική επιχείρηση (ανά τόνο ορυκτού/μεταλλεύματος), είναι η διαφορά μεταξύ της τιμής πώλησης του προϊόντος και του κόστους παραγωγής και υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Κέρδος} = (\text{Έσοδα}) - (\text{Λειτουργικό κόστος}) - (\text{Πάγιο κόστος}) \quad (2.8)$$

Η κερδοφορία μιας επιχείρησης δύναται να αυξηθεί, είτε αυξάνοντας τα έσοδα, είτε μειώνοντας τα έξοδα, είτε πραγματοποιώντας ταυτόχρονα και τα δυο. Τα έξοδα μιας επιχείρησης χωρίζονται σε λειτουργικά και πάγια. Λειτουργικά είναι εκείνα τα οποία σχετίζονται με την αγορά εκρηκτικών υλών, ανταλλακτικών για τον μηχανολογικό εξοπλισμό, καυσίμων, χημικών για την πραγματοποίηση εμπλουτισμού, καθώς επίσης και οι αμοιβές του προσωπικού, τα ασφάλιστρα, οι εργοδοτικές εισφορές κ.α. Πάγια είναι εκείνα τα έξοδα τα οποία σχετίζονται με την αρχική επένδυση που πραγματοποίησε η επιχείρηση. Τα λειτουργικά έξοδα αποτελούν συνάρτηση της παραγωγής που επιτυγχάνεται, σε αντίθεση με τα πάγια τα οποία είναι ανεξάρτητα από αυτή.

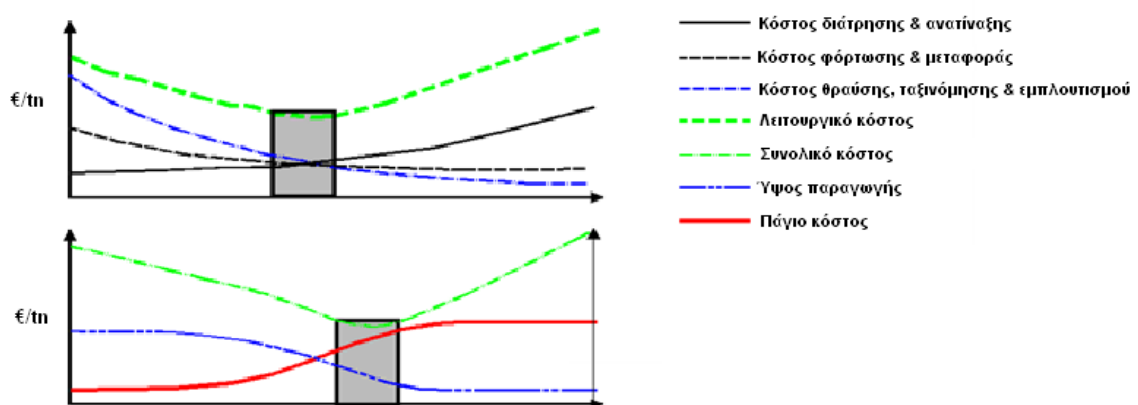
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αποτελεσματικότητα μιας ανατίναξης καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα των διεργασιών που έπονται, ειδικότερα της θραύσης και της λειοτρίβησης. Ωστόσο, κάθε προσπάθεια ελάττωσης του κόστους διάτρησης και ανατίναξης, θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς οι εργασίες αυτές έχουν μικρό ποσοστό συμμετοχής στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους την εκμετάλλευσης ($\approx 25\%$), σε σχέση με τις εργασίες φόρτωσης, μεταφοράς και θραύσης ($\approx 75\%$) (όπως αναφέρεται από τον Παναγιώτου, χ.χ).

Συνήθως το κόστος θραύσης και λειοτρίβησης μειώνεται στις περιπτώσεις εκείνες που η αποτελεσματικότητα της ανατίναξης είναι αυξημένη. Η διαπίστωση αυτή βρίσκει σύμφωνους τους περισσότερους λατόμους, οι οποίοι θεωρούν ότι η φθηνότερη θραύση επιτυγχάνεται στο μέτωπο και όχι στον θραυστήρα και επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα μελέτης που πραγματοποίησε ο Eloranta (1995, 1997).

Σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου η λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού αγγίζει το ανώτερο όριο αποδοτικότητας που προβλέπεται από τον κατασκευαστή,

προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της παραγωγής, απαιτείται επαναπροσδιορισμός του σχεδίου ανατίναξης με σκοπό την πραγματοποίηση αποτελεσματικότερων ανατινάξεων. Για την περαιτέρω αύξηση της παραγωγής θα πρέπει να πραγματοποιηθεί νέα επένδυση, η οποία θα αποσκοπεί στην αναβάθμιση του υπάρχοντος εξοπλισμού.

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 2.20, η αύξηση της αποτελεσματικότητας της ανατίναξης μέχρι του σημείου επίτευξης του ελάχιστου λειτουργικού κόστους, δεν εξασφαλίζει και την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (Kanchibotla, 2003). Επιπλέον, το σημείο στο οποίο επιτυγχάνεται το ελάχιστο συνολικό κόστος (άθροισμα λειτουργικού και πάγιου), δεν θα πρέπει να λαμβάνεται ως βέλτιστο, εάν δεν διευκρινίζεται ποια είναι η σχέση που συνδέει την αποτελεσματικότητα της ανατίναξης με τη δαπάνη της επένδυσης και με τα έσοδα που αποφέρει στην επιχείρηση η πώληση του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 2.20: Μεταβολή των επιμέρους κόστων ανάλογα με τον βαθμό αποτελεσματικότητας της ανατίναξης (Kanchibotla, 2003).

Σύμφωνα με τον Kanchibotla (2003), υπάρχουν τρία σενάρια τα οποία περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο, η κοκκομετρία που επιτυγχάνεται έπειτα από την πραγματοποίηση μιας ανατίναξης, σχετίζεται με τα έσοδα τα οποία αποκομίζει μια εξορυκτική επιχείρηση από την πώληση του τελικού προϊόντος:

- Το πρώτο σενάριο αναφέρεται στις περιπτώσεις εκείνες όπου η τιμή πώλησης του τελικού προϊόντος είναι ανεξάρτητη από την κοκκομετρία που επιτυγχάνεται ως αποτέλεσμα της ανατίναξης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τα πολύτιμα αλλά και

με τα βασικά μέταλλα. Αύξηση των εσόδων στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω αύξησης της παραγωγής. Ο βαθμός αποτελεσματικότητας της ανατίναξης αποκτά τη μέγιστη τιμή του, στο σημείο όπου η παραγωγικότητα αυξάνεται και το συνολικό κόστος ελαχιστοποιείται.

- Το δεύτερο σενάριο αναφέρεται σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου η τιμή πώλησης του τελικού προϊόντος εξαρτάται από την κοκκομετρία που επιτυγχάνεται ως αποτέλεσμα της ανατίναξης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα αδρανή υλικά, ο άνθρακας και τα σιδηρομεταλλεύματα, η τιμή πώλησης των οποίων αποτελεί συνάρτηση του μεγέθους τους. Στις περιπτώσεις αυτές το κέρδος της επιχείρησης εξαρτάται αφενός από την τιμή πώλησης του προϊόντος, αφετέρου από το ύψος της παραγωγής. Το μέγιστο κέρδος επιτυγχάνεται σε εκείνο το σημείο όπου η τιμή πώλησης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, ενώ ταυτόχρονα το ύψος της παραγωγής αρχίζει σταδιακά να αυξάνεται.
- Το τρίτο σενάριο αναφέρεται και πάλι στις περιπτώσεις εκείνες όπου η τιμή πώλησης του τελικού προϊόντος είναι σταθερή, ωστόσο στο σενάριο αυτό η επίτευξη της επιθυμητής κοκκομετρίας επιφέρει αύξηση της ανάκτησης και της παραγωγής του τελικού προϊόντος, μέχρι ενός σημείου, πέραν του οποίου η παραγωγή αρχίζει και πάλι να φθίνει. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι επιχειρήσεις οι οποίες για την ανάκτηση του τελικού προϊόντος εφαρμόζουν π.χ. την τεχνική της εκχύλισης σε σωρούς (heap leaching). Η ανάκτηση αυξάνεται όσο βελτιώνεται ο θρυμματισμός του πετρώματος (άρα και το έργο της ανατίναξης), υπάρχει ωστόσο ένα κρίσιμο σημείο πέραν του οποίου η αύξηση του θρυμματισμού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών λεπτομερών τεμαχίων, γεγονός το οποίο τελικά οδηγεί σε μείωση της ανάκτησης και επομένως σε μείωση της κερδοφορίας.

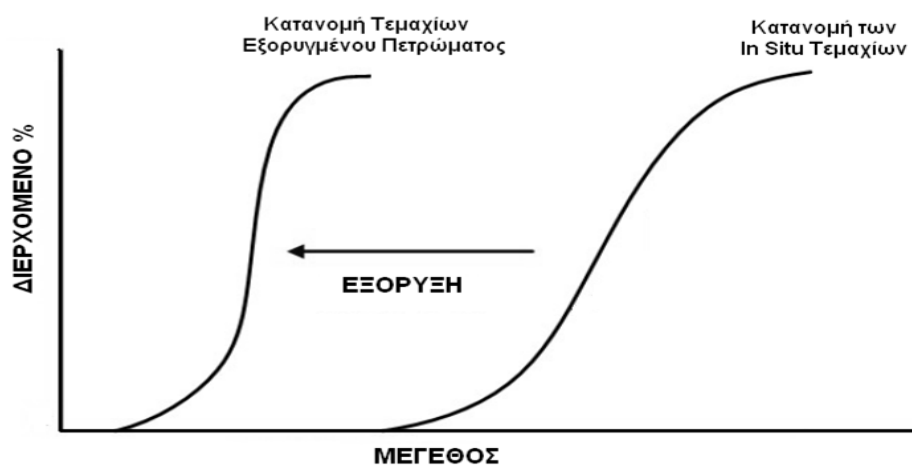
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η οποιαδήποτε προσπάθεια ελάττωσης του κόστους διάτρησης και ανατίναξης θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, καθότι ο μη προσεκτικός σχεδιασμός τους, το πιθανότερο είναι ότι θα επιφέρει αύξηση του συνολικού λειτουργικού κόστους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, το ποσοστό συμμετοχής των εργασιών εξόρυξης στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους εκμετάλλευσης, βρίσκεται συνήθως γύρω στο 25%, σε αντίθεση με τις εργασίες φόρτωσης, μεταφοράς και θραύσης, το ποσοστό συμμετοχής των οποίων βρίσκεται κοντά στο 75%. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην Αυστραλία έδειξαν ότι αυξάνοντας την ειδική κατανάλωση εκρηκτικής ύλης από 0,52 σε 0,61kg/m³, πυκνώνοντας μόνο τον

κάνναβο των διατρημάτων, επιτεύχθηκε μείωση του κόστους φόρτωσης και μεταφοράς κατά 0,4\$/t, του κόστους θραύσης κατά 0,3\$/t και του συνολικού κόστους κατά 0,65\$/t. (όπως αναφέρεται από τον Παναγιώτου, χ.χ.)

2.4 Μοντέλα εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αποτελεσματικότητα μιας ανατίναξης κατά κανόνα εκτιμάται βάση του θρυμματισμού που επιτυγχάνεται. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο όρος «καλός θρυμματισμός» χρησιμοποιείται προκειμένου να περιγραφούν κοκκομετρίες μικρού/μέσου μεγέθους, οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένη ομοιογένεια. Αντιθέτως ο όρος «φτωχός θρυμματισμός» χρησιμοποιείται για να περιγραφούν εκείνες οι περιπτώσεις, όπου μεταξύ των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος υπάρχουν αρκετοί μεγάλοι όγκοι, οι οποίοι πρέπει να υποστούν δευτερογενή θραύση προκειμένου να διευκολυνθεί η φόρτωση και η μεταφορά τους.

Αμέσως μετά την πραγματοποίηση μιας ανατίναξης, ο όγκος του θραυσμένου πλέον πετρώματος συγκεντρώνεται με τη μορφή σωρού μπροστά από το νέο μέτωπο. Μέσω του μηχανισμού της ανατίναξης η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του *in situ* πετρώματος μετατρέπεται στην κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.21.



Εικόνα 2.21: Μετατροπή της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του *in situ* πετρώματος σε κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου (Παναγιώτου, χ.χ.).

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 2.21, τα αποτελέσματα του μηχανισμού εξόρυξης είναι αφενός η μείωση του μεγέθους των *in situ* τεμαχίων πετρώματος (μετατόπιση της κατανομής προς τα «αριστερά»), αφετέρου η επίτευξη πιο ομοιόμορφης κοκκομετρίας (μετατόπιση της κατανομής σε πιο «όρθια» κλίση).

Ο απαιτούμενος βαθμός θρυμματισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το προς πώληση προϊόν, καθώς και από τους περιορισμούς που ορίζει ο μηχανολογικός εξοπλισμός της εξόρυξης και της θραύσης. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση και ο έλεγχος του θρυμματισμού που πρόκειται να επιτευχθεί παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απροβλημάτιστη και αποδοτική λειτουργία του λατομείου/μεταλλείου.

Για τον σκοπό αυτό έχουν κατά καιρούς προταθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα εκτίμησης της κατανομής του εξορυγμένου πετρώματος. Τα μοντέλα συνήθως εκτιμούν την τιμή του x_{50} , χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης, τον τύπο της εκρηκτικής ύλης, καθώς και τα διάφορα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη μικροδομή και τη μακροδομή του πετρώματος, θεωρώντας ότι αυτά παραμένουν σταθερές για το σύνολο του προς εξόρυξη όγκου.

Στην πραγματικότητα βέβαια κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών καθώς και η τιμή της θλιπτικής αντοχής του πετρώματος, είναι δύο μόνο από τις παραμέτρους που παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις στις διάφορες θέσεις του προς εξόρυξη όγκου. Διακυμάνσεις παρατηρούνται επίσης στην τιμή του φορτίου αλλά και στην απόσταση μεταξύ των διατρημάτων, λόγω της μικρής ακρίβειας με την οποία αυτά ορύσσονται, εξαιτίας εσφαλμένων χειρισμών του χειριστή του διατρητικού μηχανήματος, όπως επίσης και στην πλειοψηφία των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα προκειμένου να γίνει η εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων.

Οι διακυμάνσεις οι οποίες σχετίζονται με το σχέδιο ανατίναξης και με τον τύπο της εκρηκτικής ύλης ως ένα βαθμό μπορούν να ελεγχθούν, ενώ ο έλεγχος των διακυμάνσεων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας είναι πρακτικά ανέφικτος. Ως εκ τούτου, αποκλίσεις παρατηρούνται μεταξύ της κατανομής που εκτιμάται από τα μοντέλα και εκείνης που θα λαμβάνονταν έπειτα από την πραγματοποίηση κοσκίνησης του εξορυγμένου πετρώματος. Παρόλα αυτά, τα μοντέλα εκτίμησης αποτελούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τον μηχανικό των ανατινάξεων, κυρίως σε ότι αφορά τον έλεγχο του τρόπου με τον οποίο μετατοπίζεται η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του

εξορυγμένου πετρώματος εξαιτίας των αλλαγών που πραγματοποιούνται σε ένα σχέδιο ανατίναξης.

2.4.1 Το μοντέλο εκτίμησης Kuz-Ram

Το Kuz-Ram (Kuznetsov-Rosin-Rammmler), είναι το δημοφιλέστερο από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος. Το μοντέλο περιλαμβάνει τέσσερις βασικές εξισώσεις. Η πρώτη από αυτές χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνει ο σχεδιασμός της καμπύλης που περιγράφει την κοκκομετρία των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος (κατανομή Rosin-Rammmler) (όπως αναφέρεται από τον Cunningham, 2005):

$$P(x) = 1 - 2^{-\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n} \quad (2.9)$$

όπου:

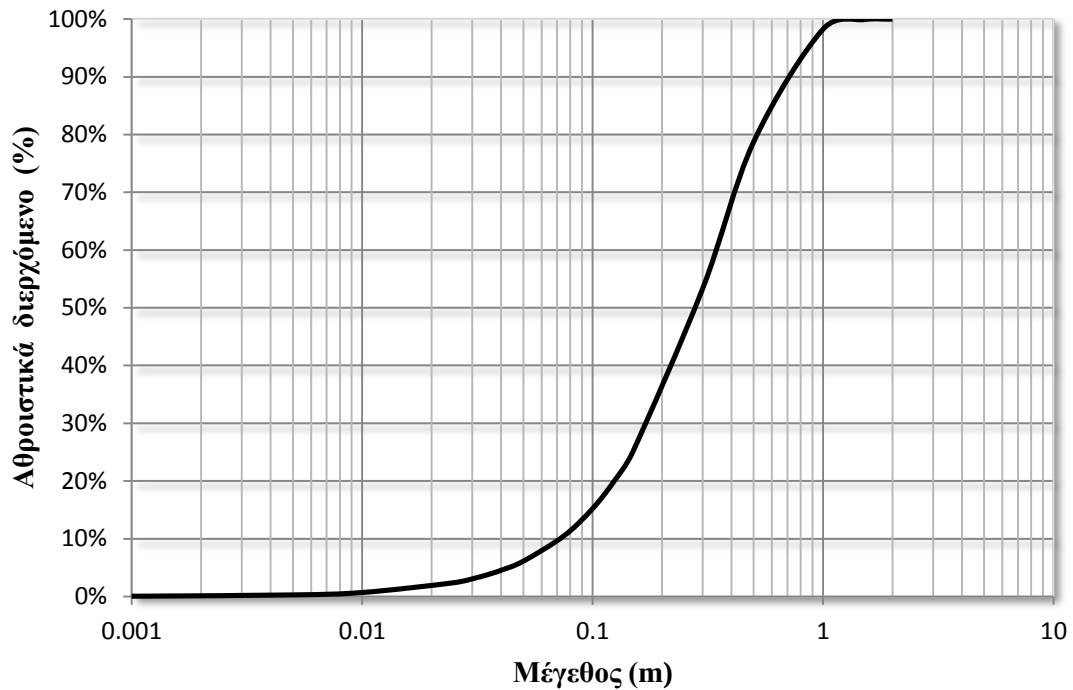
$P(x)$ = το κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος x

x = το μέγεθος του θραυσμένου πετρώματος (m)

x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος (m)

n = ο συντελεστής ομοιομορφίας (uniformity index).

Η απεικόνιση της κοκκομετρικής κατανομής των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος γίνεται συνήθως σε ένα σύστημα ορθογώνιων αξόνων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.22, στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται σε λογαριθμική κλίμακα το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων και στον κάθετο το ποσοστό κατά βάρος του πετρώματος που είναι μικρότερο κάποιου δεδομένου μεγέθους σε δεκαδική κλίμακα.



Εικόνα 2.22: Απεικόνιση της κοκκομετρικής κατανομής των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα.

Η δεύτερη εξίσωση του μοντέλου Kuz-Ram δίνει το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος (σε cm), συναρτήσει ορισμένων από τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης (Kuznetsov 1973):

$$x_{50} = A \cdot \left(\frac{V_o}{Q} \right)^{0,8} \cdot Q^{1/6} \quad (2.10)$$

όπου:

x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος (cm)

A = ο συντελεστής εξορυξιμότητας του πετρώματος ο οποίος λαμβάνει την τιμή 1 για πολύ σαθρά πετρώματα, 7 για μέτριας σκληρότητας πετρώματα, 10 για σκληρά και έντονα κερματισμένα πετρώματα, 13 για σκληρά πετρώματα τα οποία είναι ελαφρώς κερματισμένα

V_o = ο όγκος του εξορυσσόμενου πετρώματος ανά διάτρημα (m^3)

Q = η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης TNT που ισοδυναμεί σε ενέργεια με τη χρησιμοποιούμενη σε κάθε διάτρημα εκρηκτική ύλη (kg).

Η παραπάνω σχέση μετασχηματίστηκε από τον Cunningham προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε εκρηκτική ύλη:

$$x_{50} = A \cdot q^{-0,8} \cdot Q_e^{1/6} \cdot \left(\frac{RWS}{115}\right)^{-19/30} \quad (2.11)$$

όπου:

x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος (cm)

A = ο συντελεστής εξορυξιμότητας του πετρώματος

q = η ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης (powder factor, kg/m³), δηλ η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό μέτρο του προς εξόρυξη πετρώματος

Q_e = η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης η οποία βρίσκεται τοποθετημένη εντός του διατρήματος (kg)

RWS = η σχετική κατά βάρος ισχύς της εκρηκτικής ύλης ως προς το ANFO.

Ο συντελεστής εξορυξιμότητας A που εμφανίζεται στην Εξίσωση 2.10, σχετίζεται με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το προς εξόρυξη πέτρωμα και αποτελεί δείκτη της ευκολίας με την οποία αυτό θραύεται με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Για τον υπολογισμό του ο Lilly (1986) προτείνει την ακόλουθη εξίσωση:

$$A = 0,06 \cdot (RMD + RDI + HF) \quad (2.12)$$

όπου:

A = ο συντελεστής εξορυξιμότητας

RMD = δείκτης περιγραφής της βραχομάζας (Rock Mass Description)
RDI = δείκτης που σχετίζεται με το ειδικό βάρος της βραχομάζας (Rock Density Influence)
HF = δείκτης σκληρότητας (Hardness Factor).

Ο δείκτης περιγραφής της βραχομάζας RMD, ισούται με:

- 10, εάν το πέτρωμα είναι εύθρυπτο (friable).
- JF (Joint Factor), εάν στο πέτρωμα υπάρχουν κατακόρυφες ασυνέχειες.
- 50, εάν το πέτρωμα είναι συμπαγές (massive).

Ο δείκτης κερματισμού JF, ισούται με:

$$JF = JPS + JPA \quad (2.13)$$

όπου:

JF = δείκτης κερματισμού
JPS = δείκτης που σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (Joint Plane Spacing)
JPA = δείκτης που σχετίζεται με την κλίση των ασυνεχειών (Joint Plane Angle).

Ο δείκτης JPS που σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- 10, όταν η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από 0,1m.
- 20, όταν η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών κυμαίνεται από 0,1m έως 0,3m.
- 50 όταν η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από το γινόμενο $(B \cdot S)^{0.5}$.

Ο δείκτης JPA που σχετίζεται με την κλίση των ασυνεχειών, λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- 20, εάν οι ασυνέχειες εξέρχονται από το μέτωπο.
- 30, εάν οι ασυνέχειες είναι κάθετες στο μέτωπο.
- 40, εάν οι ασυνέχειες βυθίζονται προς το μέτωπο.

Ο δείκτης RDI που σχετίζεται με το ειδικό βάρος της βραχομάζας, δίνεται από την σχέση:

$$RDI = 0,025 \cdot \rho - 50 \quad (2.14)$$

όπου:

RDI = δείκτης ειδικού βάρους της βραχομάζας

ρ = ειδικό βάρος πετρώματος (kg/m^3).

Η τιμή του δείκτη σκληρότητας HF καθορίζεται βάσει της τιμής της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σ_c (MPa) και της τιμής του μέτρου ελαστικότητας του Young E (MPa). Πιο συγκεκριμένα ισούται με:

- $E/3$, εάν η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E είναι μικρότερη από 50MPa
- $\sigma_c/5$, εάν η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E είναι μεγαλύτερη από 50MPa.

Η τρίτη εξίσωση του μοντέλου Kuz-Ram χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή ομοιομορφίας:

$$n = \left(2,2 - 14 \cdot \frac{B}{d}\right) \cdot \left(1 - \frac{W}{B}\right) \cdot \left(0,5 + \frac{S/B}{2}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{|L_B - L_c|}{L_B + L_c} + 0,1\right)^{0,1} \cdot \frac{L_{tot}}{H} \quad (2.15)$$

όπου:

n = ο συντελεστής ομοιομορφίας

B = το φορτίο (m)

- d = η διάμετρος του διατρήματος (mm)
 W = η τυπική απόκλιση της ακρίβειας με την οποία έγινε η όρυξη ενός διατρήματος (m)
 S = η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της ίδιας σειράς (m)
 L_B = το μήκος γόμωσης πυθμένα (m)
 L_C = το μήκος γόμωσης στήλης (m)
 L_{tot} = το συνολικό μήκος γόμωσης του διατρήματος (m)
 H = ύψος βαθμίδας (m).

Από την Εξίσωση 2.11 προκύπτει ότι η τιμή του 50% αθροιστικά διερχόμενου μεγέθους μπορεί να μειωθεί εάν χρησιμοποιηθεί εκρηκτική ύλη με μεγαλύτερη ισχύ. Η μεταβολή αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του 50% αθροιστικά διερχόμενου μεγέθους χωρίς να μεταβάλλεται ωστόσο η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας.

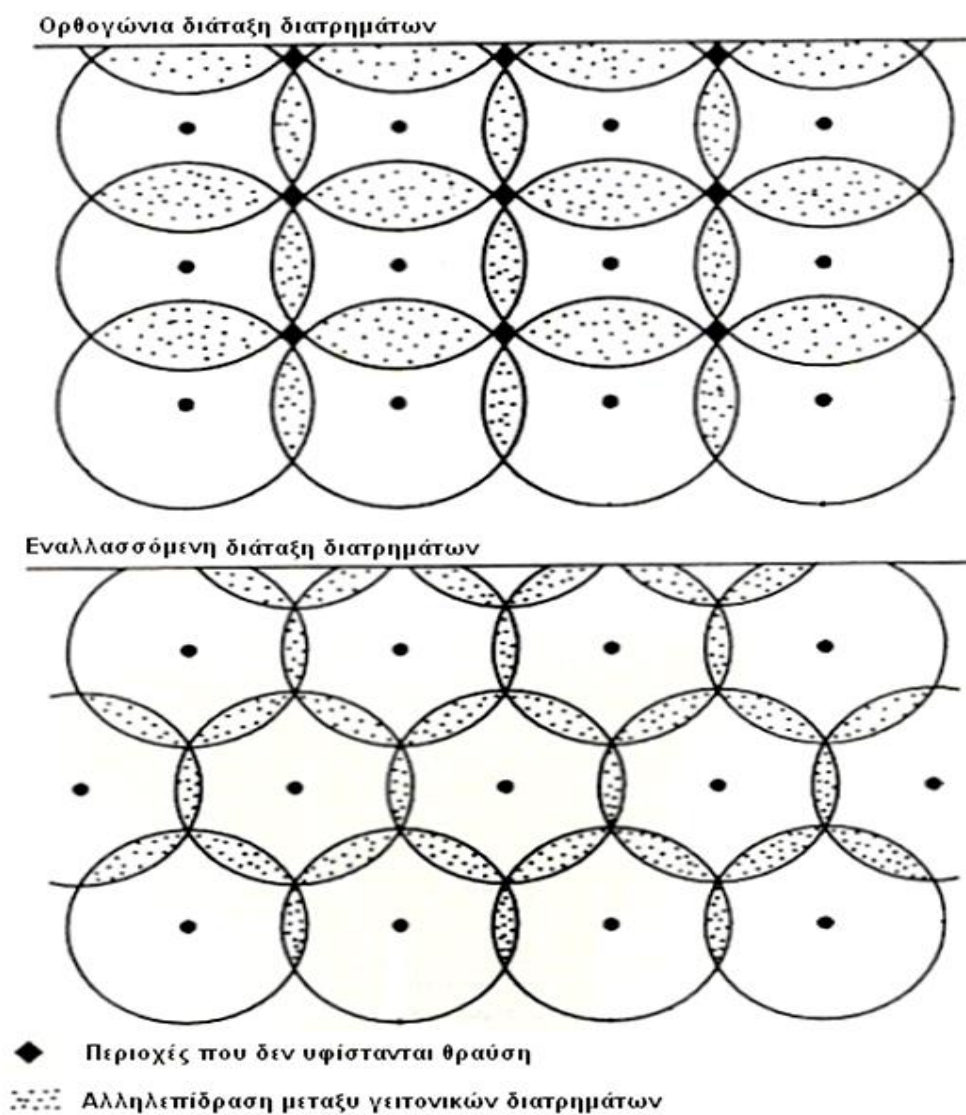
Υπάρχουν όμως και εκείνες οι περιπτώσεις όπου η τροποποίηση του σχεδίου ανατίναξης, πέραν των αλλαγών που επιφέρει στην τιμή του x_{50} , επιφέρει αλλαγές και στην τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας. Αν για παράδειγμα ο κάνναβος διάτρησης (drilling pattern) συρρικνωθεί λόγω μείωσης του φορτίου B , αλλά διατηρηθούν σταθεροί ο λόγος S/B και η διάμετρος d , τότε η τιμή του 50% αθροιστικά διερχόμενου θα ελαττωθεί, ενώ ταυτόχρονα η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας θα αυξηθεί.

Από τις βασικότερες επιδιώξεις του μηχανικού που σχεδιάζει μια ανατίναξη είναι η όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφη κοκκομετρική κατανομή του εξορυσσόμενου πετρώματος, καθώς και η απουσία πολύ λεπτομερών αλλά και χονδρομερών τεμαχίων. Κάτι τέτοιο μεταφράζεται σε υψηλές τιμές του συντελεστή ομοιομορφίας n . Όπως προκύπτει από την Εξίσωση 2.15, ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι ανεξάρτητος των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος και των χαρακτηριστικών της εκρηκτικής ύλης και καθορίζεται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης. Σύμφωνα με τον Cunningham, προκειμένου να αυξηθεί η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας θα πρέπει:

- Να μειωθεί η τιμή του λόγου φορτίο προς διάμετρος διατρήματος (B/d).
- Να βελτιωθεί η ακρίβεια με την οποία ορύσσονται τα διατρήματα.
- Να αυξηθεί η τιμή του λόγου απόσταση μεταξύ των διατρημάτων προς φορτίο (S/B).

- Να αυξηθεί η τιμή του λόγου συνολικό μήκος γόμωσης προς ύψος βαθμίδας (L_{tot}/H).
- Τα διατρήματα να ορυχθούν σε εναλλασσόμενη διάταξη (staggered pattern) αντί ορθογώνιας (rectangular pattern), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.23. Η εφαρμογή της εναλλασσόμενη διάταξης έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας κατά 10%.

Αύξηση τις τιμές του συντελεστή ομοιομορφίας μπορεί επίσης να επιτευχθεί εφαρμόζοντας ομοιόμορφη γόμωση σε όλο το μήκος της διατρήματος, εάν δηλαδή $L_C = 0$ και $L_B = L_{tot}$ (Ouchterlony, 2003).



Εικόνα 2.23: Ορθογώνια και εναλλασσόμενη διάταξη διατρημάτων.

2.4.2 Τα μοντέλα πρόβλεψης του JKMRC

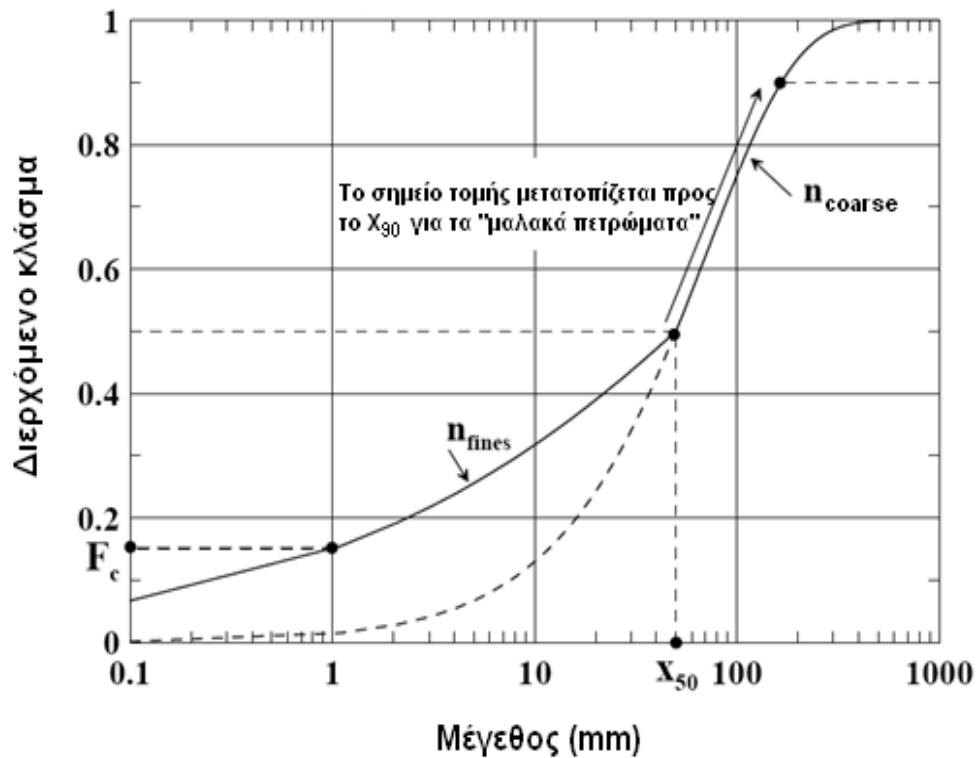
Οι ερευνητές του Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (Brisbane, Australia), έχουν πραγματοποιήσει εκτενή μελέτη πάνω στο αντικείμενο της θραύσης των πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Αποτέλεσμα της έρευνας αυτής είναι η δημιουργία δύο μοντέλων εκτίμησης, τα οποία ουσιαστικά αποτελούν προεκτάσεις του μοντέλου Kuz-Ram. Τα προτεινόμενα από το JKMRC μοντέλα είναι το Crush Zone Model (CZM) (Thornton *et al.*, 2002) και το Two Components Model (TCM) (Djordjevic, 1999).

Η βασική τους διαφοροποίηση, σε σχέση με το Kuz-Ram, είναι ότι για τα CZM και TCM η δημιουργία των πολύ λεπτομερών τεμαχίων πετρώματος ελέγχεται από έναν μηχανισμό, ο οποίος είναι διαφορετικός από εκείνον που ελέγχει τη δημιουργία των μεγαλύτερων τεμαχίων. Σύμφωνα με τους ερευνητές του JKMRC, περιμετρικά του διατρήματος δημιουργείται μια ζώνη θρυμματισμού εντός της οποίας το πέτρωμα αστοχεί σε θλίψη (Djordjevic 2002). Αυτή η ζώνη θρυμματισμού (crushed zone) θεωρείται υπεύθυνη για τη δημιουργία των λεπτομερών τεμαχίων. Ως εκ τούτου, για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων αυτών απαιτείται η εισαγωγή ξεχωριστών εξισώσεων από εκείνες που περιγράφουν την κατανομή των μεγαλύτερων τεμαχίων. Σε ότι αφορά τα χονδρομερή τεμάχια, οι ερευνητές του JKMRC θεωρούν ότι η δημιουργία τους οφείλεται στην αστοχία του πετρώματος σε εφελκυσμό, καθώς και στις ρωγμές που προϋπάρχουν στο πέτρωμα (όπως συμβαίνει και με το μοντέλο Kuz-Ram).

2.4.2.1 Crush Zone Model (CZM)

Το CZM χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές εξισώσεις Rosin-Rammler προκειμένου να περιγράψει τη συνολική κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος. Η μια εξίσωση περιγράφει το τμήμα την κατανομής που σχετίζεται με τα λεπτομερή τεμάχια, ενώ η δεύτερη το τμήμα που σχετίζεται με τα χονδρομερή. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.24, το σημείο τομής (grafting point) των δύο καμπυλών, αντιστοιχεί σε ένα χαρακτηριστικό μέγεθος x_c το οποίο εξαρτάται από τις ιδιότητες της βραχομάζας. Το μέγεθος του μεγαλύτερου τεμαχίου που δημιουργείται εντός της ζώνης θρυμματισμού εκ παραδοχής θεωρείται ότι είναι ίσο με 1mm (Thornton *et al.* 2001), ενώ το χαρακτηριστικό μέγεθος x_c λαμβάνει την τιμή του μεγέθους x_{50} για τις περιπτώσεις των «σκληρών» πετρωμάτων ($UCS > 50\text{MPa}$) και την τιμή του μεγέθους x_{90}

για τις περιπτώσεις των πιο «μαλακών» πετρωμάτων ($UCS < 10\text{MPa}$) (Kanchibotla *et al.*, 1999).



Εικόνα 2.24: Σημείο τομής της καμπυλών των λεπτομερών και των χονδρομερών τεμαχίων για το CZM (Ouchterlony, 2003).

Ο υπολογισμός του τμήματος της καμπύλης που περιγράφει τα χονδρομερή τεμάχια πετρώματος πραγματοποιείται με τη χρήση των εξισώσεων που ακολουθούν:

$$P(x) = 1 - e^{\left(\ln(1-P(x_c)) \cdot \left(\frac{x}{x_c}\right)^{n_{coarse}}\right)} \quad (2.16)$$

όπου:

$P(x)$ = το κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος x

$P(x_c)$ = το κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος ίσο με εκείνο του χαρακτηριστικού μεγέθους x_c

x = το μέγεθος του θραυσμένου πετρώματος (m)

x_c = το σημείο τομής των δύο καμπυλών (m)

n_{coarse} = ο συντελεστής ομοιομορφίας του τμήματος που περιγράφει τα χονδρομερή τεμάχια.

Ο συντελεστής ομοιομορφίας n_{coarse} υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{coarse} = \left(2,2 - 14 \cdot \frac{B}{d}\right) \cdot \left(0,5 + \frac{S/B}{2}\right)^{0,5} \cdot \frac{L_{tot}}{H} \quad (2.17)$$

όπου:

n_{coarse} = ο συντελεστής ομοιομορφίας του τμήματος που περιγράφει τα χονδρομερή τεμάχια

B = το φορτίο (m)

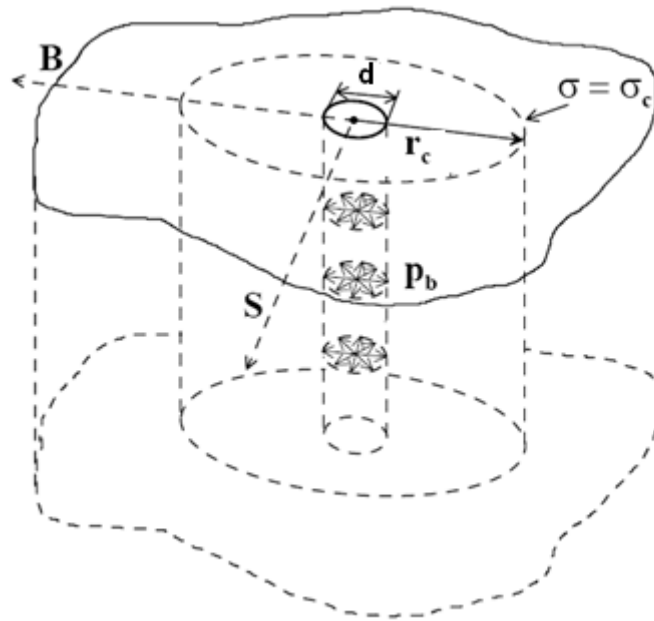
d = η διάμετρος του διατρήματος (mm)

S = η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της ίδιας σειράς (m)

L_{tot} = το συνολικό μήκος γόμωσης του διατρήματος (m)

H = ύψος βαθμίδας (m).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρεί ότι τα πολύ λεπτομερή τεμάχια πετρώματος (-1mm), προέρχονται από μια κυλινδρική ζώνη θραύσης εντός της οποίας το πέτρωμα αστοχεί σε θλίψη. Η ακτίνα της ζώνης αυτής είναι ίση με την απόσταση μεταξύ του διατρήματος και του σημείου στο οποίο η ακτινική τάση ισούται με τη θλιπτική αντοχή του πετρώματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.25.



Εικόνα 2.25: Ακτίνα της ζώνης θραύσης που δημιουργείται περιμετρικά του διατρήματος (Ouchterlony, 2003).

$$r_c = r \cdot \sqrt{\frac{P_b}{\sigma_c}} \quad (2.18)$$

όπου:

r_c = η ακτίνα της ζώνης θραύσης (m)

r = η ακτίνα του διατρήματος (m)

P_b = η στο μέτωπο της έκρηξης (Pa)

σ_c = η θλιπτική αντοχή του πετρώματος (Pa).

Η πίεση στο μέτωπο της έκρηξης υπολογίζεται ως εξής:

$$P_b = \rho_c \cdot \frac{VOD^2}{4} \quad (2.19)$$

όπου:

P_b = πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του διατρήματος (Pa)

ρ_c = η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης (kg/m^3)

VOD = η ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης (m/s).

Το κλάσμα του λεπτομερούς υλικού που δημιουργείται από την ανατίναξη ενός διατρήματος δίνεται από την σχέση:

$$F_c = \frac{V_c}{V_b} \quad (2.20)$$

όπου:

F_c = το κλάσμα του λεπτομερούς υλικού που δημιουργείται από την ανατίναξη ενός διατρήματος

V_c = ο όγκος της ζώνης θραύσης (m^3)

V_b = ο όγκος του εξορυγμένου πετρώματος ανά διάτρημα (m^3).

Για τον υπολογισμό του τμήματος της καμπύλης που περιγράφει τα λεπτομερή τεμάχια πετρώματος χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$P(x) = 1 - e^{\left(\ln(1-P(x_c)) \cdot \left(\frac{x}{x_c}\right)^{n_{\text{fine}}}\right)} \quad (2.21)$$

όπου:

$P(x)$ = το κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος x

$P(x_c)$ = το κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος ίσο με εκείνο του χαρακτηριστικού μεγέθους x_c

x = το μέγεθος του θραυσμένου πετρώματος (m)

x_c = το σημείο τομής των δύο καμπυλών (m)

n_{fines} = ο συντελεστής ομοιομορφίας του τμήματος που περιγράφει τα λεπτομερή τεμάχια.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ομοιομορφίας n_{fine} χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$n_{fines} = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1-F_c)}{\ln(1-P(x_c))}\right)}{\ln\left(\frac{1}{x_c}\right)} \quad (2.22)$$

όπου:

n_{fines} = ο συντελεστής ομοιομορφίας του τμήματος που περιγράφει τα λεπτομερή τεμάχια

F_c = το κλάσμα του λεπτομερούς υλικού που δημιουργείται από την ανατίναξη ενός διατρήματος

$P(x_c)$ = το ποσοστό του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος ίσο με εκείνο του χαρακτηριστικού μεγέθους x_c (%)

x_c = το σημείο τομής των δύο καμπυλών (m).

Το CZM είναι αρκετά αντιφατικό σε ότι αφορά τεμάχια με μέγεθος μεγαλύτερο του 1mm, τα οποία προέρχονται από τμήματα του πετρώματος που βρίσκονται εκτός της ζώνης θρυμματισμού ($r > r_c$). Για τα τεμάχια αυτά ισχύει η ίδια κατανομή που ισχύει και για τα τεμάχια που προέρχονται από το εσωτερικό της ζώνης θρυμματισμού ($r < r_c$), παρόλο που ο μηχανισμός θραύσης του πετρώματος και επομένως ο τρόπος δημιουργίας των συγκεκριμένων τεμαχίων είναι διαφορετικός (Ouchterlony 2003). Από τα αποτελέσματα δοκιμών προέκυψε ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό των «ψιλών» ($\approx 25\%$) δημιουργείται εντός της συγκεκριμένης ζώνης (Svahn 2003). Επιπλέον, σε ότι αφορά το σημείο τομής των δύο καμπυλών, για τις περιπτώσεις πετρωμάτων μέτριας «σκληρότητας», το σημείο αυτό τοποθετείται κάπου ανάμεσα στο x_{50} και στο x_{90} , χωρίς ωστόσο να προσδιορίζεται ποια είναι η ακριβής θέση του (Kanchibotla *et al.*, 1999).

2.4.2.2 Two Component Model (TCM)

Το μοντέλο TCM παρουσιάζει μια διαφοροποίηση σε σχέση με το CZM. Παρόλο που και το TCM δέχεται ότι η δημιουργία των λεπτομερών τεμαχίων οφείλεται σε ένα μηχανισμό διαφορετικό από εκείνο που ελέγχει τη δημιουργία των μεγαλύτερων τεμαχίων, χρησιμοποιεί ταυτόχρονα δύο εξισώσεις Rosin-Rammler προκειμένου να περιγράψει την κατανομή των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας καμπύλης με ενιαία κλίση. Η εξίσωση είναι η εξής:

$$P(x) = 100 \cdot \left(1 - (1 - F_c) \cdot e^{-\ln 2 \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^b} - F_c \cdot e^{-\ln 2 \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^d} \right) \quad (2.23)$$

όπου:

$P(x)$ = το ποσοστό του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος x (%)

x = το μέγεθος του θραυσμένου πετρώματος (m)

F_c = το κλάσμα του πετρώματος που δημιουργείται εντός της ζώνης θρυμματισμού

a = το μέσο μέγεθος τεμαχίων που δημιουργούνται πέρα από τη ζώνη θρυμματισμού (m)

b = σταθερά ομοιομορφίας που σχετίζεται με τα τεμάχια που δημιουργούνται πέρα από τη ζώνη θρυμματισμού

c = το μέσο μέγεθος τεμαχίων που δημιουργούνται εντός της ζώνης θρυμματισμού (m)

d = σταθερά ομοιομορφίας που σχετίζεται με τα τεμάχια που δημιουργούνται εντός της ζώνης θρυμματισμού.

Οι τιμές των c και d προσδιορίζονται έπειτα από πραγματοποίηση δοκιμαστικών ανατινάξεων μικρής κλίμακας και κοσκίνιση των τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος που δημιουργούνται. Σε ότι αφορά τα a και b , ο προσδιορισμός τους γίνεται μέσω των εξισώσεων υπολογισμού του x_{50} (Εξίσωση 2.11) και του συντελεστή ομοιομορφίας (Εξίσωση 2.15) του μοντέλου Kuz-Ram, τροποποιώντας ελαφρά τις σχέσεις υπολογισμού

των JPS και RDI, ενώ για τον υπολογισμό του F_c χρησιμοποιείται η ίδια ακριβώς εξίσωση που χρησιμοποιείται και στο μοντέλο CZM.

Η ακτίνα της ζώνης θρυμματισμού για το TCM δίνεται από τον τύπο:

$$r_c = \left(\frac{r}{\sqrt{\frac{24 \cdot TS_{in situ}}{P_b}}} \right) - r \quad (2.24)$$

όπου:

- r_c = η ακτίνα της ζώνης θρυμματισμού (m)
- r = η ακτίνα του διατρήματος (m)
- P_b = η πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του διατρήματος (Pa)
- $TS_{in situ}$ = η εφελκυστική αντοχή του in situ πετρώματος (Pa).

Για τον υπολογισμό της πίεσης που ασκείται στα τοιχώματα του διατρήματος χρησιμοποιείται η αντίστοιχη εξίσωση του CZM (Εξίσωση 2.19), ενώ ο υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής του in situ πετρώματος γίνεται ως εξής:

$$TS_{in situ} = \sigma_\tau \cdot \left(\frac{0,05}{\text{mean block size}} \right)^{0,18} \quad (2.25)$$

όπου:

- σ_τ = η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος (MPa)
- mean block size = το μέσο μέγεθος των τεμαχίων in situ πετρώματος (m).

2.4.3 Η εξίσωση Swebrec και το μοντέλο πρόβλεψης KCO

Έπειτα από εκτενή μελέτη που πραγματοποίησε ο Ouchterlony, αναλύοντας δεδομένα και αποτελέσματα μεγάλου αριθμού κοσκίνιστων που έγιναν σε τεμάχια προερχόμενα από δοκιμαστικές ανατινάξεις αλλά και ανατινάξεις παραγωγής στο πλαίσιο

του Ευρωπαϊκού Προγράμματος «Less Fines Project» (Moser 2003a), κατέληξε ότι η χρήση της εξίσωσης Rosin-Rammler οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα σε ότι αφορά την εκτίμηση τόσο των πολύ λεπτομερών όσο και των χονδρομερών τεμαχίων. Σύμφωνα με τον Ouchterlony (2005a/b) οι βασικοί λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι:

- Παρόλο που πάντοτε υπάρχει ένα μέγιστο μέγεθος τεμαχίου $x_{\max}$ για το οποίο η τιμή του αθροιστικά διερχόμενου είναι 100%, η εξίσωση Rosin-Rammler τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή 100%.
- Στην περιοχή των λεπτομερών τεμαχίων, η εξίσωση Rosin-Rammler παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά κατά την απεικόνιση της σε λογαριθμικό διάγραμμα, κάτι το οποίο στην πραγματικότητα δεν ισχύει.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αδυναμίες της εξίσωσης Rosin-Rammler, ο Ouchterlony προτείνει μια νέα εξίσωση τριών παραμέτρων η οποία είναι ικανή να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια ($R^2=0,995$), κοκκομετρικές κατανομές το εύρος τιμών των οποίων φτάνει έως και τις τρεις τάξεις μεγέθους (1-500mm). Η εξίσωση αυτή φέρει το όνομα Swebrec και έχει την εξής μορφή:

$$f(x) = \left(\frac{\ln \frac{x_{\max}}{x}}{\ln \frac{x_{\max}}{x_{50}}} \right)^b \quad (2.26)$$

όπου:

- x = το μέγεθος του θραυσμένου πετρώματος (m)
- x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% του αθροιστικά διερχόμενου (m)
- $x_{\max}$ = το μέγεθος του μεγαλύτερου τεμαχίου θραυσμένου πετρώματος (m)
- b = παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη κυματοειδή μορφή της εξίσωσης (curve-undulation parameter).

Η εξίσωση Swebrec έχει ως κύρια παράμετρο την τιμή του 50% αθροιστικά διερχόμενου (x_{50}), όπως ακριβώς συμβαίνει και με την εξίσωση Rosin-Rammler. Επιπλέον όμως, έχει ένα ανώτερο όριο το οποίο αντιστοιχεί στο μέγεθος του μεγαλύτερου τεμαχίου πετρώματος ($x_{\max}$), ενώ χρησιμοποιεί και μια τρίτη παράμετρο b , η οποία σχετίζεται με την

κυματοειδή μορφή της καμπύλης που αναπαριστά την εξίσωση Swebrec (curve undulation parameter).

Η σχέση που συνδέει τις παραμέτρους x_{50} , x_{max} και b είναι η εξής:

$$b = 0,5 \cdot x_{50}^{0,25} \cdot \ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right) \quad (2.27)$$

όπου:

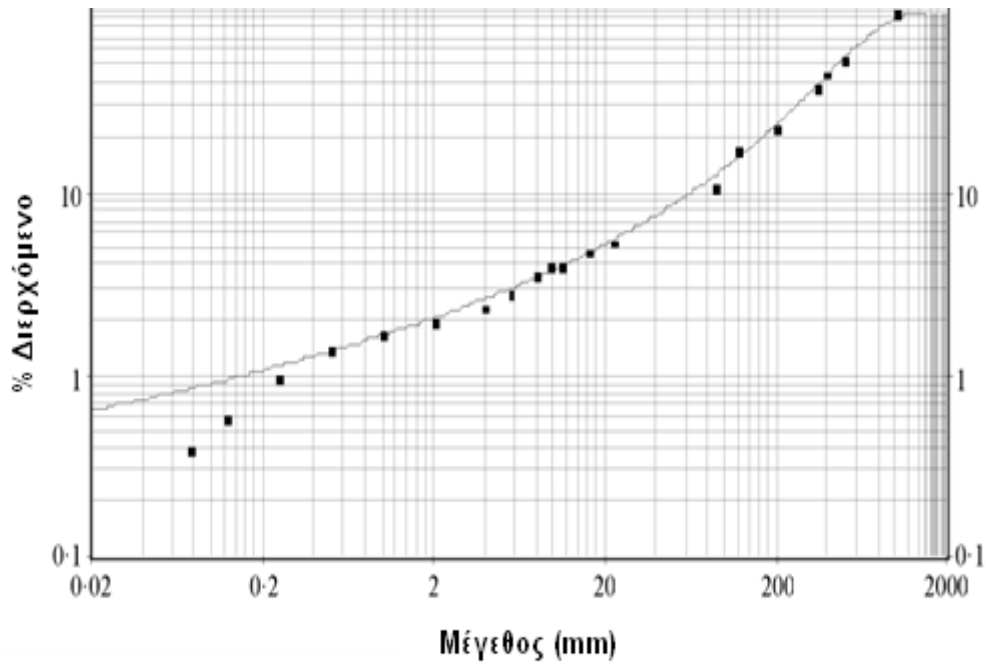
b = παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη κυματοειδή μορφή της εξίσωσης (curve-undulation parameter).

x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (m)

x_{max} = το μέγεθος του μεγαλύτερου τεμαχίου θραυσμένου πετρώματος (m).

Οι τιμές τις οποίες συνήθως λαμβάνει η παράμετρος b κυμαίνονται από 1 έως 4, ενώ σε εξαιρετικές περιπτώσεις, όπως είναι για παράδειγμα οι δοκιμαστικές ανατινάξεις με τιμές φορτίου κοντά στην τιμή του «κρίσιμου φορτίου» (δλδ την ελάχιστη τιμή φορτίου για την οποία δεν παρατηρείται θραύση), η τιμή της μπορεί να γίνει μικρότερη της μονάδας. Συνήθως η τιμή της παραμένει σταθερή για ένα δεδομένο τύπο πετρώματος, ακόμα και όταν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες προκαλείται η θραύση του μεταβάλλονται σημαντικά, ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις η τιμή της φαίνεται να εξαρτάται από τον τύπο της εκρηκτικής ύλης, από την πυκνότητα γόμωσης, καθώς και από την κλίμακα της ανατίναξης. Ως εκ τούτου δεν υπάρχει κάποια σταθερή ένδειξη βάσει της οποίας η παράμετρος b μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστική ιδιότητα ενός πετρώματος ή ότι εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τον συντελεστή ομοιομορφίας του μοντέλου Kuz-Ram (Ouchterlony 2005a).

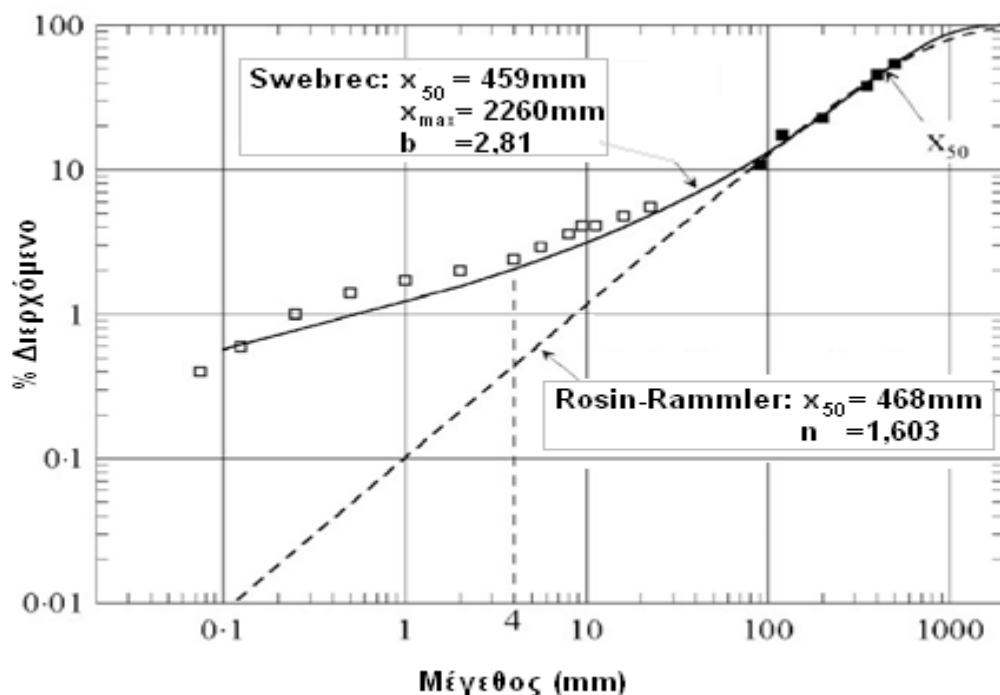
Στην Εικόνα 2.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από κοσκίνιση των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος μιας ανατίναξης που πραγματοποιήθηκε στο λατομείο Bararp της Σουηδίας. Το σχέδιο ανατίναξης περιελάμβανε μία σειρά των 6 διατρημάτων, ο συνολικός όγκος που εξορύχθηκε ήταν 500tn, η διάμετρος των διατρημάτων 51mm, οι διαστάσεις του κάνναβου 1,8m x 2,2m (Φορτίο x Απόσταση) και η τιμή της ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικής ύλης 0,55kg/m³.



Εικόνα 2.26: Προσαρμογή της εξίσωσης Swebrec στα αποτελέσματα κοσκίνισης (Ouchterlony, 2005a).

Όπως προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, ο συντελεστής προσαρμογής της εξίσωσης Swebrec είναι ιδιαίτερα υψηλός ($R^2=0,997\pm0,001$), για ένα εύρος τιμών μεγέθους που κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 500mm. Σε ότι αφορά τον συντελεστή προσαρμογής της εξίσωσης Rosin Rammler στα αποτελέσματα της ίδιας κοσκίνισης, η τιμή του R^2 ήταν 0,98, με την καμπύλη ωστόσο να παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από τις μετρούμενες τιμές για μεγέθη μικρότερα των 20mm.

Η εξίσωση Swebrec δύναται να χρησιμοποιηθεί, με αυξημένη μάλιστα αποτελεσματικότητα, προκειμένου να κατασκευαστεί η κοκκομετρική κατανομή των λεπτομερών τεμαχίων πετρώματος εφαρμόζοντας τη μέθοδο της προβολής (extrapolation), χρησιμοποιώντας ως δεδομένο την κατανομή των χονδρομερών τεμαχίων, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.27.



Εικόνα 2.27: Σύγκριση της προσαρμογής των εξισώσεων Swebrec και R-R στα αποτελέσματα κοσκίνισης για τα μεγέθη +90 mm και εφαρμογή προβολής για την κατασκευή της κατανομής των λεπτομερών τεμαχίων (Ouchterlony, 2005a).

Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος της προβολής σημειώνονται στην Εικόνα 2.27 με το σύμβολο «■». Όπως ξεκάθαρα προκύπτει από το διάγραμμα, το ποσοστό των λεπτομερών τεμαχίων (-4mm) που εκτιμά η εξίσωση Rosin-Rammler (0,3-0,4%), είναι σημαντικά μικρότερο από εκείνο που μετρήθηκε μέσω κοσκίνισης (2,5%). Αντίθετα το ποσοστό που εκτιμάται μέσω της εξίσωσης Swebrec (2%), προσεγγίζει τη μετρούμενη τιμή με ιδιαίτερα αυξημένη ακρίβεια.

Για μεγέθη τεμαχίων τα οποία βρίσκονται γύρω από την τιμή x_{50} , οι εξισώσεις R-R και Swebrec παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Εξισώνοντας την κλίση των R-R και Swebrec στην τιμή x_{50} , λαμβάνουμε την ακόλουθη σχέση:

$$n = \frac{b}{\left[2 \cdot \ln 2 \cdot \ln \left(\frac{x_{\max}}{x_{50}} \right) \right]} \quad (2.28)$$

όπου:

n = ο συντελεστής ομοιομορφίας Rosin-Rammler

b = παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη κυματοειδή μορφή της εξίσωσης (curve-undulation parameter).

x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (m)

x_{max} = το μέγεθος του μεγαλύτερου τεμαχίου θραυσμένου πετρώματος (m).

Εάν στο μοντέλο Kuz-Ram, αντί την εξίσωσης Rosin Rammler χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Swebrec, προκύπτει το μοντέλο KCO (Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony), το οποίο είναι γνωστό και ως «διευρυμένο μοντέλο Kuz-Ram» (extended Kuz-Ram model).

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής κατανομής για το μοντέλο KCO πραγματοποιείται μέσω της σχέσης:

$$P(x) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln \frac{x_{max}}{x}}{\ln \frac{x_{max}}{x_{50}}} \right]^b} \quad (2.29)$$

όπου:

$P(x)$ = το κλάσμα του υλικού που διέρχεται μέσα από άνοιγμα κόσκινου με μέγεθος x

x = το μέγεθος του θραυσμένου πετρώματος (m)

x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% του αθροιστικά διερχόμενου (m)

x_{max} = το μέγεθος του μεγαλύτερου τεμαχίου θραυσμένου πετρώματος (m)

b = παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη κυματοειδή μορφή της εξίσωσης (curve-undulation parameter).

Προκειμένου η εκτιμώμενη κατανομή να μετατοπιστεί σε μικρότερες τιμές του x_{50} , ώστε να βελτιωθεί η πρόβλεψη των λεπτομερών τεμαχίων πετρώματος, ο Spathis (2004) πρότεινε την προσθήκη ενός συντελεστή $g(n)$ στην εξίσωση υπολογισμού του x_{50} . Η σχέση μέσω της οποίας γίνεται ο υπολογισμός του x_{50S} είναι:

$$x_{50S} = g(n) \cdot A \cdot q^{-0,8} \cdot Q_e^{1/6} \cdot \left(\frac{RWS}{115}\right)^{-19/30} \quad (2.30)$$

όπου:

x_{50S} = το μέγεθος των τεμαχίων πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο κατά τον Spathis (cm)

A = ο συντελεστής εξορυξιμότητας του πετρώματος

q = η ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης (powder factor, kg/m^3), δηλ η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό μέτρο του προς εξόρυξη πετρώματος

Q_e = η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης η οποία βρίσκεται τοποθετημένη εντός του διατρήματος (kg)

RWS = η σχετική κατά βάρος ισχύς της εκρηκτικής ύλης ως προς το ANFO.

Ο συντελεστής διόρθωσης $g(n)$ υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$g(n) = \frac{(\ln 2)^{1/n}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{n}\right)} \quad (2.31)$$

όπου:

$g(n)$ = ο συντελεστής διόρθωσης

n = ο συντελεστής ομοιομορφίας

Γ = η τιμή της συνάρτησης Γ (gamma factor).

Σ ότι αφορά το $x_{\max}$, δεν υπάρχει κάποια μαθηματική σχέση μέσω της οποίας μπορεί να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός του. Ως εκ τούτου για τον προσδιορισμό του προς το παρόν χρησιμοποιείται ο παρακάτω εμπειρικός τύπος:

$$x_{\max} = \min (\max_{\text{in situ block size}}, S \text{ ή } B) \quad (2.32)$$

2.4.4 Σύγκριση των μοντέλων εκτίμησης

Το μοντέλο Kuz-Ram αποτελούσε για 25 περίπου χρόνια το βασικό εργαλείο εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος. Παρά τις όποιες διορθώσεις έχει κατά καιρούς υποστεί από διάφορους μελετητές (Cunningham 2000/2005, Spathis 2004, Onederra 2007, Gheibie *et al.* 2009), το σημαντικότερο μειονέκτημα του εξακολουθεί και είναι ο μη ικανοποιητικός προσδιορισμός του τμήματος της κατανομής που σχετίζεται με τα λεπτομερή τεμάχια πετρώματος (-25mm).

Βασιζόμενοι στο Kuz-Ram, οι μελετητές του JKMRC πρότειναν δύο νέα μοντέλα εκτίμησης, το CZM και το TCM. Τα μοντέλα του JKMRC αποδίδουν τη δημιουργία των λεπτομερών τεμαχίων σε ένα μηχανισμό θραύσης διαφορετικό από εκείνον που ελέγχει τη δημιουργία τεμαχίων μεγαλύτερου μεγέθους. Θεωρούν ότι τα «ψιλά» προέρχονται από μια ζώνη θρυμματισμού που εκτείνεται περιμετρικά του διατρήματος και εισάγουν νέες εξισώσεις προκειμένου να πραγματοποιούν ακριβέστερους υπολογισμούς για τα τεμάχια αυτά.

Συγκρίνοντας τα μοντέλα του JKMRC, οι Hall *et al.* (2002) κατέληξαν ότι το CZM εκτιμά αποτελεσματικότερα το τμήμα της κατανομής που σχετίζεται με τα λεπτομερή τεμάχια. Από την ίδια μελέτη προέκυψε ότι οι παράμετροι που απαιτούνται για την εφαρμογή του CZM αλλά και του Kuz-Ram, είναι λιγότερες και μπορούν να συλλεχθούν πιο εύκολα, σε σχέση με εκείνες που απαιτούνται για την εφαρμογή του TCM. Η περιορισμένη ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, κυρίως στην περιοχή των λεπτομερών τεμαχίων, έχει οδηγήσει τους μελετητές του JKMRC στην πραγματοποίηση διορθώσεων στο τυπολόγιο των μοντέλων (Onederra *et al.* 2004b).

Το πιο πρόσφατο από τα μοντέλα εκτίμησης είναι το KCO, το οποίο φέρεται να εκτιμά αποτελεσματικότερα από οποιοδήποτε άλλο, κοκκομετρικές κατανομές εύρους τριών τάξεων μεγέθους ($1 < x < 500 \text{ mm}$, $R^2=0,995$). Η βασική διαφοροποίηση του KCO σε σχέση με το Kuz-Ram, είναι η χρήση της εξίσωσης Swebrec (αντί της R-R), η οποία αφενός παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά στην περιοχή των λεπτομερών τεμαχίων, προσδίδοντας αυξημένη ακρίβεια στην εκτίμηση των τεμαχίων αυτών, αφετέρου έχει ένα πεπερασμένο άνω όριο μεγέθους ($x_{\max}$). Η εξίσωση Swebrec φαίνεται να αποτελεί

πρασιτικότερη προσέγγιση της κατανομής που ακολουθούν τα τεμάχια του θραυσμένου πετρώματος, σε σχέση με την Rosin Rammeler, ειδικότερα στην περιοχή των «φιλών».

Πλην της αποτελεσματικότητας που φέρεται να έχει στην εκτίμηση κατανομών τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος που προέρχονται από δοκιμαστικές ανατινάξεις και ανατινάξεις παραγωγής, η εξίσωση Swebrec δύναται να περιγράψει με αυξημένη ακρίβεια, κατανομές οι οποίες είναι αποτέλεσμα εργαστηριακών ανατινάξεων (Moser 2005, Johansson *et al.* 2007). Το μοντέλο KCO μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς, για την αναπαραγωγή ολόκληρης της κατανομής των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος, εφαρμόζοντας την τεχνική της προβολής σε ένα δεδομένο τμήμα (Ouchterlony *et al.* 2006a). Επιπλέον, μέσω της εξίσωσης Swebrec μπορεί να πραγματοποιηθεί διόρθωση των αποτελεσμάτων τα οποία έχουν εξαχθεί με τη χρήση φωτογραφικών μεθόδων, κυρίως σε ότι αφορά την περιοχή των πολύ λεπτομερών τεμαχίων (Ouchterlony, 2005b).

Πάρα την ύπαρξη ορισμένων σημείων τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, το μοντέλο KCO φαίνεται να δίνει λύση στα δύο μεγαλύτερα μειονεκτήματα που εμφανίζει το μοντέλο Kuz-Ram, δηλαδή την περιορισμένη ακρίβεια υπολογισμού των λεπτομερών τεμαχίων και την απουσία άνω ορίου για την κοκκομετρική κατανομή.

Γεγονός είναι, ότι τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται με τη χρήση των διαφόρων μοντέλων εκτίμησης διαφέρουν, άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο, από τα αποτελέσματα τα οποία θα λαμβάνονταν έπειτα από την πραγματοποίηση κοσκίνισης του σωρού των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος. Αυτή η απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των πραγματικών τιμών και των εκτιμώμενων αποτελεσμάτων, οφείλεται στο ότι το τυπολόγιο των μοντέλων πρόβλεψης δεν δύναται να συμπεριλάβει όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την κοκκομετρία του θραυσμένου πετρώματος.

Η αδυναμία κοσκίνισης του σωρού αμέσως μετά την ανατίναξη, προκειμένου να γίνει διασταύρωση μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών, καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την πραγματοποίηση ουσιαστικών και αποτελεσματικών τροποποιήσεων στις εξισώσεις των μοντέλων εκτίμησης. Η κοσκίνιση τμήματος του θραυσμένου όγκου για τον σκοπό αυτό, αποτελεί συμβιβαστική λύση, καθώς το δείγμα το οποίο λαμβάνεται, τις περισσότερες φορές, δεν είναι αντιπροσωπευτικό του συνολικού εξορυγμένου όγκου. Τα πολύ χονδρομερή τεμάχια συνήθως υφίστανται δευτερογενή θραύση αμέσως μετά την ολοκλήρωση της ανατίναξης, ενώ τα πολύ λεπτομερή τις περισσότερες φορές παρασύρονται και απομακρύνονται από τον σωρό, είτε εξαιτίας του

αέρα, είτε λόγω της παρουσίας υδάτων. Ως εκ τούτου, τα κοκκομετρικά κλάσματα που προέρχονται από τις δύο παραπάνω κατηγορίες μεγέθους, σπανίως είναι αντιπροσωπευτικά του συνόλου του εξορυγμένου πετρώματος.

Η πραγματοποίηση ανατινάξεων σε δοκίμια κατασκευασμένα από διαφανές υλικό με σκοπό την κατανόηση του μηχανισμού της έκρηξης, είναι μια λύση η οποία θα πρέπει να αποφεύγεται, καθότι τόσο τα δοκίμια, όσο και οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές αυτές, αδυνατούν να προσομοιάσουν μια ανατίναξη παραγωγής (Cunningham 2005). Αντίθετα, δοκιμαστικές ανατινάξεις που πραγματοποιούνται σε δοκίμια κατασκευασμένα από σκυρόδεμα, έπειτα από προσεκτική μελέτη και λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη την έννοια της κλίμακας, μπορούν να προσομοιάσουν ικανοποιητικά τις ανατινάξεις κανονικής κλίμακας (Stimpson 1970, Dick 1993, Moser *et al.* 2000/2003b/2003c, Ouchterlony *et al.* 2006b).

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση φωτογραφικών μεθόδων για τη διασταύρωση και τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων που εξάγονται μέσω των μοντέλων εκτίμησης, τυγχάνει ιδιαίτερης αποδοχής από πολλούς μελετητές αλλά και από μεγάλο αριθμό λατομικών επιχειρήσεων. Εκτενή αναφορά στις μεθόδους φωτογραφικής ανάλυσης πραγματοποιείται στην παράγραφο που ακολουθεί.

Ανεξάρτητα πάντως από τα όποια μειονεκτήματα παρουσιάζουν, τα μοντέλα εκτίμησης κοκκομετρικών κατανομών εξακολουθούν να αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για τον μηχανικό που σχεδιάζει ανατινάξεις.

2.5 Λογισμικά επεξεργασίας εικόνων

Ο υπολογισμός του κερματισμού που επιτυγχάνεται έπειτα από την πραγματοποίηση μιας ανατίναξης, έχει ιδιαίτερη σημασία για τη εξορυκτική βιομηχανία, καθώς μέσω αυτού δύναται να ελεγχθεί και να βελτιστοποιηθεί το σύνολο των διεργασιών που έπονται μιας ανατίναξης (φόρτωση, μεταφορά, θραύση).

Για τον ακριβή προσδιορισμό του κερματισμού θα έπρεπε ιδανικά να υπολογιστεί το μέγεθος για καθένα από τα εξορυγμένα τεμάχια πετρώματος ξεχωριστά, κάτι τέτοιο όμως είναι πρακτικά ανέφικτο. Η οπτική παρατήρηση του σωρού των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος, είναι μια από τις συνηθισμένες τακτικές που ακολουθούνται για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας μιας ανατίναξης. Η διαδικασία αυτή έχει ποιοτικό

χαρακτήρα και σε συνδυασμό με το πώς εξελίσσονται οι εργασίες που ακολουθούν την ανατίναξη, αποτελεί σημαντικό κριτήριο για το εάν μπορεί ο σχεδιασμός της να θεωρηθεί αποτελεσματικός ή όχι.

Η ύπαρξη ενός εργαλείου το οποίο θα επιτρέπει την πραγματοποίηση συγκρίσεων μεταξύ της κατανομής που εκτιμάται μέσω των διαφόρων μοντέλων και εκείνης που τελικά προκύπτει μετά την πραγματοποίησης μιας ανατίναξης, είναι αναγκαία, τόσο για τους ερευνητές που το αντικείμενο εργασίας τους είναι ο υπολογισμός της κοκκομετρίας των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος, όσο και για τους μηχανικούς που ασχολούνται με τον σχεδιασμό ανατινάξεων.

Τις τελευταίες δεκαετίες σημαντικά βήματα προόδου είχαν γίνει στον τομέα της πραγματοποίησης υπολογισμών της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος με τη χρήση φωτογραφικών μεθόδων (Maerz *et al.* 1987, Franklin *et al.* 1988, Hunter *et al.* 1990, Exadaktylos *et al.* 1991). Φυσική απόρροια των προσπαθειών αυτών ήταν η δημιουργία εξειδικευμένων λογισμικών ανάλυσης εικόνων (image analysis systems). Τα προγράμματα αυτά είναι ιδιαίτερα δημοφιλή, όχι μόνο σε επίπεδο εργαστηριακής έρευνας, αλλά και σε επίπεδο βιομηχανικής εφαρμογής (Kanchibotla *et al.* 1998, Kemeny *et al.* 1999, Grundstrom *et al.* 2001, Segarra *et al.* 2005, Adel *et al.* 2006, Sanchidrian *et al.* 2006, Ouchterlony *et al.* 2007, Monjezi *et al.* 2012). Η ευκολία με την οποία μπορεί να γίνει ο χειρισμός ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή υψηλών δυνατοτήτων, σε συνδυασμό με την ύπαρξη προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας, καθώς και το σχετικά χαμηλό κόστος κτήσης ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών υψηλής ανάλυσης, καθιστούν πλέον τον υπολογισμό της κατανομής των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος με τη χρήση των εξειδικευμένων λογισμικών μια διαδικασία εύκολα εφαρμόσιμη.

2.5.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των λογισμικών επεξεργασίας εικόνων

Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι για τους οποίους πραγματοποιούνται υπολογισμοί μέσω των ειδικών λογισμικών επεξεργασίας εικόνων. Ο πρώτος λόγος είναι το να διαπιστωθεί εάν η κοκκομετρία των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος βρίσκεται εντός των επιθυμητών ορίων. Ο δεύτερος λόγος είναι το να ελεγχθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν την κοκκομετρική κατανομή οι όποιες αλλαγές πραγματοποιούνται σε ένα σχέδιο ανατίναξης. Βάσει των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, μπορεί να αξιολογηθεί η ορθότητα ενός σχεδίου ανατίναξης και να γίνουν τροποποιήσεις σε αυτό, προκειμένου να

περιοριστεί κυρίως η δημιουργία των πολύ λεπτομερών τεμαχίων, η παρουσία των οποίων είναι γενικώς μη επιθυμητή. Επιπλέον, μέσω των υπολογισμών αυτών μπορεί να περιοριστεί η εμφάνιση μεγάλων ογκόλιθων εντός του σωρού του εξορυγμένου πετρώματος, γεγονός το οποίο επιφέρει σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις, επιβαρύνει την εξορυκτική επιχείρηση με το κόστος της δευτερογενούς θραύσης, προκαλεί εκτεταμένες φθορές στον μηχανολογικό εξοπλισμό και «ανατρέπει» τον χρονικό προγραμματισμό της εξορυκτικής διαδικασίας.

Ο υπολογισμός της κοκκομετρίας με τη βοήθεια των λογισμικών ανάλυσης εικόνων, πλεονεκτεί έναντι της παραδοσιακής μεθόδου υπολογισμού μέσω κοσκίνισης για τους ακόλουθους λόγους (Maerz, 2001):

- Η λήψη φωτογραφιών δεν παρεμποδίζει, ούτε διακόπτει τις υπόλοιπες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός του μεταλλείου/λατομείου.
- Ο χειρισμός των λογισμικών επεξεργασίας εικόνων μπορεί να γίνει εύκολα.
- Το κόστος κτήσης του εξοπλισμού που απαιτείται προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί είναι χαμηλό.
- Η ανάλυση φωτογραφιών δεν είναι χρονοβόρος διαδικασία.
- Η ανάλυση φωτογραφιών είναι μια διαδικασία πλήρως αυτοματοποιημένη.
- Παρέχεται η δυνατότητα ανάλυσης μεγάλου δείγματος, γεγονός το οποίο περιορίζει ως ένα βαθμό την εμφάνιση σφάλματος.
- Η επεξεργασία φωτογραφιών και η λήψη των αποτελεσμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο.
- Τα όρια εντός των οποίων βρίσκονται τα μεγέθη τα οποία μπορούν να υπολογιστούν μέσω των τεχνικών αυτών είναι σαφώς διευρυμένα έναντι εκείνων που υπολογίζονται μέσω της κοσκίνισης.
- Παρέχεται η δυνατότητα πραγματοποίησης υπολογισμών ακόμα και για περιπτώσεις «μαλακών» σχετικά πετρωμάτων (π.χ. άνθρακας), τα οποία έχουν την τάση να θραύονται κατά την κοσκίνισή τους.
- Οι φωτογραφίες που λαμβάνονται σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που εξάγονται από την ανάλυσή τους μπορούν να καταγραφούν, να αρχειοθετηθούν και να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εκτιμηθούν μελλοντικά σχέδια ανατίναξης.

Ωστόσο ο υπολογισμός της κοκκομετρικής κατανομής του εξορυσσόμενου πετρώματος με τη χρήση λογισμικού εμπεριέχει και μια σειρά από μειονεκτήματα (Maerz *et al.* 1998/2007). Τα σημαντικότερα είναι τα εξής:

- Όσο πιο έντονο είναι το ανάγλυφο των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος και όσο πιο ανομοιόμορφο είναι το χρώμα τους, τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος.
- Όσο πιο μεγάλο είναι το εύρος της κοκκομετρικής κατανομής, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των μετρούμενων και των τιμών μεγέθους που θα λαμβάνονταν έπειτα από την πραγματοποίηση κοσκίνισης.
- Τα λογισμικά παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια σε ότι αφορά τον υπολογισμό των λεπτομερών τεμαχίων, ενώ γενικά αυξημένη θεωρείται η ακρίβεια με την οποία γίνεται ο υπολογισμός των τεμαχίων μέσου και μεγάλου μεγέθους.
- Η δυσκολία «αναγνώρισης» των λεπτομερών τεμαχίων πετρώματος, έχει ως αποτέλεσμα η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας που υπολογίζεται μέσω των λογισμικών να είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα υπολογίζαμε εάν πραγματοποιούσαμε κοσκίνιση του ίδιου δείγματος.
- Τα λογισμικά πραγματοποιούν υπολογισμούς μετρώντας τον μεσαίο ή τον μεγάλο άξονα των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος, ενώ κατά την κοσκίνιση το μέγεθος των τεμαχίων υπολογίζεται μέσω του μικρού ή του μεσαίου άξονα τους.
- Η αποτύπωση και η εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής του τρισδιάστατου σωρού που δημιουργούν τα τεμάχια του θραυσμένου πετρώματος, γίνεται μέσω δισδιάστατων φωτογραφιών.

Εξαιτίας των παραπάνω μειονεκτημάτων, η αξιοπιστία των λογισμικών υπολογισμού της κατανομής του εξορυγμένου πετρώματος έχει τεθεί υπό αμφισβήτηση (Cunningham, 1996). Οι Latham *et al.* (2003), σε μια προσπάθεια να αξιολογήσουν την αξιοπιστία τεσσάρων δημοφιλών λογισμικών προγραμμάτων, πραγματοποίησαν υπολογισμούς χρησιμοποιώντας τεχνητούς σωρούς με συντελεστές ομοιομορφίας (n) που κυμαίνονταν από 0,5-1,75 για τιμές του x_{50} που κυμαίνονταν από 15-52mm. Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι τα λογισμικά έχουν την τάση:

- Να υπολογίζουν τιμές του x_{50} μεγαλύτερες των «πραγματικών», για τις περιπτώσεις δειγμάτων με μικρό x_{50}

- Να υπολογίζουν τιμές του x_{50} μικρότερες των «πραγματικών», για τις περιπτώσεις δειγμάτων με μεγάλο x_{50} .

Σε ότι αφορά τους πιο ομοιομορφους σωρούς, με υψηλή τιμή συντελεστή ομοιομορφίας, τα τρία από τα τέσσερα λογισμικά εκτίμησαν την τιμή του συντελεστή με σχετικά αυξημένη ακρίβεια. Για τους πιο ανομοιομορφους σωρούς ($n < 0.9$), η μετρούμενη από τα λογισμικά τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη από την «πραγματική».

Γεγονός είναι ότι η μη προσεκτική εφαρμογή της μεθοδολογίας λήψης και επεξεργασίας εικόνων καθώς και ο μη προσεκτικός χειρισμός των λογισμικών, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Ωστόσο, πολλές είναι οι περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από ορθή χρήση των συγκεκριμένων λογισμικών οδήγησαν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και στην πραγματοποίηση ουσιαστικών τροποποιήσεων για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της εξόρυξης (Palangio *et al.* 1999, Maerz *et al.* 2000, Ozkahraman 2006, Eloranta *et al.* 2007, Pinksen *et al.* 2011).

2.5.2 Τεχνική ανάλυσης φωτογραφιών

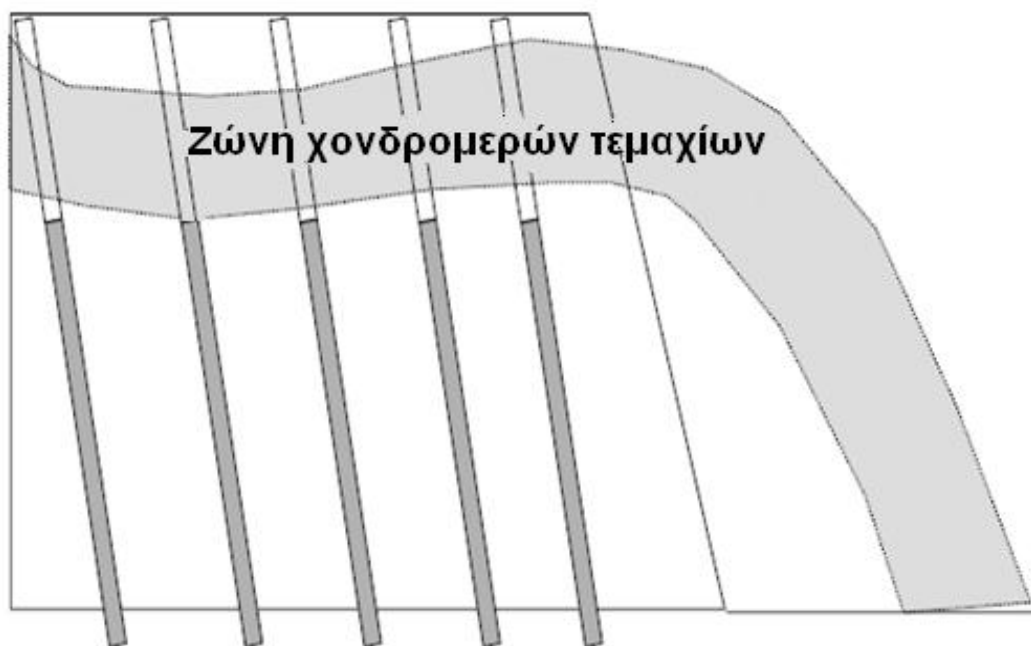
Η διαδικασία της εκτίμησης της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος μέσω λογισμικού περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Προετοιμασία του δείγματος
- Λήψη φωτογραφιών
- Ανάλυση φωτογραφιών

Η προετοιμασία του δείγματος σχετίζεται με τον καθορισμό του τμήματος του θραυσμένου πετρώματος από το οποίο θα προέλθουν οι φωτογραφίες που πρόκειται να υποστούν ανάλυση. Τα κριτήρια επιλογής είναι όμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του τμήματος του εξορυγμένου πετρώματος που προορίζεται για κοσκίνιση. Ως εκ τούτου, το δείγμα που φωτογραφίζεται θα πρέπει να είναι στατιστικώς αντιπροσωπευτικό του συνολικού όγκου και να περιλαμβάνει τεμάχια όλων των μεγεθών.

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τη λήψη και την επιλογή εκείνων των φωτογραφιών που διαθέτουν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά προκειμένου η ανάλυσή τους να δώσει αξιόπιστες μετρήσεις (Maerz 1996a). Κατά τη λήψη φωτογραφιών θα πρέπει

πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη ότι τα τεμάχια των οποίων το μέγεθος δύναται να υπολογιστεί είναι εκείνα που βρίσκονται στην επιφάνεια του σωρού και ως εκ τούτου είναι «ορατά» από το λογισμικό και όχι εκείνα που είναι «κρυμμένα» κάτω από τα «ορατά». Ειδικότερα σε ότι αφορά τις περιπτώσεις ανατινάξεων που πραγματοποιούνται για τη θραύση «σκληρών» και χωρίς την ύπαρξη ασυνεχειών πετρωμάτων, το ανώτερο τμήμα του σωρού απαρτίζεται συνήθως από χονδρομερή τεμάχια τα οποία προέρχονται από το τμήμα του πετρώματος που βρίσκεται στο ύψος της επιγόμεωσης, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.28.



Εικόνα 2.28: Προέλευση χονδρομερών τεμαχίων πετρώματος (Kanchibotla, 1999).

Προκειμένου λοιπόν το δείγμα που θα φωτογραφηθεί να είναι αντιπροσωπευτικό του συνόλου του εξορυγμένου όγκου, θα πρέπει να αποφεύγεται η λήψη φωτογραφιών αμέσως μετά την ολοκλήρωση της ανατίναξης. Η λήψη τους θα πρέπει να πραγματοποιείται είτε κατά την εξέλιξη της διαδικασίας φόρτωσης του θραυσμένου πετρώματος, είτε στο σημείο που γίνεται η εκκένωση των χωματουργικών οχημάτων, είτε κατά τη μετακίνηση του θραυσμένου πετρώματος μέσω των μεταφορικών ταινιών (Maerz *et al.* 2004, Palangio *et al.* 2005).

Ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει επίσης να δίνεται στο ποια είναι η κλίμακα με την οποία λαμβάνονται οι φωτογραφίες. Για κάθε δεδομένη κλίμακα τα λογισμικά προγράμματα μπορούν να προσδιορίσουν μεγέθη τεμαχίων πετρώματος τα οποία βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων. Τα όρια αυτά καθορίζονται από το μικρότερο μέγεθος το οποίο μπορεί να αναγνωριστεί από το εκάστοτε λογισμικό (resolvable size) και από το μεγαλύτερο μέγεθος το οποίο είναι ορατό εντός της φωτογραφίας (visible size). Επιπλέον, κανένα τεμάχιο θραυσμένου πετρώματος δεν θα πρέπει να έχει μέγεθος το οποίο να καταλαμβάνει επιφάνεια μεγαλύτερη του 20% του πλάτους της φωτογραφίας.

Όσο μικραίνει η απόσταση από την οποία λαμβάνονται οι προς ανάλυση φωτογραφίες, τόσο αυξάνεται η ικανότητα των λογισμικών συστημάτων για αναγνώριση όλο και πιο λεπτομερών τεμαχίων. Ο αριθμός των τεμαχίων που συμπεριλαμβάνονται εντός των φωτογραφιών στις περιπτώσεις αυτές, είναι πολύ μικρός συγκριτικά με τον συνολικό όγκο του θραυσμένου πετρώματος, γεγονός το οποίο καθιστά επιτακτική την ανάγκη για ανάλυση μεγάλου αριθμού φωτογραφιών. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των φωτογραφιών που λαμβάνονται και αναλύονται προκειμένου να υπολογιστεί μια κατανομή μεγέθους, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των τεμαχίων που συμπεριλαμβάνεται σε αυτές και επομένως τόσο αντιπροσωπευτικότερο είναι το προς ανάλυση δείγμα.

Η λήψη ευρυγώνιων φωτογραφιών θα πρέπει να αποφεύγεται, ενώ ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στο ποια είναι η γωνία με την οποία γίνεται η λήψη, προκειμένου η κλίμακα να παραμένει σταθερή σε όλη την έκταση της φωτογραφίας. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο απαιτείται ο άξονας λήψης να είναι κάθετος στην επιφάνεια που ορίζουν τα τεμάχια του θραυσμένου πετρώματος.

Ο προσδιορισμός της κλίμακας πραγματοποιείται μέσω ενός αντικειμένου γνωστού μεγέθους το οποίο τοποθετείται σε κάποιο άκρο της φωτογραφίας. Ωστόσο τις περισσότερες φορές, λόγω της φυσικής κλίσης του σωρού, η κλίμακα της φωτογραφίας δεν παραμένει σταθερή σε ολόκληρη την έκταση της. Για τον προσδιορισμό της κλίμακας σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ως πρότυπα μεγέθους δύο αντικείμενα γνωστών διαστάσεων, τα οποία τοποθετούνται το ένα στο ανώτερο και το άλλο στο κατώτερο τμήμα της φωτογραφίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.29.



Εικόνα 2.29: Χρήση δύο αντικειμένων γνωστού μεγέθους για τον καθορισμό της κλίμακας φωτογραφίας (ύψος κώνου=30cm).

Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την ανάλυση των φωτογραφιών που έχουν επιλεγεί ως κατάλληλες για ανάλυση και τον υπολογισμό της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος. Το λογισμικό «αναγνωρίζει» τα επιμέρους τεμάχια θραυσμένου πετρώματος και δημιουργεί περιμετρικά από αυτά ένα δίκτυο (net), η ακρίβεια του οποίου εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της φωτογραφίας που υφίσταται την ανάλυση. Η σχεδίαση του δικτύου είναι αποτελεσματικότερη όταν τα τεμάχια πετρώματος έχουν ομοιόμορφη φωτεινότητα σε όλη τους την επιφάνεια και περιμετρικά αυτών υπάρχει μια λεπτή σκιά (Palangio et al., 1996).

Τα περισσότερα λογισμικά παρέχουν τη δυνατότητα χειρωνακτικής επεξεργασίας (manual editing) του δικτύου, προκειμένου να βελτιώνεται η ακρίβεια σχεδίασης του. Για τον σκοπό αυτό διατίθενται μια σειρά από εργαλεία που επιτρέπουν τη χάραξη γραμμών, οι οποίες για τον οποιονδήποτε λόγο δεν δημιουργήθηκαν κατά το στάδιο της αυτόματης σχεδίασης, καθώς και τη διαγραφή εκείνων που εσφαλμένα δημιουργήθηκαν. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα επιλεκτικής εξαίρεσης τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος ή αντικείμενων που βρίσκονται εντός της υπό ανάλυση φωτογραφίας, τα οποία ο χρήστης δεν επιθυμεί να συμπεριλάβει στις μετρήσεις.

Στη συνέχεια, κάνοντας χρήση των αρχών των γεωμετρικών πιθανοτήτων, πραγματοποιούνται μετρήσεις του δισδιάστατου πλέγματος και κατασκευάζεται μια κατανομή για τα τεμάχια πετρώματος που βρίσκονται και στις «τρεις» διαστάσεις της υπό ανάλυση φωτογραφίας (Maerz 1996a). Τα λεπτομερή τεμάχια, είτε επειδή έχουν μέγεθος μικρότερο από εκείνο που δύναται να αναλυθεί βάσει της εγγενούς υπολογιστικής ικανότητας των προγραμμάτων, είτε επειδή τις περισσότερες φορές είναι «κρυμμένα» πίσω από τα μεγαλύτερα, δεν γίνονται ορατά από τα λογισμικά συστήματα και δεν συμπεριλαμβάνονται στις μετρήσεις, μετατοπίζοντας την κοκκομετρική κατανομή σε ποσοστιαίες τιμές μεγέθους οι οποίες είναι μεγαλύτερες των «πραγματικών» (Maerz 1996b).

Συνήθως οι συνθήκες που επικρατούν μέσα σε ένα λατομείο/μεταλλείο, απέχουν πολύ από τις ιδανικές συνθήκες προετοιμασίας του δείγματος και λήψης φωτογραφιών. Ως εκ τούτου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να προκύψουν λανθασμένα αποτελέσματα έπειτα από την ανάλυση μη κατάλληλων φωτογραφιών, γεγονός το οποίο τελικά οδηγεί στην εξαγωγή εσφαλμένων συμπερασμάτων. Για κάθε ένα από τα τρία στάδια που αναφέρθηκαν παραπάνω, απαιτούνται ιδιαίτερα προσεκτικοί χειρισμοί προκειμένου τα επιμέρους σφάλματα να περιοριστούν στο ελάχιστο.

2.5.3 Αιτίες πρόκλησης σφαλμάτων

Υπάρχουν τρεις βασικές αιτίες πρόκλησης σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό της κοκκομετρικής κατανομής του θραυσμένου πετρώματος με τη χρήση λογισμικών. Οι αιτίες αυτές είναι η κακή δειγματοληψία, η περιορισμένη ακρίβεια με την οποία έχει σχεδιαστεί το δίκτυο και η δυσκολία ανίχνευσης των «ψιλών».

Το σημαντικότερο από τα τρία σφάλματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι εκείνο που σχετίζεται με το κατά πόσο αντιπροσωπευτικό του συνόλου του εξορυγμένου όγκου είναι το δείγμα που απεικονίζεται σε μια φωτογραφία. Πιο συγκεκριμένα, σφάλματα παρατηρούνται στις περιπτώσεις εκείνες που οι προς επεξεργασία φωτογραφίες λαμβάνονται από τμήματα του σωρού στα οποία είναι έντονη η παρουσία, είτε μόνο χονδρομερών, είτε μόνο λεπτομερών τεμαχίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά που παρουσιάζει η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος (μεγαλύτερη της μιας τάξης μεγέθους), τόσο πιο έντονα αποτυπώνεται το παραπάνω σφάλμα στο εξαγόμενο αποτέλεσμα.

Σε ότι αφορά την ακρίβεια του δικτύου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σχεδίαση του μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χειρωνακτικά από το χρήστη του λογισμικού, είτε αυτόματα από το ίδιο το λογισμικό. Η χειρωνακτική σχεδίαση είναι αρκετά πιο χρονοβόρα, ωστόσο επιτρέπει την πραγματοποίηση διορθώσεων, γεγονός το οποίο περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τα ποσοστά σφάλματος.

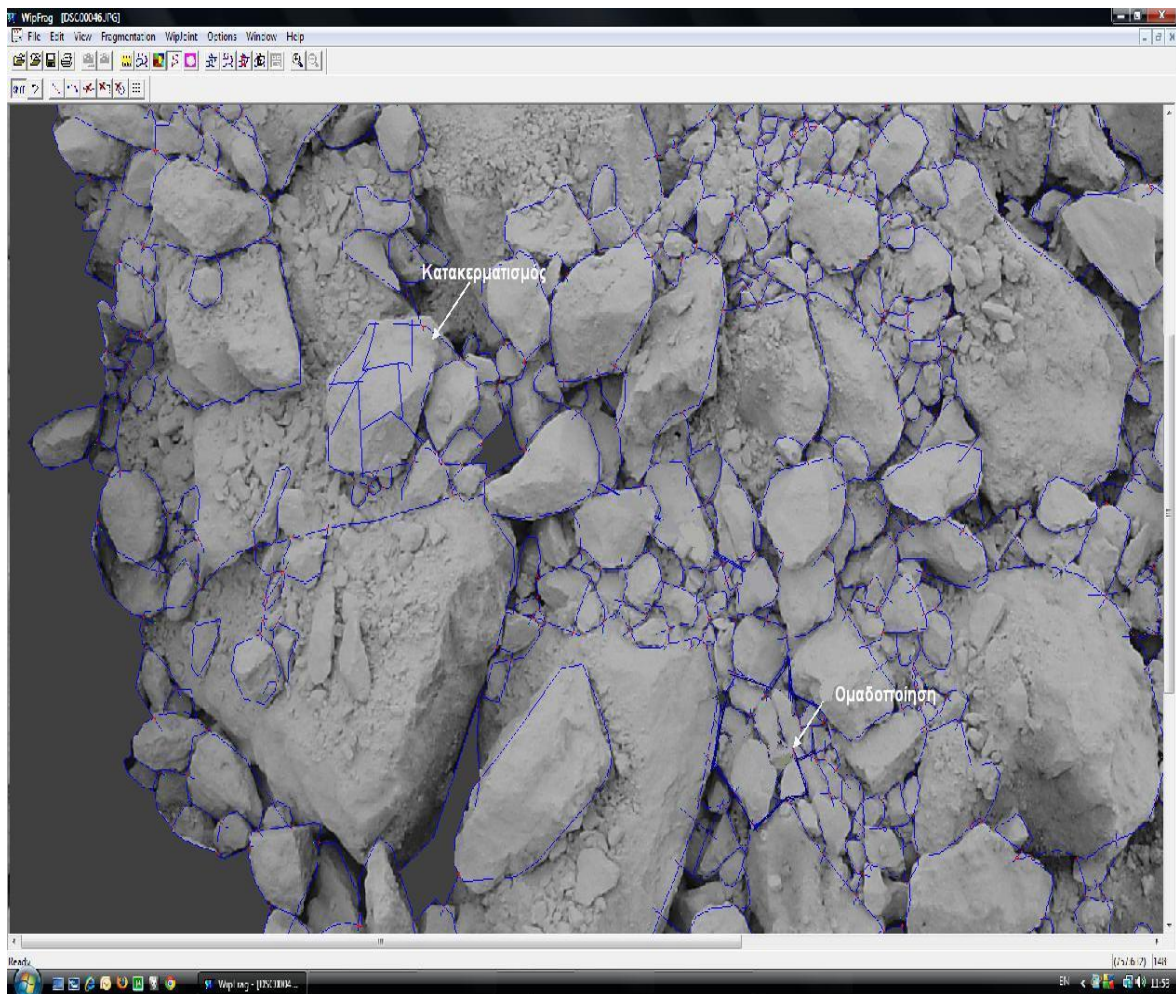
Η περιορισμένη ακρίβεια του δικτύου που αυτόματα δημιουργείται από τα λογισμικά συστήματα οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους:

- Στην επεξεργασία φωτογραφιών των οποίων τα χαρακτηριστικά δεν είναι τα ενδεδειγμένα (π.χ. ελλιπή ή μη ομοιόμορφα κατανεμημένη φωτεινότητα).
- Στο έντονο ανάγλυφο επιφάνειας το οποίο παρουσιάζουν ορισμένα πετρώματα.

Η ελλιπής ακρίβεια του αυτόματα δημιουργούμενου δικτύου εκδηλώνεται με τους ακόλουθους τρόπους (Eden *et al.*, 1996):

- Εσφαλμένη ομαδοποίηση ενός ομίλου τεμαχίων (fusion). Στην περίπτωση αυτή ένας όμιλος τεμαχίων «αναγνωρίζεται» από το πρόγραμμα ως ένα τεμάχιο, με αποτέλεσμα η κατανομή να μετατοπίζεται σε ποσοστιαίες τιμές μεγέθους οι οποίες είναι μεγαλύτερες των «πραγματικών», όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.30.
- Εσφαλμένος κατακερματισμός ενός τεμαχίου (disintegration/breakdown). Στην περίπτωση αυτή το λογισμικό «αναγνωρίζει» περισσότερα τεμάχια από εκείνα που υπάρχουν πραγματικά σε μια φωτογραφία, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση της κατανομής σε ποσοστιαίες τιμές μεγέθους οι οποίες είναι μικρότερες των «πραγματικών», όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.30.

Το σχετικό ποσοστό εμφάνισης των δυο παραπάνω φαινομένων είναι σχεδόν ίδιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλληλοεξουδετερώνονται τα πιθανά σφάλματα που θα προέκυπταν λόγω της παρουσίας τους.



Εικόνα 2.30: Εσφαλμένη σχεδίαση δικτύου.

Η δυσκολία αναγνώρισης των πολύ λεπτομερών τεμαχίων έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της κατανομής προς την κατεύθυνση όπου βρίσκονται τιμές τεμαχίων μεγαλύτερες των «πραγματικών», καθώς και τον περιορισμό του εύρους της κατανομής που υπολογίζεται, συγκριτικά με εκείνο των «πραγματικών» τιμών. Τα περισσότερα λογισμικά παρέχουν στον χρήστη τη δυνατότητα διόρθωσης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων μέσω εμπειρικής βαθμονόμησης, αλλά και μέσω συγχώνευσης (merging) των αποτελεσμάτων που έχουν εξαχθεί έπειτα από επεξεργασία περισσότερων της μιας φωτογραφιών. Η τεχνική της συγχώνευσης μπορεί να εφαρμοστεί, είτε σε αποτελέσματα που έχουν προέλθει από την ανάλυση φωτογραφιών της ίδιας κλίμακας, οι οποίες όμως έχουν ληφθεί από διαφορετικά τμήματα του ίδιου σωρού, είτε σε αποτελέσματα που προήλθαν από φωτογραφίες ενός συγκεκριμένου τμήματος του σωρού, οι οποίες όμως έχουν ληφθεί με διαφορετική κλίμακα (zoom merging). Η μεθοδολογία της συγχώνευσης είναι απαιτητική σε ότι αφορά την οργάνωση και τη διαχείριση των αποτελεσμάτων,

ωστόσο η ιδιαίτερα βελτιωμένη ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων καθιστούν την εφαρμογή της επιτακτική.

2.5.4 Διαφορά μεταξύ της «ακρίβειας» και της «συνέπειας» ενός υπολογισμού.

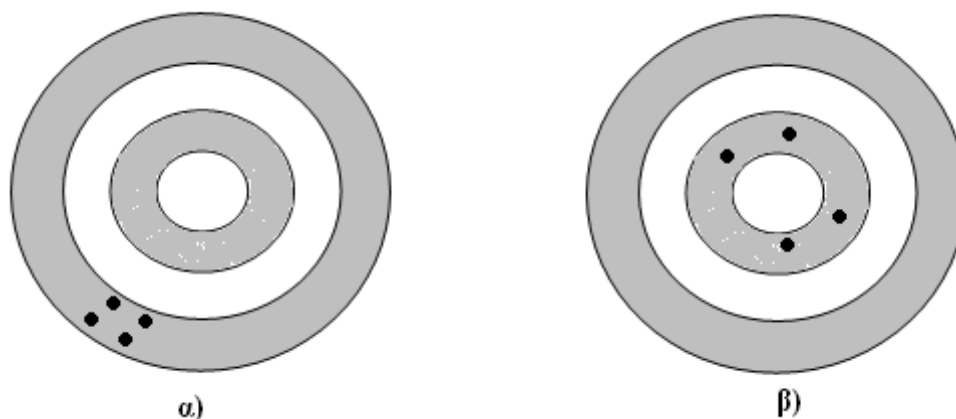
Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους πραγματοποιούνται υπολογισμοί μέσω των λογισμικών ανάλυσης εικόνων είναι αφενός το να διαπιστωθεί εάν η κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος βρίσκεται εντός των επιθυμητών ορίων, αφετέρου το να ελεγχθεί ο τρόπος με τον οποίο μετατοπίζουν την κατανομή οι όποιες αλλαγές πραγματοποιούνται σε ένα σχέδιο ανατίναξης.

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που εξάγονται μέσω των λογισμικών ανάλυσης εικόνων έχει επανειλημμένα τεθεί υπό αμφισβήτηση. Μελέτες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε λατομεία αδρανών υλικών, έδειξαν ότι η «ακρίβεια» των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τα συγκεκριμένα λογισμικά παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις σε σχέση με τα αποτελέσματα κοσκίνισης. Σε ορισμένες ακραίες μάλιστα περιπτώσεις, η διαφοροποίηση που παρατηρήθηκε μεταξύ των μετρούμενων και των «πραγματικών» τιμών για το x_{50} άγγιζε το 35%. Ωστόσο, από τις ίδιες έρευνες προέκυψε ότι η «συνέπεια» των λογισμικών σε ότι αφορά τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα αυξημένη (Maerz 1998).

Ο όρος «ακρίβεια» (accuracy) αναφέρεται στην απόκλιση που παρουσιάζει η μέση μετρούμενη τιμή ενός μεγέθους από την «πραγματική» του τιμή. Μέσω της «ακρίβειας» εκφράζεται η πιθανότητα μια μέτρηση να βρίσκεται εντός ενός συγκεκριμένου διαστήματος εμπιστοσύνης (confidence level), σε σχέση με την «πραγματική» τιμή του μεγέθους. Στις περισσότερες περιπτώσεις το διάστημα εμπιστοσύνης ορίζεται να είναι το 95%. Από την άλλη ο όρος «συνέπεια» (precision) ή αλλιώς «ακρίβεια επανάληψης», αποτελεί δείκτη της επαναληψιμότητας μιας διαδικασίας και εκτιμάται μέσω του συντελεστή μεταβλητότητας (coefficient of variation), ο οποίος υπολογίζεται ως το πηλίκο της διαίρεσης της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή ενός μεγέθους.

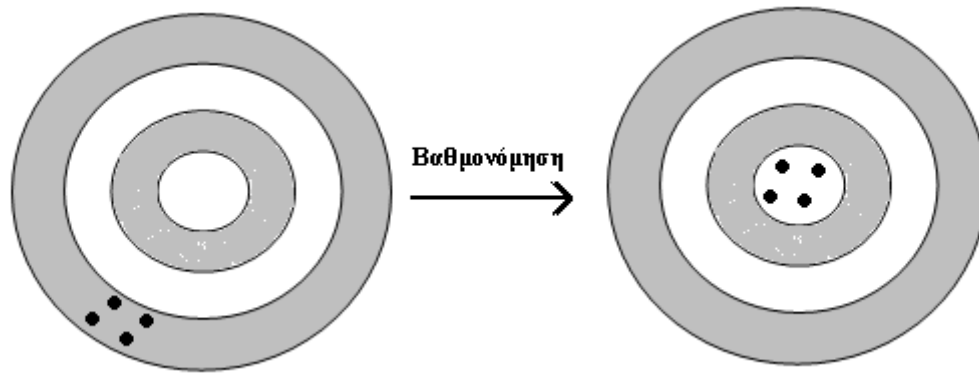
Τα λογισμικά συστήματα ανάλυσης εικόνων δίνουν αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη «συνέπεια» και σχετικά περιορισμένη «ακρίβεια». Η «ακρίβεια» ενός υπολογισμού αποτελεί δείκτη του πόσο κοντά στην «πραγματική» βρίσκεται η τιμή που υπολογίζεται μέσω του λογισμικού, ενώ η «συνέπεια» αποτελεί δείκτη της μεταβλητότητας μιας μέτρησης. Στην Εικόνα 2.31 απεικονίζονται η «συνέπεια» και η

«ακρίβεια» μιας μέτρησης, ως προς την «πραγματική» τιμή της μέτρησης, η οποία βρίσκεται στο κέντρο των «στόχων».



Εικόνα 2.31: α) «Συνέπεια», β) «Ακρίβεια».

Προκειμένου να εκτιμηθεί η «ακρίβεια» των υπολογισμών που πραγματοποιούνται μέσω των λογισμικών προγραμμάτων, θα πρέπει να γίνει σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν έπειτα από κοσκίνιση του ίδιου δείγματος. Στην περίπτωση της κοσκίνισης, το μέγεθος κάθε τεμαχίου υπολογίζεται προσδιορίζοντας το μήκος του ενδιάμεσου άξονα (intermediate axis), ενώ στην περίπτωση των λογισμικών από το μήκος του μεγάλου άξονα (Maerz *et al.* 2001). Είναι επομένως φυσιολογικό μεταξύ των δύο μετρήσεων να παρατηρείται απόκλιση. Επιπλέον, η εγγενής αδυναμία που παρουσιάζουν τα συστήματα στον προσδιορισμό των «ψιλών», τα οποία τις περισσότερες φορές δεν γίνονται «ορατά» και επομένως δεν συμπεριλαμβάνονται στις μετρήσεις, έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της κοκκομετρικής κατανομής σε ποσοστιαίες τιμές μεγέθους οι οποίες είναι μεγαλύτερες των «πραγματικών». Στην περίπτωση που το ζητούμενο είναι η ταύτιση των δύο μετρήσεων, τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω των λογισμικών θα πρέπει να υποστούν διόρθωση μέσω βαθμονόμησης (Maerz *et al.* 1999), όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 2.32.



Εικόνα 2.32: Διόρθωση της ακρίβειας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων μέσω βαθμονόμησης.

Τα λογισμικά ανάλυσης εικόνων αποτελούν την ενδεδειγμένη λύση για εκείνες τις περιπτώσεις όπου το ζητούμενο είναι ο έλεγχος του τρόπου με τον οποίο μετατοπίζεται μια κοκκομετρική κατανομή, εξαιτίας των όποιων αλλαγών γίνονται σε ένα σχέδιο ανατινάξεως, κυρίως λόγω της αυξημένης «συνέπειας» των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Όσο αντιπροσωπευτικότερο του συνολικού όγκου θραυσμένου πετρώματος είναι το δείγμα το οποίο φωτογραφίζεται και αναλύεται και όσο καταλληλότερες από πλευράς χαρακτηριστικών ποιότητας είναι οι φωτογραφίες που λαμβάνονται, τόσο πιο αξιόπιστες είναι οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται. Επιπλέον, η ευκολία με την οποία γίνεται η χρήση των λογισμικών καθώς και η δυνατότητα πραγματοποίησης μεγάλου αριθμού υπολογισμών σε σύντομο χρονικό διάστημα, καθιστούν τα συστήματα αυτά ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τον μηχανικό που σχεδιάζει τις ανατινάξεις.

3 Πεδίο εφαρμογής – Λατομείο της Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε.

3.1 Γενικά

Τα αδρανή υλικά (άμμος, χαλίκι, γαρμπίλι, σκύρα) είναι λατομικά προϊόντα τα οποία λόγω της ορυκτολογικής τους σύστασης, κατά την ανάμιξή τους με συγκολλητικά υλικά (τσιμεντοκονία, ασβεστοκονία, άσφαλτο κ.α.), δεν συμμετέχουν ενεργά στις διαδικασίες πήξης και σκλήρυνσης. Τα αδρανή αποτελούν το σκελετό του σύνθετου υλικού που δημιουργείται, ενώ η συνδετική ύλη γεμίζει ολικά ή μερικά τα κενά και συγκολλά τους κόκκους μεταξύ τους.

Τα πετρώματα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή αδρανών υλικών στον Ελλαδικό χώρο είναι τα ασβεστολιθικά. Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι:

- Ικανοποιούν τις μηχανικές αντοχές των συνήθων κατασκευών.
- Έχουν μικρό κόστος θραύσης.
- Συναντώνται στις περισσότερες περιοχές του Ελλαδικού χώρου.

Το Λατομείο της Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε. που βρίσκεται στη θέση Κεραμιδέζα στη Μάνδρα Αττικής, είναι ένα από τα μεγαλύτερα λατομεία αδρανών υλικών στην Ελλάδα, απέχει 5 km από την πόλη της Μάνδρας και 33km από το κέντρο της Αθήνας. Λειτουργεί σε μια έκταση 1.300.000m², διαθέτοντας δύο πλήρως αυτοματοποιημένες μονάδες παραγωγής αδρανών υλικών με ικανότητα παραγωγής 3.000tn/h και 20 σιλό για τη φόρτωση των τελικών προϊόντων. Στο ανωτέρω λατομείο, το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται χάριν συντομίας «Λατομείο Χάλυψ», πραγματοποιήθηκε το σύνολο των επί τόπου μετρήσεων, δοκιμών και παρατηρήσεων που αφορούν την παρούσα διατριβή.

3.2 Γεωλογία του λατομικού χώρου

Οι στρωματογραφικές διαπλάσεις που απαντώνται στην περιοχή του λατομείου είναι το Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό και το Ανώτερο Τριαδικό.

Το Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό αντιπροσωπεύεται από λευκούς έως λευκότεφρους, κατά τόπους ροδίζοντες ασβεστόλιθους, άστρωτους έως παχυστρωματώδεις, ισχυρώς

διερρηγμένους και κερματισμένους. Οι συγκεκριμένοι ασβεστόλιθοι αναπτύσσονται ομοιόμορφα επί των ιζημάτων του Κατώτερου-Μέσου Τριαδικού. Στην πλειοψηφία τους είναι δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, μεταπίπτοντας συχνά στους κατώτερους ορίζοντες σε τυπικούς δολομίτες. Οι συγκεκριμένοι ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν σακχαρώδη υφή γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι έχουν υποστεί ασθενή μεταμόρφωση. Σε ορισμένες περιοχές η μεταμόρφωση αυτή είναι αρκετά προχωρημένη μετατρέποντας τον ασβεστόλιθο σε μάρμαρο. Η ηλικία τους εντοπίζεται στην περίοδο του Μέσου Τριαδικού και μόνο οι ανώτεροι ορίζοντες είναι πιθανόν να έχουν ανωτριάδική ηλικία. Το μέγιστο πάχος τους ανέρχεται περίπου στα 350 m.

Το Ανώτερο Τριαδικό αντιπροσωπεύεται από βαθύτεφρους και μελανότεφρους ασβεστόλιθους, λεπτοπλακώδεις έως μεσοπλακώδεις, στην πλειοψηφία τους δολομιτικούς, οι οποίοι περικλείουν κονδύλους και ενστρώσεις κερατόλιθου. Το πάχος τους υπερβαίνει τα 250 m., ωστόσο στις περισσότερες περιοχές που εμφανίζονται δεν αποτελούν παρά μόνο μικρά υπολείμματα διασωθέντα από την ισχυρή διάβρωση.

Η τεκτονική της περιοχής χαρακτηρίζεται από την πολλαπλή πτύχωση των στρωμάτων, αποτέλεσμα της οποίας είναι η παρουσία αλληπάλληλων συγκλίνων και αντικλίνων, καθώς και από την κατάτμηση τους από τις διαρρήξεις οι οποίες επακολούθησαν των πτυχώσεων. Οι παχυπλακώδεις έως άστρωτοι μεσοτριάδικοί ασβεστόλιθοι δεν παρουσιάζουν σαφείς πτυχές αλλά εμφανίζονται έντονα διαρρηγμένοι και γενικά ανακρυσταλλωμένοι, έχοντας πολλές φορές σακχαρώδη υφή η οποία οφείλεται στην ασθενή μεταμόρφωση που προήλθε από τις ασκηθείσες τεκτονικές πιέσεις.

Οι πτυχώσεις της περιοχής οφείλουν τη γένεση τους σε τρεις κυρίως φάσεις της Αλπικής ορογένεσης, την Παλαιοκιμμερική, την Πυρηναική και μιας άλλης της οποίας ο προσδιορισμός δεν ήταν δυνατός λόγω έλλειψης στοιχείων. Επακόλουθο των διαρρήξεων και των ηπειρογενετικών κινήσεων υπήρξε η έντονη διάβρωση της περιοχής με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση μεγάλων ποσοτήτων φερτών υλικών στις υψομετρικά χαμηλότερες περιοχές και τη δημιουργία πλειστοκαινικών κροκαλοπαγών και λατυποκροκαλοπαγών μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται ενστρώσεις ερυθρών αμμούχων αργίλων.

Επειδή η περιοχή στην πλειοψηφία της αποτελείται από ασβεστόλιθους και δολομίτες, είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη η καρστική διάβρωση η οποία παρουσιάζει πλήθος και ποικιλία καρστικών μορφών. Επιπλέον το γεγονός ότι η περιοχή παρέμεινε για μακρύ

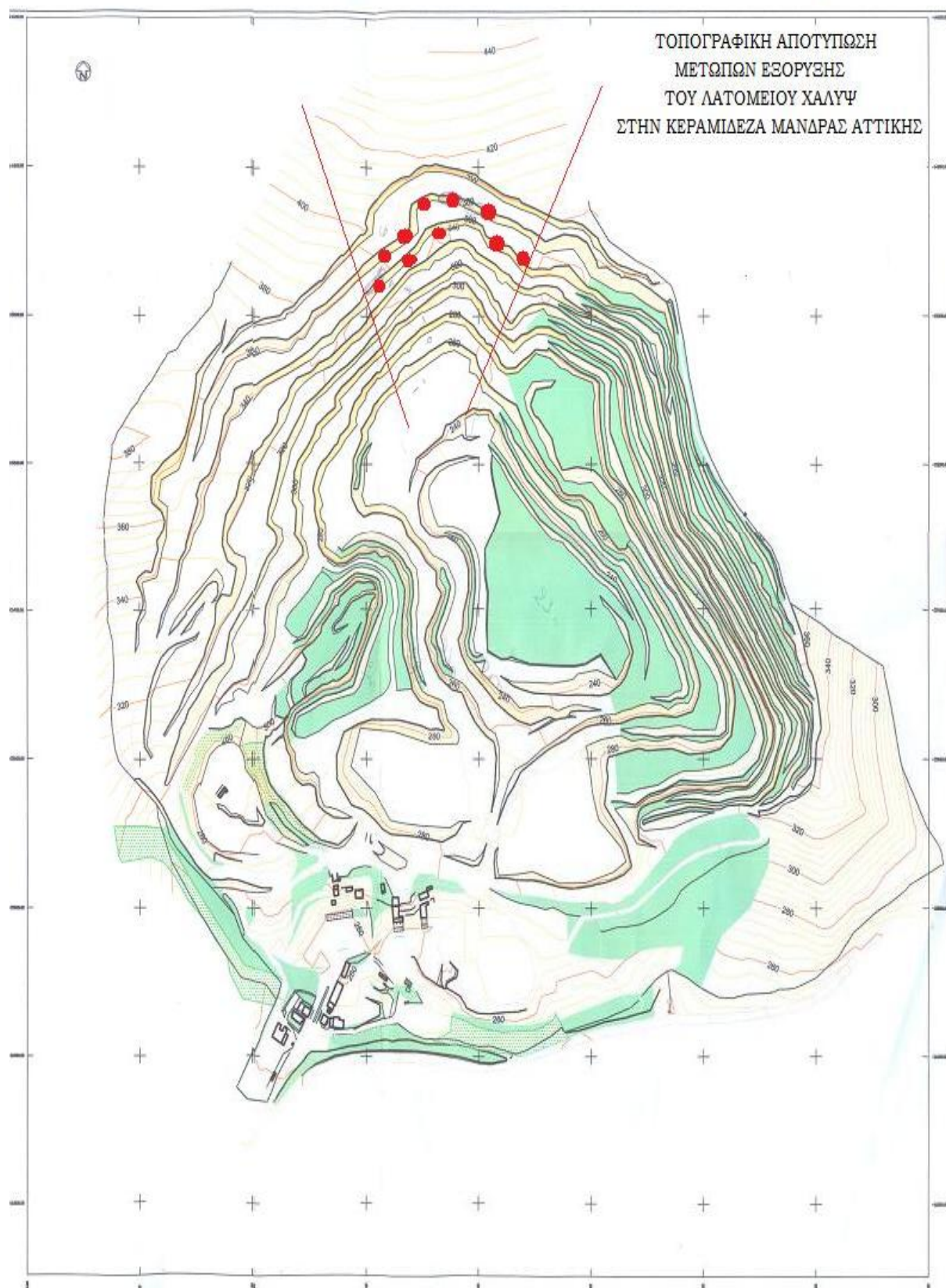
γεωλογικό διάστημα υπό την επίδραση της διάβρωσης, σε συνδυασμό με τις τεκτονικές κινήσεις που συνέβησαν στο διάστημα αυτό οι οποίες ανανέωναν τους διαφόρους κύκλους διάβρωσης, οδήγησαν στη δημιουργία προχωρημένων σταδίων του καρστικού κύκλου.

Αναφορικά με την υδροπερατότητα, οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες του Μέσου-Ανώτερου Τριαδικού παρουσιάζουν ασθενή κρυσταλλικότητα και ισχυρή διάρρηξη με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πλούσιου καρστικού δικτύου, το οποίο σε συνδυασμό με τον έντονο κατακερματισμό προσδίδει στο πέτρωμα αυξημένη περατότητα καθιστώντας το καλό υδροφορέα. Αντίθετα η δράση της καρστικής διάβρωσης στους ασβεστόλιθους και τους δολομίτες του Ανώτερου Τριαδικού είναι σχετικά περιορισμένη με αποτέλεσμα από πλευράς υδροπερατότητας να κατατάσσονται στους ημιπερατούς.

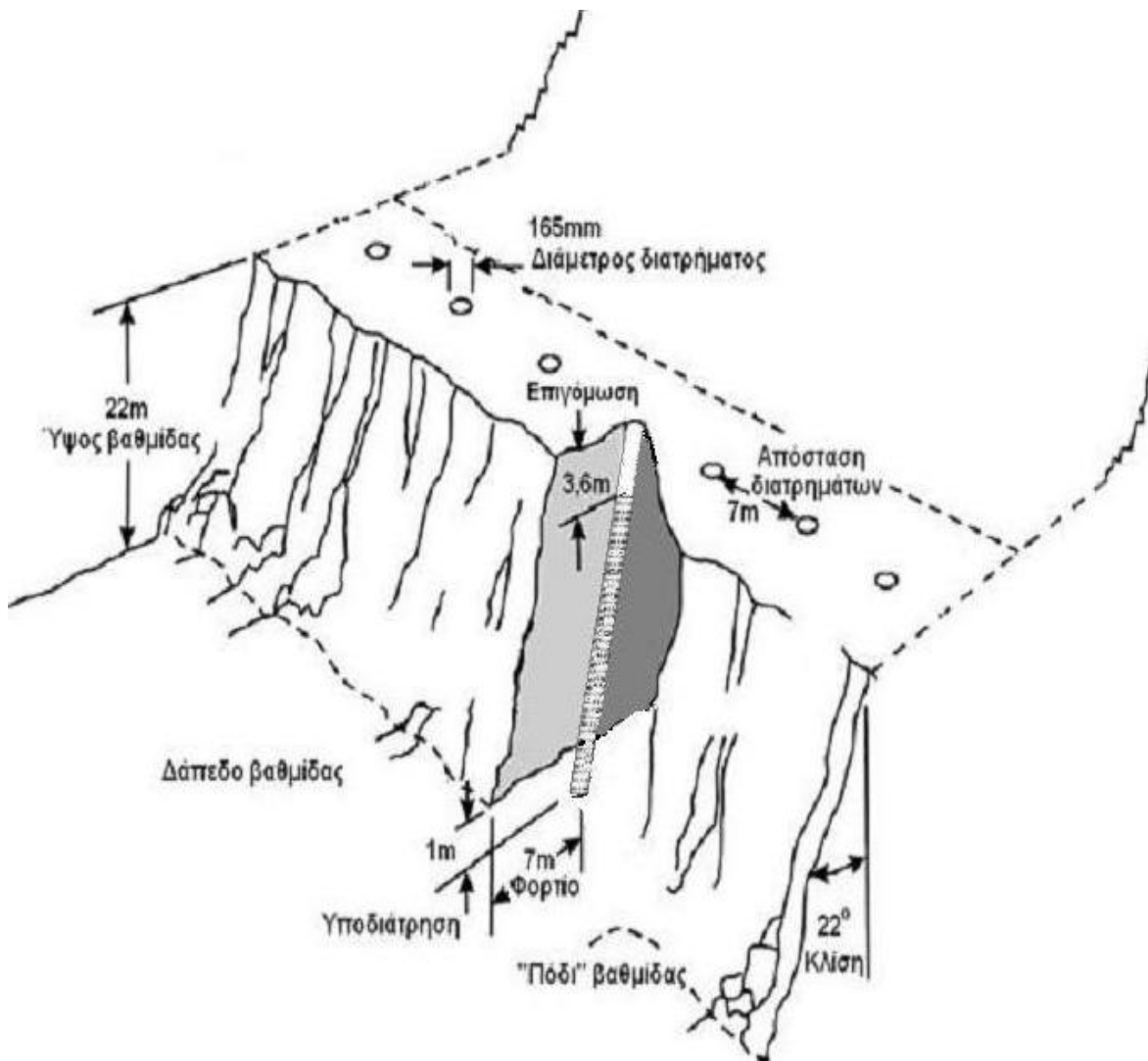
3.3 Χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης

Οι δέκα ανατινάξεις, τα δεδομένα των οποίων καταγράφηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκαν στον βόρειο τομέα του λατομείου, στις θέσεις που σημειώνονται στην Εικόνα 3.1.

Το σχέδιο ανατίναξης όριζε το ύψος των βαθμίδων στα 22m. Κάθε ανατίναξη περιελάμβανε μια μόνο σειρά διατρημάτων διαμέτρου 165mm, με γωνία κλίσης 22°. Η όρυξη των διατρημάτων πραγματοποιήθηκε με διατρητικό μηχάνημα Atlas Copco L8 και τα τρίμματα της διάτρησης χρησιμοποιήθηκαν ως υλικό επιγόμωσης των διατρημάτων. Το μήκος επιγόμωσης ορίστηκε στα 3,6m, το μήκος υποδιάτρησης στο 1m, ενώ οι τιμές για το φορτίο και την απόσταση μεταξύ διαδοχικών διατρημάτων στα 7m, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.1: Τοπογραφική αποτύπωση λατομείου Χάλυψ.

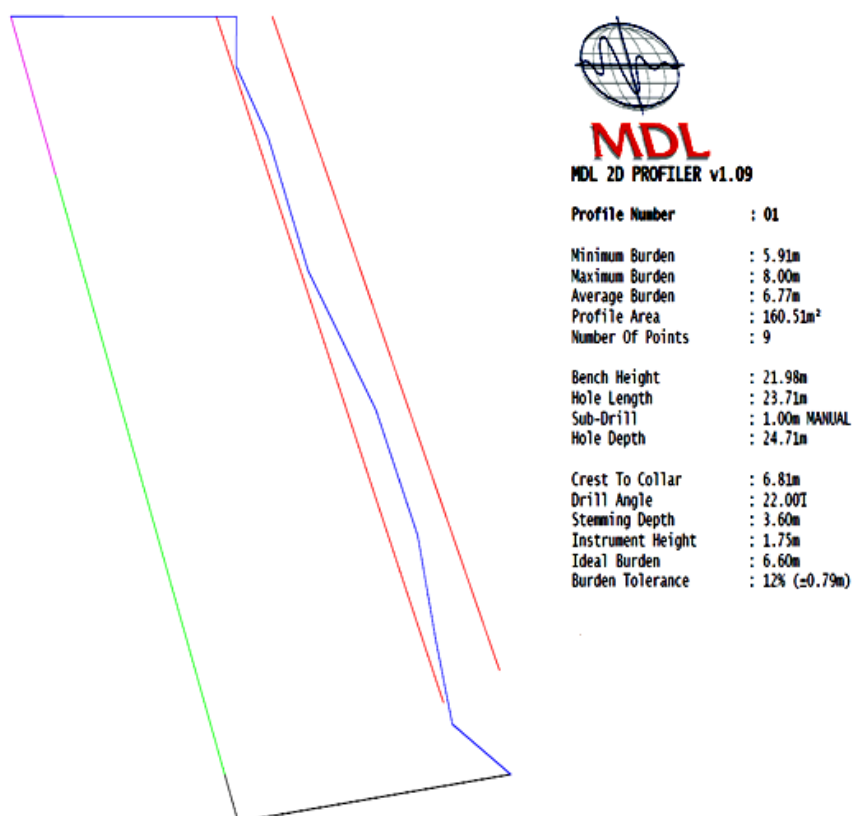


Εικόνα 3.2: Σχέδιο ανατίναξης.

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η συσκευή LaserAce 3D Burden Finder του οίκου MDL UK που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την σάρωση των προφίλ (επιφανειακό αναγλυφο) των δέκα μετώπων. Στην Εικόνα 3.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από την πραγματοποίηση μίας μέτρησης. Για κάθε μια από τις δέκα ανατινάξεις υπολογίστηκε το πραγματικό ύψος βαθμίδας και η πραγματική τιμή του φορτίου μπροστά από κάθε διάτρημα.

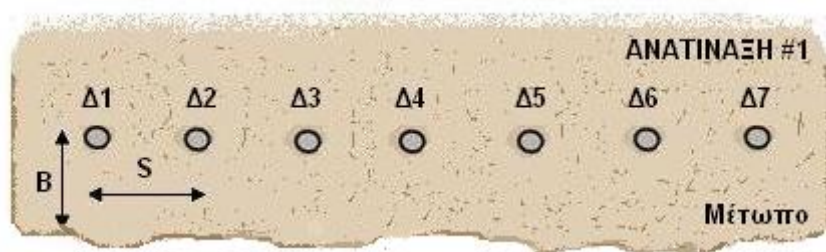


Εικόνα 3.3: Η συσκευή LaserAce 3D Burden Finder του οίκου MDL, που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων του Ε.Μ.Π.



Εικόνα 3.4: Αποτελέσματα σάρωσης του προφίλ του προς εξόρυξη μετώπου με τη χρήση της συσκευής LaserAce 3D Burden Finder.

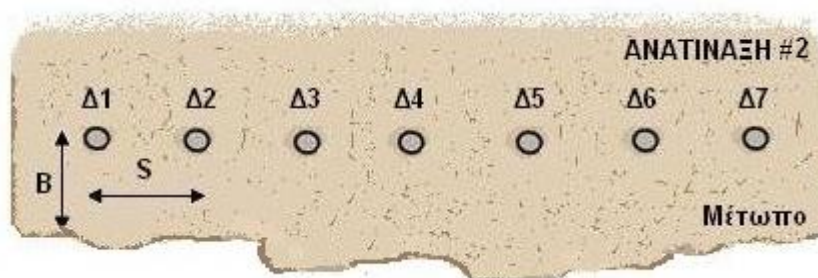
Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3.5- Εικόνα 3.14), παρατίθενται ο αριθμός διατρημάτων που προέβλεπε το σχέδιο ανατίναξης, καθώς και η κάτοψη του κάθε σχεδίου. Επιπλέον, στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 3.1- Πίνακας 3.10), δίδονται για κάθε μια από τις δέκα ανατινάξεις, το ύψος της βαθμίδας (H) στη θέση όρυξης του κάθε διατρήματος, η τιμή του φορτίου (B) που αντιστοιχεί στο κάθε διάτρημα, καθώς και η τιμή της απόστασης (S) μεταξύ των διαδοχικών διατρημάτων της ανατίναξης, που προέκυψαν έπειτα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την συσκευή LaserAce 3D Burden Finder.



Εικόνα 3.5: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #1.

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #1, βάσει μετρήσεων.

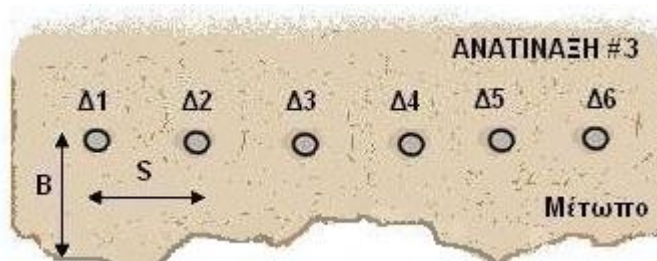
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #1								
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	22,08	22,21	21,14	22,27	22,19	21,92	22,05	21,98
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	6,31	6,49	6,94	6,31	7,11	7,28	6,97	6,77
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Δ6-Δ7	Μέση Τιμή	
	7,06	6,84	6,96	7,10	7,04	7,09	7,02	



Εικόνα 3.6: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #2.

Πίνακας 3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #2, βάσει μετρήσεων.

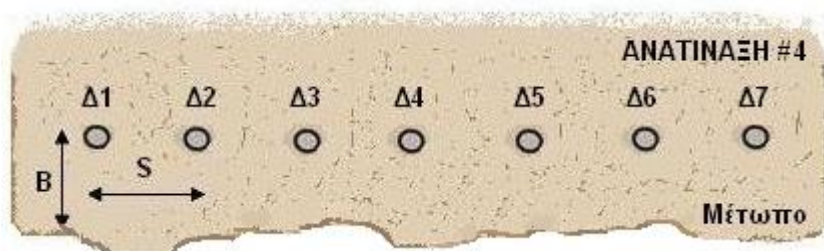
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #2								
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	23,58	23,32	23,76	23,54	23,50	23,51	23,58	23,54
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	6,56	6,57	7,39	7,30	7,50	8,95	7,36	7,38
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Δ6-Δ7		Μέση Τιμή
	7,14	6,89	7,21	7,04	6,81	6,92		7,00



Εικόνα 3.7: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #3.

Πίνακας 3.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #3, βάσει μετρήσεων.

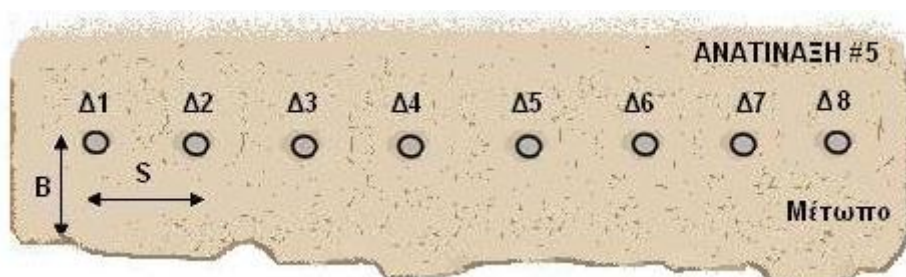
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #3							
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Μέση Τιμή
	24,13	24,21	24,22	24,12	24,23	24,21	24,19
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Μέση Τιμή
	8,13	7,06	6,88	6,34	8,83	7,42	7,44
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6		Μέση Τιμή
	6,98	7,06	6,99	6,89	6,91		6,97



Εικόνα 3.8: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #4.

Πίνακας 3.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #4, βάσει μετρήσεων.

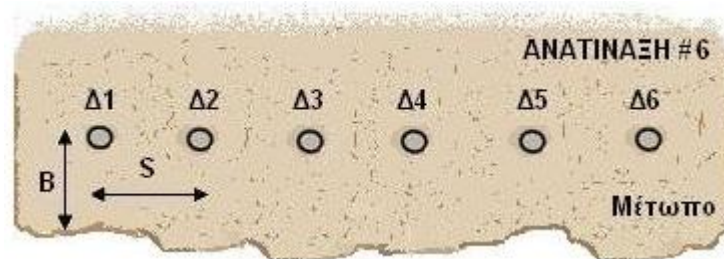
ANATINAΞΗ #4								
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	23,74	23,37	23,93	23,52	23,39	23,52	23,63	23,59
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	7,84	6,47	6,89	7,59	6,62	7,71	7,94	7,29
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Δ6-Δ7	Μέση Τιμή	
	7,11	7,04	7,14	6,86	6,92	7,20	7,05	



Εικόνα 3.9: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #5.

Πίνακας 3.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #5, βάσει μετρήσεων.

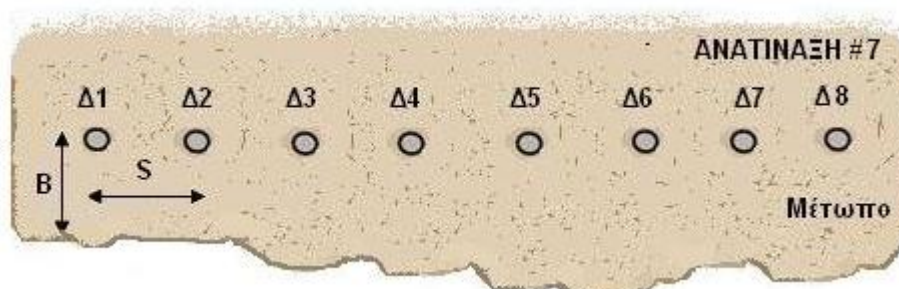
ANATINAΞΗ #5									
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Δ8	Μέση Τιμή
	21,31	20,16	19,91	20,23	19,29	20,12	20,24	20,15	20,18
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Δ8	Μέση Τιμή
	6,76	6,86	6,91	7,83	7,27	7,52	7,83	8,09	7,38
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Δ6-Δ7	Δ7-Δ8	Μέση Τιμή	
	6,87	7,12	7,15	6,98	7,21	7,16	7,15	7,09	



Εικόνα 3.10: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #6.

Πίνακας 3.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #6, βάσει μετρήσεων.

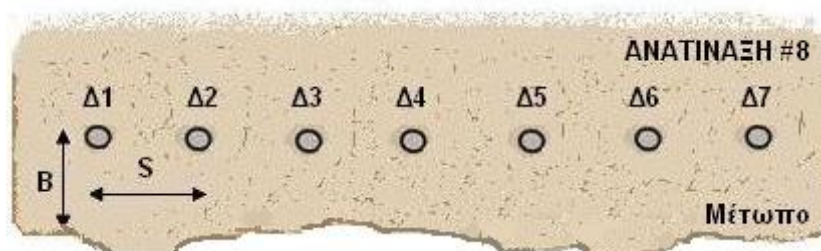
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #6							
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Μέση Τιμή
	23,21	23,25	23,24	23,55	23,98	23,48	23,45
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Μέση Τιμή
	6,87	6,93	7,46	7,25	6,83	8,18	7,25
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Μέση Τιμή	
	7,06	7,02	6,89	6,92	7,06	6,99	



Εικόνα 3.11: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #7.

Πίνακας 3.7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #7, βάσει μετρήσεων.

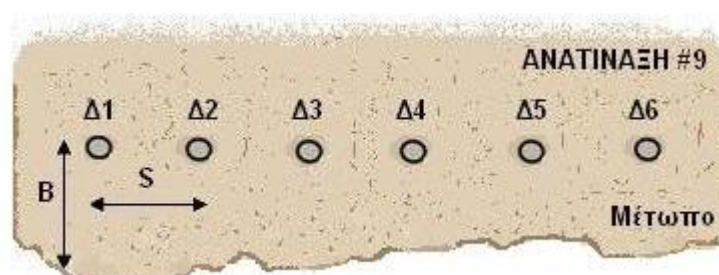
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #7									
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Δ8	Μέση Τιμή
	21,59	21,62	21,26	21,54	22,17	21,51	21,68	21,76	21,64
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Δ8	Μέση Τιμή
	6,1	5,87	6,83	6,85	6,75	7,15	7,12	6,56	6,65
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Δ6-Δ7	Δ7-Δ8	Μέση Τιμή	
	6,72	6,76	6,81	6,72	7,01	6,81	6,86	6,81	



Εικόνα 3.12: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #8.

Πίνακας 3.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #8, βάσει μετρήσεων.

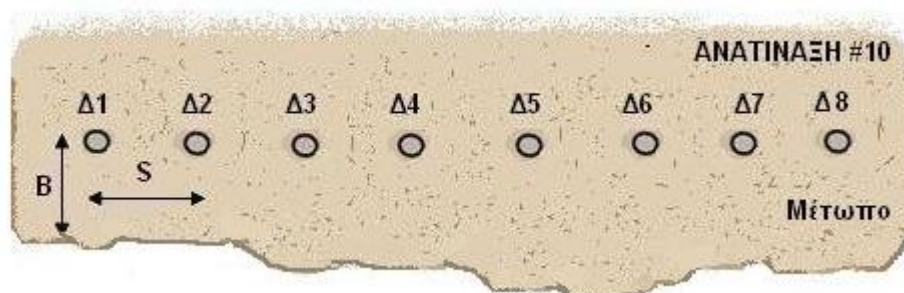
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #8								
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	21,02	21,07	21,14	21,05	21,49	21,09	21,20	21,15
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Μέση Τιμή
	6,21	6,71	6,04	6,13	7,01	7,20	6,42	6,53
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Δ6-Δ7	Μέση Τιμή	
	7,08	7,01	6,86	6,91	7,12	7,03	7,00	



Εικόνα 3.13: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #9.

Πίνακας 3.9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #9, βάσει μετρήσεων.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #9							
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Μέση Τιμή
	22,97	23,98	23,89	22,57	23,88	23,48	23,46
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Μέση Τιμή
	8,21	7,13	7,86	6,38	6,31	6,34	7,04
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Μέση Τιμή	
	6,69	6,46	6,49	6,58	6,41	6,53	



Εικόνα 3.14: Κάτοψη του σχεδίου της ανατίναξης #10.

Πίνακας 3.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης #10, βάσει μετρήσεων.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ #10									
H (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Δ8	Μέση Τιμή
	23,11	23,21	23,15	23,06	23,04	23,18	23,01	23,15	23,11
B (m)	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5	Δ6	Δ7	Δ8	Μέση Τιμή
	6,51	6,57	7,29	7,22	7,45	8,89	7,21	7,36	7,31
S (m)	Δ1-Δ2	Δ2-Δ3	Δ3-Δ4	Δ4-Δ5	Δ5-Δ6	Δ6-Δ7	Δ7-Δ8		Μέση Τιμή
	7,19	7,27	6,89	6,96	7,15	7,19	7,17		7,12

Οι μέσες τιμές που προέκυψαν βάσει των παραπάνω μετρήσεων για το ύψος της βαθμίδας (H_{av}), το φορτίο (B_{av}) και την απόσταση των διατρημάτων (S_{av}) της κάθε ανατίναξης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11 που ακολουθεί. Επιπλέον, στον ίδιο πίνακα παρατίθεται για κάθε μια εξ αυτών, το μήκος του διατρήματος (L_{tot}) καθώς και το μήκος της γόμωσης (L_c), τα οποία υπολογίστηκαν βάσει της τιμής του μέσου ύψους κάθε βαθμίδας.

Μεταξύ των τιμών που μετρήθηκαν και εκείνων που ορίζονται από το σχέδιο ανατίναξης, παρατηρείται απόκλιση τόσο στο φορτίο και την απόσταση μεταξύ των διατρημάτων, όσο και στο ύψος της βαθμίδας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.12. Για την τιμή του φορτίου, οι αποκλίσεις κυμαίνονται από -6,71% έως +6,29% και πιθανά οφείλονται, είτε σε κακούς χειρισμούς του χειριστή του διατρητικού μηχανήματος, είτε στη δημιουργία μη ευθύγραμμου «φρυδιού» πρανούς από την τελευταία σειρά διατρημάτων της ανατίναξης που προηγήθηκε. Σε ότι αφορά την απόσταση μεταξύ των διατρημάτων, οι αποκλίσεις κυμαίνονται από -6,71% έως +1,71%, ενώ οι αποκλίσεις στην τιμή του ύψους βαθμίδας από -8,27% έως +9,95%.

Πίνακας 3.11: Μέση τιμή του ύψους βαθμίδας (H_{av}), του φορτίου (B_{av}), της απόστασης διατρημάτων (S_{av}), του μήκους διατρήματος (L_{tot}) και του μήκους γόμωσης (L_c), της κάθε ανατίναξης.

	ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
H_{av} (m)	21,98	23,54	24,19	23,59	20,18	23,45	21,64	21,15	23,46	23,11
B_{av} (m)	6,77	7,38	7,44	7,29	7,38	7,25	6,65	6,53	7,04	7,31
S_{av} (m)	7,02	7,00	6,97	7,05	7,09	6,99	6,81	7,00	6,53	7,12
L_{tot} (m)	24,71	26,39	27,09	26,44	22,76	26,29	24,34	23,24	25,97	25,92
L_c (m)	21,11	22,79	23,49	22,84	19,16	22,69	20,74	19,64	22,37	22,32

Πίνακας 3.12: Απόκλιση % μεταξύ των τιμών που προέβλεπε το σχέδιο ανατίναξης και των μετρούμενων τιμών, για το φορτίο (B) και την απόσταση διατρημάτων (S) και το ύψος βαθμίδας (H).

	ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
H (%)	-0,09	7,00	9,95	7,23	-8,27	6,59	-1,64	-3,86	6,64	5,05
B (%)	-3,29	5,43	6,29	4,14	5,43	3,57	-5,00	-6,71	0,57	4,43
S (%)	0,29	0,00	-0,43	0,71	1,29	-0,14	-2,71	0,00	-6,71	1,71

Για τη γόμωση των διατρημάτων χρησιμοποιήθηκε ως κύρια εκρηκτική ύλη ο πετραμμωνίτης (ANFO, **A**mmonium **N**itrate **F**uel **O**il). Το ANFO αποτελεί μίγμα νιτρικού αμμωνίου (AN) και πετρελαίου εσωτερικής καύσης (FO), σε αναλογία κατά βάρος 94% και 6% αντίστοιχα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ANFO, σύμφωνα με τα στοιχεία που παρέχει ο προμηθευτής (EXTRACO A.E.), παρατίθενται στον Πίνακα 3.13 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.13: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ANFO (EXTRACO A.E.).

Πυκνότητα	0,8 g/cm ³
Σχετική κατά βάρος ισχύς	75%
Ταχύτητα έκρηξης	3000 m/s
Ενέργεια έκρηξης	920 kcal/kg
Όγκος εκρηκτικών αερίων	970 lt/kg
Θερμοκρασία έκρηξης	2600 °C

Στον Πίνακα 3.14, δίδεται η ποσότητα του ANFO ανά διάτρημα (Q σε kg), για τα διατρήματα (Δ) της κάθε ανατίναξης, ενώ στον Πίνακα 3.15 παρατίθεται η τιμή της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης (ρ_L σε kg/m) για κάθε ένα από αυτά.

Πίνακας 3.14: Ποσότητα ANFO (Q σε kg) ανά διάτρημα (Δ), για κάθε ανατίναξη.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
$\Delta 1$	395	430	380	380	350	390	390	300	340	420
$\Delta 2$	380	410	380	380	325	390	375	310	360	380
$\Delta 3$	340	430	400	400	310	410	350	300	370	390
$\Delta 4$	370	430	400	360	325	390	360	300	325	390
$\Delta 5$	370	430	380	360	300	425	390	310	350	415
$\Delta 6$	390	410	375	370	330	390	375	320	360	400
$\Delta 7$	390	430	---	370	325	---	370	310	---	400
$\Delta 8$	---	---	---	---	330	---	390	---	---	400

Πίνακας 3.15: Γραμμική πυκνότητα γόμωσης (ρ_L σε kg/m) ανά διάτρημα (Δ), για κάθε ανατίναξη.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
$\Delta 1$	18,62	18,83	16,22	16,52	17,17	17,39	18,85	14,95	15,33	18,81
$\Delta 2$	17,80	18,18	16,16	16,81	16,98	17,35	18,10	15,40	15,48	16,94
$\Delta 3$	16,83	18,67	17,01	17,23	16,43	18,25	17,22	14,85	15,97	17,44
$\Delta 4$	17,27	18,87	17,08	15,81	16,91	17,11	17,45	14,92	14,95	17,51
$\Delta 5$	17,34	18,90	16,15	15,91	16,48	18,27	18,30	15,06	15,12	18,65
$\Delta 6$	18,53	18,02	15,95	16,25	17,28	17,16	18,20	15,88	15,84	17,86
$\Delta 7$	18,41	18,83	---	16,17	16,90	---	17,80	15,30	---	18,00
$\Delta 8$	---	---	---	---	17,25	---	18,69	---	---	17,88

Στον Πίνακα 3.16 παρουσιάζονται για την κάθε ανατίναξη, η μέση τιμή της ποσότητας ANFO ανά διάτρημα (Q_{av}), καθώς επίσης και η μέση τιμή της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης ($\rho_{L,av}$).

Πίνακας 3.16: Μέση ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα (Q_{av}) και μέση γραμμική πυκνότητα γόμωσης (ρ_{Lav}), για κάθε ανατίναξη.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Q_{av} (kg)	375	425	385	375	325	400	375	305	350	400
ρ_{Lav} (kg/m)	17,83	18,62	16,43	16,39	16,92	17,59	18,08	15,20	15,45	17,89

Για το ANFO του οποίου η πυκνότητα είναι $0,8\text{g/cm}^3$, η θεωρητική τιμή της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης για τα διατρήματα των 165mm είναι ίση με 17,09kg/m. Ωστόσο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.17, μεταξύ της θεωρητικής και των μετρούμενων τιμών υπάρχει απόκλιση η οποία κυμαίνεται από -11,08% έως +8,93%.

Πίνακας 3.17: Απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής και της μετρούμενης τιμής της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης για κάθε ανατίναξη.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
ρ_L (%)	4,33	8,93	-3,87	-4,12	-0,97	2,91	5,77	-11,08	-9,61	4,66

Η ύπαρξη τιμών που είναι μεγαλύτερες από τη θεωρητική, πιθανά οφείλεται στη παρουσία ανοικτών ασυνεχειών ή κενών, περιμετρικά του διατρήματος. Ως εκ τούτου, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα Ε.Υ. από εκείνη που αρχικά είχε υπολογιστεί προκειμένου να πληρωθεί το διάτρημα. Από την άλλη, η ύπαρξη τιμών μικρότερων της θεωρητικής αποδίδεται σε πιθανή πτώση τεμαχίων πετρώματος εντός του διατρήματος, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ωφέλιμου όγκου του διατρήματος.

Η τιμή της ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικής ύλης ανά ανατίναξη (q σε kg/m^3), η οποία υπολογίστηκε βάσει της μέσης ποσότητας εκρηκτική ύλης ανά διάτρημα (Q_{av}), του μέσου ύψους βαθμίδας (H_{av}), της μέσης απόστασης διατρημάτων (S_{av}) και του μέσου φορτίου (B_{av}), που αντιστοιχεί σε κάθε ανατίναξη, δίδεται στον Πίνακα 3.18 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.18: Η τιμή της ειδικής κατανάλωση Ε.Υ. (q) για κάθε ανατίναξη.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
q (kg/m³)	0,359	0,349	0,307	0,309	0,308	0,337	0,383	0,310	0,325	0,333

Για την έναυση του ANFO χρησιμοποιείται ένα φυσίγγιο ζελατινοδυναμίτιδας, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 3.15. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ζελατινοδυναμίτιδας, σύμφωνα με τα στοιχεία που παρέχει ο προμηθευτής (EXTRACO Α.Ε.), παρατίθενται στον Πίνακα 3.19 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.15: Εναυσματική γόμωση.

Πίνακας 3.19: Τεχνικά χαρακτηριστικά ζελατινοδυναμίτιδας (EXTRACO Α.Ε.).

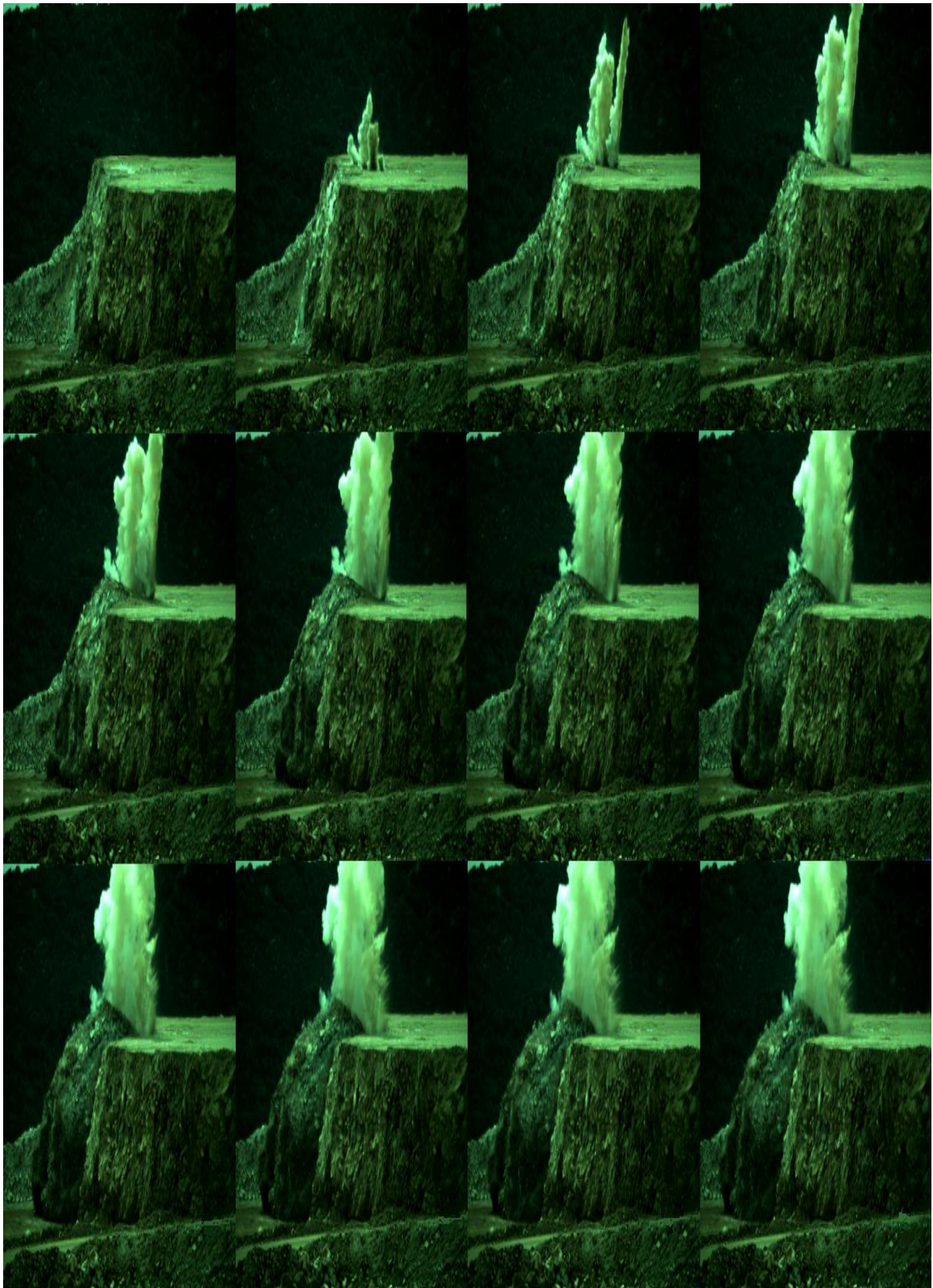
Διάμετρος φυσιγγίου	65 mm
Βάρος	2500 g
Πυκνότητα	1,5 g/cm ³
Σχετική κατά βάρος ισχύς	86%
Ταχύτητα έκρηξης	6000 m/s
Ενέργεια έκρηξης	4100 kJ/kg
Όγκος εκρηκτικών αερίων	858 lt/kg
Θερμοκρασία έκρηξης	3000 °C

Η έναυση της ζελατινοδυναμίτιδας πραγματοποιείται με τη χρήση του συστήματος NONEL (**NON EL**ektrik). Το NONEL είναι ένα σύστημα μη ηλεκτρικής πυροδότησης, με αγωγούς (σωληνίσκους) που μεταφέρουν χαμηλής ισχύος εκρηκτικό κύμα στο καψύλλιο που είναι ενσωματωμένο στο άκρο του σωληνίσκου.

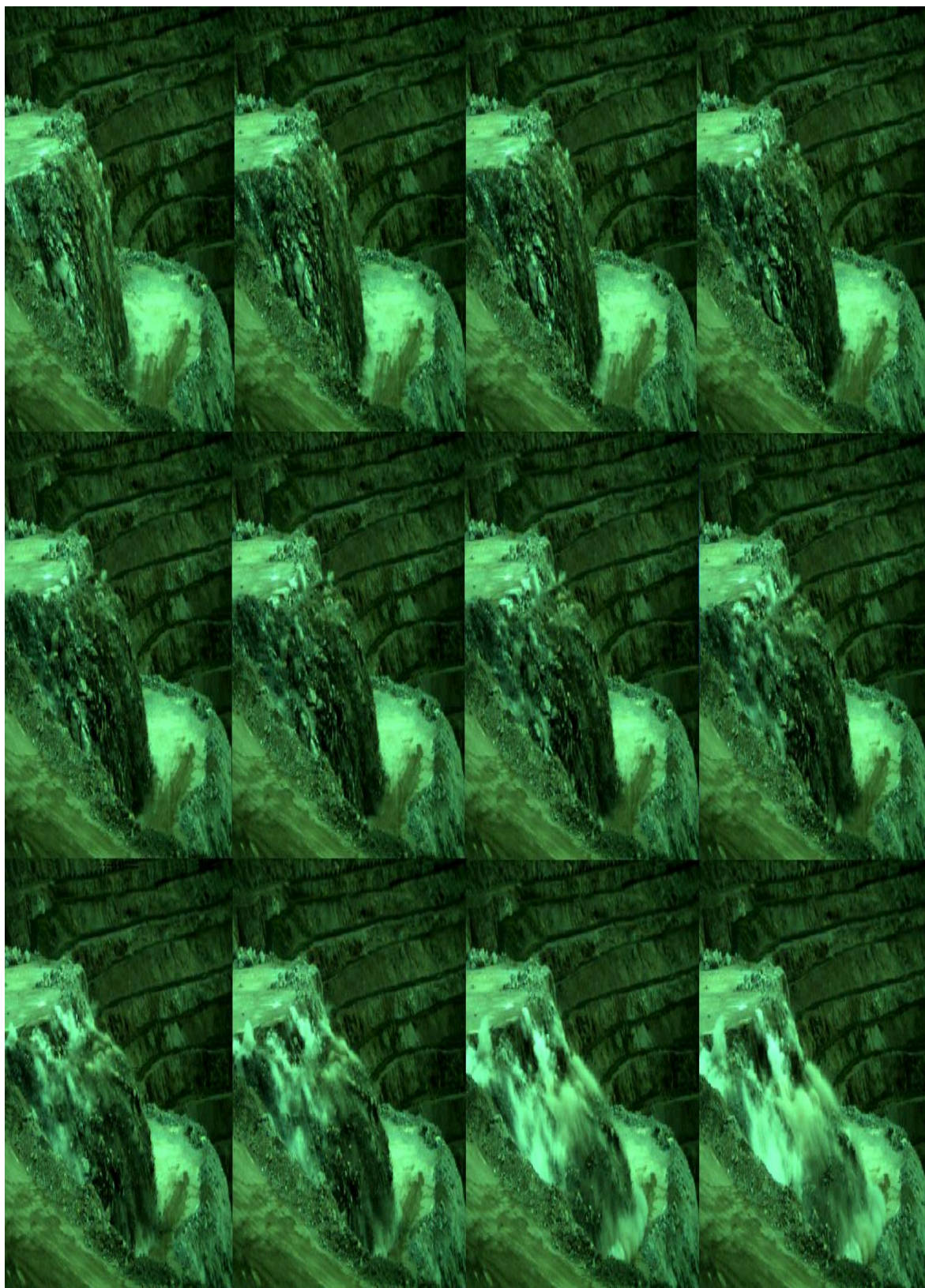
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του συστήματος NONEL, είναι ότι εξασφαλίζει την αποτελεσματική πυροδότηση της γόμωσης στήλης από τον πυθμένα του διατρήματος. Επιπλέον, προσφέρει στον μηχανικό ανατινάξεων μεγάλη ευελιξία σε ότι αφορά τους χρόνους επιβράδυνσης, συμβάλλοντας σημαντικά στην αποτελεσματικότερη θραύση του πετρώματος.

Το σημαντικότερο ωστόσο πλεονέκτημα του συστήματος NONEL σχετίζεται με την εξασφάλιση της «ακεραιότητας» της επιγόμενης, ακόμα και εάν αυτή αποτελείται από μη κατάλληλα υλικά, όπως είναι τα τρίμματα της διάτρησης. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από τη σύγκριση των στιγμιότυπων των δυο ανατινάξεων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.16 και στην Εικόνα 3.17. Και στις δυο ανατινάξεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια εκρηκτική ύλη (ANFO/ζελατινοδυναμίτιδα), ωστόσο στην ανατίναξη της Εικόνας 3.16 το μέσο έναυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν εκρηκτική θρυαλλίδα, ενώ στην ανατίναξη της Εικόνας 3.17 ως μέσο έναυσης χρησιμοποιήθηκε ένα καψύλλιο NONEL.

Οι δύο ανατινάξεις βιντεοσκοπήθηκαν με τη βοήθεια της συσκευής Blaster's Ranger High Speed Camera του οίκου MREL Canada που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της οποίας παρατίθενται αναλυτικά στην Παράγραφο 3.5.2.



Εικόνα 3.16: Έναυση γόμωσης ANFO/ζελατινοδυναμίτιδας με τη χρήση εκρηκτικής θρυαλλίδας.



Εικόνα 3.17: Έναυση γόμωσης ANFO/ζελατινοδυναμίτιδας με τη χρήση του συστήματος NONEL.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.18 που ακολουθεί, ένα σύστημα NONEL αποτελείται από τους πυροκροτητές (καψύλλια) διατρήματος, τους επιφανειακούς συνδέσμους και τη μηχανή πυροδότησης. Αντί της μηχανής πυροδότησης NONEL, για την πυροδότηση ενός κυκλώματος NONEL μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοινός ή ηλεκτρικός πυροκροτητής.



Εικόνα 3.18:Σύστημα NONEL.

Οι πυροκροτητές που τοποθετούνται σε όλα τα διατρήματα μιας ανατίναξης έχουν συνήθως τον ίδιο χρόνο επιβράδυνσης, προκειμένου η ακολουθία της πυροδότησης να καθορίζεται από τους χρόνους επιβράδυνσης που χρησιμοποιούνται στους συνδέσμους επιφάνειας. Ο χρόνος επιβράδυνσης του πυροκροτητή διατρήματος είναι πολύ μεγαλύτερος από εκείνον του συνδέσμου επιφάνειας, γεγονός το οποίο διασφαλίζει ότι το εκρηκτικό κύμα θα ενεργοποιήσει όλους τους πυροκροτητές, προτού ξεκινήσει η θραύση και η μετατόπιση του πετρώματος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται ο κίνδυνος διακοπής της μετάδοσης της πυροδότησης από ενδεχόμενη καταστροφή των αγωγών NONEL.

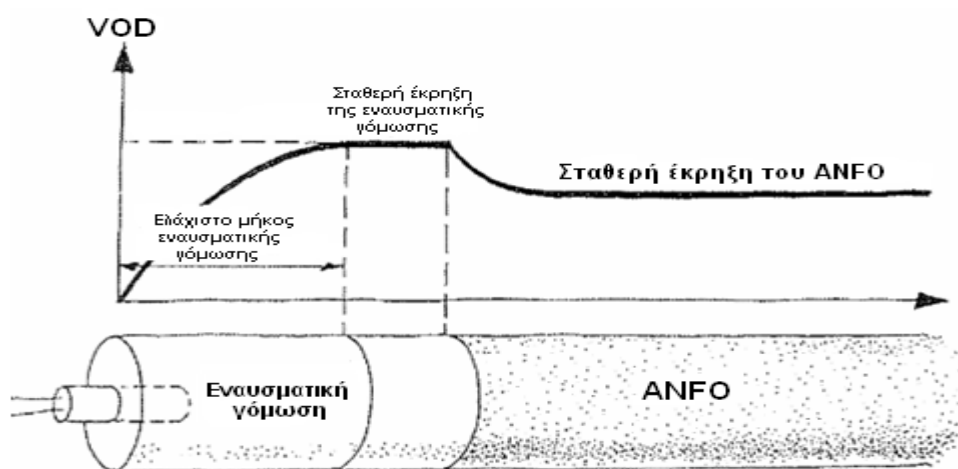
Οι πυροκροτητές που χρησιμοποιούνται στο λατομείο Χάλυψ είναι οι U500 (UNIDET 500ms), με μήκος αγωγού 27m και οι σύνδεσμοι επιφάνειας είναι οι SL42

(SNAPLINE 42ms), με μήκος αγωγού 7,8m. Η πυροδότηση του συστήματος NONEL πραγματοποιείται με τη χρήση ηλεκτρικού πυροκροτητή.

3.4 Μέτρηση της ταχύτητας έκρηξης του ANFO εντός διατρήματος

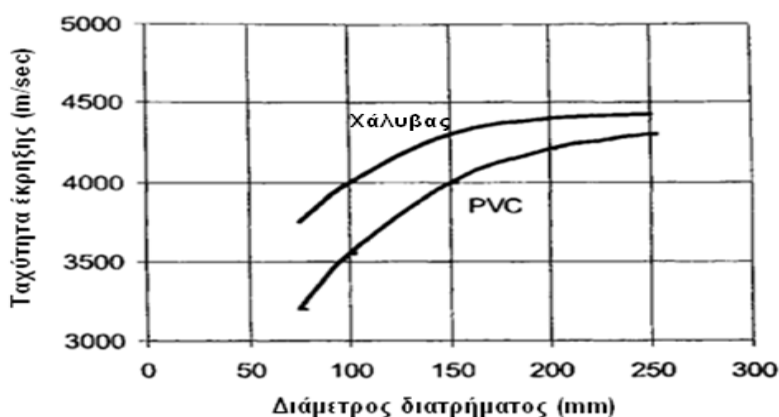
Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους των εκρηκτικών υλών είναι η ταχύτητα με την οποία αυτές εκρήγνυνται (Velocity Of Detonation, VOD). Η ταχύτητα έκρηξης αποτελεί δείκτη της επίδοσης της εκρηκτικής ύλης καθώς σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό της κρουστικής ενέργειας που παράγεται κατά την έκρηξη της. Κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έκρηξης, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό ενέργειας που διατίθεται για τη θραύση του πετρώματος και επομένως τόσο καταλληλότερη είναι η εκρηκτική ύλη για την εξόρυξη σκληρών, συμπαγών πετρωμάτων, που δεν διαθέτουν ανεπτυγμένο σύστημα ασυνεχειών.

Για την αποτελεσματική έναυση του ANFO απαιτείται ισχυρό κρουστικό κύμα το οποίο προέρχεται από την έκρηξη της εναυσματικής γόμωσης που τοποθετείται στον πυθμένα του διατρήματος. Η εναυσματική γόμωση είναι συνήθως μια ισχυρή εκρηκτική ύλη, με υψηλή ταχύτητα έκρηξης ($>5500\text{m/s}$), ικανή να παράγει υψηλά επίπεδα πίεσης ($>80\text{kbar}$), προκειμένου το ANFO να αποκτήσει σταθερή ταχύτητα έκρηξης όσο το δυνατό πιο άμεσα, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 3.19. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα το να αποφεύγεται η υποτονική διέγερση του ANFO στο κρίσιμο τμήμα του «ποδιού» της βαθμίδας.



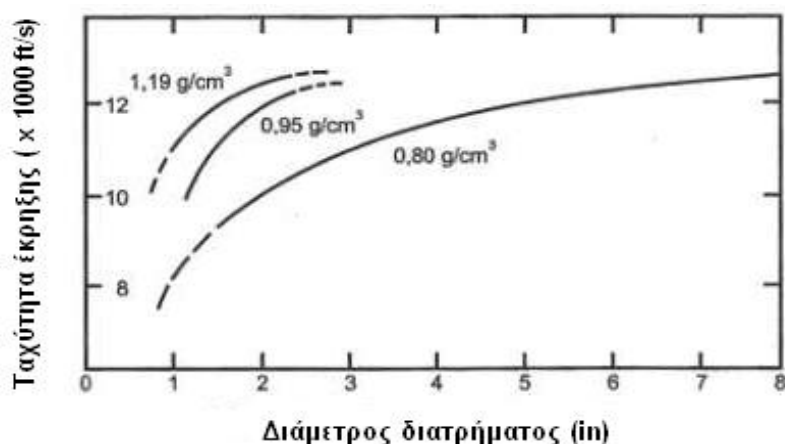
Εικόνα 3.19: Διέγερση του ANFO με τη χρήση ισχυρής εναυσματικής γόμωσης (Olofsson 1990).

Δυο ακόμα παράγοντες που σχετίζονται άμεσα με την ταχύτητα έκρηξης του ANFO, είναι η διάμετρος του διατρήματος και ο βαθμός εγκλεισμού της γόμωσης σε αυτό. Εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν πυροδοτώντας ANFO εντός σωλήνων, οι οποίοι ήταν κατασκευασμένοι από χάλυβα και από PVC, έδειξαν ότι η ταχύτητα του ANFO στην περίπτωση της πυροδότησης εντός του χαλύβδινου σωλήνα, ήταν περίπου 500-300 m/s μεγαλύτερη σε σχέση με την ταχύτητα εντός του κατασκευασμένου από PVC σωλήνα, μεταβαλλόμενη συναρτήσει της διαμέτρου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20.



Εικόνα 3.20: Μεταβολή της ταχύτητας του ANFO ανάλογα με τον βαθμό εγκλεισμού και τη διάμετρο (Kent 2007).

Η ταχύτητα έκρηξης του ANFO επηρεάζεται σημαντικά και από την τιμή της πυκνότητας του. Οι συνηθισμένες τιμές πυκνότητας για το ANFO ($0,75-0,85\text{g/cm}^3$), είναι χαμηλότερες από την τιμή της κρυσταλλικής πυκνότητας του νιτρικού αμμωνίου ($1,65\text{g/cm}^3$), λόγω της παρουσίας σημαντικού ποσοστού κενών στο εσωτερικό αλλά και μεταξύ των κόκκων του σφαιρόμορφου νιτρικού αμμωνίου. Η ταχύτητα έκρηξης των μιγμάτων οξειδωτικού-καυσίμου, καθορίζεται από το πόσο «στενή» είναι η επαφή μεταξύ των συστατικών τους. Η χρήση νιτρικού αμμωνίου υπό μορφή κόκκων μικρής διαμέτρου με υψηλό πορώδες, αφενός αυξάνει την πυκνότητα του ANFO, αφετέρου συντελεί στην ευκολότερη απορρόφηση και τον εμποτισμό του πετρελαίου στο εσωτερικό των κόκκων, οδηγώντας τελικά στην αύξηση της ταχύτητας έκρηξης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.21.



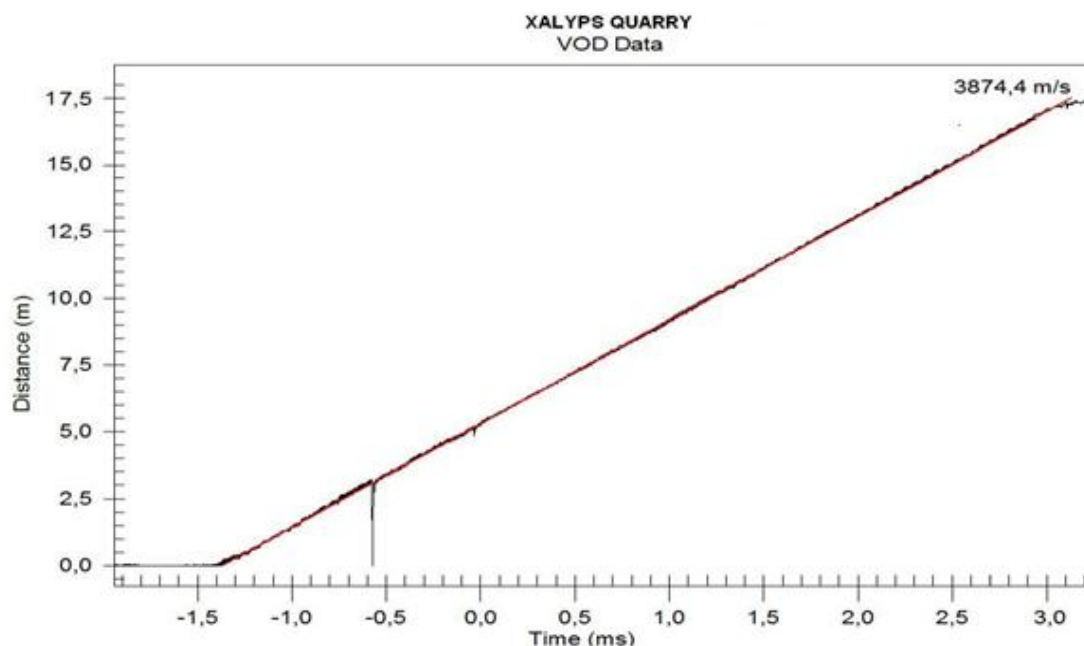
Εικόνα 3.21: Συσχέτιση μεταξύ της πυκνότητας του ANFO και της ταχύτητας με την οποία αυτό εκρήγνυται (Encyclopedia of Forensic Sciences, 2000).

Προκειμένου να εκτιμηθεί η εκρηκτική ισχύς του ANFO, υπό τις πραγματικές συνθήκες των ανατινάξεων που πραγματοποιήθηκαν στο Λατομείο Χάλυψ, μετρήθηκε η ταχύτητα με την οποία αυτό εκρήγνυται εντός του διατρήματος. Η μέτρηση έγινε με τη χρήση της συσκευής Handitrap II του οίκου MREL Canada που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων και αποσκοπούσε στη συνεχή καταγραφή της ταχύτητας έκρηξης σε όλο το μήκος του διατρήματος. Η συσκευή Handitrap II παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.22.



Εικόνα 3.22: Η συσκευή Handitrap II του οίκου MREL, που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων του Ε.Μ.Π.

Το διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας έκρηξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.23. Η ύπαρξη αρνητικών τιμών στον άξονα του χρόνου (pre-trigger time) σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η συνεχής καταγραφή δεδομένων από την συσκευή Handitrap II.



Εικόνα 3.23: Προσδιορισμός ταχύτητας έκρηξης (VOD) του ANFO εντός διατρήματος.

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι:

- Η ταχύτητα που αποκτά το ANFO ($3874\text{m/s} \approx 12711\text{ft/s}$), είναι σύμφωνη με την τιμή που προκύπτει από το διάγραμμα της Εικόνας 3.21, για το ANFO πυκνότητας $0,8\text{g/cm}^3$ το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο σε διατρήματα διαμέτρου 165mm ($=6,5\text{in}$). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει τον ικανοποιητικό βαθμό εγκλεισμού του ANFO εντός του διατρήματος αλλά και την αποτελεσματική έναυση του από τη ζελατινοδυναμίτιδα (εναυσματική γόμωση).
- Η απόσταση που απαιτείται προκειμένου η ταχύτητα του ANFO να σταθεροποιηθεί (run up distance) είναι σχεδόν μηδενική, αποτέλεσμα της έντονης διέγερσης που προκαλεί η εναυσματική γόμωση.
- Η ταχύτητα του ANFO παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος της εκρηκτικής στήλης, ως αποτέλεσμα της ισχυρής έναυσης του από τη ζελατινοδυναμίτιδα, αλλά και

της μεγάλης διαμέτρου της γόμωσης. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την ομοιόμορφη απόδοση του ANFO σε ολόκληρο το μήκος της εκρηκτικής στήλης.

Βάσει των παραπάνω, η έναυση του ANFO με τη χρήση ενός φυσιγγίου ζελατινοδυναμίτιδας (2,5kg) κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική, γεγονός το οποίο διασφαλίζει την έκλυση της προσδοκώμενης ποσότητας ενέργειας για τη θραύση του πετρώματος.

3.5 Καταγραφή αποτελεσμάτων των ανατινάξεων

Η καταγραφή των αποτελεσμάτων μιας ανατίναξης είναι μια ιδιαιτέρως δύσκολη και χρονοβόρος διαδικασία η οποία επιβάλλεται να πραγματοποιείται κατά το δυνατόν λεπτομερώς. Η προσεκτική καταγραφή των δεδομένων περιορίζει σημαντικά τα σφάλματα των μετρήσεων, διασφαλίζοντας στον βαθμό που κάτι τέτοιο είναι εφικτό, την ορθότητα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

3.5.1 Εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των in situ τεμαχίων πετρώματος

Το πρώτο στάδιο της καταγραφής δεδομένων, περιελάμβανε τη λήψη φωτογραφιών από το προς εξόρυξη μέτωπο, προκειμένου αυτές να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των in situ τεμαχίων πετρώματος, μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνων το οποίο διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα προγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται εκτενώς τις δύο τελευταίες δεκαετίες για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος, τόσο σε επίπεδο επιστημονικής έρευνας όσο και σε επίπεδο βιομηχανικής εφαρμογής.

Το λογισμικό που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων είναι το WipFrag του οίκου WipWare Inc. Canada (Palangio 2000), το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα και αξιόπιστα προγράμματα αυτού του είδους (Sudhakar *et al.* 2006). Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, πέραν του υπολογισμού της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος, με τη βοήθεια του WipFrag πραγματοποιήθηκε και η εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των in situ τεμαχίων του μετώπου.

Η διαδικασία της προετοιμασίας/λήψης/ανάλυσης φωτογραφιών για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των in situ τεμαχίων πετρώματος, είναι η ίδια με εκείνη που

ακολουθείται όταν το ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, με μοναδική διαφορά ότι οι φωτογραφίες απεικονίζουν το μέτωπο του προς εξόρυξη όγκου και όχι τον σωρό των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος. Οι φυσικές ασυνέχειες που απαντώνται στη μάζα του πετρώματος ορίζουν τα *in situ* τεμάχια, το μέγεθος και η κατανομή των οποίων υπολογίζεται με τη βοήθεια του WipFrag.

Για τη λήψη των φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Lumix DMC-FX35 που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων.

Για κάθε ένα από τα δέκα μέτωπα ελήφθη ένα πλήθος φωτογραφιών, προκειμένου αυτές να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των *in situ* τεμαχίων πετρώματος του μετώπου, μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνων WipFrag.

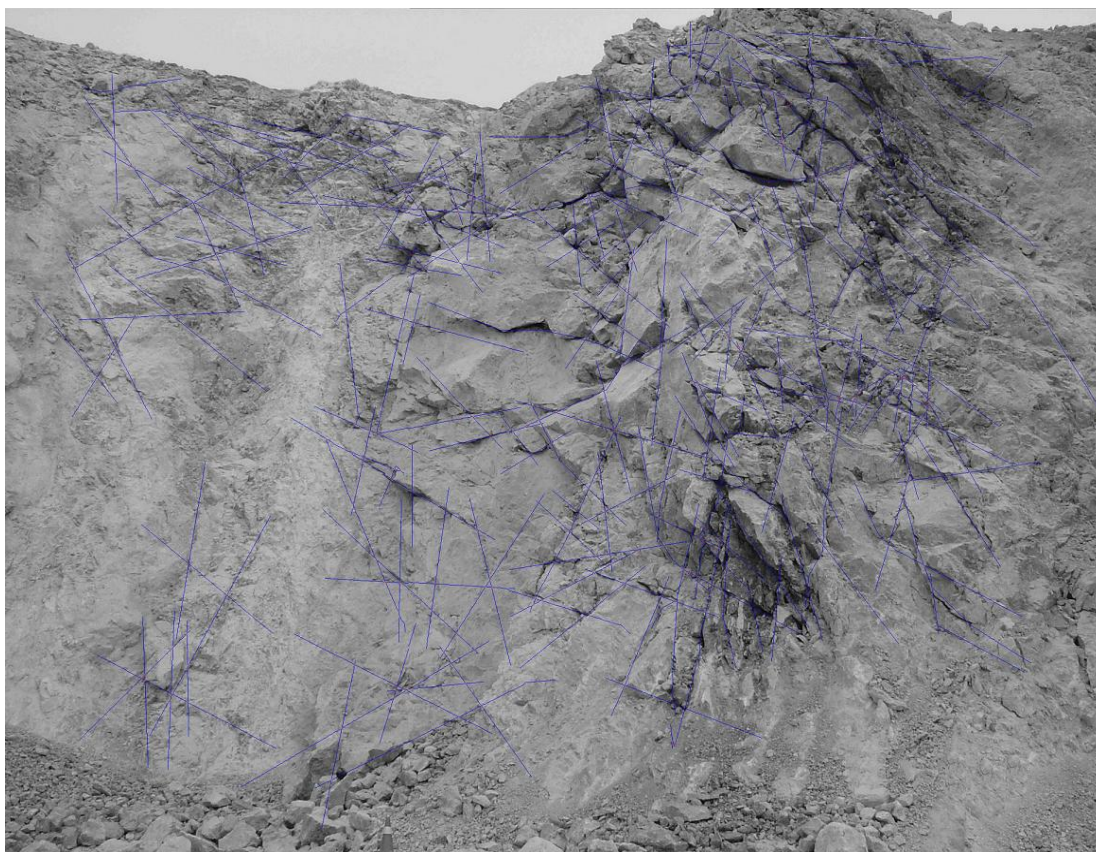


Εικόνα 3.24: Φωτογραφία μετώπου που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των *in situ* τεμαχίων, μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνων WipFrag (ύψος κώνου 30cm).

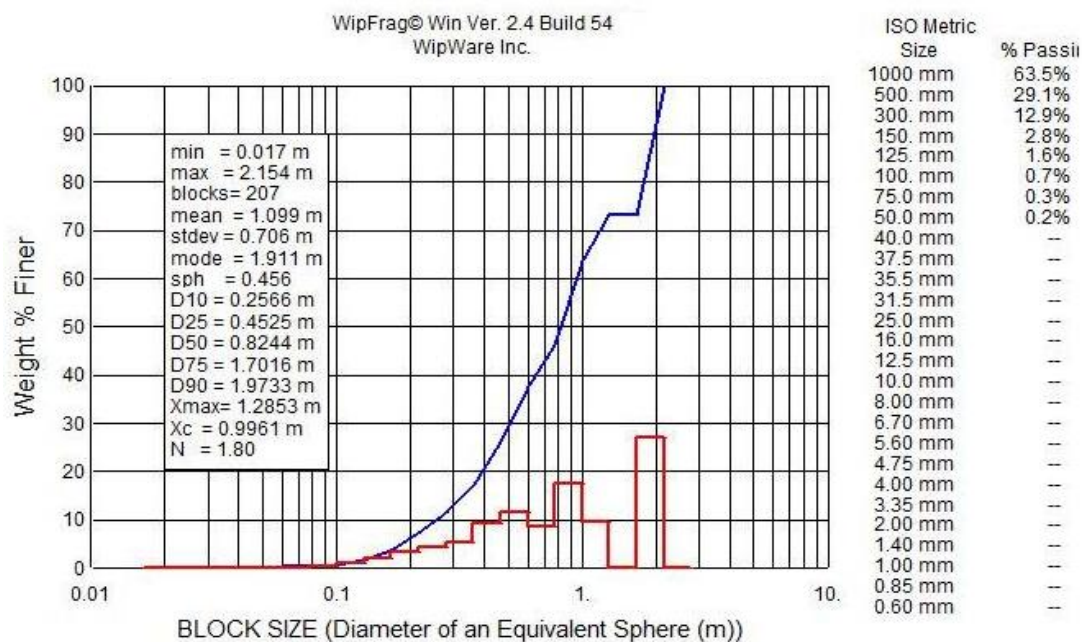
Από τον συνολικό αριθμό φωτογραφιών που ελήφθησαν για κάθε μέτωπο, μόνο οι δεκαπέντε καταλληλότερες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των *in situ* τεμαχίων του μετώπου. Η επιλογή των φωτογραφιών που διαθέτουν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά προκειμένου η ανάλυσή τους να δώσει αξιόπιστες μετρήσεις, έγινε βάσει των κριτηρίων που περιγράφονται αναλυτικά στην Παράγραφο 2.5.2. Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε ώστε η γωνία λήψης των φωτογραφιών να είναι κάθετη στην επιφάνεια του μετώπου, προκειμένου να αποφευχθεί η ύπαρξη προοπτικής, η οποία αλλοιώνει σημαντικά την κλίμακα των φωτογραφιών. Στην Εικόνα 3.24 παρουσιάζεται μια από τις φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των *in situ* τεμαχίων.

Για την ανάλυση των φωτογραφιών εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της αυτόματης σχεδίασης δικτύου από το ίδιο το λογισμικό, ενώ σε όποιες περιπτώσεις κρίθηκε σκόπιμο, πραγματοποιήθηκαν χειρωνακτικές διορθώσεις αποσκοπώντας στην περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας του δικτύου. Ο μέσος χρόνος επεξεργασίας κάθε φωτογραφίας ήταν περίπου εικοσιπέντε λεπτά. Στην Εικόνα 3.25 παρουσιάζεται το δίκτυο που δημιουργήθηκε για μια από τις υπό ανάλυση φωτογραφίες.

Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των φωτογραφιών που ελήφθησαν από τα προς εξόρυξη μέτωπα, περιλαμβάνει τη δημιουργία της κοκκομετρικής κατανομής των *in situ* τεμαχίων, του τμήματος του μετώπου που απεικονίζεται στις επιμέρους φωτογραφίες. Στην Εικόνα 3.26 παρουσιάζεται η κοκκομετρική κατανομή των *in situ* τεμαχίων που προέκυψε έπειτα από την ανάλυση μιας φωτογραφίας. Η τελική καμπύλη της αθροιστικής κατανομής των *in situ* τεμαχίων κάθε μετώπου, προέκυψε έπειτα από τη συγχώνευση των επιμέρους κατανομών.



Εικόνα 3.25: Δημιουργία δικτύου περιμετρικά των in situ τεμαχίων του μετώπου, από το λογισμικό WipFrag.



Εικόνα 3.26: Κοκκομετρική κατανομή των in situ τεμαχίων του μετώπου, η οποία υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού WipFrag.

Στον Πίνακα 3.20 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα μεγέθη τεμαχίου πετρώματος (σε m) που αντιστοιχούν στα αθροιστικά ποσοστά διερχόμενου μεγέθους 50% και 75%, καθώς και το μέγεθος του μεγαλύτερου in situ τεμαχίου ($x_{\max}$), για κάθε ένα από τα δέκα μέτωπα. Τα αποτελέσματα προέκυψαν έπειτα από τη συγχώνευση των επιμέρους κατανομών του κάθε μετώπου.

Προκειμένου να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ των ποσοστών αθροιστικά διερχόμενου που αναφέρονται στο μέτωπο της βαθμίδας και εκείνων που αναφέρονται στον σωρό των θραυσμένων τεμαχίων, χρησιμοποιούνται πριν από το επί τοις εκατό ποσοστό (%) τα γράμματα «F» (face) και «P» (pile) αντίστοιχα.

Πίνακας 3.20: Το μέγεθος τεμαχίου in situ πετρώματος που αντιστοιχεί στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 50% και 75% καθώς και μέγιστο μέγεθος in situ τεμαχίου, για κάθε μέτωπο.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
F₅₀ (m)	1,064	1,113	0,895	1,112	0,890	1,022	1,020	1,029	1,160	1,004
F₇₅ (m)	1,680	1,206	1,475	1,749	1,385	1,994	1,461	1,381	1,689	1,212
x_{max} (m)	2,054	1,668	2,834	3,594	2,154	2,783	2,356	2,723	2,783	1,458

3.5.2 Βιντεοσκόπηση των ανατινάξεων με τη βοήθεια κάμερας ταχείας λήψης

Το επόμενο στάδιο της καταγραφής δεδομένων περιελάμβανε τη βιντεοσκόπηση κάθε ανατίναξης με τη χρήση της συσκευής Blaster's Ranger High Speed Camera του οίκου MREL Canada, που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.27. Η συγκεκριμένη κάμερα ταχείας λήψης έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει 500frames/s, έναντι των 24frames/s που λαμβάνει μια κοινή κινηματογραφική κάμερα. Η ανάλυση των βίντεο πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Blaster's MAS του ιδίου οίκου.



Εικόνα 3.27: Η συσκευή Blaster's Ranger High Speed Camera του οίκου MREL, που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων του Ε.Μ.Π.

Βασική επιδίωξη ήταν ο υπολογισμός του ελάχιστου χρόνου απόκρισης του μετώπου (minimum response time, $T_{\min}$) και η συσχέτιση του χρόνου αυτού με τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης. Επιπλέον, μέσω των βιντεοσκοπημένων ανατινάξεων, πραγματοποιήθηκε ποιοτική αποτίμηση των ανατινάξεων, σε ότι αφορά τον αποτελεσματικό εγκλεισμό των αερίων της έκρηξης εντός του διατρήματος, καθώς και σε ότι αφορά την εξέλιξη της διαδικασίας της απόσπασης, μετακίνησης και απόθεσης του εξορυγμένου πετρώματος υπό τη μορφή σωρού μπροστά από το νέο πρανές.

Το μέγεθος $T_{\min}$ είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που γίνεται η πυροδότηση της εκρηκτικής ύλης στον πυθμένα του διατρήματος, μέχρι τη στιγμή που το πέτρωμα αρχίζει να κινείται προκειμένου τελικά να αποσπαστεί από τη φυσική του θέση. Έχοντας ως ταχύτητα λήψης τα 500frames/s, ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμιότυπων είναι 2ms. Ως εκ τούτου, το μέγιστο σφάλμα το οποίο σχετίζεται με τον υπολογισμό του $T_{\min}$ εκτιμάται ότι είναι τα 2ms.

Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στην ορθή επιλογή της θέσης τοποθέτησης της κάμερας για την καταγραφή κάθε ανατίναξης. Το εκάστοτε επιλεγμένο σημείο, εξασφάλιζε λήψη κάθετη στην πλάγια όψη (προφίλ) του προς εξόρυξη μετώπου προκειμένου να είναι άμεσα

ορατή η στιγμή που αρχίζει η κίνηση του, ενώ ταυτόχρονα διαφύλασσε την ακεραιότητα τόσο του χειριστή, όσο και της ίδιας της συσκευής.

Σύμφωνα με τους Onederra *et al.* (2003), ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης αποτελεί βασική παράμετρο για τον προσδιορισμό του κατάλληλου χρόνου επιβράδυνσης, τόσο μεταξύ των διατρημάτων της ίδιας σειράς, όσο και μεταξύ των διαδοχικών σειρών διατρημάτων. Από την ίδια μελέτη προκύπτει ότι ο T_{min} εξαρτάται από την τιμή του φορτίου, τον τύπο της εκρηκτικής ύλης και τα χαρακτηριστικά του πετρώματος. Οι Segarra *et al.* (2003), θεωρούν ότι τα χαρακτηριστικά του πετρώματος δεν επηρεάζουν την τιμή του ελάχιστου χρόνου απόκρισης T_{min} . Επιπλέον, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης σχετίζεται με την τιμή του «τοπικού» φορτίου (B_L), στη θέση για την οποία μετριέται ο χρόνος T_{min} , κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα νεότερης έρευνας που πραγματοποίησαν οι Sanchidrian *et al.* (2005).

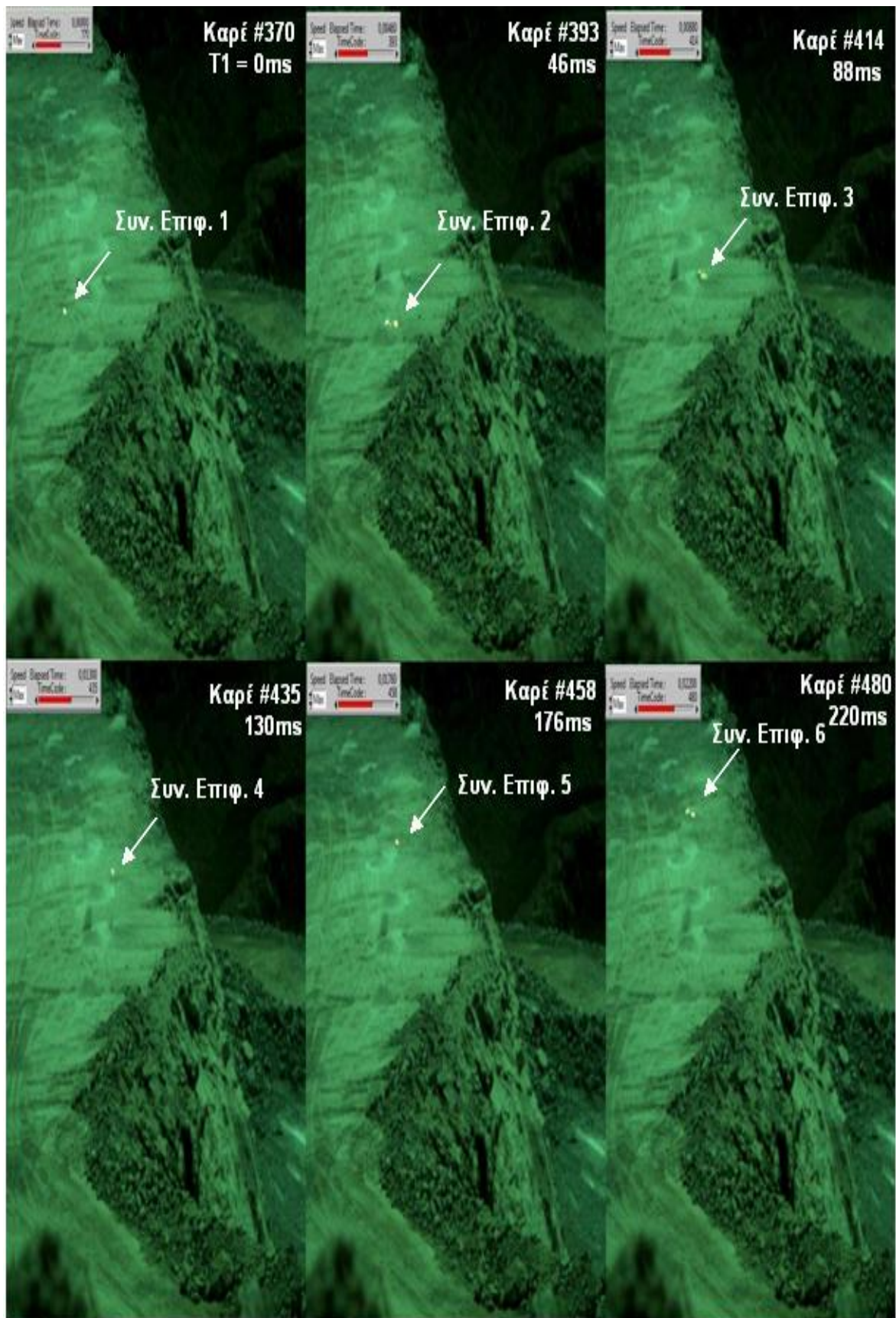
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του T_{min} είναι η εξής:

- Υπολογίστηκε η χρονική στιγμή (T_1) που το εκρηκτικό κύμα χαμηλής ισχύος που διαδίδεται εντός του αγωγού NONEL, φτάνει στο κέλυφος του συνδέσμου επιφάνειας (είναι η στιγμή που στο βίντεο εμφανίζεται μια «λάμψη» στη θέση που βρίσκεται το κέλυφος).
- Γνωρίζοντας το μήκος του αγωγού NONEL που είναι προσαρτημένο στον πυροκροτητή και τον χρόνο με τον οποίο το εκρηκτικό κύμα ταξιδεύει μέσα στον αγωγό (2000 m/s), υπολογίστηκε η χρονική στιγμή (T_2) που πραγματοποιείται η έκρηξη της εναυσματικής γόμωσης που είναι τοποθετημένη στον πυθμένα του διατρήματος.
- Έπειτα από οπτική παρατήρηση του βίντεο εντοπίζεται η χρονική στιγμή (T_3) που ξεκινάει η μετακίνηση της βαθμίδας.

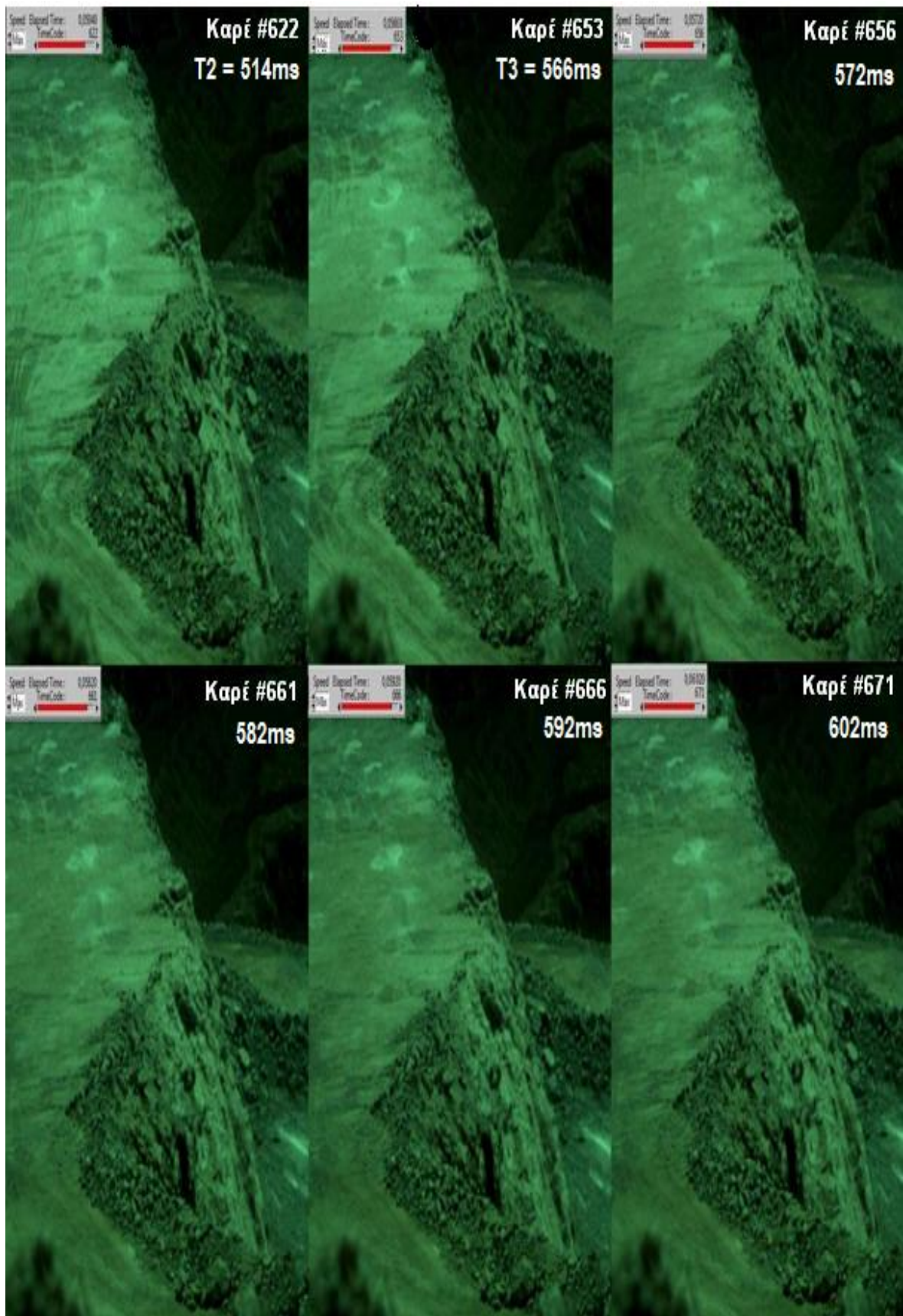
Ο χρόνος T_{min} υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{min} = T_3 - T_2 - T_1 \quad (3.1)$$

Στην Εικόνα 3.28 και στην Εικόνα 3.29 παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από το βίντεο μιας καταγεγραμμένης ανατίναξης (ανατίναξη #3), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ελάχιστου χρόνου απόκρισης T_{min} .

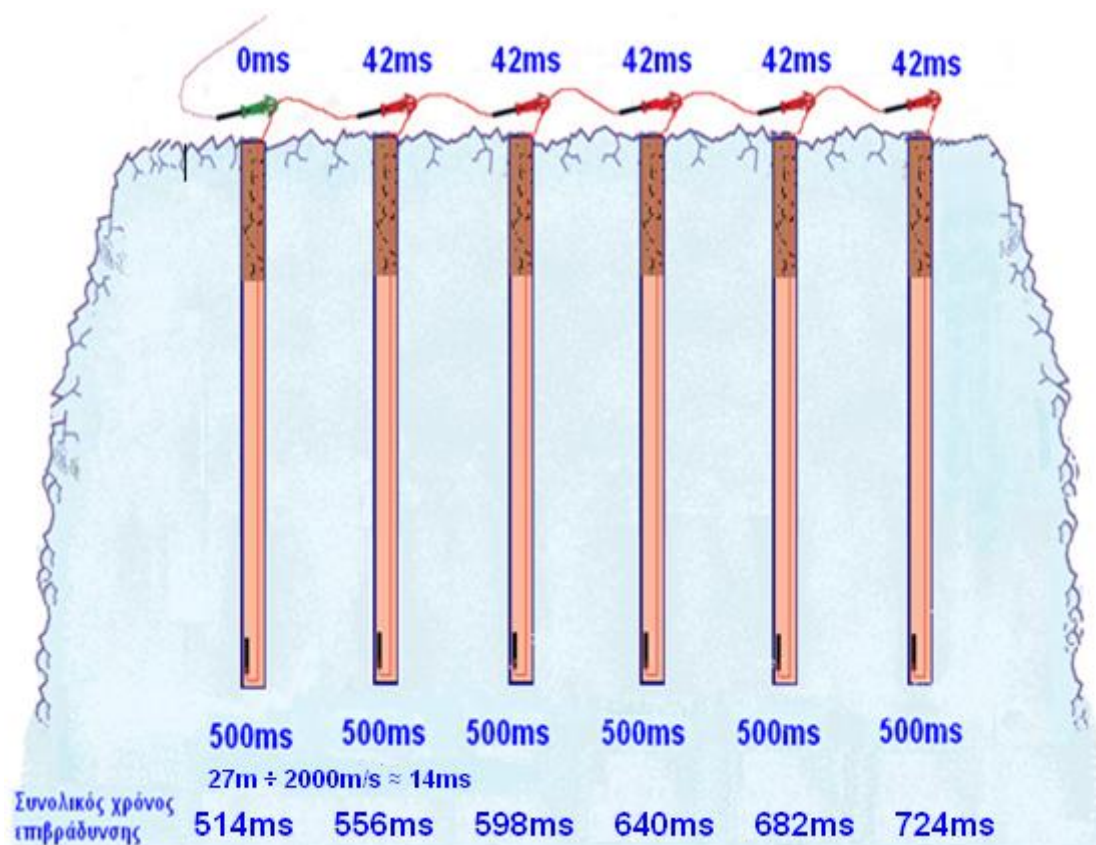


Εικόνα 3.28: Προσδιορισμός της χρονικής στιγμής T_1 για τον υπολογισμό του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (Συν. Επιφ. = Σύνδεσμος Επιφάνειας)



Εικόνα 3.29: Προσδιορισμός των χρονικών στιγμών T_2 και T_3 για τον υπολογισμό του ελάχιστου χρόνου απόκρισης.

Το σχέδιο της συγκεκριμένης ανατίναξης περιελάμβανε 6 διατρήματα, για τη συνδεσμολογία των οποίων χρησιμοποιήθηκαν σύνδεσμοι επιφάνειας με χρόνο επιβράδυνσης 42ms και πυροκροτητές διατρήματος με μήκος αγωγού 27m και χρόνο επιβράδυνσης 500ms, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 3.30. Η ταχύτητα με την οποία το εκρηκτικό κύμα μεταδίδεται εντός του αγωγού NONEL είναι ίση με 2000m/s.



Εικόνα 3.30: Συνολικός χρόνος επιβράδυνσης για κάθε διάτρημα.

Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή T_1 που ενεργοποιείται ο κόμβος του πρώτου συνδέσμου επιφάνειας, μέχρι τη χρονική στιγμή T_2 που ενεργοποιείται η εναυσματική γόμωση στον πυθμένα του διατρήματος από τον πυροκροτητή, ισούται με 514ms. Από την οπτική παρατήρηση του βίντεο προκύπτει ότι η μετακίνηση της βαθμίδας ξεκινάει τη χρονική στιγμή T_3 , η οποία αντιστοιχεί σε χρόνο 566ms. Ως εκ τούτου ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης για τη συγκεκριμένη ανατίναξη είναι ίσος με 52ms.

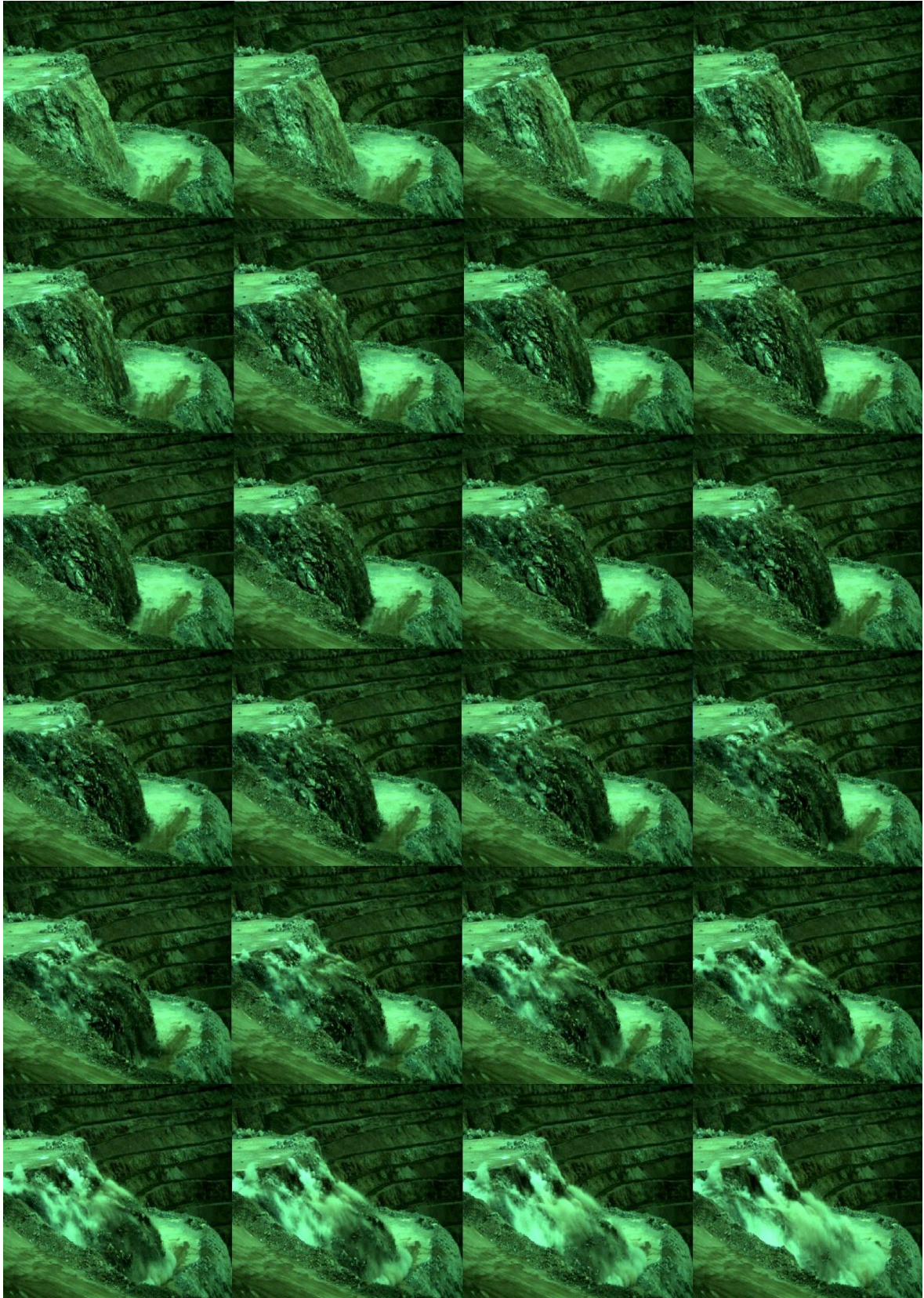
Στον Πίνακα 3.21 που ακολουθεί, παρατίθενται ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης ($T_{\min}$) που μετρήθηκε για κάθε ένα από τα δέκα μέτωπα, καθώς και το «τοπικό» φορτίο (B_L), της θέσης για την οποία μετρήθηκε ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να ξεκινήσει η μετακίνηση του μετώπου.

Πίνακας 3.21: Ελάχιστος χρόνος απόκρισης ($T_{\min}$) και τιμή του «τοπικού» φορτίου (B_L) στη θέση για την οποία μετρήθηκε ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης.

	ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
T _{min} (ms)	40	42	52	48	50	48	38	48	42	44
B _L (m)	5,11	5,39	7,88	6,22	7,27	6,83	5,15	6,24	5,34	6,24

Στην Εικόνα 3.31 παρατίθενται στιγμιότυπα από μια βιντεοσκοπημένη ανατίναξη. Από την παρατήρηση των βιντεοσκοπημένων ανατινάξεων προκύπτει ότι:

- Η πυροδότηση των διατρήμάτων με τη χρήση του συστήματος NONEL, διατηρεί ακέραιη την επιγώμωση μήκους 3,6m που προέβλεπε το εφαρμοζόμενο σχέδιο ανατίναξης. Ως εκ τούτου, αποτρέπεται η εκτόνωση των αερίων της έκρηξης από το στόμιο του διατρήματος, γεγονός το οποίο προσδίδει σε αυτά την πίεση που απαιτείται προκειμένου να ενισχυθεί η θραύση και η μετακίνηση του εξορυσσόμενου όγκου.
- Ο αποτελεσματικός εγκλεισμός των αερίων της έκρηξης εντός του διατρήματος, περιορίζει σημαντικά το ανεπιθύμητο φαινόμενο του αέριου ωστικού κύματος (air blast).
- Οι χρόνοι επιβράδυνσης που έχουν επιλεγεί για τους συνδέσμους επιφάνειας και για τους πυροκροτητές διατρήματος, εξασφαλίζουν την ενεργοποίηση όλων των πυροκροτητών προτού ξεκινήσει η θραύση και η μετατόπιση του πετρώματος, γεγονός το οποίο αποτρέπει τη διακοπή μετάδοσης της πυροδότησης, λόγω πιθανής καταστροφής των αγωγών NONEL.
- Η διαδικασία της απόσπασης, μετακίνησης και απόθεσης του εξορυγμένου πετρώματος υπό τη μορφή σωρού μπροστά από το νέο πρανές, εξελίσσεται ομαλά χωρίς να παρατηρείται το ανεπιθύμητο φαινόμενο της εκτόξευσης τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος από το «φρύδι» του μετώπου, σε μεγάλη απόσταση από το πρανές (flyrock).



Εικόνα 3.31: Στιγμιότυπα μιας βιντεοσκοπημένης ανατίναξης, τα οποία ελήφθησαν με τη χρήση της συσκευής Blaster's Ranger High Speed Camera.

3.5.3 Εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος

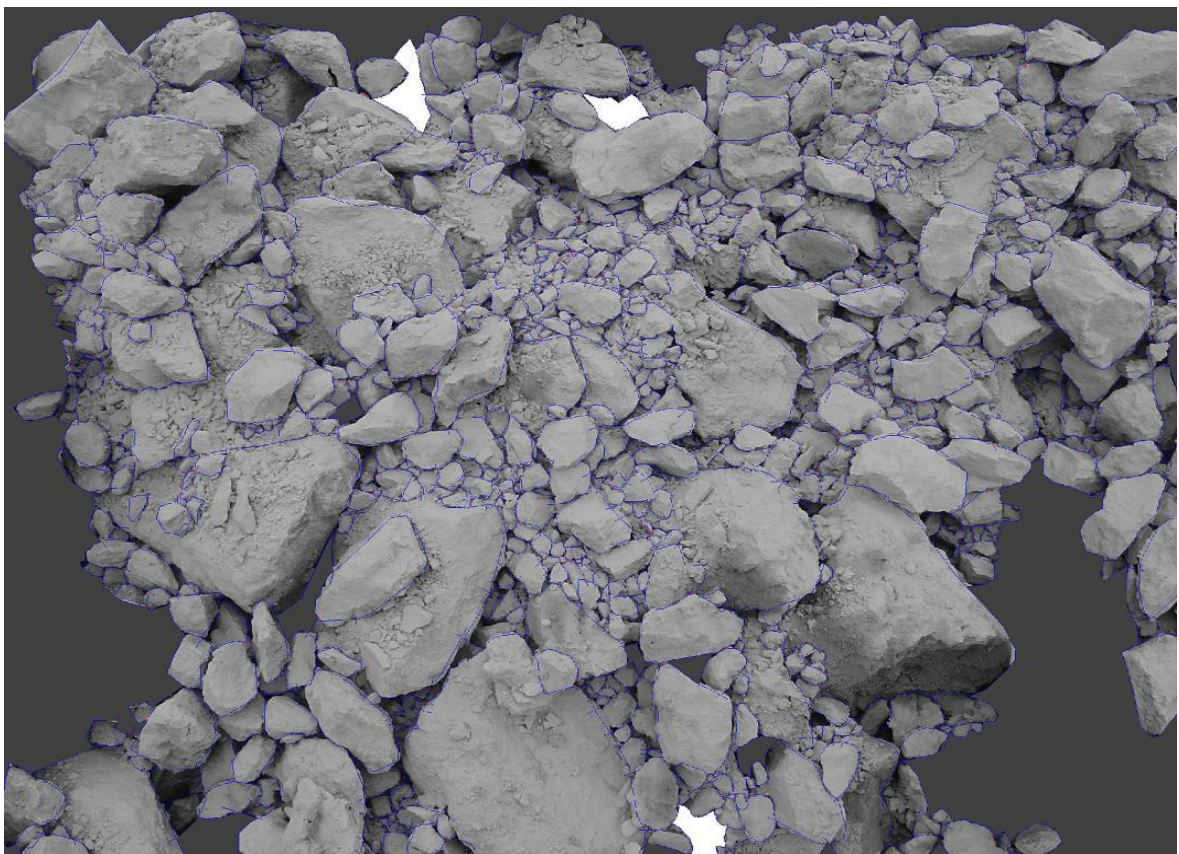
Το τελευταίο χρονικά στάδιο της καταγραφής δεδομένων, περιελάμβανε τη λήψη φωτογραφιών από τους σωρούς που δημιουργούνται μπροστά από τα νέα μέτωπα, προκειμένου εν συνεχεία να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής κατανομής των εξορυγμένων τεμαχίων πετρώματος κάθε ανατίναξης, μέσω του λογισμικού WipFrag.

Για τη λήψη των φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Lumix DMC-FX35 που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων. Από κάθε σωρό ελήφθη ένα πλήθος φωτογραφιών, εκ των οποίων μόνο οι δεκαπέντε καταλληλότερες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής κάθε ανατίναξης. Στην Εικόνα 3.32 παρουσιάζεται μια από τις φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος.



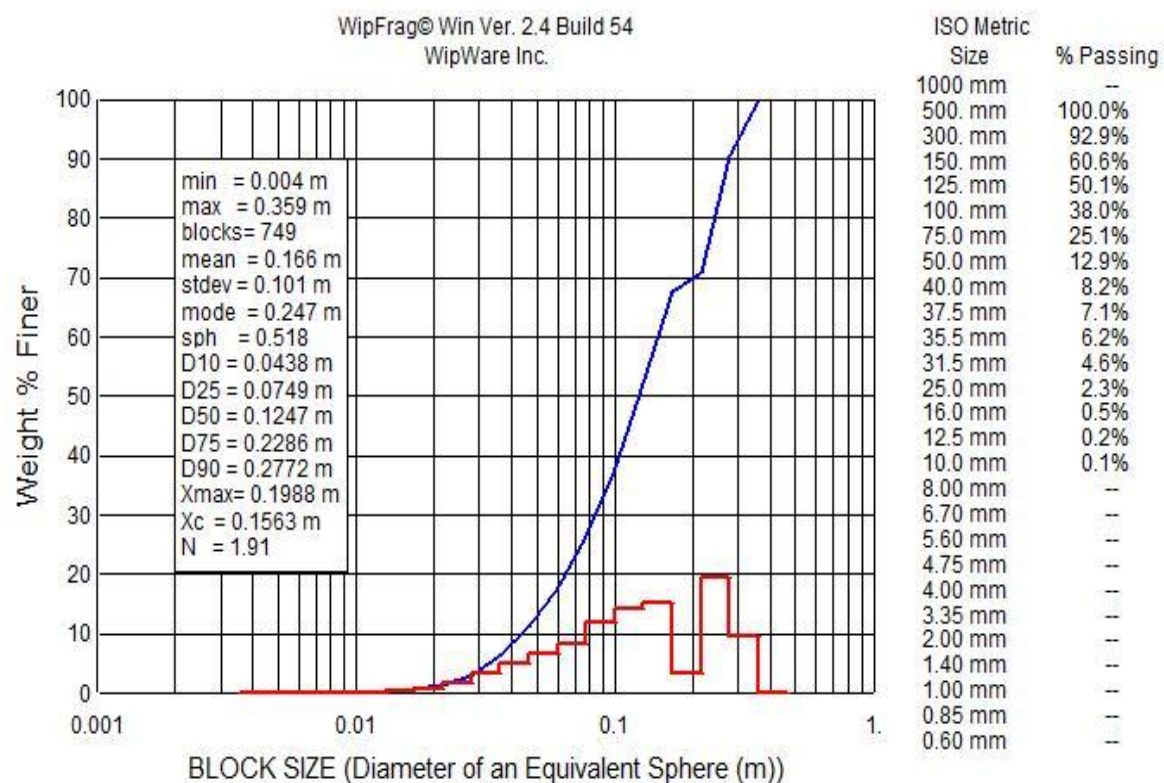
Εικόνα 3.32: Φωτογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής των θραυσμένων τεμαχίων, μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνων WipFrag (ύψος κώνου=30cm).

Οι εργασίες της προετοιμασίας του δείγματος, της λήψης και της ανάλυσης των φωτογραφιών, πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας όλα όσα προβλέπονται από τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην Παράγραφο 2.5.2), καθώς κάτι τέτοιο συντελεί στο να περιοριστούν σε σημαντικό βαθμό τα επιμέρους σφάλματα (Latham *et al.* 2003, Sanchidrian *et al.* 2006). Η λήψη των φωτογραφιών πραγματοποιήθηκε σε περισσότερα το ενός σημεία και ενώ η διαδικασία φόρτωσης βρισκόταν σε εξέλιξη, προκειμένου η δειγματοληψία να είναι όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερη του συνόλου του εξορυγμένου όγκου. Για την ανάλυση των φωτογραφιών εφαρμόσθηκε η μεθοδολογία της αυτόματης σχεδίασης δικτύου από το ίδιο το λογισμικό και μόνο στις περιπτώσεις που κρίθηκε σκόπιμο πραγματοποιήθηκαν χειρωνακτικές διορθώσεις για να βελτιωθεί η ακρίβεια του. Ο μέσος χρόνος επεξεργασίας για κάθε φωτογραφία ήταν περίπου εικοσιπέντε λεπτά. Στην Εικόνα 3.33 παρουσιάζεται το δίκτυο που δημιουργήθηκε για μια από τις υπό ανάλυση φωτογραφίες.



Εικόνα 3.33: Δημιουργία δικτύου περιμετρικά των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, από το λογισμικό WipFrag.

Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των φωτογραφιών που ελήφθησαν από τους σωρούς, περιλαμβάνει τη δημιουργία της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων πετρώματος που απεικονίζεται στις επιμέρους φωτογραφίες. Στην Εικόνα 3.34 παρουσιάζεται η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος που προέκυψε έπειτα από την ανάλυση μιας φωτογραφίας. Η τελική καμπύλη της αθροιστικής κατανομής των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος για την κάθε ανατίναξη, προκύπτει έπειτα από τη συγχώνευση των επιμέρους κατανομών.



Εικόνα 3.34: Κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, η οποία υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού WipFrag.

Στον Πίνακα 3.22 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα μεγέθη τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος (σε m) που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, για κάθε μία από τις δέκα ανατινάξεις.

Πίνακας 3.22: Μεγέθη τεμαχίων θραυσμένου πετρώματος που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου των 20, 50 75 και 90%.

	ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
P₂₅ (m)	0,149	0,144	0,128	0,161	0,146	0,153	0,124	0,138	0,116	0,116
P₅₀ (m)	0,226	0,236	0,269	0,279	0,259	0,260	0,215	0,252	0,242	0,239
P₇₅ (m)	0,386	0,387	0,457	0,474	0,439	0,450	0,371	0,432	0,413	0,390
P₉₀ (m)	0,650	0,701	0,779	0,738	0,783	0,697	0,501	0,832	0,722	0,709

Γνωρίζοντας το μέγεθος τεμαχίου που αντιστοιχεί στο 50% του αθροιστικά διερχόμενου, τόσο για τα in situ τεμάχια του κάθε μετώπου όσο και τα τεμάχια εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχούν στο κάθε μέτωπο, μπορούμε να υπολογίσουμε τον λόγο κατάτμησης (reduction ratio) για το ποσοστό του 50% αθροιστικά διερχόμενου. Ο λόγος κατάτμησης RR_{50} ισούται με :

$$RR_{50} = \frac{F_{50}}{P_{50}} \quad (3.2)$$

όπου:

RR_{50} = ο λόγος κατάτμησης

F_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των in situ τεμαχίων πετρώματος (m)

P_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος (m).

Στον Πίνακα 3.23 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι λόγοι κατάτμησης RR_{50} για κάθε μία από τις δέκα ανατινάξεις, οι οποίοι προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές του F_{50} από τον Πίνακα 3.20 και του P_{50} από τον Πίνακα 3.22.

Πίνακας 3.23: Λόγοι κατάτμησης που αντιστοιχούν στο 50% αθροιστικά διερχόμενο κάθε ανατίναξης.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
RR₅₀	4,708	4,716	3,327	3,986	3,436	4,931	4,744	4,083	4,793	4,201

4 Μοντέλο εκτίμησης της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά πραγματοποιείται υπολογισμός των κοκκομετρικών κλασμάτων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90% για κάθε έναν από τους δέκα σωρούς εξορυγμένου πετρώματος, κάνοντας χρήση των μοντέλων Kuz-Ram και KCO. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με εκείνα τα οποία προέκυψαν μέσω του λογισμικού προγράμματος WipFrag, προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα των μοντέλων να εκτιμούν ικανοποιητικά τις μεταβολές που επιφέρουν οι αλλαγές που γίνονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός σχεδίου ανατίναξης. Στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται βαθμονόμηση ορισμένων εξισώσεων από το τυπολόγιο του μοντέλου KCO, προκειμένου αυτές να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη σχεδίαση μελλοντικών ανατινάξεων.

Σε ότι αφορά τον υπολογισμό του συντελεστή εξορυξιμότητας A , που «περιγράφει» την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το προς εξόρυξη πέτρωμα και αποτελεί δείκτη της ευκολίας με την οποία αυτό θραύεται, θεωρείται ότι για το σύνολο των καταγεγραμμένων ανατινάξεων, το πέτρωμα είναι ένα ασυνεχές υλικό του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες και τα δομικά χαρακτηριστικά παραμένουν σταθερά στην έκταση του λατομικού χώρου όπου έγιναν οι ανατινάξεις.

Λόγω της παραπάνω παραδοχής, είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι η ικανότητα των μοντέλων εκτίμησης να αναπαράγουν με ακρίβεια την κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος είναι περιορισμένη, καθώς τα δεδομένα τα οποία εισάγονται στο τυπολόγιο τους και σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, είναι ελλιπή, αφού στην πραγματικότητα οι ιδιότητες του πετρώματος μεταβάλλονται κατά θέσεις εντός του λατομικού χώρου. Διακυμάνσεις ωστόσο παρατηρούνται και στην τιμή του φορτίου και στην απόσταση μεταξύ των διατηρημάτων, λόγω της περιορισμένης ακρίβειας με την οποία αυτά ορύσσονται, αλλά και στην πλειοψηφία των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα προκειμένου να γίνει η εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων.

Ανεξάρτητα από τις όποιες αδυναμίες τους, τα μοντέλα εκτίμησης είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τον μηχανικό ανατινάξεων καθώς διευκολύνουν τον

έλεγχου του τρόπου με τον οποίο μετατοπίζεται η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, ως αποτέλεσμα των όποιων αλλαγών πραγματοποιούνται στο σχέδιο ανατίναξης. Ως εκ τούτου, καθίσταται εφικτός ο σχεδιασμός μιας ανατίναξης το αποτέλεσμα της οποίας θα είναι προσαρμοσμένο στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την αποδοτικότερη και ταυτόχρονα οικονομικότερη λειτουργία όλων των επιμέρους διεργασιών που έπονται της ανατίναξης.

4.2 Εκτίμηση κοκκομετρίας με τη χρήση των μοντέλων Kuz-Ram και KCO

Οι ασυνέχειες που απαντώνται στις θέσεις που πραγματοποιήθηκαν οι καταγεγραμμένες ανατινάξεις εξέρχονται από το μέτωπο. Ως εκ τούτου, η τιμή του δείκτη περιγραφής της βραχομάζας (RMD), ισούται με το άθροισμα του δείκτη κατάτμησης (JPS) και του δείκτη που σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (JPA), λαμβάνοντας τελικά την τιμή 40. Η τιμή του δείκτη που σχετίζεται με το ειδικό βάρος της βραχομάζας (RDI), είναι ίση με 15,9, ενώ η τιμή του δείκτη σκληρότητας (HF) είναι 12,77. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην Εξίσωση 2.12, προκύπτει ο συντελεστής εξορυξιμότητας (A) του πετρώματος ο οποίος ισούται με 4,12.

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων του μοντέλου Kuz-Ram, αρχικά υπολογίστηκαν το μέγεθος τεμαχίου x_{50} που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο και ο συντελεστής ομοιομορφίας n , για κάθε μια από τις δέκα ανατινάξεις και εν συνεχεία τα μεγέθη τεμαχίων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 75% και 90%. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την πραγματοποίηση υπολογισμών με τη χρήση των εξισώσεων του μοντέλου KCO. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, για τον υπολογισμό του x_{50} χρησιμοποιείται η εξίσωση που προτείνει ο Spathis (2004), η οποία περιλαμβάνει την προσθήκη του συντελεστή $g(n)$ που μετατοπίζει το x_{50} σε μικρότερες τιμές. Στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί, παρατίθενται οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, καθώς και η τιμή του συντελεστή b που σχετίζεται με την κυματοειδή μορφή της εξίσωσης Swabrec, για κάθε μία από τις δέκα ανατινάξεις.

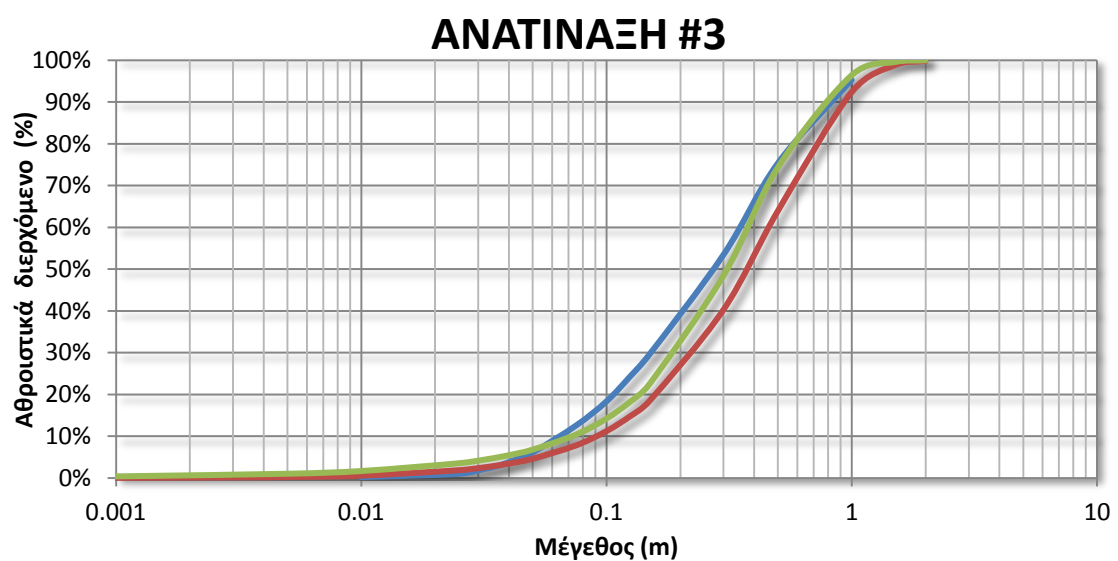
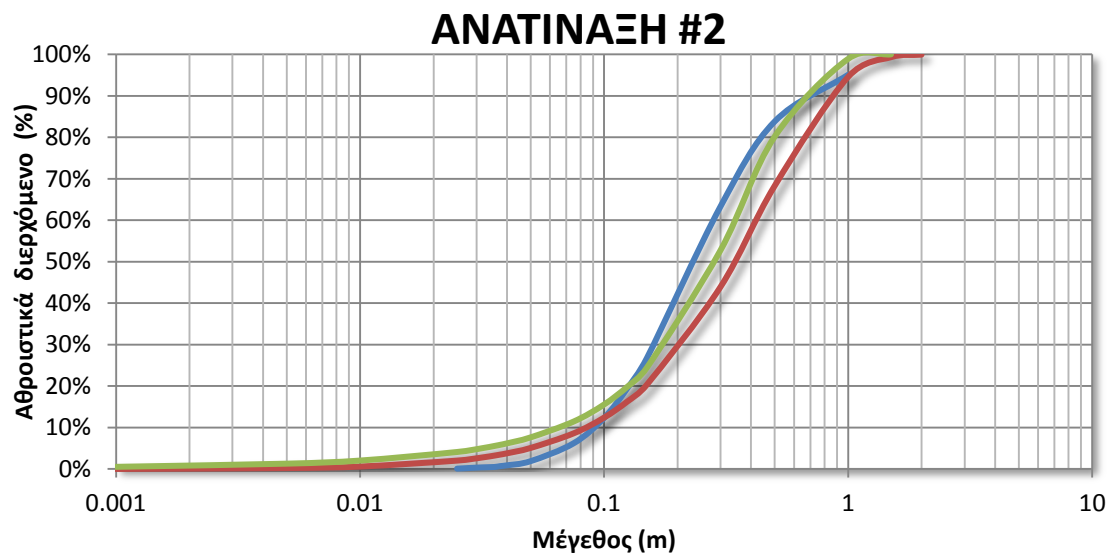
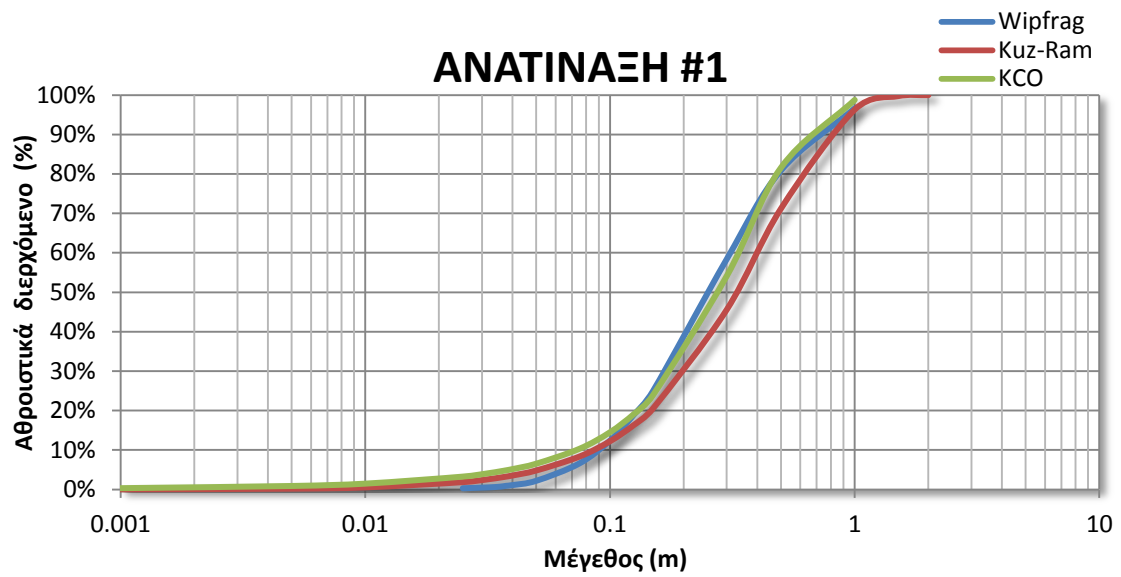
Πίνακας 4.1: Συντελεστής ομοιομορφίας (n) και μεγέθη τεμαχίων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου Kuz-Ram.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
n	1,403	1,343	1,335	1,353	1,343	1,354	1,404	1,389	1,334	1,355
x₂₅ (m)	0,176	0,178	0,194	0,193	0,189	0,183	0,167	0,189	0,182	0,185
x₅₀ (m)	0,329	0,343	0,375	0,371	0,364	0,350	0,313	0,356	0,353	0,354
x₇₅ (m)	0,540	0,576	0,630	0,619	0,609	0,585	0,512	0,587	0,593	0,590
x₉₀ (m)	0,774	0,839	0,921	0,901	0,889	0,851	0,736	0,845	0,867	0,858

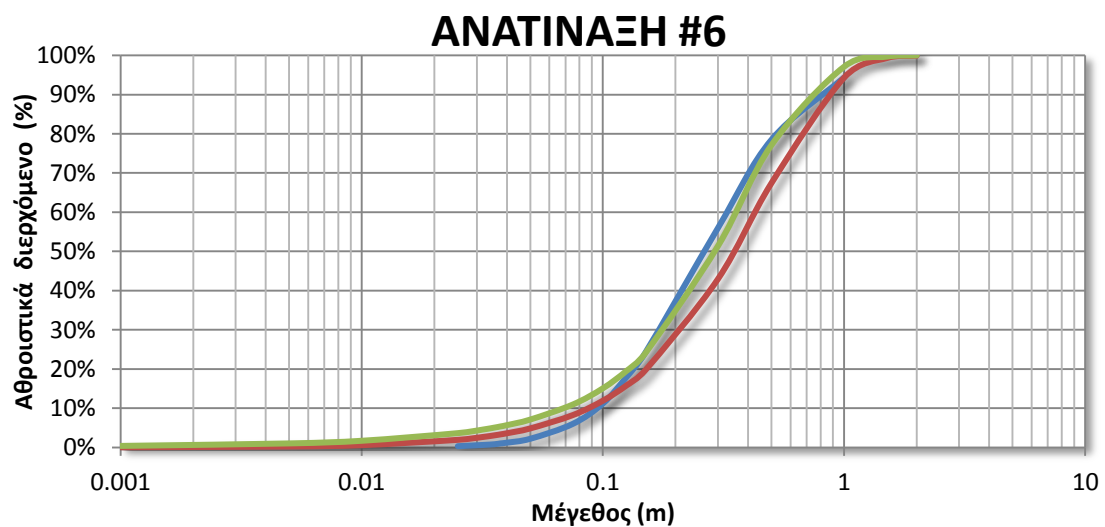
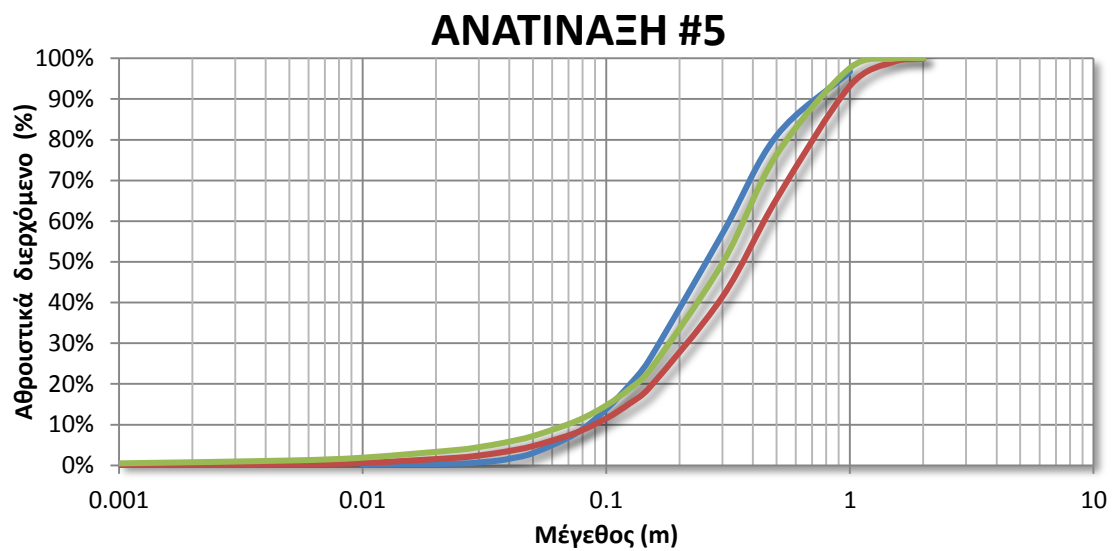
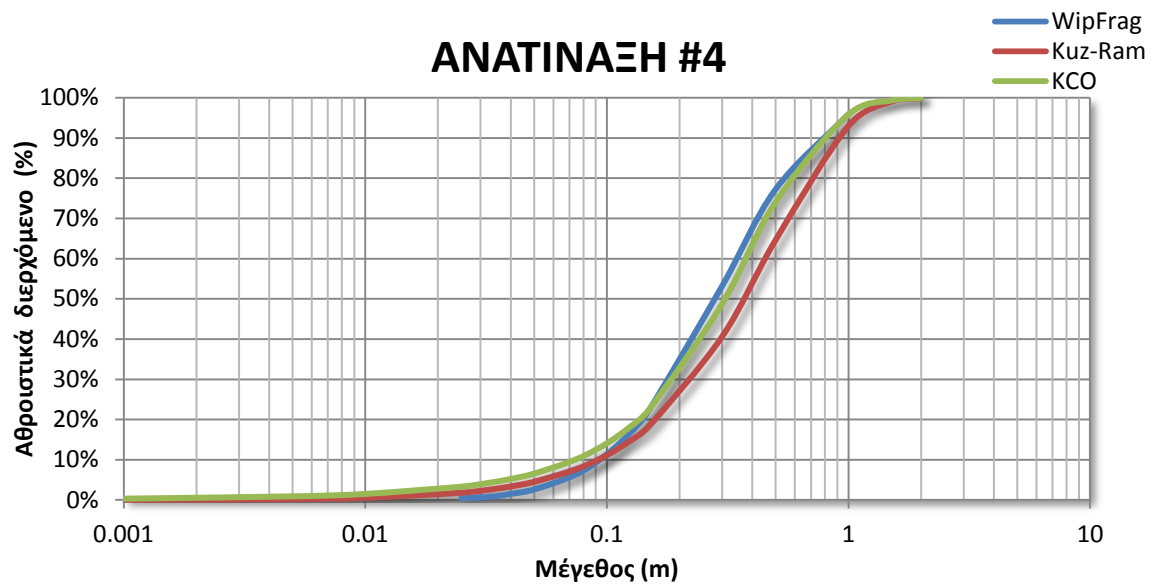
Πίνακας 4.2: Συντελεστής κυματοειδούς μορφής (b) και μεγέθη τεμαχίων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου KCO.

ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
b	4,292	3,640	4,359	4,759	3,944	4,451	4,659	4,585	4,517	3,396
x₂₅ (m)	0,155	0,152	0,164	0,164	0,160	0,155	0,148	0,165	0,156	0,160
x_{50s} (m)	0,278	0,285	0,310	0,309	0,301	0,291	0,264	0,300	0,292	0,294
x₇₅ (m)	0,437	0,451	0,508	0,510	0,486	0,478	0,419	0,480	0,475	0,458
x₉₀ (m)	0,620	0,635	0,744	0,762	0,698	0,703	0,601	0,695	0,695	0,579

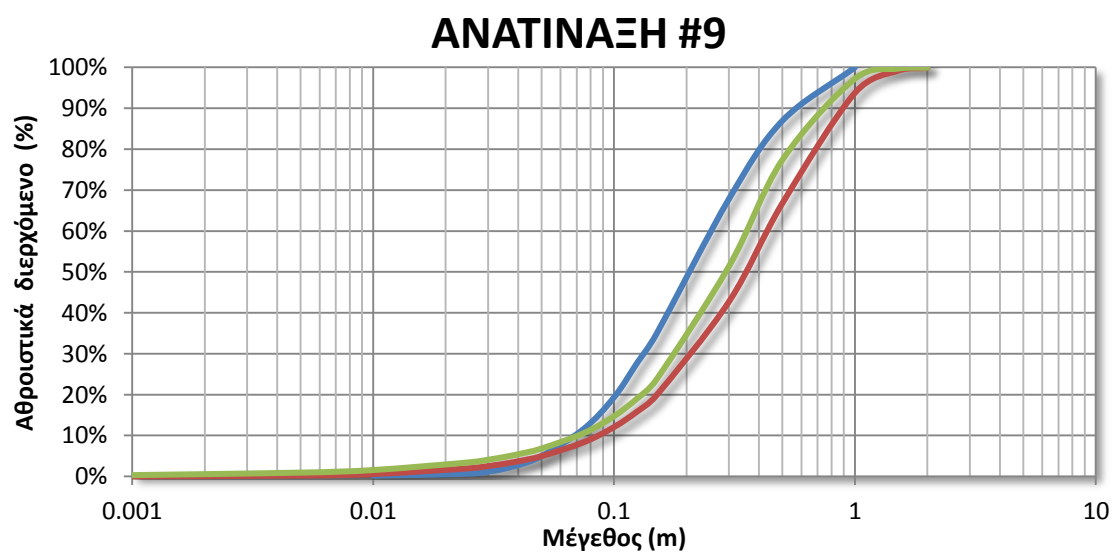
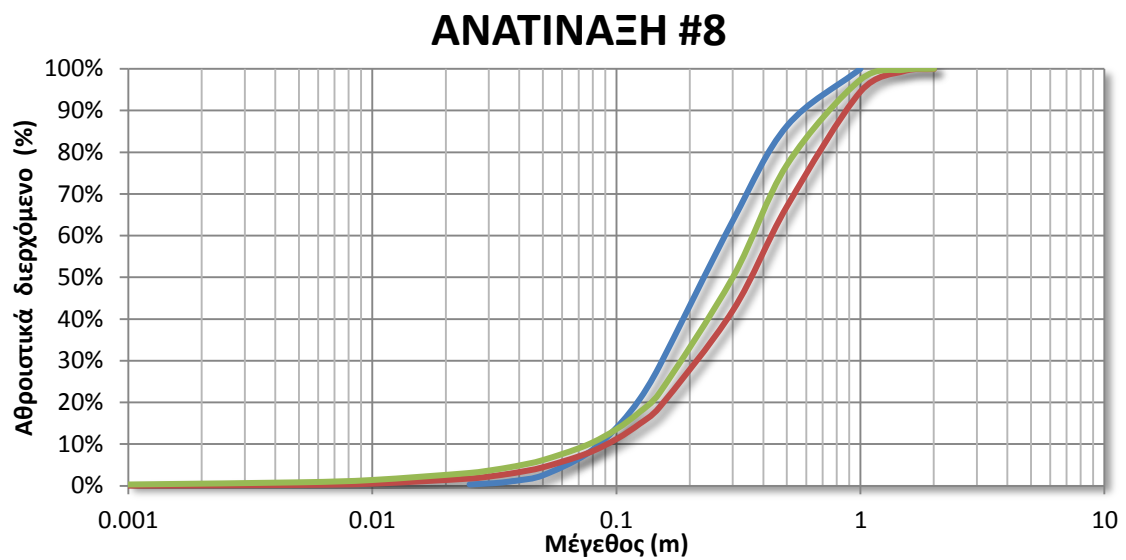
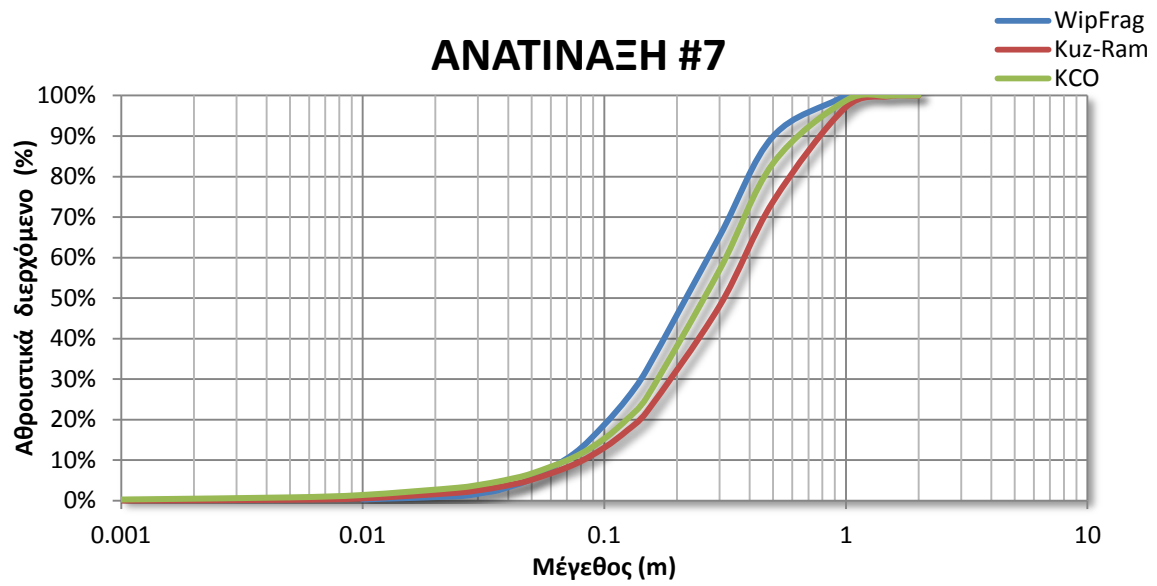
Στα διαγράμματα που παρατίθενται από την Εικόνα 4.1 έως την Εικόνα 4.4, παρουσιάζονται οι κατανομές που εκτιμώνται από τα δύο μοντέλα καθώς και εκείνη που υπολογίζεται μέσω του λογισμικού προγράμματος WipFrag.



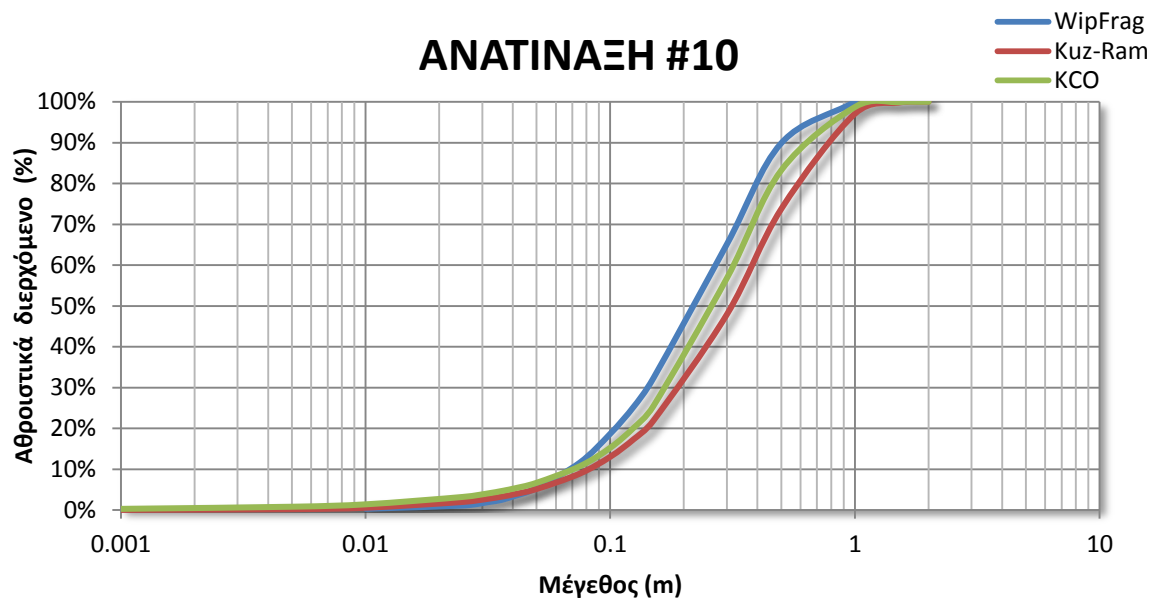
Εικόνα 4.1: Κοκκομετρικές κατανομές των ανατινάξεων #1, #2, #3 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.



Εικόνα 4.2: Κοκκομετρικές κατανομές των ανατινάξεων #4, #5, #6 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.



Εικόνα 4.3: Κοκκομετρικές κατανομές των ανατινάξεων #7, #8, #9 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.



Εικόνα 4.4: Κοκκομετρικές κατανομές της ανατίναξης #10 που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και των μοντέλων Kuz-Ram και KCO.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι:

- Οι κατανομές που εκτιμώνται μέσω του μοντέλου KCO, είναι πιο ομοιόμορφες σε σχέση με εκείνες που εκτιμώνται μέσω του Kuz-Ram, ενώ ακόμα μεγαλύτερο συντελεστή ομοιομορφίας παρουσιάζουν οι κατανομές που υπολογίζονται από το λογισμικό WipFrag.
- Το μέγεθος τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο το οποίο εκτιμάται από το KCO είναι μικρότερο από αυτό που εκτιμάται μέσω του Kuz-Ram.
- Τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου που αντιστοιχούν στα λεπτομερή τεμάχια εξορυγμένου πετρώματος είναι μεγαλύτερα για το μοντέλο KCO.
- Τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου που αντιστοιχούν στα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους τεμάχια εξορυγμένου πετρώματος, είναι μικρότερα για το μοντέλο KCO, σε σχέση με τα αντίστοιχα ποσοστά του μοντέλου Kuz-Ram. Ως εκ τούτου, οι τιμές μεγέθους που υπολογίζονται μέσω του KCO για τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου από 50% έως 75%, είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες που υπολογίζονται μέσω του Kuz-Ram.
- Οι κατανομές του μοντέλου KCO έχουν ένα πεπερασμένο άνω όριο, σε αντίθεση με τις κατανομές του Kuz-Ram οι οποίες τείνουν ασυμπτωτικά στο 100%.
- Για την πλειονότητα των ανατινάξεων, οι τιμές μεγέθους που υπολογίζονται με τη βοήθεια του WipFrag και αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου μεταξύ

50% και 75%, βρίσκονται πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές μεγέθους που εκτιμώνται μέσω του KCO.

Στον Πίνακα 4.3, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα ποσοστά διερχόμενου 25%, 50% και 75%.

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών μεγέθους (σε m) που αντιστοιχούν στα ποσοστά διερχόμενου 25%, 50% και 75%, οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag, Kuz-Ram και KCO.

		ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
25%	WipFrag	0,149	0,144	0,128	0,161	0,146	0,153	0,124	0,138	0,116	0,116
	Kuz-Ram	0,176	0,178	0,194	0,193	0,189	0,183	0,167	0,189	0,182	0,185
	KCO	0,155	0,152	0,164	0,164	0,160	0,152	0,148	0,165	0,156	0,160
50%	WipFrag	0,226	0,236	0,269	0,279	0,259	0,260	0,215	0,252	0,242	0,239
	Kuz-Ram	0,329	0,343	0,375	0,371	0,364	0,350	0,313	0,356	0,353	0,354
	KCO	0,278	0,285	0,310	0,309	0,301	0,291	0,264	0,300	0,292	0,294
75%	WipFrag	0,386	0,387	0,457	0,474	0,439	0,450	0,371	0,432	0,413	0,390
	Kuz-Ram	0,540	0,576	0,630	0,619	0,609	0,585	0,512	0,587	0,593	0,590
	KCO	0,437	0,451	0,508	0,510	0,486	0,478	0,419	0,480	0,475	0,458

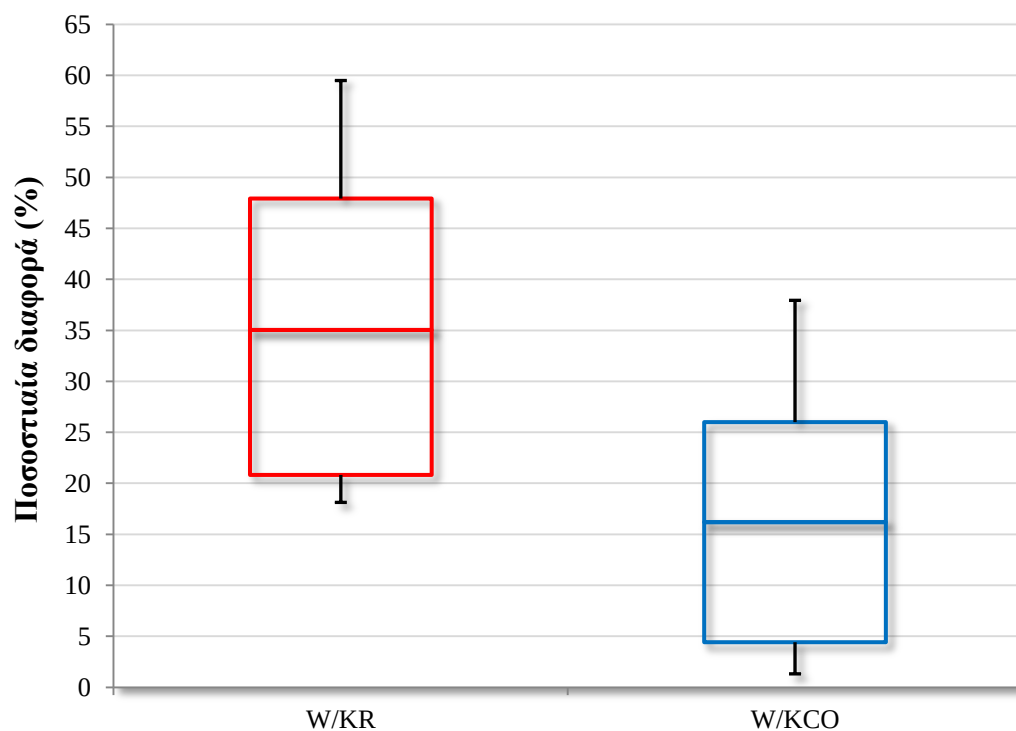
Η ποσοστιαία διαφορά, μεταξύ των τιμών μεγέθους που υπολογίστηκαν με τη χρήση του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν μέσω των μοντέλων Kuz-Ram και KCO, παρατίθεται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Ποσοστιαία διαφορά (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO.

		ANATINAEH										
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Aver.
25%	W/KR	-18,12	-23,61	-51,56	-19,88	-29,45	-19,61	-34,68	-36,96	-56,90	-59,48	-35,02±15,88
	W/KCO	-4,03	-5,56	-28,13	-1,86	-9,59	-1,31	-19,35	-19,57	-34,48	-37,93	-16,18±13,75
50%	W/KR	-45,58	-45,34	-39,41	-32,97	-40,54	-34,62	-45,58	-41,27	-45,87	-48,12	-41,93±5,10
	W/KCO	-23,01	-20,76	-15,24	-10,75	-16,22	-11,92	-22,79	-19,05	-20,66	-23,01	-18,34±4,57
75%	W/KR	-39,90	-48,84	-37,86	-30,59	-38,60	-30,00	-38,01	-35,88	-43,58	-51,28	-39,45±6,92
	W/KCO	-13,21	-16,54	-11,16	-7,59	-10,61	-6,22	-12,94	-11,11	-15,01	-17,44	-12,18±3,61

Αναφορικά με το ποσοστό αθροιστικά διερχόμενου 25%, παρατηρείται ότι οι διαφορές μεταξύ των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού WipFrag και του μοντέλου KCO, κυμαίνονται από -37,9% έως -1,31%. Η μέση τιμή της

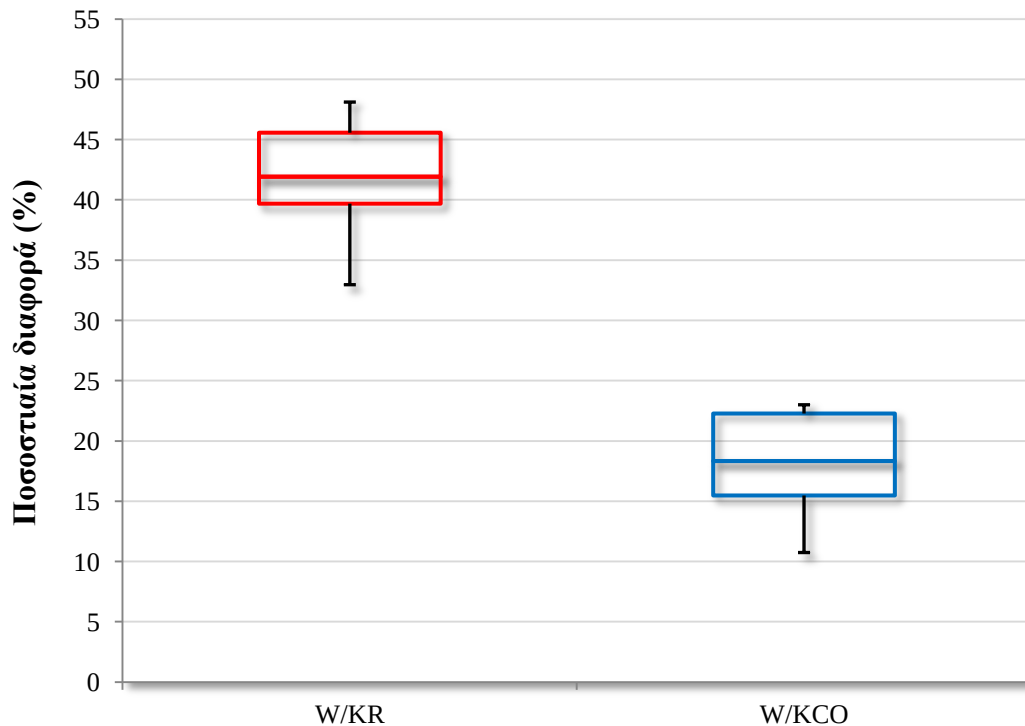
διαφοράς των δύο υπολογισμών ισούται με $-16,18\% \pm 13,75\%$. Για την περίπτωση των υπολογισμών που έγιναν μέσω του μοντέλου Kuz-Ram, παρατηρείται ότι η διαφοροποίηση τους σε σχέση με εκείνους που πραγματοποιήθηκαν μέσω του WipFrag, κυμαίνεται από $-59,48\%$ έως $-18,12\%$, με τη μέση τιμή της διαφοράς να ισούται με $-35,02\% \pm 15,88\%$ (το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι οι τιμές μεγέθους που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag είναι μικρότερες). Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζονται οι εκατοστιαίες διαφορές που αφορούν το ποσοστό αθροιστικά διερχόμενου 25%.



Εικόνα 4.5: Θηκογράμματα ποσοστιαίας διαφοράς (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO, για το 25% αθροιστικά διερχόμενο.

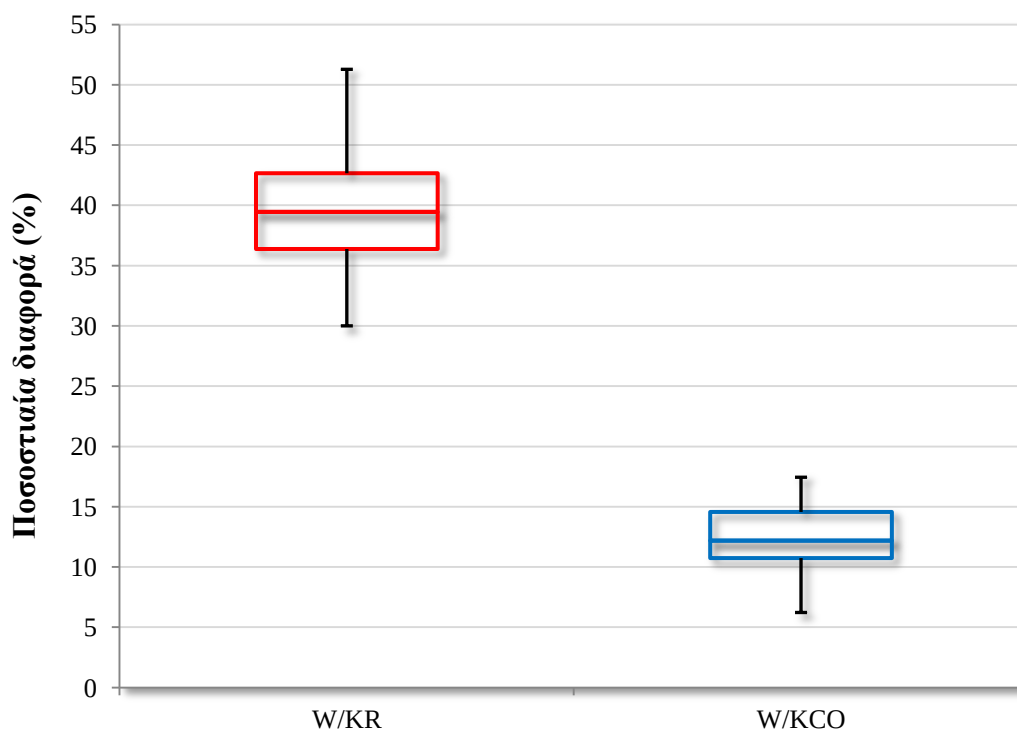
Σε ότι αφορά το ποσοστό διερχόμενου 50% και τη σύγκριση μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από τα WipFrag και KCO, παρατηρείται ότι οι μεταξύ τους διαφορές κυμαίνονται από $-23,01\%$ έως $-10,75\%$, με τη μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ των υπολογισμών να βρίσκεται στα $-18,34\% \pm 4,57\%$. Οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα WipFrag και Kuz-Ram κυμαίνονται από $-48,12\%$ έως $-32,97\%$, με τη μέση τιμή της διαφοράς να ισούται με $-41,93\% \pm 5,10\%$. Στην Εικόνα

4.6 παρουσιάζονται οι εκατοστιαίες διαφορές που αφορούν το ποσοστό αθροιστικά διερχόμενου 50%.



Εικόνα 4.6: Θηκογράμματα ποσοστιαίας διαφοράς (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO, για το 50% αθροιστικά διερχόμενο.

Τέλος, σε ότι αφορά το ποσοστό διερχόμενου 75%, οι διαφορές μεταξύ WipFrag και KCO κυμαίνονται από -17,44% έως -6,22%, με τη μέση τιμή των διαφορών να είναι -12,18% $\pm$ 3,61%. Μεταξύ WipFrag και Kuz-Ram οι διαφορές κυμαίνονται από -51,28% έως -30% ενώ η μέση τιμή της ισούται με -39,45% $\pm$ 6,92%. Στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζονται οι εκατοστιαίες διαφορές που αφορούν το ποσοστό αθροιστικά διερχόμενου 75%.



Εικόνα 4.7: Θηκογράμματα ποσοστιαίας διαφοράς (%), μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν μέσω του WipFrag και εκείνων που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα Kuz-Ram και KCO, για το 75% αθροιστικά διερχόμενο.

Η απόκλιση μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται από το WipFrag και εκείνων που εκτιμώνται από τα μοντέλα KCO και Kuz-Ram, οφείλεται κυρίως στο ότι τα μοντέλα αδυνατούν να συμπεριλάβουν στο τυπολόγιο τους όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος και ειδικότερα εκείνες που σχετίζονται με τις ιδιότητες και την κατάσταση του προς εξόρυξη όγκου, ενώ επίσης δεν μπορούν να συνυπολογίσουν κατά την εξαγωγή αποτελεσμάτων, το φαινόμενο της απελευθέρωσης των *in situ* λεπτομερών τεμαχίων. Επιπλέον, όπως ήδη έχει αναφερθεί, για την εφαρμογή των μοντέλων έχει γίνει η παραδοχή ότι το πέτρωμα είναι ένα ασυνεχές υλικό του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μέτρο ελαστικότητας) καθώς και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών έχουν σταθερή τιμή στον όγκο της βαθμίδας ανατίναξης, παραδοχή η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την πραγματοποίηση υπολογισμών με τη χρήση του WipFrag.

Ένας ακόμη λόγος που δικαιολογεί τη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ του λογισμικού προγράμματος WipFrag και των μοντέλων εκτίμησης KCO και Kuz-Ram, είναι το ότι τα μοντέλα αναφέρονται σε θραύση η οποία αποδίδεται στην πυροδότηση ενός μόνο διατρήματος (*single hole firing*). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη λαμβάνεται υπόψη

στην εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής του εξορυγμένου πετρώματος, η συνέργεια των διαφόρων εκρηκτικών κυμάτων που δημιουργούνται εξαιτίας της πυροδότησης περισσότερων του ενός διατηρήματος.

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 4.8 που ακολουθεί, όσο αυξάνεται ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δυο διαδοχικές πυροδοτήσεις, τόσο πιο έντονη είναι η μεταξύ τους συνέργεια σε ότι αφορά τη δημιουργία μικρότερων τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος, ως αποτέλεσμα της αυτογενούς θραύσης που επιτυγχάνεται λόγω της σύγκρουσης των θραυσμένων τεμαχίων πετρώματος, γεγονός το οποίο τελικά εξασφαλίζει την επίτευξη πιο ομοιόμορφης κατανομής. Η αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών διατηρημάτων ισχύει για ένα ορισμένο εύρος χρόνων πυροδότησης, πέραν του οποίου η συνέργεια παύει να υφίσταται.



Εικόνα 4.8: Επίδραση του χρόνου επιβράδυνσης στην κοκκομετρία του θραυσμένου πετρώματος (Onederra, 2007).

Το τυπολόγιο που προτείνει ο Onederra (2007) για τον υπολογισμό της τιμής του μεγέθους τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, συναρτήσει του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της πυροδότησης διαδοχικών διατηρημάτων, περιλαμβάνει τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$x_{50}^t = \frac{x_{insitu}}{1 + F^t} \quad (4.1)$$

όπου:

- x_{50}^t = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος, συναρτήσει του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της πυροδότησης διαδοχικών διατρημάτων (m)
- x_{insitu} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των in situ τεμαχίων (m)
- F^t = ο διορθωμένος συντελεστής αποδοτικότητας της ανατίναξης.

Η εξίσωση υπολογισμού του διορθωμένου συντελεστή F^t είναι:

$$F^t = F \cdot (1 + a_t) \quad (4.2)$$

όπου:

- F^t = ο διορθωμένος συντελεστής αποδοτικότητας της ανατίναξης
- F = ο μη διορθωμένος συντελεστής αποδοτικότητας της ανατίναξης
- a_t = συντελεστής που σχετίζεται με τη χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών πυροδοτήσεων.

Η εξίσωση υπολογισμού του μη διορθωμένου συντελεστή F είναι:

$$F = \frac{x_{insitu}}{x_{50}} - 1 \quad (4.3)$$

όπου:

- F = ο μη διορθωμένος συντελεστής αποδοτικότητας της ανατίναξης
- x_{insitu} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των in situ τεμαχίων (m)
- x_{50} = το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος (m)

Η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή a_t είναι:

$$\begin{cases} a_t = \left(1 - \frac{d_t}{T_{\min}}\right) & \text{εάν } \frac{d_t}{T_{\min}} < 1 \\ a_t = 0 & \text{εάν } \frac{d_t}{T_{\min}} \geq 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

όπου:

- a_t = συντελεστής που σχετίζεται με τη χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών πυροδοτήσεων
- d_t = ο χρόνος επιβράδυνσης μεταξύ γειτονικών διατρημάτων (ms)
- $T_{\min}$ = ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης του μετώπου (ms).

Σύμφωνα με το σχέδιο ανατίναξης που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ, ο χρόνος επιβράδυνσης που μεσολαβεί μεταξύ της πυροδότησης διαδοχικών διατρημάτων είναι 42ms. Στον Πίνακα 4.5 που ακολουθεί, δίδονται οι τιμές μεγέθους που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των Εξισώσεων 4.1 - 4.4.

Πίνακας 4.5: Μέγεθος τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αρθροιστικά διερχόμενο, συναρτήσει του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της πυροδότησης διαδοχικών διατρημάτων.

	ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
x_{50}^t (m)	0,329	0,343	0,337	0,342	0,329	0,320	0,313	0,329	0,353	0,348

4.3 Κατασκευή της κοκκομετρικής κατανομής

Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας διδακτορικής διατριβής, είναι η εύρεση μιας κατανομής η οποία θα περιγράφει με αυξημένη ακρίβεια την κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος των καταγεγραμμένων ανατινάξεων. Η σπουδαιότητα της ύπαρξης μιας τέτοιας κατανομής είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς θα επιτρέψει την αποτελεσματικότερη σχεδίαση μελλοντικών ανατινάξεων, συντελώντας στην αποδοτικότερη και ταυτόχρονα οικονομικότερη λειτουργία όλων των επιμέρους διεργασιών που έπονται της ανατίναξης. Ο καθορισμός του σχεδίου ανατίναξης, ο οποίος

γίνεται με βασικό γνώμονα την επιθυμητή κοκκομετρία, θα μπορεί να υλοποιείται περιορίζοντας σημαντικά τον βαθμό αβεβαιότητας που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη διαδικασία, αφού πλέον θα υπάρχουν μαθηματικές σχέσεις που θα συνδέουν τα χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης με την κοκκομετρία του εξορυγμένου όγκου.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η κοσκίνιση του συνόλου του εξορυγμένου όγκου αμέσως μετά την ολοκλήρωση μιας ανατίναξης για την κατασκευή της αθροιστικής κατανομής μεγέθους των εξορυγμένων τεμαχίων, είναι μια χρονοβόρος και πρακτικά μη εφικτή διαδικασία, λόγω του εξαιρετικά υψηλού κόστους υλοποίησης. Η κοσκίνιση τμήματος του θραυσμένου όγκου για τον σκοπό αυτό είναι κάτι που επίσης δεν συνιστάται, καθότι το δείγμα το οποίο λαμβάνεται τις περισσότερες φορές δεν είναι αντιπροσωπευτικό του συνολικού όγκου.

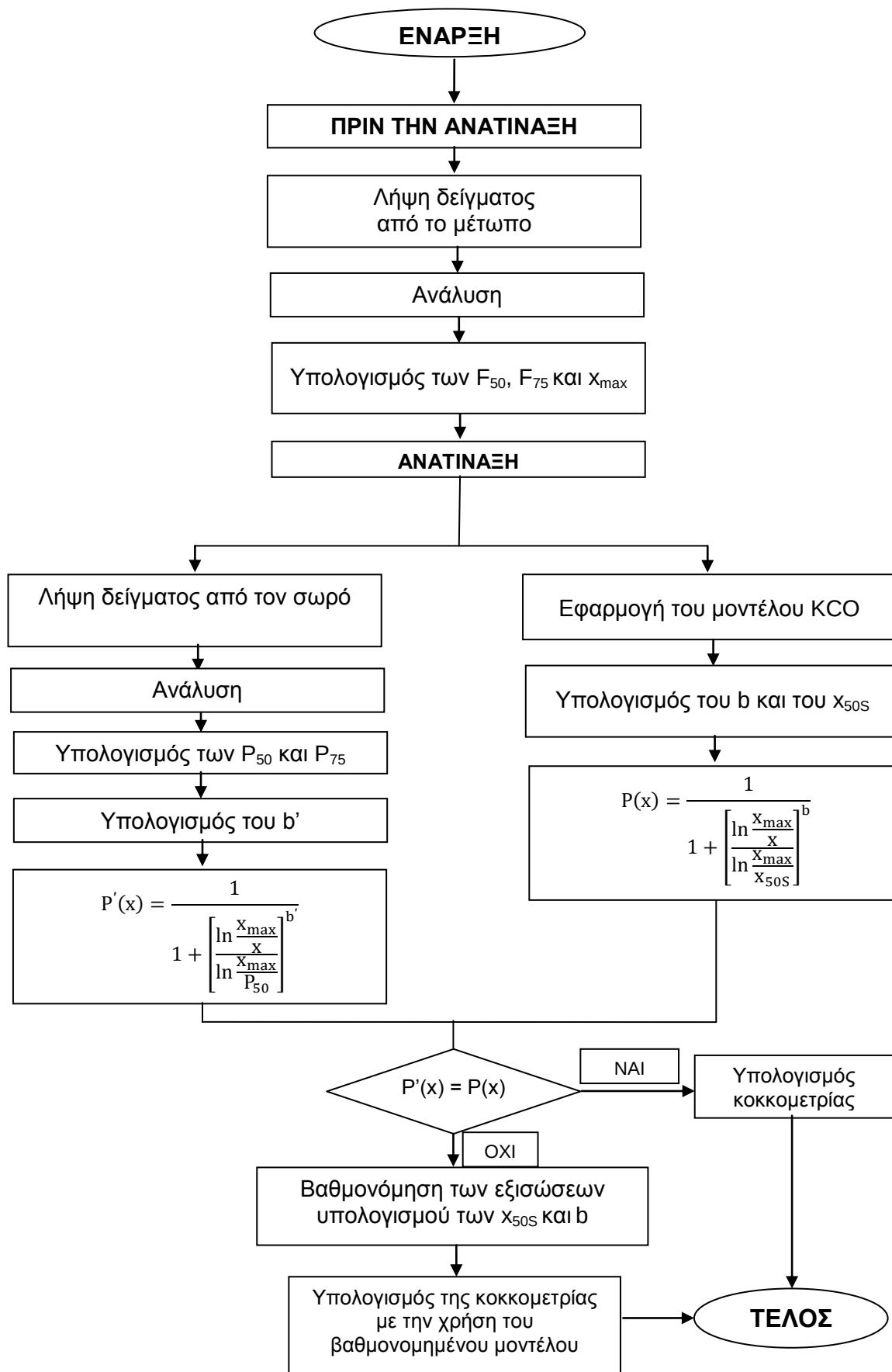
Τα τελευταία χρόνια η χρήση φωτογραφικών μεθόδων για τον υπολογισμό του θρυμματισμού που επιτυγχάνεται μετά την ολοκλήρωση μιας ανατίναξης, τυγχάνει ιδιαίτερης αποδοχής από πολλούς μελετητές, αλλά και από μεγάλο αριθμό λατομικών επιχειρήσεων, ανεξάρτητα από τα όποια μειονεκτήματα παρουσιάζει. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που εξάγονται μέσω των λογισμικών ανάλυσης εικόνων, έχει επανειλημμένα τεθεί υπό αμφισβήτηση λόγω της περιορισμένης «ακρίβειας» που παρουσιάζουν (απόκλιση μεταξύ «μετρούμενης» και «πραγματικής» τιμής). Ωστόσο, η αυξημένη «συνέπεια» των υπολογισμών που πραγματοποιούνται μέσω αυτών, τα καθιστούν ως την πλέον ενδεδειγμένη λύση, ειδικότερα για εκείνες τις περιπτώσεις που το ζητούμενο είναι ο έλεγχος του τρόπου με τον οποίο μετατοπίζεται μια κοκκομετρική κατανομή, εξαιτίας των όποιων αλλαγών γίνονται σε ένα σχέδιο ανατίναξης.

Για την κατασκευή της κοκκομετρικής κατανομής χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Swebrec, σε συνδυασμό με ορισμένα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό WipFrag. Η εξίσωση Swebrec, πλεονεκτεί έναντι της Rosin-Rammler, στο ότι μπορεί και εκτιμά κατανομές εύρους τριών τάξεων μεγέθους ($1 < x < 500\text{mm}$) με ιδιαίτερα αυξημένη αποτελεσματικότητα ($R^2=0,995$), ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιοπιστία της στην εκτίμηση του κρίσιμου τμήματος της κατανομής που σχετίζεται με τα πολύ λεπτομερή τεμάχια (-25mm). Ένα εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα της Swebrec είναι ότι έχοντας ως δεδομένο την κατανομή των τεμαχίων μέσου και μεγάλου μεγέθους και εφαρμόζοντας τη μέθοδο της προβολής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της κοκκομετρικής κατανομής των λεπτομερών τεμαχίων πετρώματος (Ouchterlony 2005a).

Βάσει των παραπάνω, ως σταθερά σημεία για την κατασκευή της κατανομής χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές μεγέθους που υπολογιστήκαν μέσω του WipFrag και αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 50% και 75%. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή της κοκκομετρικής κατανομής παρατίθεται στην Εικόνα 4.9 που ακολουθεί.

Η επιλογή των συγκεκριμένων ποσοστών αθροιστικά διερχόμενου (50% και 75%), έγινε με κριτήριο τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα με την οποία πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί των τεμαχίων μέσου και μεγάλου μεγέθους από τα λογισμικά προγράμματα ανάλυσης εικόνων, έναντι εκείνων των υπολογισμών που σχετίζονται με τα λεπτομερή τεμάχια (Sudhakar J. *et al.* 2006). Τονίζεται για μια ακόμα φορά, ότι οι εργασίες της προετοιμασίας του δείγματος καθώς και εκείνες της λήψης και ανάλυσης των φωτογραφιών, πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας όλα όσα προβλέπονται από τη μεθοδολογία, γεγονός το οποίο διασφάλισε σε πολύ μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω του WipFrag.

Έχοντας ως σταθερά σημεία της κατανομής τις τιμές μεγέθους που υπολογίστηκαν από το WipFrag για τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 50% και 75% και εφαρμόζοντας τη διαδικασία της ανάδρομης ανάλυσης (back analysis), υπολογίστηκε η τιμή του συντελεστή b' για κάθε μια από τις δέκα ανατινάξεις που πραγματοποιήθηκαν. Οι τιμές του συντελεστή b' παρατίθενται στον Πίνακα 4.6.

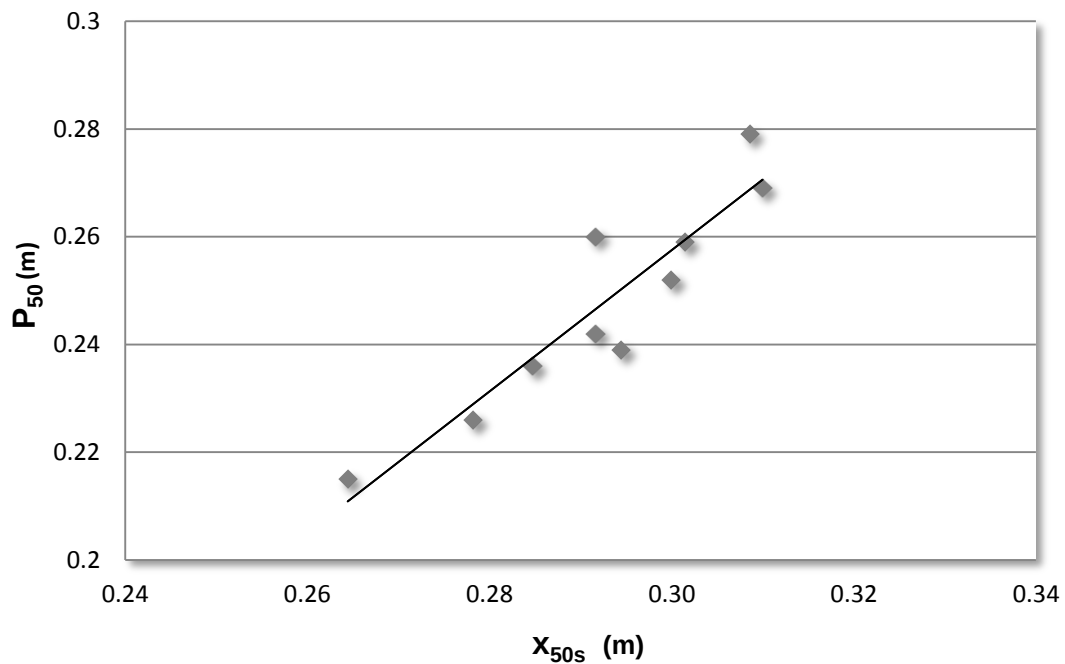


Εικόνα 4.9: Μεθοδολογία βαθμονόμησης των εξισώσεων υπολογισμού της κοκκομετρικής κατανομής του λατομείου Χάλυψ.

Πίνακας 4.6: Συντέλεσης b' που υπολογίστηκε μέσω ανάδρομης ανάλυσης.

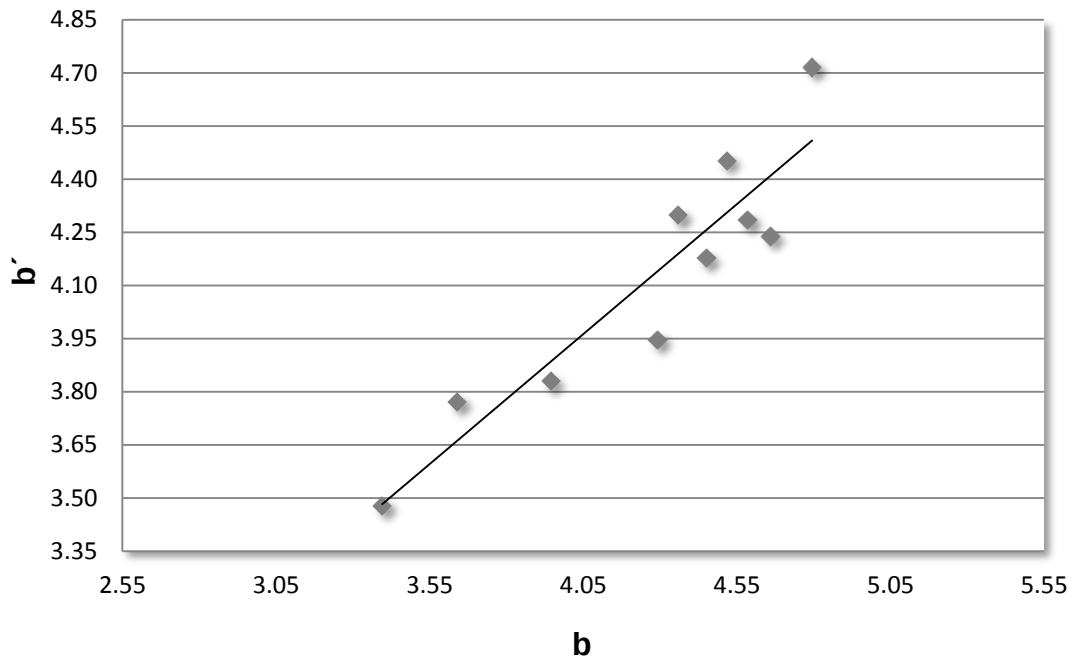
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ										
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
b'	3,946	3,771	4,299	4,716	3,830	4,177	4,238	4,285	4,453	3,478

Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές των P_{50} και x_{50s} για κάθε μια από τις δέκα ανατινάξεις που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 4.10: Μεγέθη τεμαχίων που αντιστοιχούν στα P_{50} και x_{50s} .

Στην Εικόνα 4.11 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων b και b' για κάθε μια από τις δέκα ανατινάξεις που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 4.11: Τιμές των παραμέτρων b και b' .

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η διασπορά των σημείων είναι μικρή, γεγονός το οποίο ενδεχομένως μαρτυρά μια ιδιαίτερα αυξημένη συσχέτιση, τόσο μεταξύ των P_{50} και x_{50s} , όσο και μεταξύ των b και b' . Επιπλέον, η κλίση της διασποράς δείχνει μια μάλλον ευθεία γραμμή χωρίς έντονα αποκλίνουσες τιμές, ένδειξη ότι υπάρχει περισσότερο γραμμική (linear) παρά καμπυλόγραμμη (curvilinear) συσχέτιση μεταξύ των τιμών.

Ο έλεγχος του βαθμού συσχέτισης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SPSS (Statistical Product & Service Solutions) του οίκου IBM Software USA, ένα εξαιρετικά ισχυρό και δημοφιλές εργαλείο ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης σύνθετων ερευνητικών προβλημάτων.

Οι συσχετίσεις συμβολίζονται με το γράμμα r , καλούνται συσχετίσεις Pearson, καθώς η σχέση υπολογισμού τους αποδίδεται στον Karl Pearson και λαμβάνουν τιμές που κυμαίνονται από -1 έως +1. Ο υπολογισμός τους γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης:

$$r = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (4.5)$$

όπου:

r = η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών x και y

$\text{cov}(x,y)$ = η συνδιακύμανση των μεταβλητών x και y

σ_x, σ_y = οι τυπικές αποκλίσεις των μεταβλητών x και y .

Παρότι η παραπάνω σχέση υπολογισμού στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι δύο εμπλεκόμενες μεταβλητές ακολουθούν περίπου την κανονική κατανομή, η σχέση συχνά χρησιμοποιείται ακόμα και σε περιπτώσεις που η υπόθεση της κανονικότητας δεν ικανοποιείται ή και σε περιπτώσεις όπου μια από τις μεταβλητές δεν είναι συνεχής.

Η τιμή $r = +1$ δηλώνει μια τέλεια θετική συσχέτιση. Το «τέλεια» σημαίνει ότι κάποια μεταβλητή είναι με ακρίβεια προβλέψιμη από κάποια άλλη. Το «θετική» σημαίνει ότι όταν η τιμή μιας μεταβλητής αυξάνεται, η τιμή της άλλης μεταβλητής επίσης αυξάνει ή αντίθετα όταν η τιμή της μιας μειώνεται, μειώνεται επίσης και η τιμή της άλλης. Σε ότι αφορά την περίπτωση της τέλει αρνητικής συσχέτισης ($r = -1$), όταν η τιμή της μίας μεταβλητής αυξάνει, η τιμή της άλλης μειώνεται και αντίστροφα.

Μια θετική αλλά όχι τέλεια συσχέτιση ($0 < r < 1$), δηλώνει ότι καθώς η τιμή μιας μεταβλητής αυξάνεται, η τιμή της άλλης μεταβλητής επίσης έχει την τάση να αυξάνει. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή της συσχέτισης, τόσο ισχυρότερη είναι η τάση αυτή, ενώ όσο πιο κοντά στο 0 είναι η τιμή της συσχέτισης, η τάση αυτή είναι ασθενέστερη. Αντίστοιχα μια αρνητική αλλά όχι τέλεια συσχέτιση ($-1 < r < 0$), δηλώνει ότι καθώς η τιμή της μιας μεταβλητής αυξάνεται η τιμή της άλλης μειώνεται. Όταν το $r = 0$, τότε μεταξύ των δύο μεταβλητών δεν παρατηρείται καμία απολύτως συσχέτιση.

Δύο εξίσου σημαντικά στατιστικά μεγέθη τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία εκτίμησης της συσχέτισης που παρατηρείται μεταξύ δύο μεταβλητών, είναι το «τετράγωνο του r » (R^2) και το «προσαρμοσμένο τετράγωνο του r » ($\text{adj}R^2$). Η τιμή του R^2 , προσδιορίζει το κομμάτι της διασποράς της εξαρτημένης μεταβλητής για το οποίο ευθύνεται η ανεξάρτητη μεταβλητή, ενώ το $\text{adj}R^2$ είναι μια πιο ακριβής και ταυτόχρονα λιγότερο αισιόδοξη εκτίμηση σε σχέση με το R^2 .

Όπως συμβαίνει με τις περισσότερες στατιστικές διαδικασίες, για κάθε συσχέτιση θα πρέπει να υπολογίζεται και η τιμή της «σημαντικότητας» (significance, p), προκειμένου να καθοριστεί εάν η συσχέτιση προέκυψε τυχαία ή όχι. Η στατιστική σημαντικότητα αποτελεί δείκτη της σπανιότητας ενός συγκεκριμένου αποτελέσματος. Είναι μια δήλωση

της πιθανότητας, να προκύψει ένας συγκεκριμένος συντελεστής συσχέτισης για ένα δείγμα δεδομένων, στην περίπτωση που δεν υπάρχει συσχέτιση (δηλαδή $r = 0$) στον πληθυσμό από τον οποίο λήφθηκε το δείγμα. Ως εκ τούτου, μια τιμή σημαντικότητας $p < 0,05$, δηλώνει ότι υπάρχει πιθανότητα μικρότερη από 5% η συγκεκριμένη συσχέτιση να προέκυψε τυχαία.

Στον Πίνακα 4.7 που ακολουθεί, παρατίθενται τα αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ των τιμών μεγέθους του 50% αθροιστικά διερχόμενου, που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO.

Πίνακας 4.7: Συσχέτιση των τιμών μεγέθους που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO, οι οποίες αντιστοιχούν στο 50% αθροιστικά διερχόμενο.

Model Summary	Pearson Cor.	0,931
	p	0,01
	R²	0,867
	Adj R²	0,851
	Std. Error of the Est.	0,008
ANOVA	Sum of Sq. Regression	0,003 (df=1)
	Sum of Sq. Residual	0,001 (df=8)
	Sum of Sq. Total	0,004 (df=9)
	Mean Sq Regression	0,003
	Mean Sq Residual	0,001
	F	52,32
	p_F	0,01

Από τον Πίνακα 4.7 προκύπτει ότι η συσχέτιση μεταξύ των τιμών μεγέθους που εκτιμώνται από τα WipFrag και KCO και αφορούν το 50% του αθροιστικά διερχόμενου, είναι ιδιαίτερα αυξημένη και ισούται με $r=0,931$. Το 86,7% της διακύμανσης των τιμών του P_{50} , μπορεί να περιγραφεί από τις τιμές του x_{50s} , με την τιμή της τυπικής απόκλισης των αναμενόμενων τιμών για την εξαρτημένη μεταβλητή να ισούται με 0,008. Το επίπεδο σημαντικότητας που εξετάστηκε είναι αμφίπλευρο (two-tailed) και η τιμή σημαντικότητας p που υπολογίστηκε για την παραπάνω συσχέτιση είναι ίση με 0,01, γεγονός το οποίο δηλώνει ότι η υψηλή τιμή συσχέτισης δεν προέκυψε τυχαία. Η τιμή του F , η οποία ισούται με τον λόγο του μέσου τετραγώνου της παλινδρόμησης (Mean Sq Regression) προς το μέσο τετράγωνο των υπολοίπων (Mean Sq Residual), είναι ίση με 52,32. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη της τιμής $F_{table}=4,96$ ($\alpha=0,05$, $N=10$), που λαμβάνεται από τον πίνακα

των F-statistics, γεγονός το οποίο ενισχύει σημαντικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της παλινδρόμησης.

Η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των τιμών μεγέθους που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO, εξετάστηκε και για τα μεγέθη τεμαχίων πετρώματος που αντιστοιχούν στο 75% αθροιστικά διερχόμενο και παρατίθεται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Συσχέτιση των τιμών μεγέθους που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO, οι οποίες αντιστοιχούν στο 75% αθροιστικά διερχόμενο.

Model Summary	Pearson Cor.	0,945
	P	0,001
	R²	0,894
	Adj R²	0,880
	Std. Error of the Est.	0,012
ANOVA	Sum of Sq. Regression	0,010 (df=1)
	Sum of Sq. Residual	0,001 (df=8)
	Sum of Sq. Total	0,011 (df=9)
	Mean Sq Regression	0,010
	Mean Sq Residual	0,000
	F	67,30
	P_F	0,001

Είναι προφανές από τον Πίνακα 4.8, ότι και για την περίπτωση των τιμών μεγέθους που σχετίζονται με το 75% αθροιστικά διερχόμενο, υπάρχει ιδιαίτερα αυξημένη συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω των WipFrag και KCO. Η τιμή του r είναι ίση με 0,945, ενώ η τιμή της σημαντικότητας ισούται με 0,001, γεγονός το οποίο δηλώνει ότι και σε αυτή την περίπτωση η συσχέτιση δεν προέκυψε τυχαία. Η τιμή του F είναι 67,30, αρκετά δηλαδή μεγαλύτερη της τιμής $F_{\text{table}}=4,96$ ($\alpha=0,05$, $N=10$) που λαμβάνεται από τον πίνακα των F-statistics, γεγονός το οποίο ενισχύει σημαντικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της παλινδρόμησης.

Βάσει των παραπάνω, μπορούμε να θεωρηθεί ως δεδομένη την αυξημένη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται από το WipFrag και το μοντέλο KCO και αφορούν τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 50% και 75%, γεγονός το οποίο ενισχύει την επιλογή χρήσης των τιμών μεγέθους P_{50} και P_{75} που υπολογίστηκαν από το WipFrag, ως σταθερά σημεία για την κατασκευή της κοκκομετρικής κατανομής.

Στον Πίνακα 4.9 παρατίθενται τα αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ του συντελεστή b που υπολογίστηκε από την εξίσωση του μοντέλου KCO και του συντελεστή b' που προέκυψε εφαρμόζοντας τη διαδικασία της ανάδρομης ανάλυσης.

Πίνακας 4.9: Συσχέτιση του συντελεστή b που υπολογίστηκε από το τυπολόγιο του μοντέλου KCO και του b' που προέκυψε με τη διαδικασία της ανάδρομης ανάλυσης.

Model Summary	Pearson Cor.	0,926
	P	0,01
	R²	0,857
	Adj R²	0,839
	Std. Error of the Est.	0,146
ANOVA	Sum of Sq. Regression	1,021 (df=1)
	Sum of Sq. Residual	0,170 (df=8)
	Sum of Sq. Total	1,191 (df=9)
	Mean Sq Regression	1,021
	Mean Sq Residual	0,021
	F	48,056
	PF	0,01

Από τον Πίνακα 4.9 προκύπτει ότι η συσχέτιση μεταξύ των συντελεστών b και b' είναι ιδιαίτερα αυξημένη ($r=0,926$). Το 85,7% της διακύμανσης των τιμών του b μπορεί να περιγραφεί από τις τιμές του b' , με την τιμή της τυπικής απόκλισης των αναμενόμενων τιμών για την εξαρτημένη μεταβλητή, να ισούται με 0,146. Το αμφίπλευρο επίπεδο σημαντικότητας που εξετάστηκε για την παραπάνω συσχέτιση είναι ίσο με 0,01, γεγονός το οποίο δηλώνει ότι η αυξημένη συσχέτιση δεν προέκυψε τυχαία. Η τιμή του F ισούται με 48,06 και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της τιμής $F_{table}=4,96$, γεγονός το οποίο ενισχύει σημαντικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της παλινδρόμησης.

Στη συνέχεια βαθμονομήθηκαν οι σχέσεις υπολογισμού του x_{50} και του συντελεστή b του μοντέλου KCO, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία της κατανομής που περιγράφει την κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος.

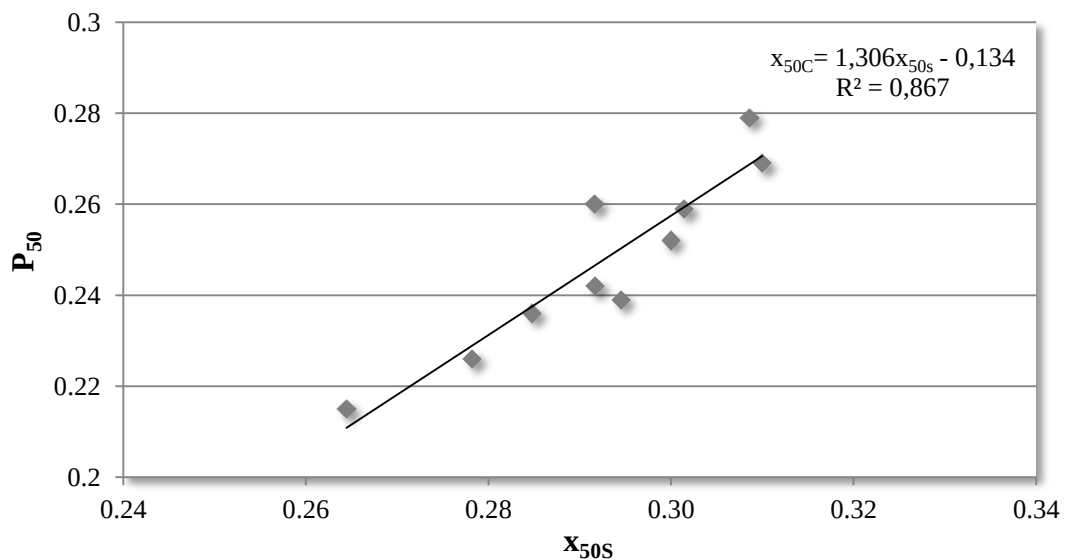
Η διορθωμένη σχέση για την εκτίμηση του μεγέθους τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (x_{50C}) είναι η εξής:

$$x_{50C} = 1,306 \cdot x_{50S} - 0,134 \quad (4.6)$$

Τα στατιστικά δεδομένα και η γραφική απεικόνιση της εξίσωσης υπολογισμού του x_{50C} , παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10 και στην Εικόνα 4.12 που ακολουθούν.

Πίνακας 4.10: Στατιστικά δεδομένα της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του 50% αθροιστικά διερχόμενου (x_{50C}).

	Dependent Variable x_{50C}			
	Coef.	Std. Error	-95%CI	+95%CI
x_{50S}	1,306	0,181	0,890	1,722
Intercept	-0,134	0,053	-0,256	-0,012



Εικόνα 4.12: Γραφική απεικόνιση της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του 50% αθροιστικά διερχόμενου (x_{50C}).

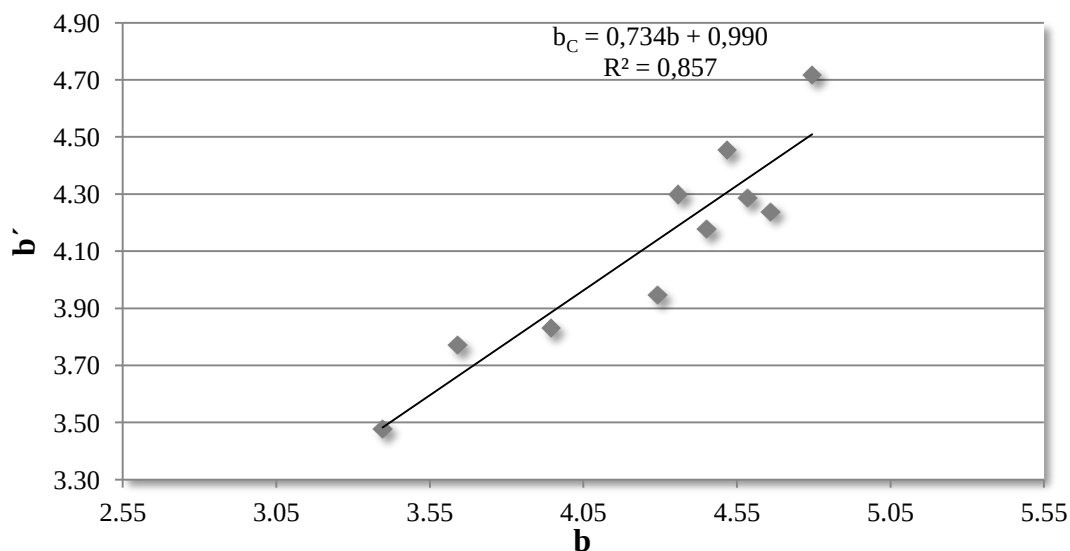
Η βαθμονομημένη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή b' του (b_C) είναι η εξής:

$$b_C = 0,734 \cdot b + 0,990 \quad (4.7)$$

Τα στατιστικά δεδομένα και η γραφική απεικόνιση της εξίσωσης υπολογισμού του b_C , παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11 και στην Εικόνα 4.13 που ακολουθούν.

Πίνακας 4.11: Στατιστικά δεδομένα της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του συντελεστή b_C .

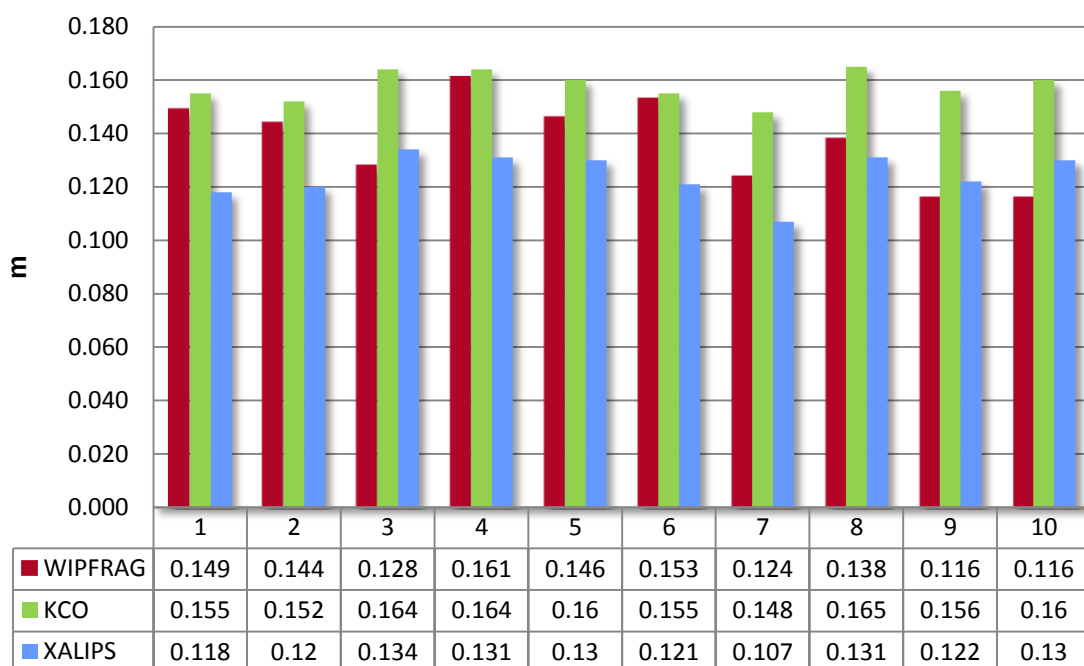
	Dependent Variable b_C			
	Coef.	Std. Error	-95%CI	+95%CI
b	0,734	0,106	0,490	0,978
Intercept	0,990	0,454	-0,057	2,036



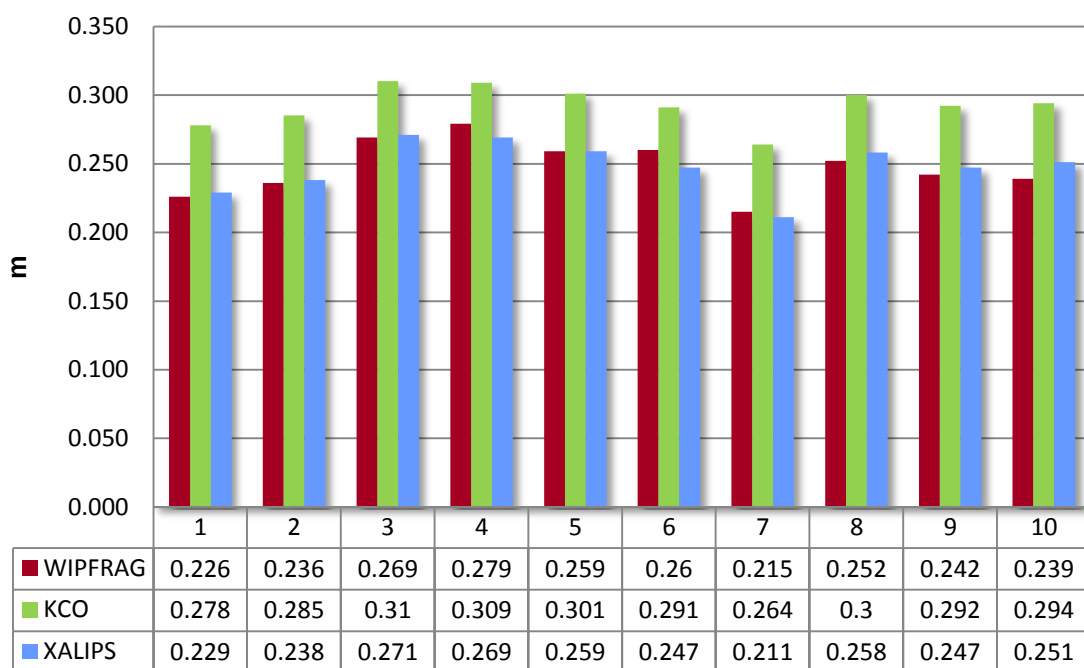
Εικόνα 4.13: Γραφική απεικόνιση της βαθμονομημένης εξίσωσης υπολογισμού του συντελεστή b_C .

Στην Εικόνα 4.14 και στην Εικόνα 4.15, παρατίθενται συγκεντρωμένες οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50%, 75% και 90%, οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού WipFrag, του μοντέλου KCO και της κατανομής του λατομείου Χάλυψ, που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας τα μεγέθη x_{50C} και b_C .

25% Αθροιστικά Διερχόμενο

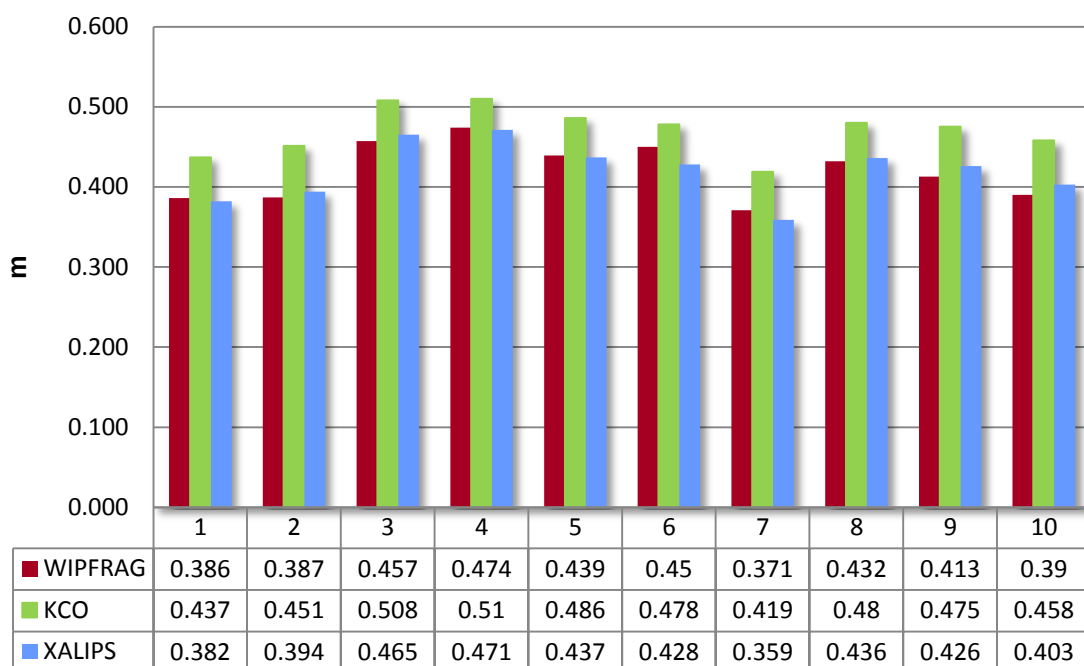


50% Αθροιστικά Διερχόμενο

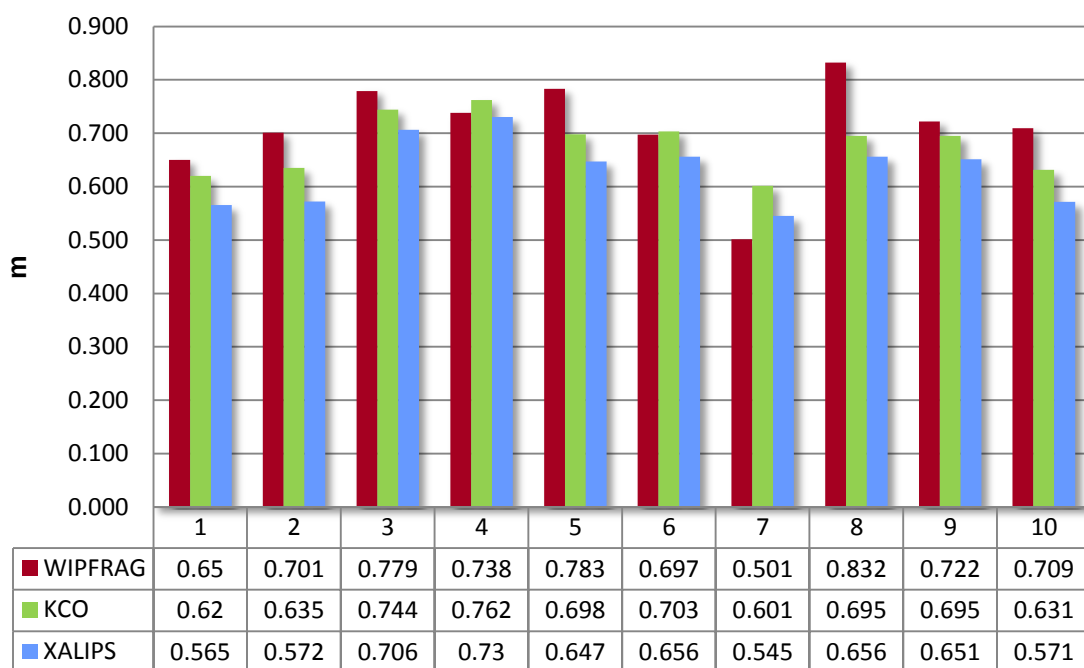


Εικόνα 4.14: Σύγκριση των τιμών μεγέθους της κοκκομετρικής κατανομής XALIPS των καταγεγραμμένων ανατινάξεων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25% και 50%, με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO.

75% Αθροιστικά Διερχόμενο



90% Αθροιστικά Διερχόμενο



Εικόνα 4.15: Σύγκριση των τιμών μεγέθους της κοκκομετρικής κατανομής XALIPS των καταγεγραμμένων ανατινάξεων που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 75% και 90%, με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν μέσω των WipFrag και KCO.

Από τα γραφήματα προκύπτει ότι για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι τιμές μεγέθους του 25% αθροιστικά διερχόμενου που εκτιμώνται από την κοκκομετρική κατανομή του λατομείου Χάλυψ που κατασκευάστηκε, είναι μικρότερες από εκείνες που υπολογίζονται μέσω του WipFrag. Η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μετρήσεων, αποδίδεται στη σχετικά περιορισμένη αποτελεσματικότητα του WipFrag στην εκτίμηση τεμαχίων μικρού μεγέθους. Ένας επιπλέον παράγοντας που δικαιολογεί τη διαφοροποίηση αυτή, είναι η αυξημένη αποτελεσματικότητα που παρουσιάζει η εξίσωση Swebrec που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της κοκκομετρικής κατανομής, σε ότι αφορά την εκτίμηση των λεπτομερών τεμαχίων, έναντι της εξίσωσης Rosin-Rammler που χρησιμοποιεί το λογισμικό WipFrag.

Διαφορές ωστόσο εντοπίζονται και στις τιμές μεγέθους του 90% αθροιστικά διερχόμενου. Οι τιμές που υπολογίζονται από την κοκκομετρική κατανομή του λατομείου Χάλυψ, είναι μικρότερες από εκείνες που προέκυψαν μέσω του WipFrag. Το γεγονός αυτό πιθανά οφείλεται στο ότι η εξίσωση R-R που χρησιμοποιείται από το λογισμικό WipFrag, τείνει ασυμπτωτικά στο ποσοστό 100%, σε αντίθεση με την εξίσωση Swebrec, για την εφαρμογή της οποίας απαιτείται μια τιμή για το μέγιστο μέγεθος τεμαχίου x_{max} .

Από τα διαγράμματα προκύπτει επίσης ότι για τα διάφορα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου, οι τιμές μεγέθους που υπολογίστηκαν από το μοντέλο KCO, είναι μεγαλύτερες που τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν μέσω της κοκκομετρικής κατανομής του λατομείου Χάλυψ, με την απόκλιση μεταξύ των δύο υπολογισμών να είναι σχεδόν σταθερή για όλα τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου.

Με βαθμονομημένες πλέον τις σχέσεις υπολογισμού του μεγέθους εξορυγμένων τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο και του συντελεστή b , μπορεί να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο η κοκκομετρική κατανομή του λατομείου Χάλυψ, θα μετατοπιστεί εξαιτίας των όποιων μεταβολών πραγματοποιηθούν στο σχέδιο ανατίναξης. Μέσω των βαθμονομημένων εξισώσεων, παρέχεται η δυνατότητα αποτελεσματικότερου σχεδιασμού μελλοντικών ανατινάξεων. Η σχεδίαση τους πλέον δεν θα βασίζεται στις γενικευμένες εξισώσεις των διαφόρων μοντέλων εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής του εξορυγμένου πετρώματος, αλλά σε εξισώσεις οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου λατομικού χώρου. Οι βαθμονομημένες εξισώσεις αποτυπώνουν καλύτερα τον βαθμό αλληλεπίδρασης που παρατηρείται μεταξύ των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και της κοκκομετρίας που επιτυγχάνεται κατά την εξόρυξη του πετρώματος με εκρηκτικές ύλες, βάσει πραγματικών δεδομένων.

Μέσω της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε παραπάνω, καθίσταται εφικτή η δημιουργία ενός εργαλείου εκτίμησης το οποίο δύναται να βελτιώνεται με τη συνεχή προσθήκη πραγματικών δεδομένων, επιτρέποντας τη διαρκώς αποτελεσματικότερη ποσοτικοποίηση του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται η κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος, ως αποτέλεσμα των αλλαγών που πραγματοποιούνται στο εφαρμοζόμενο σχέδιο ανατίναξης.

4.4 Συσχέτιση παραμέτρων

Μια από τις βασικές επιδιώξεις της παρούσας διδακτορικής διατριβής, είναι η διερεύνηση της ύπαρξης συσχετίσεων μεταξύ των καταγεγραμμένων παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μια μήτρα συσχετίσεων (correlation matrix), με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής επεξεργασίας δεδομένων SPSS.

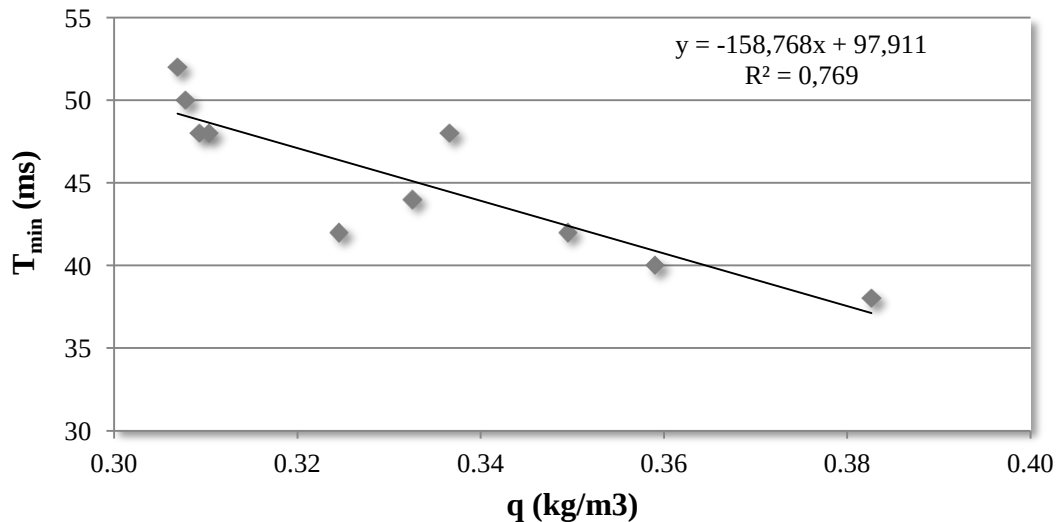
Με τη βοήθεια της μήτρας, αρχικά εξετάστηκε εάν υπάρχει συσχέτιση του ελάχιστου χρόνου απόκρισης $T_{\min}$ με ορισμένες από τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης. Οι σημαντικότερες συσχετίσεις που εντοπίστηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12: Σημαντικότερες συσχετίσεις του χρόνου $T_{\min}$ με ορισμένες από τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης.

Dependent Variable: $T_{\min}$						
	r	R ²	Sig.	Std. Error	Intercept	Slope
q	-0,877	0,769	0,01	2,363	97,911	-158,768
B_L	0,938	0,880	0,01	1,705	16,819	4,602
P₅₀	0,906	0,821	0,01	2,080	-7,466	212,622
x_{50s}	0,901	0,811	0,01	2,137	-41,479	296,338
RR₅₀	-0,945	0,892	0,01	1,614	79,056	-8,075

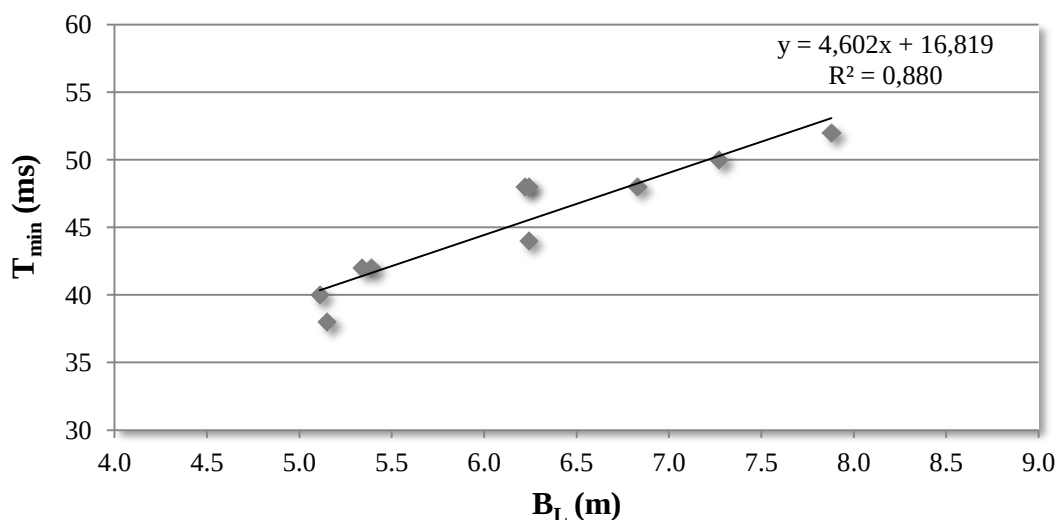
Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.12, μεταξύ του χρόνου $T_{\min}$ και της ειδικής κατανάλωσης E.Y. (q), παρατηρείται ιδιαίτερα αυξημένη αρνητική συσχέτιση ($r=-0,837$). Η αρνητική συσχέτιση μπορεί να ερμηνευτεί φυσικά, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής κατανάλωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά m³ και

επομένως η εκλυόμενη κρουστική ενέργεια, η οποία προκαλεί την ταχύτερη μετατόπιση του εξορυγμένου πετρώματος. Η τιμή σημαντικότητας είναι 0,01, γεγονός το οποίο δηλώνει ότι η συγκεκριμένη συσχέτιση δεν προέκυψε τυχαία. Στην Εικόνα 4.16 παρατίθεται η γραφική απεικόνιση της παραπάνω συσχέτισης



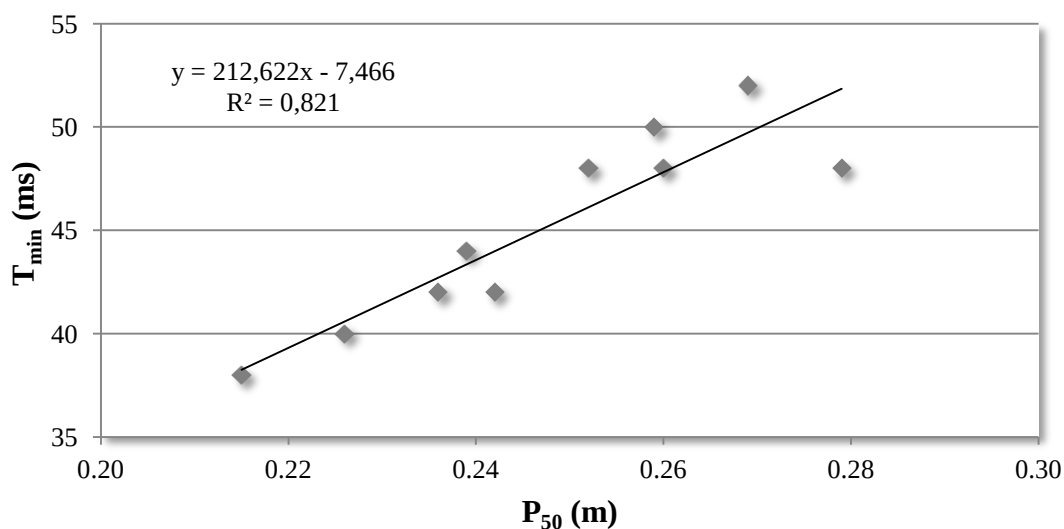
Εικόνα 4.16: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και της ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικής ύλης (q).

Σε ότι αφορά τη σχέση μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης T_{min} και της τιμής του «τοπικού» φορτίου (B_L), από τον Πίνακα 4.12 προκύπτει ότι η τιμή του r ισούται με 0,938, δηλώνοντας μια ιδιαίτερα αυξημένη θετική συσχέτιση, η οποία βάσει της τιμής σημαντικότητας δεν προέκυψε τυχαία. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του φορτίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει το κρουστικό κύμα προκειμένου να φτάσει στο μέτωπο της βαθμίδας και επομένως τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή της πυροδότησης της εκρηκτικής ύλης μέχρι τη μετακίνηση του μετώπου. Στην Εικόνα 4.17 παρατίθεται η γραφική απεικόνιση της παραπάνω συσχέτισης.

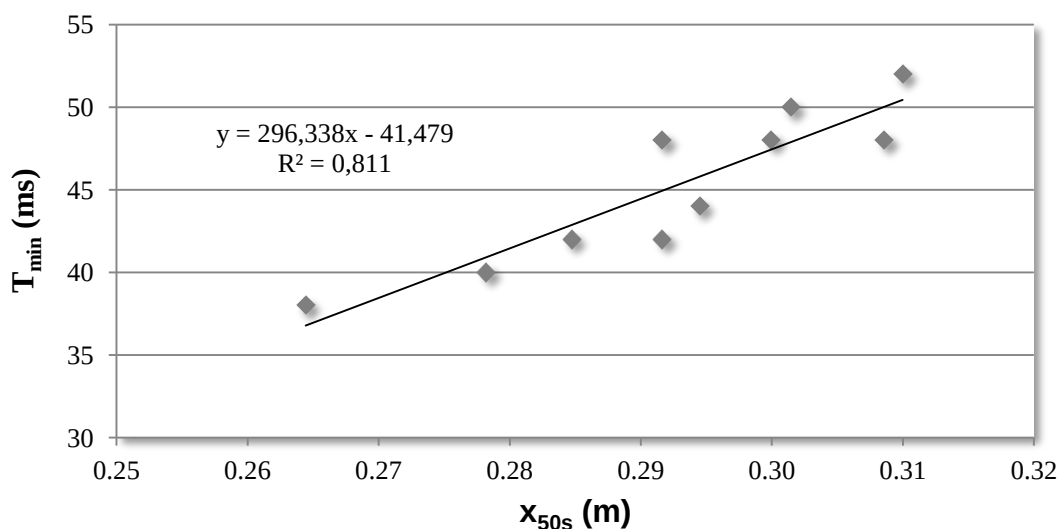


Εικόνα 4.17: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και του «τοπικού» φορτίου (B_L).

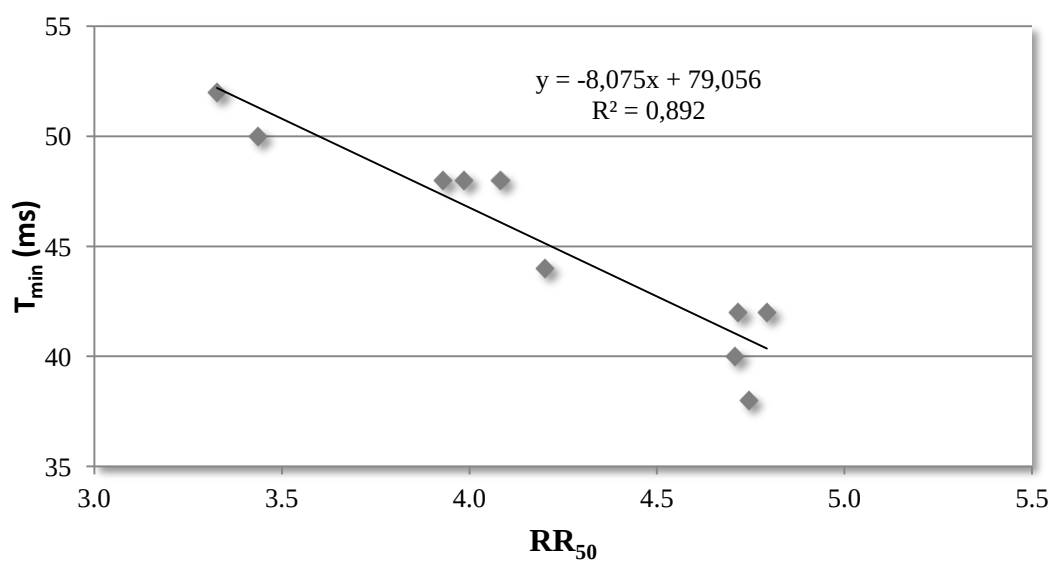
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.12, αυξημένη θετική συσχέτιση εντοπίζεται μεταξύ του T_{min} και του P_{50} ($r=0,906$, $p=0,01$), αλλά και μεταξύ του T_{min} και του x_{50S} ($r=0,901$, $p=0,01$), ενώ αυξημένη αλλά αρνητική είναι η συσχέτιση μεταξύ των T_{min} και RR_{50} ($r=-0,945$, $p=0,01$). Οι συσχετίσεις του T_{min} με το P_{50} , το x_{50S} και το RR_{50} , παρατίθενται στην Εικόνα 4.18, Εικόνα 4.19 και Εικόνα 4.20 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.18: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και της τιμής μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του εξορυγμένου πετρώματος (P_{50}) που υπολογίστηκε με τη βοήθεια του WipFrag.



Εικόνα 4.19: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και της τιμής μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του εξορυγμένου πετρώματος (x_{50s}) που υπολογίστηκε με τη χρήση του μοντέλου KCO.



Εικόνα 4.20: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}) και του λόγου κατάτμησης RR_{50} .

Για την περίπτωση του εξορυγμένου πετρώματος του λατομείου Χάλυψ, η αρνητική συσχέτιση μεταξύ του T_{min} και του λόγου κατάτμησης RR_{50} , πιθανά οφείλεται στη μερική διαφυγή των αερίων της έκρηξης από ρωγμές που προϋπάρχουν στο πέτρωμα, γεγονός το οποίο αφενός οδηγεί στην αύξηση του χρόνου που απαιτείται προκειμένου να ξεκινήσει η απόσπαση του πετρώματος από τη φυσική του θέση, αφετέρου επιφέρει

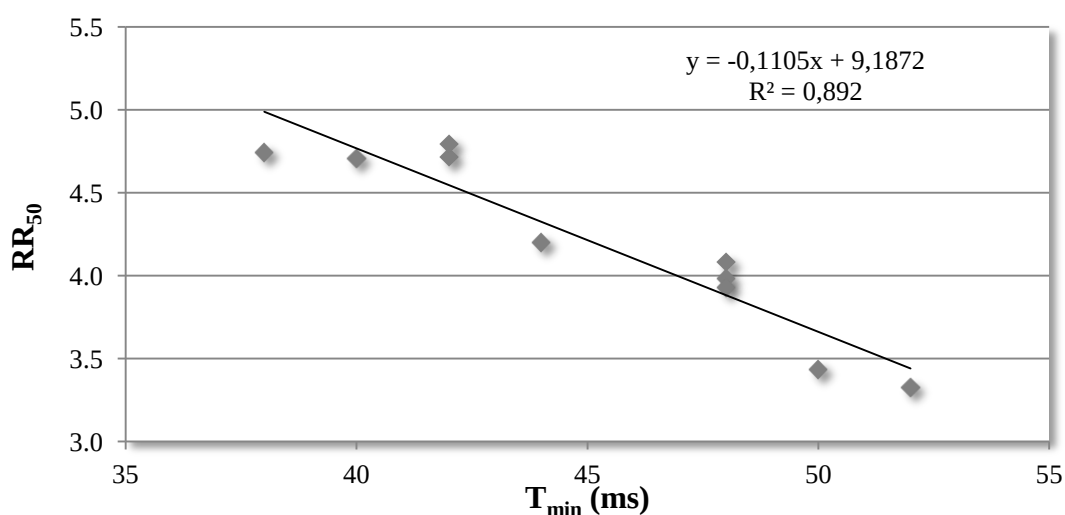
μείωση την ποσότητας της κρουστικής ενέργειας που συνεισφέρει στην κατάτμηση του in situ πετρώματος.

Ένα άλλο μέγεθος για το οποίο εξετάστηκε η ύπαρξη συσχετίσεων με κάποιες από τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης, είναι ο λόγος κατάτμησης RR_{50} . Στον Πίνακα 4.13 παρατίθενται οι σημαντικότερες συσχετίσεις που υπολογίστηκαν μέσω του SPSS.

Πίνακας 4.13: Σημαντικότερες συσχετίσεις του λόγου κατάτμησης RR_{50} με ορισμένες από τις παραμέτρους του σχεδίου ανατίναξης.

	Dependent Variable RR_{50}					
	r	R^2	Sig.	Std. Error	Intercept	Slope
T_{min}	-0,945	0,892	0,01	0,189	9,187	-0,110
q	0,739	0,545	0,02	0,388	-1,000	15,639
B_L	-0,979	0,958	0,01	0,118	7,656	-0,562

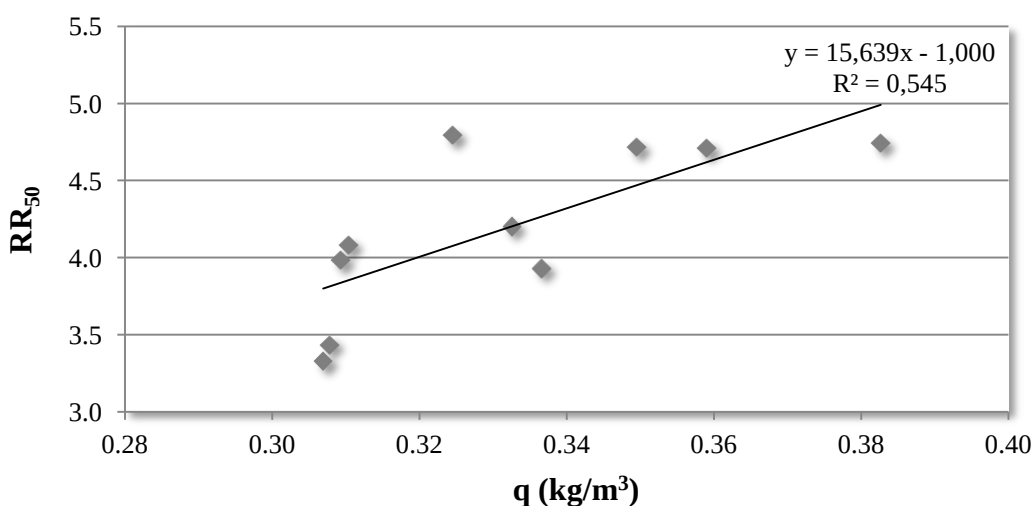
Η συσχέτιση του λόγου κατάτμησης RR_{50} με τον ελάχιστο χρόνο απόκρισης (T_{min}), έχει ήδη σχολιαστεί παραπάνω. Στην Εικόνα 4.21 που ακολουθεί, απεικονίζεται γραφικά η μεταξύ τους συσχέτιση.



Εικόνα 4.21: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του λόγου κατάτμησης (RR_{50}) και του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}).

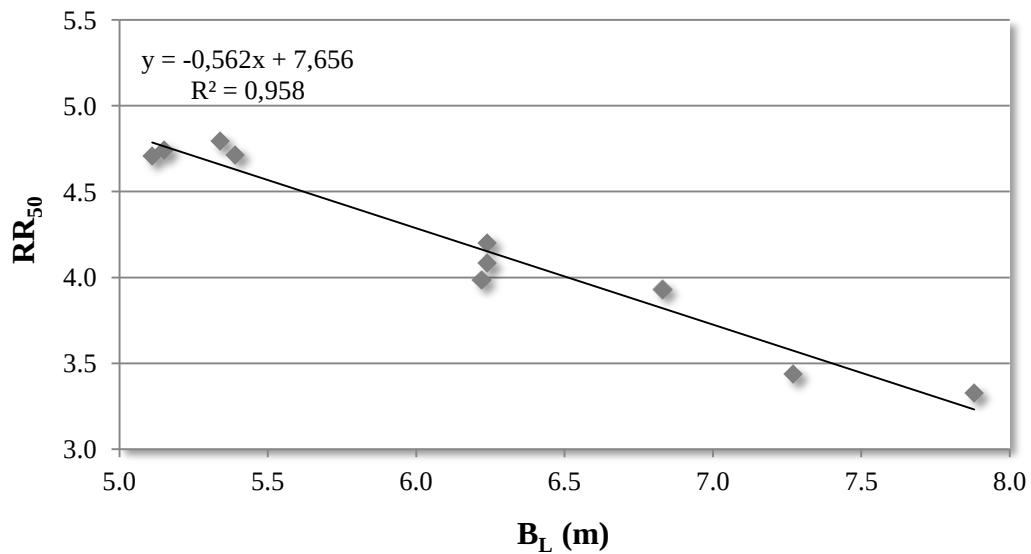
Σε ότι αφορά τη σχέση του λόγου κατάτμησης RR_{50} με την ειδική κατανάλωση Ε.Υ. (q), παρατηρείται ότι μεταξύ τους υπάρχει θετική συσχέτιση ($r=0,739$), για την οποία

η τιμή σημαντικότητας ισούται με 0,02. Η φυσική ερμηνεία της θετικής συσχέτισης συνοψίζεται στο ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής κατανάλωσης Ε.Υ., τόσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση Ε.Υ ανά κυβικό μέτρο πετρώματος. Ως εκ τούτου, η ένταση του παραγόμενου κρουστικού κύματος είναι μεγαλύτερη και η θραύση που επιτυγχάνεται αυξημένη. Στην Εικόνα 4.22 που ακολουθεί, αποτυπώνεται γραφικά η μεταξύ τους συσχέτιση.



Εικόνα 4.22: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του λόγου κατάτμησης (RR₅₀) και της ειδικής κατανάλωσης Ε.Υ. (q).

Από τον Πίνακα 4.13 προκύπτει ότι αυξημένη είναι και η συσχέτιση μεταξύ του λόγου κατάτμησης RR₅₀ και της τιμής του «τοπικού» φορτίου B_L (r=-0,979), με το αρνητικό πρόσημο να δηλώνει ότι όσο πιο μικρή είναι η τιμή του B_L τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου κατάτμησης RR₅₀. Η φυσική ερμηνεία του αρνητικού πρόσημου σχετίζεται με το ότι όσο μικρότερο είναι το τμήμα του πετρώματος το οποίο βρίσκεται μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του πρανούς και του διατρήματος, τόσο μικρότερος είναι ο όγκος που απαιτείται να εξορυχθεί και επομένως τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της κρουστικής ενέργειας ανά μέτρο φορτίου, η οποία διατίθεται για τη θραύση του προς εξόρυξη όγκου. Στην Εικόνα 4.23 απεικονίζεται γραφικά η συσχέτιση μεταξύ του λόγου κατάτμησης RR₅₀ και της τιμής του «τοπικού» φορτίου B_L.



Εικόνα 4.23: Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ του λόγου κατάτμησης (RR_{50}) και του «τοπικού» φορτίου (B_L).

Επισημαίνεται για ακόμα μια φορά, ότι οι συσχετίσεις οι οποίες προέκυψαν από την παραπάνω στατιστική ανάλυση, αφορούν τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου χώρου και σχεδίου ανατίναξης, σε συνδυασμό με τις ιδιότητες της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιήθηκε και του τρόπου έναυσης που εφαρμόστηκε στις ανατινάξεις που καταγράφηκαν. Ως εκ τούτου, η χρήση και η εφαρμογή τους υπό διαφορετικές συνθήκες/παραμέτρους, θα πρέπει να γίνεται πάντοτε με ιδιαίτερη προσοχή. Οι συσχετίσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρχικά, ως μια ποιοτικού χαρακτήρα προσέγγιση του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι διάφορες παράμετροι, που σχετίζονται με την εξόρυξη του πετρώματος με τη χρήση εκρηκτικών υλών.

Η βαθμονόμηση των συσχετίσεων, έπειτα από τη συλλογή πραγματικών δεδομένων που αφορούν τον εκάστοτε χώρο εξόρυξης, επιτρέπει τελικά την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων για την αποδοτικότερη σχεδίαση μελλοντικών ανατινάξεων. Μέσω της συνεχούς ροής και προσθήκης πραγματικών στοιχείων από ανατινάξεις παραγωγής, εξασφαλίζεται η διαρκώς αποτελεσματικότερη ποσοτικοποίηση του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι παράμετροι που καθορίζουν την κοκκομετρία του εξορυγμένου πετρώματος.

5 Διαστασιακή Ανάλυση

5.1 Εισαγωγή

Μέσω της μεθόδου της διαστασιακής ανάλυσης, μπορεί να περιγραφεί η συμπεριφορά ενός φαινομένου συναρτήσει των φυσικών μεγεθών που το επηρεάζουν. Η εφαρμογή της, βασίζεται στην υπόθεση ότι ένα φαινόμενο μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των μεταβλητών που το επηρεάζουν, μέσα από μια διαστασιακώς ομογενή εξίσωση. Ως εκ τούτου, η μορφή της συνάρτησης που προκύπτει είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος των μονάδων μέτρησης των θεμελιωδών φυσικών μεγεθών.

Αυτού του είδους η ανάλυση στηρίζεται σε δυο βασικές αρχές (Σταμπολτζής 1989):

- Κάθε όρος σε μια «φυσικά ορθή» εξίσωση έχει τις ίδιες φυσικές διαστάσεις (αρχή της διαστασιακής ομοιογένειας).
- Ο λόγος των μέτρων δύο φυσικών μεγεθών που έχουν τις ίδιες φυσικές διαστάσεις είναι ανεξάρτητος από τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών, αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες μονάδες και για τα δύο (αρχή της απόλυτης σημασίας του σχετικού μεγέθους).

Οι πρώτες αναφορές στις αρχές της διαστασιακής ανάλυσης είχαν διατυπωθεί ήδη από τον 17^ο αιώνα από τον Isaac Newton. Οι σχετικές ωστόσο θεωρίες άρχισαν να αναπτύσσονται κατά τον 19^ο αιώνα, αρχικά από τον Lord Rayleigh και εν συνεχεία από τους James Clerk Maxwell, Osborne Reynolds, Aimee Vaschy, Edgar Buckingham.

Η διαστασιακή ανάλυση δίνει περισσότερο ποιοτικές, παρά ποσοτικές σχέσεις μεταξύ των βασικών μεταβλητών ενός φαινομένου. Όταν όμως συνδυαστεί με πειραματικά δεδομένα, μπορεί να καταλήξει σε ποσοτικές σχέσεις ή σε εξισώσεις που περιγράφουν ένα φαινόμενο, του οποίου η μορφή της συνάρτησης των μεταβλητών του είναι άγνωστη (Roxborough *et al.* 1974, Σταμπολτζής 1989, Kramadibrata *et al.* 2001).

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εκείνες τις περιπτώσεις που ο αριθμός των μεταβλητών είναι σχετικά μεγάλος, με αποτέλεσμα η γραφική παρουσίαση των δεδομένων με τη χρήση ενός άξονα για κάθε μεταβλητή, να είναι πρακτικώς ανέφικτη. Ωστόσο, η μη προσεκτική εφαρμογή της μεθόδου είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα.

Ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει να δίνεται στην ορθή επιλογή των μεταβλητών που επηρεάζουν το φαινόμενο. Η ίδια η μέθοδος δεν προσδιορίζει, ούτε πόσες, ούτε ποιες, είναι οι βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν το φαινόμενο. Προκειμένου επομένως να εφαρμοστεί επιτυχώς, θα πρέπει να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός της φυσικής διεργασίας και να υπάρχει επαρκής γνώση του φαινομένου, ώστε να προσδιοριστούν εκ των προτέρων, οι βασικές μεταβλητές που το επηρεάζουν (Σταμπολτζής 1989).

Η εφαρμογή της διαστασιακής ανάλυσης, βασίζεται στην υπόθεση ότι ένα φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί από μια διαστασιακώς ομογενή εξίσωση των μεταβλητών (φυσικών διαστατών μεγεθών) που το επηρεάζουν:

$$F(Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n) = 0 \quad (5.1)$$

όπου:

$Q_j, (j = 1, 2, 3 \dots n)$ = οι n ανεξάρτητες βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν το φαινόμενο.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Buckingham (Langhaar 1951, Jupp 1962, Pankhurst 1964, Σταμπολτζής 1989, Sonin 2001), η Εξίσωση 5.1 μπορεί να αντικατασταθεί από μια σχέση Π αδιάστατων ομάδων:

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3 \dots \Pi_{n-N}) = 0 \quad (5.2)$$

όπου:

$\Pi_k, (k = 1, 2, 3 \dots n-N)$ = $(n-N)$ ανεξάρτητες αδιάστατες ομάδες μεταβλητών που κάθε μια περιέχει όχι περισσότερες από $N+1$ μεταβλητές Q
 N = ο αριθμός των θεμελιωδών φυσικών μεγεθών Θ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) που είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό των παραγώγων διαστάσεων των

μεταβλητών Q.

Η τυπική μορφή μιας αδιάστατης ομάδας N+1 μεταβλητών είναι:

$$\Pi_k = (Q_1^{\alpha_1} \cdot Q_2^{\alpha_2} \cdot Q_3^{\alpha_3} \cdot \dots \cdot Q_{N+1}^{\alpha_{N+1}}) = 0 \quad (5.3)$$

όπου:

Π_k	= μια αδιάστατη ομάδα
$Q_j, (j = 1, 2, \dots, N+1)$	= οι n ανεξάρτητες βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν το φαινόμενο
$\alpha_j, (j = 1, 2, \dots, N+1)$	= ρητοί αριθμοί.

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Σταμπολτζής 1989):

- Καθορισμός όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών (φυσικά μεγέθη) Q, που επηρεάζουν το φαινόμενο ή τη φυσική διεργασία.
- Προσδιορισμός του αριθμού N των θεμελιωδών φυσικών μεγεθών Θ, που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των παραγώγων διαστάσεων των μεταβλητών Q.
- Υπολογισμός του αριθμού N_Π των αδιάστατων ομάδων (dimensionless groups) των μεταβλητών, με εφαρμογή του θεωρήματος του Buckingham:

$$N_\Pi = n - N \quad (n \geq 2 \quad N \geq 1 \quad N_\Pi \geq 1) \quad (5.4)$$

όπου:

N_Π	= ο αριθμός των αδιάστατων ομάδων Π ενός πλήρους συνόλου
n	= ο αριθμός των μεταβλητών Q
N	= ο αριθμός των θεμελιωδών φυσικών μεγεθών Θ.

- Επιλογή N μεταβλητών, τόσων όσος είναι ο αριθμός των θεμελιωδών φυσικών μεγεθών. Για τις μεταβλητές αυτές θα πρέπει να ισχύουν: α) να μην είναι αδιάστατες, β)

- Σχηματισμός του πίνακα των μεταβλητών Q , των εκθετών τους α και των παραγώγων διαστάσεων τους a , ως προς τα N θεμελιώδη μεγέθη Θ . Οι εκθέτες α των υπολοίπων $n - N$ αδιάστατων μεταβλητών, που δεν περιλαμβάνονται στην πρωτεύουσα ομάδα, λαμβάνονται ίσοι προς 1 ($\alpha_{N+1} = \alpha_{N+2} = \dots = \alpha_n = 1$).
- Συνδυασμός του γινομένου των δυνάμεων των N μεταβλητών της πρωτεύουσας ομάδας, με κάθε μια από τις υπόλοιπες $n - N$ μεταβλητές Q , για τον σχηματισμό των $n - N$ αδιάστατων ομάδων, που κάθε μια είναι γινόμενο δυνάμεων $N + 1$ μεταβλητών.

- Υπολογισμός των τιμών των εκθετών των μεταβλητών σε κάθε αδιάστατη ομάδα, με λύση του αντίστοιχου γραμμικού συστήματος N γραμμικών εξισώσεων, με N αγνώστους (πρωτεύοντες άγνωστοι, εκθέτες των μεταβλητών της πρωτεύουσας ομάδας). Οι N εξισώσεις του συστήματος, προκύπτουν με εφαρμογή της αρχής ότι σε κάθε αδιάστατη ομάδα και για κάθε θεμελιώδες φυσικό μέγεθος Θ , το άθροισμα των γινομένων του εκθέτη a κάθε μεταβλητής Q της ομάδας επί την αντίστοιχη διάσταση της a (ως προς το μέγεθος Θ), πρέπει να ισούται με μηδέν.

- Διαμόρφωση της συνάρτησης που εκφράζει το φαινόμενο), με κατάλληλο συνδυασμό των αδιάστατων ομάδων Π , βάσει των πειραματικών δεδομένων.

- Λύση της προηγούμενης εξίσωσης ως προς την αδιάστατη ομάδα Π που περιέχει την εξαρτημένη μεταβλητή Q (εξαρτημένη αδιάστατη ομάδα).
- Λύση της εξίσωσης ως προς την εξαρτημένη μεταβλητή Q , με πολλαπλασιασμό και των δύο μελών της εξίσωσης, επί τον αντίστροφο των υπολοίπων μεταβλητών που περιέχονται στην εξαρτημένη αδιάστατη ομάδα.

Οι εκθέτες α_j των μεταβλητών Q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) στην αδιάστατη ομάδα Π , είναι οι άγνωστοι του ακόλουθου γραμμικού ομογενούς συστήματος, των N εξισώσεων με τους n αγνώστους:

$$\left. \begin{aligned} & a_{11} \cdot \alpha_1 + a_{12} \cdot \alpha_2 + a_{13} \cdot \alpha_3 + \dots + a_{1n} \cdot \alpha_n = 0 \\ & a_{21} \cdot \alpha_1 + a_{22} \cdot \alpha_2 + a_{23} \cdot \alpha_3 + \dots + a_{2n} \cdot \alpha_n = 0 \\ & \quad \text{\scriptsize } \\ & a_{N1} \cdot \alpha_1 + a_{N2} \cdot \alpha_2 + a_{N3} \cdot \alpha_3 + \dots + a_{Nn} \cdot \alpha_n = 0 \end{aligned} \right\} \tag{5.7}$$

Στο παραπάνω σύστημα, οι συντελεστές, a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n$) των αγνώστων a_j ($j = 1, 2, \dots, n$), είναι οι παράγωγες διαστάσεις των μεταβλητών Q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) ως προς τα N θεμελιώδη φυσικά μεγέθη Θ_i ($i = 1, 2, \dots, N$), δηλαδή οι συντελεστές της εξίσωσης i είναι διαστάσεις ως προς το μέγεθος Θ_i .

Αν ο αριθμός r του πίνακα (a_{ij}) των συντελεστών του συστήματος 48, είναι ίσος με τον αριθμό N των εξισώσεων (αριθμό των θεμελιωδών φυσικών μεγεθών) και μικρότερος από τον αριθμό n των αγνώστων, δηλαδή αν $r = (N < n)$, τότε το σύστημα έχει $n - N$ ανεξάρτητες παραμετρικές λύσεις, από τις οποίες προκύπτουν $n - N$ αδιάστατες ομάδες μεταβλητών Q .

5.2 Ανάλυση

Με τη βοήθεια της διαστασιακής ανάλυσης, επιδιώχθηκε η εύρεση μιας εξίσωσης για τον υπολογισμό του λόγου κατάτμησης RR_{50} . Ο λόγος κατάτμησης είναι ένα μέγεθος αδιάστατο, γεγονός το οποίο καθιστά προφανές ότι μπορεί να αποτελέσει την εξαρτημένη μεταβλητή της διαστασιακής ανάλυσης.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου αρχικά απαιτείται ο καθορισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών (φυσικά μεγέθη) που επηρεάζουν

το φαινόμενο (φυσική διεργασία). Ο αριθμός των αδιάστατων ομάδων που μπορούν να δημιουργηθούν από ένα σύνολο μεταβλητών που σχετίζονται με την περιγραφή ενός φαινομένου, είναι θεωρητικά άπειρος. Σύμφωνα με το θεώρημα του Buckingham, κάθε πλήρες σύνολο $n-N$ αδιάστατων ομάδων είναι αποδεκτό. Ωστόσο, δεν είναι όλες οι αδιάστατες ομάδες το ίδιο χρήσιμες και αποτελεσματικές για την επιτυχημένη εφαρμογή της μεθόδου της διαστασιακής ανάλυσης. Ως εκ τούτου, η διαδικασία επιλογής των βασικών/επαναλαμβανόμενων μεταβλητών (recurring variables) που θα αποτελέσουν την πρωτεύουσα ομάδα μεταβλητών, θα πρέπει να πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ορθότητας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Οι βασικές μεταβλητές ενός προβλήματος διαστασιακής ανάλυσης θα πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Να μην είναι αδιάστατες.
- Να μη σχηματίζουν μεταξύ τους αδιάστατες ομάδες.
- Στο σύνολο τους να περιλαμβάνονται όλα τα θεμελιώδη μεγέθη.

Στην περίπτωση που ο διαστασιακός τύπος μιας μεταβλητής δεν εμφανίζεται σε καμία από τις υπόλοιπες βασικές μεταβλητές που συνθέτουν την πρωτεύουσα ομάδα, τότε η μεταβλητή αυτή δεν δύναται να συμπεριληφθεί σε καμία από τις αδιάστατες ομάδες που δημιουργούνται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή εσφαλμένα συμπεριλήφθηκε στην πρωτεύουσα ομάδα και ως εκ τούτου θα πρέπει να αποκλειστεί από αυτήν ή ότι κάποια άλλη μεταβλητή, η οποία σχηματίζει αδιάστατη ομάδα με την εν λόγω μεταβλητή, εκ παραδρομής παρέμεινε εκτός της πρωτεύουσας ομάδας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση παλινδρόμησης που πραγματοποιήθηκε στην Παράγραφο 4.4, οι τρεις παράμετροι που παρουσιάζουν υψηλότερη συσχέτιση με την τιμή του λόγου κατάτμησης RR_{50} και επομένως επηρεάζουν σημαντικά τη μεταβολή της τιμής του, είναι ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης (T_{min}), το «τοπικό» φορτίο (B_L) και η ειδική κατανάλωση $E.Y.$ (q). Οι μεταβλητές αυτές επιλέχθηκαν να αποτελέσουν την πρωτεύουσα ομάδα μεταβλητών. Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται η μονάδα μέτρησης και ο διαστασιακός τύπος κάθε μιας από τις βασικές μεταβλητές.

Πίνακας 5.1: Μονάδες μέτρησης και διαστασιακοί τύποι των βασικών μεταβλητών.

Μεταβλητή	Μονάδα Μέτρησης	Διαστασιακός Τύπος
$T_{\min}$	ms	$M^0 L^0 T^1$
B_L	m	$M^0 L^1 T^0$
q	kg/m ³	$M^1 L^{-3} T^0$

Από τον πίνακα προκύπτει ότι το θεμελιώδες φυσικό μέγεθος του χρόνου (T), περιλαμβάνεται μόνο στον διαστασιακό τύπο του ελάχιστου χρόνου απόκρισης ($T_{\min}$). Βάσει των όσων ειπώθηκαν παραπάνω, η απουσία του χρόνου από τους διαστασιακούς τύπους των υπολοίπων μεταβλητών που συνθέτουν την πρωτεύουσα ομάδα, θα έχει ως αποτέλεσμα το να μη συμπεριληφθεί ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης στις αδιάστατες ομάδες που πρόκειται να δημιουργηθούν. Το ίδιο ισχύει και για το θεμελιώδες φυσικό μέγεθος της μάζας (M), το οποίο περιλαμβάνεται μόνο στον διαστασιακό τύπο της ειδικής κατανάλωσης E.Y.

Η ειδική κατανάλωση E.Y., αποτελεί το πηλίκο της ποσότητας της E.Y. (Q), προς τον όγκο του προς εξόρυξη πετρώματος (V_o) που αντιστοιχεί σε κάθε ανατίναξη. Η μονάδα μέτρησης της ποσότητας της E.Y. είναι τα kg και επομένως το θεμελιώδες φυσικό μέγεθος που αντιστοιχεί στη μεταβλητή είναι η μάζα (M), ενώ η μονάδα μέτρησης του όγκου είναι το m³ και το φυσικό μέγεθος που αντιστοιχεί στη μεταβλητή είναι το μήκος (L).

Πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα E.Y. που τοποθετείται σε ένα διάτρημα, με την ενέργεια έκρηξης της E.Y. (kcal/kg), προκύπτει ένα νέο μέγεθος το οποίο καλείται εκλυόμενη ενέργεια E.Y (kcal). Η ανά διάτρημα εκλυόμενη ενέργεια E.Y, μπορεί με κατάλληλο μετασχηματισμό, αντί των kcal, να εκφραστεί σε Joule (1kcal = 4186,8Joule). Το Joule ορίζεται σαν το έργο που παράγεται ή σαν την ενέργεια που καταναλώνεται, από μια δύναμη ενός Newton, η οποία μετακινεί το σημείο εφαρμογής της σε απόσταση ενός μέτρου στην κατεύθυνση της δύναμης. Ως εκ τούτου, η μονάδα μέτρησης των Joule στο Διεθνές Σύστημα Μετρικών Μονάδων (S.I.), είναι τα N·m ή εναλλακτικά τα kg·m²·s⁻².

Ο διαστασιακός τύπος της εκλυόμενης ενέργειας E.Y., περιλαμβάνει και τα τρία θεμελιώδη φυσικά μεγέθη (μάζα M, απόσταση L, χρόνο T). Αντικαθιστώντας επομένως την ποσότητα E.Y. με την εκλυόμενη ενέργεια E.Y., εξασφαλίζεται ότι εντός της πρωτεύουσας ομάδας υπάρχουν πλέον δύο μεταβλητές των οποίων ο διαστασιακός τύπος περιλαμβάνει το θεμελιώδες φυσικό μέγεθος του χρόνου. Ως εκ τούτου, διαφυλάσσεται η

συμμετοχή του ελάχιστου χρόνου απόκρισης $T_{\min}$, στις αδιάστατες ομάδες που πρόκειται να δημιουργηθούν για την εφαρμογή της διαστασιακής ανάλυσης.

Η ενέργεια έκρηξης είναι ένα μέγεθος το οποίο σχετίζεται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε Ε.Υ. και αποτελεί, ως ένα βαθμό, το μέτρο της εξορυκτικής της ικανότητας. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, για το ANFO το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις ανατινάξεις που πραγματοποιήθηκαν στο λατομείο Χάλυψ, η τιμή της ενέργειας έκρηξης είναι 920kcal/kg, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη ζελατινοδυναμίτιδα που χρησιμοποιήθηκε ως εναυσματική γόμωση είναι 4100kJ/kg. Στον Πίνακα 5.2 παρατίθεται η τιμή της εκλυόμενης ενέργειας εκρηκτικής ύλης. (EEEY σε GJ), για κάθε μία από τις δέκα ανατινάξεις.

Πίνακας 5.2: Εκλυόμενη ενέργεια εκρηκτικής ύλης. (GJ).

	ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
EEEY _{ANFO} (GJ)	10,15	11,44	8,92	10,09	10,00	9,23	11,56	8,28	8,11	12,31
EEEY _{Z/A} (GJ)	0,07	0,07	0,06	0,07	0,08	0,06	0,08	0,07	0,06	0,08
EEEY (GJ)	10,22	11,51	8,98	10,16	10,08	9,29	11,64	8,35	8,17	12,39

Σε ότι αφορά το θεμελιώδες φυσικό μέγεθος της μάζας (M), προκειμένου να εξασφαλιστεί η συμμετοχή του στις αδιάστατες ομάδες, απαιτείται να εμφανιστεί στον διαστασιακό τύπο τουλάχιστον μιας ακόμα μεταβλητής. Για τον σκοπό αυτό, αντί το όγκου του προς εξόρυξη πετρώματος που αντιστοιχεί σε κάθε ανατίναξη (V_0), ως μεταβλητή για την εφαρμογή της διαστασιακής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η μάζα του προς εξόρυξη πετρώματος που αντιστοιχεί σε κάθε ανατίναξη (M_0). Έχοντας γνωστό το ειδικό βάρος του ασβεστόλιθου του λατομείου Χάλυψ ($\rho = 2636\text{kg/m}^3$), υπολογίστηκε η μάζα M_0 (σε t) για κάθε μια από τις δέκα ανατινάξεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.3: Μάζα εξορυγμένου πετρώματος (t).

	ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
M_0 (t)	19275	22439	19840	22371	22267	18796	20666	17839	17057	25365

Οι μεταβλητές οι οποίες τελικά επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή της διαστασιακής ανάλυσης είναι:

- Ο λόγος κατάτμησης του 50% αθροιστικά διερχόμενου (RR_{50})
- Ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης (T_{min})
- Το «τοπικό» φορτίο (B_L)
- Η εκλυόμενη ενέργεια Ε.Υ ανά ανατίναξη (EEEEY)
- Η μάζα του προς εξόρυξη πετρώματος (M_0).

Η μονάδα μέτρησης και ο διαστασιακός τύπος των παραπάνω μεταβλητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Μονάδες μέτρησης και διαστασιακοί τύποι των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της διαστασιακής ανάλυσης.

Μεταβλητή	Μονάδα Μέτρησης	Διαστασιακός Τύπος
T_{min}	ms	$M^0 L^0 T^1$
B_L	m	$M^0 L^1 T^0$
EEEEY	$kg \cdot m^2/s^2$	$M^1 L^2 T^{-2}$
RR_{50}	-	$M^0 L^0 T^0$
M_0	kg	$M^1 L^0 T^0$

Η εξίσωση του διαστασιακού προβλήματος είναι ο εξής:

$$f(T_{min}, B_L, EEEY, RR_{50}, M_0) = 0 \quad (5.8)$$

Χρησιμοποιώντας σαν βασικές μεταβλητές τα T_{min} , B_L και EEEY και εφαρμόζοντας το θεώρημα του Buckingham, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να μετασχηματιστεί ως εξής:

$$f(\Pi_1, \Pi_2) = 0 \quad (5.9)$$

όπου:

$$\Pi_1 = T_{\min}^{a1} \cdot B_L^{b1} \cdot EEEY^{c1} \cdot RR_{50} \quad (5.10)$$

$$\Pi_2 = T_{\min}^{a2} \cdot B_L^{b2} \cdot EEEY^{c2} \cdot M_0 \quad (5.11)$$

Από την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, προκύπτουν οι τιμές των a_i , b_i , c_i και τελικά οι αδιάστατες ομάδες Π_1 και Π_2 . Η επίλυση παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι. Οι αδιάστατες ομάδες που δημιουργήθηκαν είναι οι εξής:

$$\Pi_1 = RR_{50} \quad (5.12)$$

$$\Pi_2 = T_{\min}^{-2} \cdot B_L^2 \cdot EEEY^{-1} \cdot M_0 \quad (5.13)$$

Η αρχική Εξίσωση 5.1 του διαστασιακού προβλήματος, μετασχηματίστηκε σε μια νέα, η οποία περιλαμβάνει τις δύο αδιάστατες ομάδες. Η μετασχηματισμένη εξίσωση είναι η εξής:

$$f(RR_{50}, T_{\min}^{-2}, B_L^2, EEEY^{-1}, M_0) = 0 \quad (5.14)$$

η οποία εναλλακτικά μπορεί να γραφτεί:

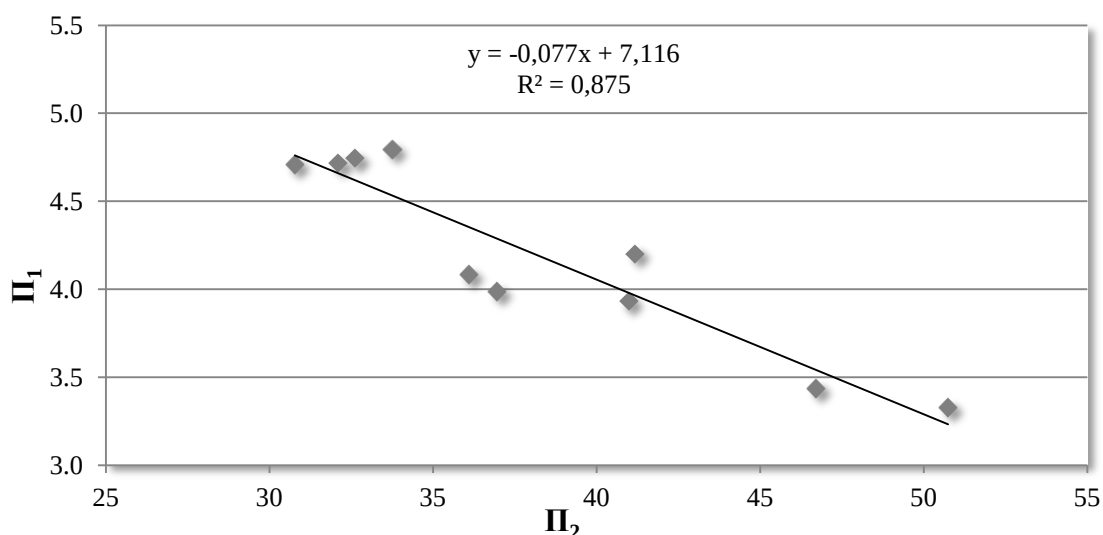
$$RR_{50} = f(T_{\min}^{-2}, B_L^2, EEEY^{-1}, M_0) \quad (5.15)$$

Με τη βοήθεια του λογισμικού SPSS, ελέγχθηκε η ύπαρξη τυχόν συσχέτισης μεταξύ των αδιάστατων ομάδων Π_1 και Π_2 . Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.5: Συσχέτιση μεταξύ των αδιάστατων ομάδων Π_1 και Π_2 .

	Dependent Variable Π_1					
	r	R ²	Sig.	Std. Error	Intercept	Slope
Π_2	-0,935	0,875	0,01	0,203	7,116	-0,077

Από τον Πίνακα 5.5 προκύπτει ότι μεταξύ των δύο αδιάστατων ομάδων, παρατηρείται ιδιαίτερα αυξημένη συσχέτιση ($r=0,935$), η οποία σύμφωνα με την τιμή σημαντικότητας ($p=0,01$), δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι προέκυψε τυχαία. Η τιμή του τυπικού σφάλματος των αναμενόμενων τιμών για την εξαρτημένη μεταβλητή, ισούται με 0,203. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο αδιάστατων ομάδων παρατίθεται στην Εικόνα 5.1



Εικόνα 5.1: Συσχέτιση μεταξύ των αδιάστατων ομάδων Π_1 και Π_2 .

Η εξίσωση που συνδέει τις δύο αδιάστατες ομάδες είναι η εξής:

$$\Pi_1 = -0,077 \cdot \Pi_2 + 7,116 \quad (5.16)$$

Ως εκ τούτου, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό του λόγου κατάτμησης RR_{50} :

$$RR_{50} = -0,077 \cdot \frac{M_0}{EEEY} \cdot \frac{B_L^2}{T_{min}^2} + 7,116 \quad (5.17)$$

Σύμφωνα με την Εξίσωση 5.17, η μεταβολή του λόγου κατάτμησης RR_{50} είναι ανάλογη με τη μάζα του προς εξόρυξη πετρώματος (M_0) και την τιμή του «τοπικού» φορτίου (B_L) και αντιστρόφως ανάλογη με τον ελάχιστο χρόνο απόκρισης (T_{min}) και την εκλυόμενη ενέργεια της εκρηκτικής ύλης (EEEY).

Οι τιμές του ειδικού βάρους του πετρώματος και της ενέργειας έκρηξης του ANFO και της ζελατινοδυναμίτιδας, ήταν σταθερές και για τις δέκα ανατινάξεις που πραγματοποιήθηκαν. Για τον λόγο αυτό απαιτείται επιπλέον διερεύνηση, προκειμένου να εξεταστεί εάν η Εξίσωση 5.17, δύναται να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς τύπους πετρώματος ή για διαφορετικούς τύπους Ε.Υ και εναυσματικής γόμωσης.

Εάν ο λόγος κατάτμησης RR_{50} , αντικατασταθεί με το πηλίκο της τιμής μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του in situ πετρώματος (F_{50}), προς την τιμή μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του εξορυγμένου πετρώματος (P_{50}), η Εξίσωση 5.17 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$P_{50} = F_{50} \cdot \left(-0,077 \cdot \frac{M_0}{EEEY} \cdot \frac{B_L^2}{T_{min}^2} + 7,116 \right)^{-1} \quad (5.18)$$

Με τη βοήθεια της Εξίσωσης 5.18, επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του μεγέθους των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, συναρτήσει της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το in situ πέτρωμα από πλευράς κερματισμού. Η συγκεκριμένη εξίσωση προέκυψε αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα και ως εκ τούτου αποτυπώνει καλύτερα τον βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και της κοκκομετρίας που επιτυγχάνεται, κατά την εξόρυξη του πετρώματος με εκρηκτικές ύλες.

Η διαρκής συλλογή νέων δεδομένων τα οποία θα προκύψουν έπειτα από την πραγματοποίηση ανατινάξεων, για τη σχεδίαση των οποίων έχει γίνει χρήση της Εξίσωσης 5.18, θα επιτρέψει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της, καθώς και τη συνεχή διόρθωση αυτής, προκειμένου να καταστεί ακόμα πιο αποδοτικός ο σχεδιασμός

μελλοντικών ανατινάξεων. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη εξίσωση αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τον μηχανικό που σχεδιάζει ανατινάξεις, μέσω του οποίου παρέχεται η δυνατότητα προσαρμογής του μεγέθους τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής, εξασφαλίζοντας την αποδοτικότερη και ταυτόχρονα οικονομικότερη λειτουργία όλων των επιμέρους διεργασιών που έπονται της ανατίναξης.

6 Πιθανολογική προσομοίωση της κοκκομετρικής κατανομής

6.1 Μέθοδος Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo, χρησιμοποιείται προκειμένου να ενισχυθούν/επαληθευτούν θεωρητικά συμπεράσματα, τα οποία σχετίζονται με την ανάλυση της συμπεριφοράς φυσικών ή μαθηματικών διαδικασιών αυξημένης αβεβαιότητας. Βασίζεται στην επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία και βρίσκουν εφαρμογή σε εκείνες τις περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η πραγματοποίηση υπολογισμών ακριβείας, με τη χρήση ντετερμινιστικών αλγορίθμων.

Ο όρος Monte Carlo επινοήθηκε τη δεκαετία του 1940, από τους John von Neumann, Stanislaw Ulam και Nicholas Metropolis, κατά την ανάπτυξη των πρώτων πυρηνικών όπλων στο πλαίσιο «Manhattan Project», στο Los Alamos National Laboratory (Metropolis 1987). Η επαναλαμβανόμενη φύση των υπολογιστικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, σε συνδυασμό με τον τυχαίο παράγοντα, παρουσιάζουν ομοιότητες με τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε ένα καζίνο. Ως εκ τούτου, στην μέθοδο αυτή αποδόθηκε ο όρος Monte Carlo, από το διάσημο καζίνο του Μόντε Κάρλο, το οποίο ο θείος του Ulam συχνά επισκεπτόταν. Έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορους επιστημονικούς τομείς (βιολογία, γεωλογία, εφαρμοσμένη στατιστική, τηλεπικοινωνίες κ.α.), ενώ συχνή είναι η εφαρμογή της για την εκτίμηση επιχειρηματικών κινδύνων, καθώς και για την πραγματοποίηση προβλέψεων υπέρβασης κόστους ή αποτυχίας υλοποίησης χρονοδιαγραμμάτων, σε προγράμματα που σχετίζονται με την εξερεύνηση του διαστήματος, την ανεύρεση κοιτασμάτων κ.α.

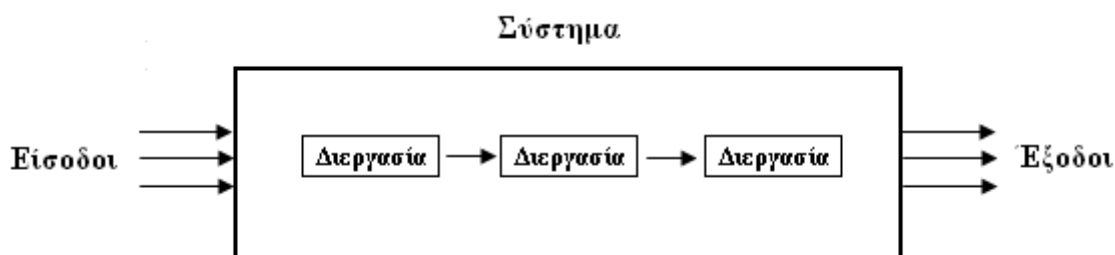
Τα 4 βασικά στάδια της μεθόδου Monte Carlo είναι τα ακόλουθα:

- Ορίζεται το πεδίο των πιθανών δεδομένων.
- Τα δεδομένα παράγονται τυχαία εντός των προκαθορισμένων ορίων.
- Εκτελούνται μεμονωμένοι ντετερμινιστικοί υπολογισμοί με τα δεδομένα που έχουν παραχθεί.
- Τα μεμονωμένα αποτελέσματα συγκεντρώνονται και εξάγεται ένα τελικό αποτέλεσμα.

Για την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo, απαιτείται μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών, η οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων υλοποιείται ως λογισμικό ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι τυχαίοι αριθμοί που παράγονται από τη γεννήτρια, θα πρέπει να ακολουθούν στατιστικές κατανομές όμοιες με εκείνες που ακολουθούν οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία που μελετάται.

Στην πραγματικότητα ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής δεν παράγει τυχαίους αριθμούς. Ο υπολογιστής ακολουθεί μια συγκεκριμένη αλληλουχία εντολών, η οποία όταν επαναλαμβάνεται διατηρώντας τις αρχικές συνθήκες σταθερές, καταλήγει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα. Ως εκ τούτου, οι αριθμοί οι οποίοι παράγονται από ένα υπολογιστή είναι ψευδοτυχαίοι και όχι τυχαίοι. Η δημιουργία ψευδοτυχαίων αριθμών δεν αποτελεί μειονέκτημα για την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo. Η επαναληψιμότητα των αριθμών που παράγει η γεννήτρια είναι επιθυμητή, υπό την προϋπόθεση ότι οι παραγόμενοι αριθμοί ικανοποιούν τα στατιστικά τεστ τυχειότητας.

Η επιλογή των στατιστικών κατανομών γίνεται, είτε βάσει πραγματικών μετρήσεων, είτε βάσει υποθέσεων που αφορούν το πραγματικό «σύστημα» και έχουν προκύψει από προηγούμενη εμπειρία. Ο όρος «σύστημα», αναφέρεται στο σύνολο των αλληλεπιδρώντων στοιχείων τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους ή λειτουργούν συλλογικά, με σκοπό την επίτευξη κάποιου στόχου (Law *et al.* 1991, Kheir 1996). Στην Εικόνα 6.1 που ακολουθεί δίδεται η σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος.



Εικόνα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος.

6.2 Προσομοίωση

Η μελέτη ενός συστήματος, περιλαμβάνει αρχικά το στάδιο της σύνθεσης/σχεδίασης, κατά το οποίο ορίζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι του συστήματος και εν συνεχεία το στάδιο της ανάλυσης του. Οποιαδήποτε διεργασία επιφέρει αλλαγές σε ένα

σύστημα καλείται «δραστηριότητα» του συστήματος. Ανάλογα με τον τρόπο που ορίζονται τα αποτελέσματα τα οποία επιφέρουν, οι δραστηριότητες διακρίνονται σε ντετερμινιστικές και στοχαστικές.

Για το σύνολο των εισόδων μιας ντετερμινιστικής δραστηριότητας, η έξοδος είναι πάντοτε συγκεκριμένη και προσδιορισμένη. Ως εκ τούτου, τα πιθανά αποτελέσματα μπορούν να περιγραφούν πλήρως από τις εισόδους. Αντιθέτως, σε μια στοχαστική δραστηριότητα, για ένα δεδομένο σύνολο εισόδων υπάρχουν πολλαπλά σύνολα εξόδων και το αποτέλεσμα το οποίο λαμβάνεται είναι επακόλουθο τυχαίων παραγόντων. Ως εκ τούτου, οι έξοδοι του συστήματος μεταβάλλονται τυχαία μέσα σε ένα σύνολο δυνατών αποτελεσμάτων.

Η μελέτη ενός συστήματος μπορεί να γίνει, είτε με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων, είτε μέσω προσομοίωσης. Η προσομοίωση είναι μια πειραματική μέθοδος η οποία περιλαμβάνει, τη μελέτη λειτουργίας ενός συστήματος, την ανάλυση ευαισθησίας και την εξοικείωση με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Αντικειμενικός στόχος της προσομοίωσης είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του υπό εξέταση συστήματος.

Μέσω της προσομοίωσης επιδιώκεται να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται το σύστημα, ως αποτέλεσμα των μεταβολών που υφίστανται οι εσωτερικές του δραστηριότητες και όχι ως αποτέλεσμα της μεταβολής των διαφόρων εξωτερικών παραγόντων. Η σειρά των αριθμών που παράγει η γεννήτρια, αποτελεί εξωτερικό παράγοντα για το σύστημα και ως εκ τούτου θα πρέπει να έχει σταθερή επαναληψιμότητα προκειμένου να μην αλλοιώνεται το εξαγόμενο αποτέλεσμα. Η επαναληψιμότητα επομένως των αριθμών που παράγει η γεννήτρια είναι επιθυμητή, καθότι παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων του ιδίου συστήματος.

Η ορθότητα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων εξαρτάται άμεσα από την προσεκτική υλοποίηση της διαδικασίας σύνθεσης του συστήματος, κατά τη διάρκεια της οποίας, ορίζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «μοντελοποίηση» και το αποτέλεσμα της είναι η δημιουργία ενός «μοντέλου», το οποίο αποτελεί αναπαράσταση του φυσικού συστήματος που μελετάται.

Το μοντέλο εμπεριέχει πληροφορίες σχετικές με το υπό εξέταση σύστημα. Όσο αντιπροσωπευτικότερο είναι το μοντέλο που δημιουργείται, τόσο πιο ορθά είναι τα συμπεράσματα που εξάγονται για το σύστημα. Ως εκ τούτου, μεταξύ του συστήματος και

του μοντέλου θα πρέπει να υπάρχει αυξημένη αντιστοιχία σε ότι αφορά τις εισόδους, τις εξόδους και τις εσωτερικές δομές.

Η πραγματοποίηση προσομοιώσεων με τη βοήθεια μοντέλων, επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος. Οποιαδήποτε θεωρία ή υπόθεση σχετικά με τον τρόπο που συμπεριφέρεται ένα σύστημα, δύναται να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί μέσω της προσομοίωσης, επιτρέποντας στον μελετητή να κάνει εκτιμήσεις αναφορικά με τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος.

Η τρείς φάσεις που περιλαμβάνει η προσομοίωση είναι:

- Κατασκευή του μοντέλου.
- Εκτέλεση του μοντέλου.
- Ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή ενός συστήματος θα πρέπει να είναι «απλό», ώστε να είναι εύκολη η κατασκευή και κατανόηση του και ταυτόχρονα «σύνθετο», ώστε να περιγράφει όσο το δυνατόν πιο πιστά το σύστημα που αντιπροσωπεύει. Στην Εικόνα 6.2 δίδεται η σχηματική αναπαράσταση ενός μοντέλου.



Εικόνα 6.2: Σχηματική αναπαράσταση μοντελοποίησης.

6.3 Κατασκευή του μοντέλου

Το πρώτο στάδιο της υλοποίησης μιας προσομοίωσης, περιλαμβάνει την κατασκευή του μοντέλου που αναπαριστά το προς εξέταση σύστημα. Στο στάδιο αυτό καθορίζονται οι εισόδους του μοντέλου, οι μαθηματικές σχέσεις με τις οποίες οι εισόδους συνδέονται μεταξύ τους, καθώς και οι εξόδους που προκύπτουν από αυτές. Οι εισόδους του μοντέλου, θα πρέπει να είναι σε θέση να αποδώσουν όσο το δυνατόν ακριβέστερα τη

συμπεριφορά του υπό εξέταση συστήματος, συντελώντας με τον τρόπο αυτό στη δημιουργία ενός εύχρηστου εργαλείου ανάλυσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, επιχειρήθηκε η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα αποδίδει την κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος, συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, των ιδιοτήτων της Ε.Υ, καθώς και των μηχανικών χαρακτηριστικών του προς εξόρυξη πετρώματος. Το μοντέλο χρησιμοποιεί στατιστικές κατανομές, προκειμένου να περιγράψει τη συμπεριφορά εκείνων των παραμέτρων εισόδου, για τις οποίες είτε έχει παρατηρηθεί μεταβλητότητα, είτε τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί δεν είναι επαρκή. Ως εκ τούτου, δημιουργείται πλέον ένα χρήσιμο εργαλείο που εμπεριέχει και συνυπολογίζει την έννοια της αβεβαιότητας. Μέσω του συγκεκριμένο εργαλείου, επιτυγχάνεται η εκτίμηση του τρόπου που μετατοπίζεται η κοκκομετρική κατανομή των εξορυγμένων τεμαχίων πετρώματος, ως αποτέλεσμα των διαφόρων υποθετικών σχεδίων ανατίναξης

Ως είσοδοι του μοντέλου επιλέχθηκαν:

- Η διάμετρος των διατρημάτων.
- Το ύψος της βαθμίδας.
- Η κλίση των διατρημάτων.
- Το μήκος της υποδιάτρησης.
- Η απόσταση των διατρημάτων.
- Το φορτίο.
- Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης.
- Η σχετική κατά βάρος ισχύς της Ε.Υ.
- Το μέγιστο μέγεθος των in situ τεμαχίων.
- Το ειδικό βάρος του πετρώματος.
- Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος.

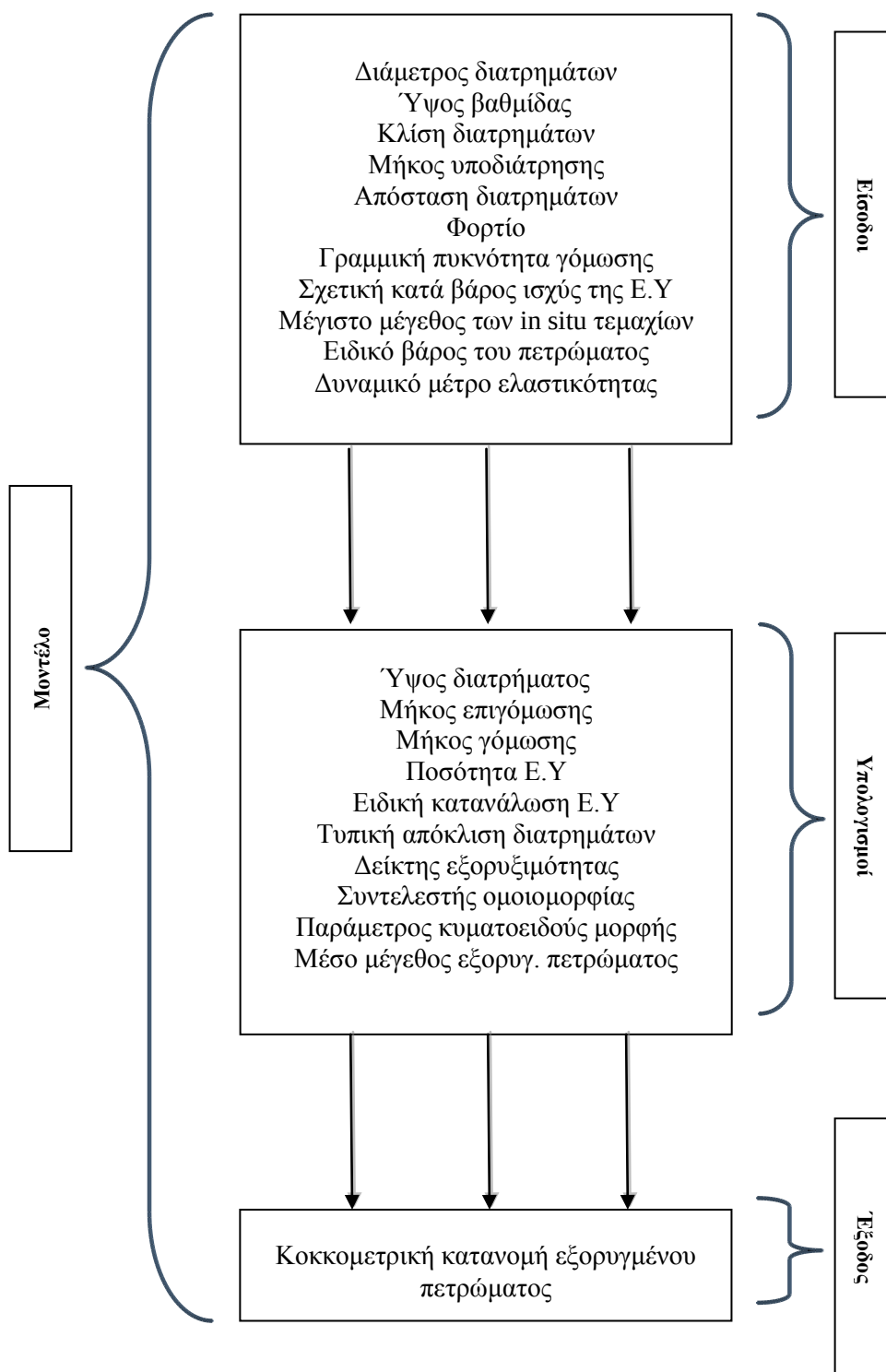
Το στάδιο της κατασκευής ενός μοντέλου, εκτός της επιλογής των εισόδων, περιλαμβάνει και τον καθορισμό των μαθηματικών σχέσεων μέσω των οποίων αυτές συνδέονται. Με τη βοήθεια αυτών των σχέσεων, πραγματοποιούνται ενδιάμεσοι υπολογισμοί, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των εξόδων του συστήματος. Τα μεγέθη τα οποία προκύπτουν ως αποτέλεσμα των ενδιάμεσων υπολογισμών είναι:

- Το ύψος του διατρήματος.
- Το μήκος της επιγόμεωσης.
- Το μήκος της γόμεωσης.
- Η ποσότητα της Ε.Υ.
- Η ειδική κατανάλωση της Ε.Υ.
- Η τυπική απόκλιση των διατρημάτων.
- Ο δείκτης εξορυξιμότητας.
- Ο συντελεστής ομοιομορφίας.
- Η παράμετρος κυματοειδούς μορφής.
- Το μέγεθος του εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο.

Η κατασκευή του μοντέλου ολοκληρώνεται με τον προσδιορισμό της εξόδου του. Ως έξοδος ορίστηκε η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, για τον υπολογισμό της οποίας, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Swabrec. Επιπλέον, επιδιώχθηκε η δημιουργία μιας περιβάλλουσας, γύρω από τη μέση τιμή μεγέθους που αντιστοιχεί στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα αθροιστικά διερχόμενου (predictive fragmentation envelope).

Η δομή του μοντέλου που δημιουργήθηκε αναπαριστάται στην Εικόνα 6.3 που ακολουθεί.

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε η προγραμματιστική γλώσσα MATLAB (MATrix LABoratory) του οίκου MathWorks USA. Η MATLAB αποτελεί ένα ισχυρό προγραμματιστικό εργαλείο, μέσω του οποίου πραγματοποιούνται αριθμητικοί υπολογισμοί και οπτικοποιούνται δεδομένα. Όπως υποδηλώνεται και από το όνομα της, η MATLAB είναι ειδικά σχεδιασμένη για να διαχειρίζεται δεδομένα, τα οποία βρίσκονται υπό τη μορφή πινάκων. Διαθέτει ενσωματωμένες συναρτήσεις για την πραγματοποίηση υπολογισμών και την ανάλυση δεδομένων και επιπλέον παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα συγγραφής κώδικα, προκειμένου να αναπτύξει τις δικές του συναρτήσεις.



Εικόνα 6.3: Δομή μοντέλου.

6.4 Προσδιορισμός των στατιστικών κατανομών των εισόδων του μοντέλου.

Από την πραγματοποίηση επιτόπου μετρήσεων στο λατομείο Χάλυψ, πρόέκυψε ότι για ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης, παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των τιμών σχεδιασμού και των πραγματικών/μετρούμενων τιμών. Αυτές οι αποκλίσεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού του μοντέλου, προκειμένου τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερα και το μοντέλο να αναπαριστά όσο το δυνατόν καλύτερα το πραγματικό σύστημα. Κρίνεται επομένως σκόπιμο να γίνει διαχωρισμός μεταξύ εκείνων των εισόδων, των οποίων η τιμή είναι σταθερή (constant variables) και εκείνων των οποίων η τιμή καθορίζεται μέσω των στατιστικών κατανομών που περιγράφουν τη μεταβλητότητα τους (random variables).

Οι εισοδοί των οποίων η τιμή παραμένει σταθερή είναι:

- Η διάμετρος των διατρημάτων.
- Η κλίση των διατρημάτων.
- Το μήκος της υποδιάτρησης.
- Η σχετική κατά βάρος ισχύς της E.Y.
- Το ειδικό βάρος του πετρώματος.

Οι εισοδοί των οποίων η τιμή καθορίζεται μέσω στατιστικών κατανομών είναι:

- Το ύψος της βαθμίδας.
- Η απόσταση των διατρημάτων.
- Το φορτίο.
- Το μέγιστο μέγεθος των in situ τεμαχίων.
- Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος.
- Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης.

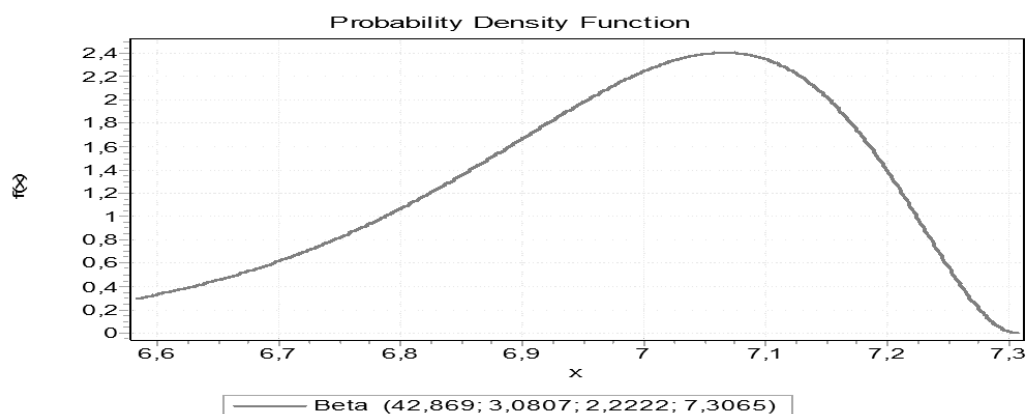
Απαραίτητη επομένως προϋπόθεση για την πραγματοποίηση στοχαστικών προσομοιώσεων, είναι ο προσδιορισμός των στατιστικών κατανομών που περιγράφουν καλύτερα τη συμπεριφορά των παραπάνω εισόδων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα Easy Fit του οίκου Mathwave Technologies.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων που αφορούν τις μεταβλητές εισόδου του μοντέλου.

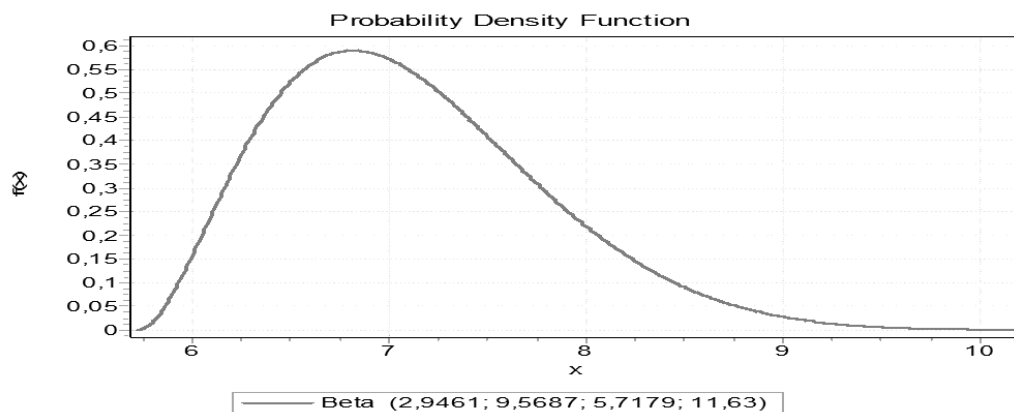
Πίνακας 6.1: Στατιστικά στοιχεία των μεταβλητών εισόδου.

	S	B	H	$x_{\max}$	E_d	ρ_L
Range	0,860	3,080	4,940	2,136	16,930	4,050
Mean	6,966	7,109	22,628	2,441	38,302	17,086
Variance	0,035	0,474	1,691	0,400	46,282	1,409
Std. Deviat.	0,187	0,689	1,301	0,633	6,803	1,187
Coef. of Var,	0,027	0,097	0,057	0,259	0,178	0,069
Std. Error	0,024	0,081	0,184	0,200	2,405	0,142
Skewness	-0,994	0,685	-0,731	0,113	0,595	-0,227
Excess Kurt.	1,057	0,261	-0,434	-0,050	-1,116	-0,958
Min	6,410	5,870	19,290	1,458	31,090	14,850
5%	6,504	6,120	20,048	1,458	31,090	14,950
10%	6,720	6,310	21,023	1,479	31,090	15,303
25%	6,868	6,563	21,527	1,958	31,958	16,157
50% (Median)	7,000	7,035	23,130	2,540	37,050	17,195
75%	7,113	7,458	23,620	2,796	45,900	18,120
90%	7,184	8,118	24,115	3,518	48,020	18,688
95%	7,209	8,557	24,214	3,594	48,020	18,839
Max	7,270	8,950	24,230	3,594	48,020	18,900

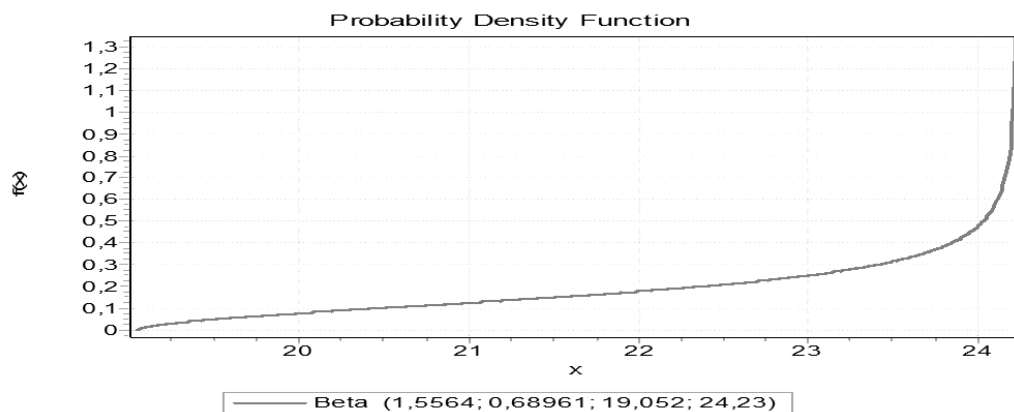
Στα γραφήματα που ακολουθούν (Εικόνα 6.4- Εικόνα 6.9), παρατίθενται οι κατανομές πιθανότητας που παρουσιάζουν την καλύτερη προσαρμογή στις μετρήσεις που ελήφθησαν, για κάθε μια από τις μεταβλητές εισόδους του συστήματος.



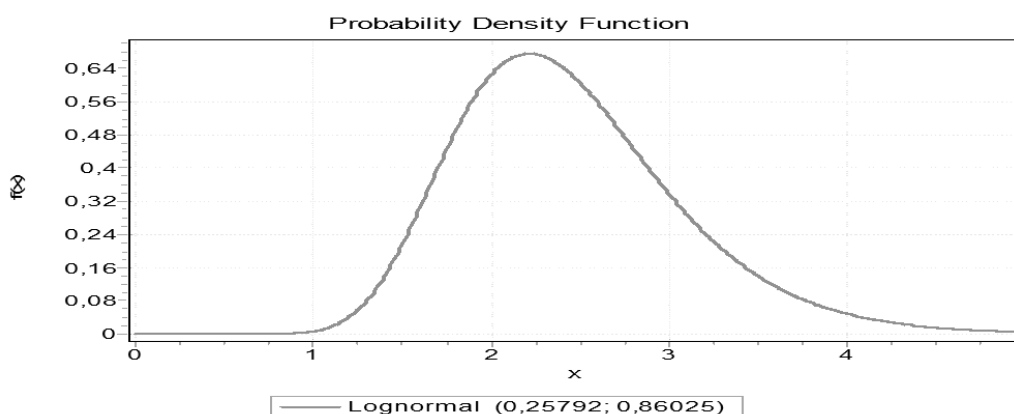
Εικόνα 6.4: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει την απόσταση των διατρημάτων.



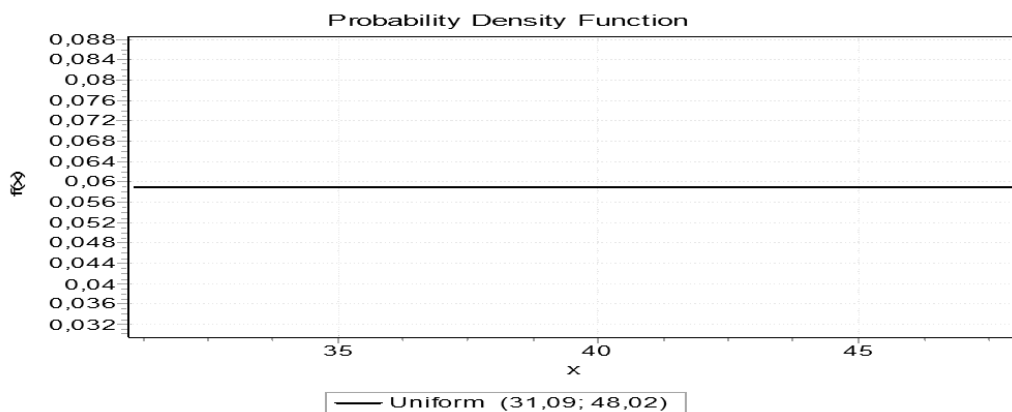
Εικόνα 6.5: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το φορτίο.



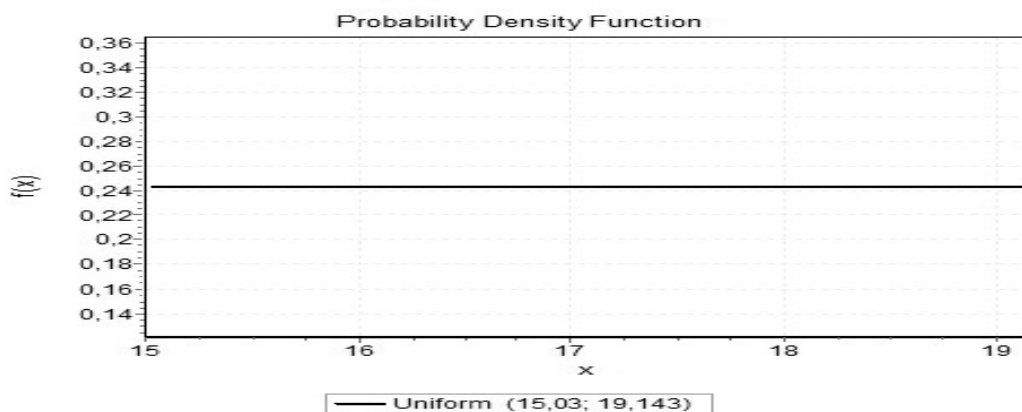
Εικόνα 6.6: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το ύψος βαθμίδας.



Εικόνα 6.7: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το μέγιστο μέγεθος των in situ τεμαχίων.



Εικόνα 6.8: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος.



Εικόνα 6.9: Γραφική απεικόνιση της κατανομής που περιγράφει τη γραμμική πυκνότητα γόμωσης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των κατανομών παρατίθενται στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί.

Η χρήση στατιστικών κατανομών για την περιγραφή της συμπεριφοράς των παραμέτρων εισόδου, εκτός του ότι αναπληρώνει την έλλειψη επαρκών δεδομένων που ενδεχομένως παρατηρείται για ορισμένες από αυτές, ενσωματώνει ποσοτικά στο μοντέλο την έννοια της αβεβαιότητας. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.2, το εύρος των κατανομών που έχουν επιλεγεί για την περιγραφή των μεταβλητών εισόδου, είναι μεγαλύτερο από το εύρος των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για την επιλογή και κατασκευή των στατιστικών κατανομών. Ως εκ τούτου, στο μοντέλο περιλαμβάνονται όλες οι δυνατές περιπτώσεις, ακόμα και εκείνες των «ακραίων τιμών»,

που βρίσκονται εκτός των ορίων που μετρήθηκαν, με μικρή ωστόσο πιθανότητα εμφάνισης.

Πίνακας 6.2: Τύπος και χαρακτηριστικά των στατιστικών κατανομών που περιγράφουν τις μεταβλητές εισόδου.

	S	B	H	x_{max}	E_d	ρ_L
Type	Beta	Beta	Beta	Lognormal	Uniform	Uniform
Min	2,222	5,718	19,052	0	26,519	15,030
Max	7,307	11,630	24,230	Plus Infin.	50,086	19,143
Mode	7,066	6,812	24,230	2,212	-	-
Mean	6,966	7,110	22,640	2,444	38,302	17,086
Variance	0,034	0,466	1,758	0,411	46,282	1,409
St. Dev.	0,186	0,682	1,326	0,641	6,803	1,187
Coef. Of Var.	0,027	0,096	0,059	0,262	0,178	0,069
Skewness	-0,990	0,632	-0,710	0,805	0,000	0,000
Kurtosis	1,316	0,174	-0,532	1,174	-1,200	-1,200

Η διαδικασία επιλογής των στατιστικών κατανομών που περιγράφουν τις μεταβλητές εισόδου του συστήματος, ακολουθείται από τη σύνταξη του κώδικα που απαιτείται για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων μέσω της MATLAB. Στην Εικόνα 6.10 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια άποψη από το περιβάλλον εργασίας της MATLAB, καθώς και από τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

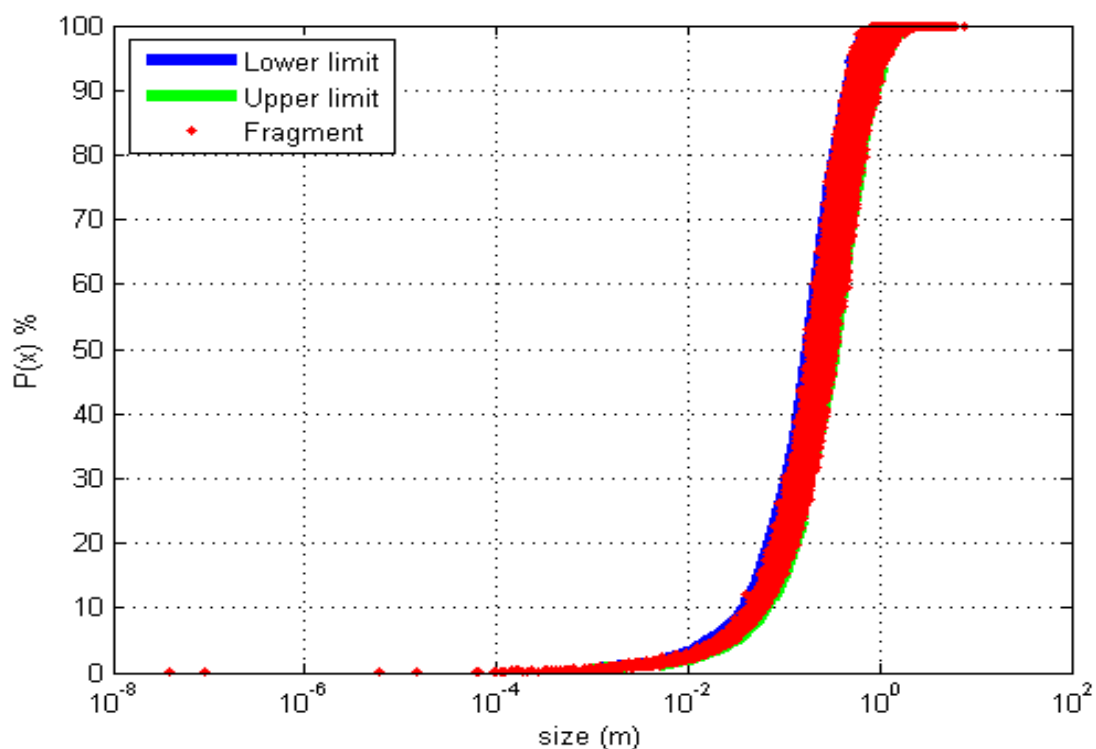
Απαραίτητη προϋπόθεση για την ολοκλήρωση του σταδίου κατασκευής του μοντέλου, είναι η διασφάλιση της ορθότητας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, προκειμένου να αποφευχθεί η εξαγωγή εσφαλμένων συμπερασμάτων. Ως εκ τούτου, κρίνεται σκόπιμος ο έλεγχος του τρόπου με τον οποίο το σύστημα «επιστρέφει» αποτελέσματα, βάσει των δεδομένων που εισάγονται σε αυτό. Με τη βοήθεια του εργαλείου Solver του MS Excel, υπολογίστηκαν οι κοκκομετρικές κατανομές για το «κατώτερο» και το «ανώτερο» όριο (lower/upper limit), βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τις επιτόπου μετρήσεις που έγιναν στο λατομείο Χάλυψ. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, αποσκοπώντας στο να διερευνηθεί εάν τα μεγέθη θραυσμένου πετρώματος (fragment) που εκτιμώνται από το μοντέλο, βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν οι καμπύλες για το «κατώτερο» και το «ανώτερο» όριο. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρατίθενται στην Εικόνα 6.11.

```

Editor - C:\Documents and Settings\Γεωργίου\Εργασία\MATLAB\LASTScenarios.m*
e Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] - 1.0 + ÷ 1.1 x [Icons] Stack: Base fx
1 %INPUT
2 - stm = 3.6; %stemming
3 - ard = 0.384; %angle radians
4 - sub = 1; %subdrill
5 - dmt = 165; %diameter
6 - rws = 75; %relative weight strength
7 - cmp = 83.33; %compression
8 - dns = 0.002649
9 %DISTRIBUTIONS
10 - n=100000;
11 - rng (1)
12 - x1 = rand(n,1);
13 - hgt= 19.052 + (24.23-19.052)*betainv(x1,1.5564, 0.68961); %bench height
14 - rng (2)
15 - x2 = rand(n,1);
16 - spc = 2.2222 + (7.3065-2.2222)*betainv(x2,42.869,3.0807); %spacing
17 - rng (3)
18 - x3 = rand(n,1);
19 - brd = 5.7179 + (11.36-5.7179)*betainv(x3,2.9461,9.5667); %burden
20 - rng (5)
21 - x5 = rand(n,1);
22 - dem = unifinv(x5,31.09,48.02); %dynamic elastic modulus
23 - rng (6)
24 - x6 = rand(n,1);
25 - xm = logninv(x6,0.86025,0.25792); %max in situ
26 - rng (7)
27 - x7 = rand(n,1);
28 - Xvar = xm.*x7; %x particle size
29 - rng (8)
30 - x8 = rand(n,1);
31 - led = unifinv(x8,15.13,19.073); %linear explosive density
32 %CALCULATIONS
33 - bi = 0.06*(40+(25000.*dns-50)+(dem/3)) ; %blastability index
34 - l = (hgt/(cos(ard)))+1 ; %total lenght
35 - ltot= l-stm ; %blasting column length
36 - bsd = 0.03*l ; %blasthole std deviation
37 - kg = led.*ltot ; %kg ANFO
38 - pf = kg./ (brd.*spc.*hgt) ; %powder factor
39 - uni = (2.2-14*(brd./dmt)).*((0.5+(spc./ (2*brd))).^0.5).*(1-(bsd./brd)).*(ltot./hgt) ; %uniformity index
40 - Y = gammainv(1+(1./uni));
41 - G = exp(Y);
42 - g = ((log(2)).^(1./uni))./G;
43 - x50 = -0.134+1.306*(((bi.*(pf.^(-0.8)).*(kg.^ (1/6)))*((115/rws)^(19/30)))/100).*g); %mean size
44 - und = 0.99+0.734*(2*log(2)*log(xm./x50).*uni); %undulation parameter
45 %OUTPUT
46 - f = ((log(xm./Xvar))./(log(xm./x50))).^und;
47 - p = 1./(1+f);
48
49 - s = find(p>1)
50

```

Εικόνα 6.10:Τμήμα του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

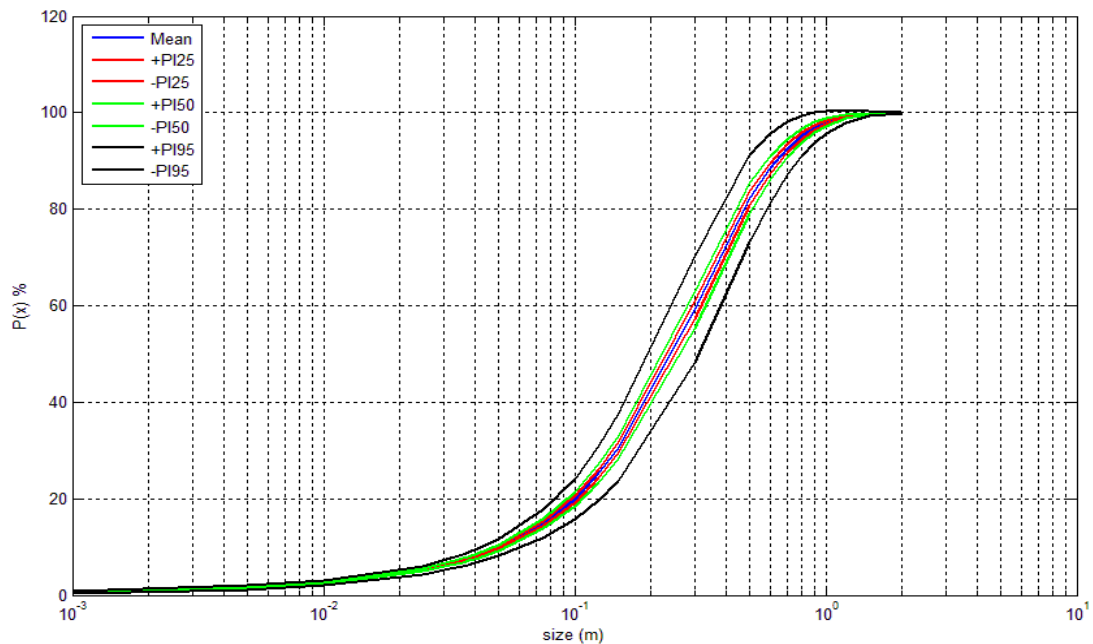


Εικόνα 6.11: Μεγέθη θραυσμένου πετρώματος που εκτιμώνται από το μοντέλο για 100000 επαναλήψεις της μεθόδου Monte Carlo.

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 6.11, η συντριπτική πλειονότητα των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος που εκτιμώνται από το μοντέλο, βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν οι καμπύλες για το «καλύτερο» και «χειρότερο» πιθανό σενάριο, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα με την οποία το μοντέλο εκτιμά το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος. Η παρουσία κάποιων ελάχιστων σημείων που τοποθετούνται εκτός των δύο καμπυλών (outliers), κυρίως στα τμήματα των πολύ λεπτομερών και πολύ χονδρομερών τεμαχίων, οφείλεται στη διεύρυνση των ορίων των στατιστικών κατανομών που περιγράφουν τις μεταβλητές εισόδου, προκειμένου να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς και κάποιες «οριακές» περιπτώσεις.

Στην Εικόνα 6.12 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα εύρη τιμών της κοκκομετρικής κατανομής των εξορυγμένων τεμαχίων πετρώματος, για τα διαστήματα πρόβλεψης μέσης τιμής (mean prediction intervals) των 25%, 50% και 95%. Τα διαστήματα πρόβλεψης, αναφέρονται στα ποσοστά του συνολικού πληθυσμού το οποίο βρίσκεται γύρω από τη μέση τιμή, όπως αυτά προέκυψαν έπειτα από την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Το εύρος για κάθε διάστημα, ορίζεται από τις καμπύλες «+» και «-» που αντιστοιχούν στο κάθε ποσοστό, ενώ η καμπύλη «Mean» αναφέρεται στη μέση τιμή

μεγέθους που υπολογίστηκε για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα, έπειτα από την πραγματοποίηση 100000 προσομοιώσεων. Για την πραγματοποίηση αυτών των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης, όπως αυτό εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ.



Εικόνα 6.12: Διαστήματα πρόβλεψης 25%, 50% και 95% γύρω από τη μέση τιμή.

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται η μέση τιμή μεγέθους και τα διαστήματα πρόβλεψης 25%, 50% και 95%, για τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50% και 75%.

Πίνακας 6.3: Η μέση τιμή μεγέθους και τα διαστήματα πρόβλεψης 25%, 50% και 95%, που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50% και 75%.

	Mean	Prediction Interval					
	Value	-25%	+25%	-50%	+50%	-95%	+95%
x_{25%} (m)	0,126	0,121	0,130	0,117	0,135	0,100	0,152
x_{50%} (m)	0,249	0,240	0,259	0,230	0,269	0,193	0,306
x_{75%} (m)	0,421	0,405	0,437	0,387	0,455	0,322	0,520

6.5 Ανάλυση δεδομένων των σεναρίων προσομοίωσης

Σκοπός των προσομοιώσεων είναι ο υπολογισμός της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένων πετρώματος, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα των διάφορων υποθετικών σχεδίων ανατίναξης, ενσωματώνοντας σε αυτά την έννοια της αβεβαιότητας. Ως έξοδος του συστήματος ορίστηκε το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, για τον υπολογισμό των οποίων έγινε χρήση της εξίσωσης Swebrec, για τους λόγους που ήδη έχουν αναφερθεί στην Παράγραφο 2.4.4.

Η αποτελεσματική χρήση των εξισώσεων των εμπειρικών μοντέλων εκτίμησης κοκκομετρικών κατανομών, προϋποθέτει τη βαθμονόμηση τους βάσει των συνθηκών που επικρατούν στον εκάστοτε λατομικό χώρο. Μέσω των βαθμονομημένων εξισώσεων, παρέχεται η δυνατότητα αποτελεσματικότερου σχεδιασμού των μελλοντικών ανατινάξεων, καθώς αντί των γενικευμένων εξισώσεων, χρησιμοποιούνται εξισώσεις οι οποίες έχουν προκύψει βάσει πραγματικών δεδομένων και οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου λατομικού χώρου, αποτυπώνοντας καλύτερα τον βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και της κοκκομετρίας που επιτυγχάνεται. Για τον λόγο αυτό, ο προσδιορισμός του μεγέθους εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο και του συντελεστή κυματοειδούς μορφής, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις βαθμονομημένες σχέσεις οι οποίες υπολογίστηκαν στο Παράγραφο 4.3.

Η διαδικασία της πιθανολογικής ανάλυσης, περιλαμβάνει τη δημιουργία υποθετικών σχεδίων ανατίναξης και την πραγματοποίηση προσομοιώσεων, προκειμένου να καταγραφούν οι μεταβολές που επιφέρουν στην κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος, οι αλλαγές των τεχνικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης. Η επιλογή των υποθετικών σεναρίων έγινε έχοντας ως γνώμονα τους λόγους συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που παρατίθενται στον Πίνακα 6.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.4: Λόγοι συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης.

Min	Ratio	Max
2	$< H/B <$	5
0,02	$< B/d <$	0,045
1	$< S/B <$	1,3
1	$< B/H_0 <$	2,0

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.4, σε ότι αφορά τον λόγο H/B (stiffness ratio) οι τιμές που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία των υποθετικών σεναρίων κυμαίνονταν από 2 έως 5. Σύμφωνα με τον Konya (2003), όταν η τιμή του λόγου H/B λαμβάνει την τιμή 2, τότε η θραύση που επιτυγχάνεται είναι μη ικανοποιητική, το αέριο ωστικό κύμα που δημιουργείται είναι ισχυρό και οι εδαφικές δονήσεις που προκαλούνται είναι έντονες, ενώ αντιθέτως, όταν η τιμή του λόγου H/B λαμβάνει την τιμή 4, τότε θραύση που επιτυγχάνεται είναι ικανοποιητική, διατηρώντας ταυτόχρονα την προκαλούμενη όχληση σε χαμηλά επίπεδα.

Οι τιμές που επιλέχθηκαν για την δημιουργία των υποθετικών σεναρίων τόσο για τον λόγο B/d όσο και για τον λόγο S/B , είναι οι συνηθισμένες που χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό ανατινάξεων. Σε ότι αφορά τον λόγο S/B , η τιμή 1 αναφέρεται στην περίπτωση του τετραγωνικού κάρναβου, ενώ η τιμή 1,3 στην περίπτωση του ορθογώνιου κάρναβου. Τέλος, σχετικά με τον λόγο B/H_0 , σύμφωνα με τον Horsley (όπως αναφέρεται από τον Παναγιώτου, χ.χ.), στις περισσότερες περιπτώσεις το μήκος επιγόμωσης λαμβάνεται ίσο με το φορτίο, ενώ σύμφωνα με τους Hoek *et al.* (όπως αναφέρεται από τον Παναγιώτου, χ.χ.), το μήκος της επιγόμωσης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο του φορτίου.

Τα σενάρια τα οποία μελετήθηκαν, περιελάμβαναν μεταβολές στο ύψος βαθμίδας (H), στο μήκος επιγόμωσης (H_0), στο φορτίο (B) και στην απόσταση των διατρημάτων (S), διατηρώντας τις τιμές των υπολοίπων τεχνικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, ίδιες με εκείνες του σχεδίου που ήδη εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ. Η συγκεκριμένη επιλογή, εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την πραγματοποίηση προσομοιώσεων για τα υποθετικά σχέδια ανατινάξεων, θα είναι άμεσα συγκρίσιμα με εκείνα τα οποία ήδη έχουν υπολογιστεί για το εφαρμοζόμενο σχέδιο ανατίναξης.

Ως εκ τούτου, όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν επιλέγοντας ως εκρηκτική ύλη το ANFO το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις ανατινάξεις που καταγράφηκαν και ως εναυσματική γόμωση τη ζελατινοδυναμίτιδα. Η διάμετρος των διατρημάτων διατηρήθηκε στα 165mm και η κλίση όρυξης τους στις 22° . Ο αριθμός των επαναλήψεων της μεθόδου Monte Carlo για το κάθε υποθετικό σενάριο ήταν 100000.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ως έξοδος του συστήματος ορίστηκε η κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι ο σχολιασμός και η αξιολόγηση των υποθετικών σεναρίων, επικεντρώνεται στη

μεταβολή των τιμών μεγέθους που προκύπτουν για τα διάφορα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου. Στην πραγματικότητα υπάρχουν και άλλες, εξίσου σημαντικές παράμετροι, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας ενός υποθετικού σεναρίου/σχεδίου ανατίναξης. Τέτοιες παράμετροι, μεταξύ άλλων, είναι το οικονομικό κόστος της ανατίναξης, η τιμή της ειδικής κατανάλωσης E.Y., η οποία θα πρέπει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων, τα οποία εξασφαλίζουν αφενός την ικανοποιητική θραύση του πετρώματος, αφετέρου το ότι τα τεμάχια του εξορυγμένου πετρώματος δεν θα εκτοξευθούν σε πολύ μεγάλη απόσταση, λόγω αυξημένης συγκέντρωσης E.Y. ανά κυβικό μέτρο του προς εξόρυξη όγκου. Ωστόσο η αξιολόγηση των παραμέτρων αυτών απαιτεί την ύπαρξη επιπλέον δεδομένων, τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

6.6 Προσομοιώσεις

6.6.1 Επίδραση του λόγου H/B

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, μεταβάλλοντας τον λόγο του ύψους της βαθμίδας (H) προς το φορτίο (B), διατηρώντας την τιμή του ύψους (H) σταθερή. Ως εκ τούτου, η τιμή ύψους που επιλέχθηκε ήταν τα 22,63m, η οποία αποτελεί τη μέση τιμή για τις δέκα ανατινάξεις παραγωγής. Οι μέσες τιμές των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για τις ανατινάξεις παραγωγής, χρησιμοποιήθηκαν επίσης, τόσο για την απόσταση των διατρημάτων (6,97m), όσο και για την επιγύμωση (3,6m).

Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης, καθώς και οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα 25%, 50% και 75% αθροιστικά διερχόμενου, για κάθε ένα από τα τέσσερα υποθετικά σενάρια, παρατίθενται στον Πίνακα 6.5 που ακολουθεί.

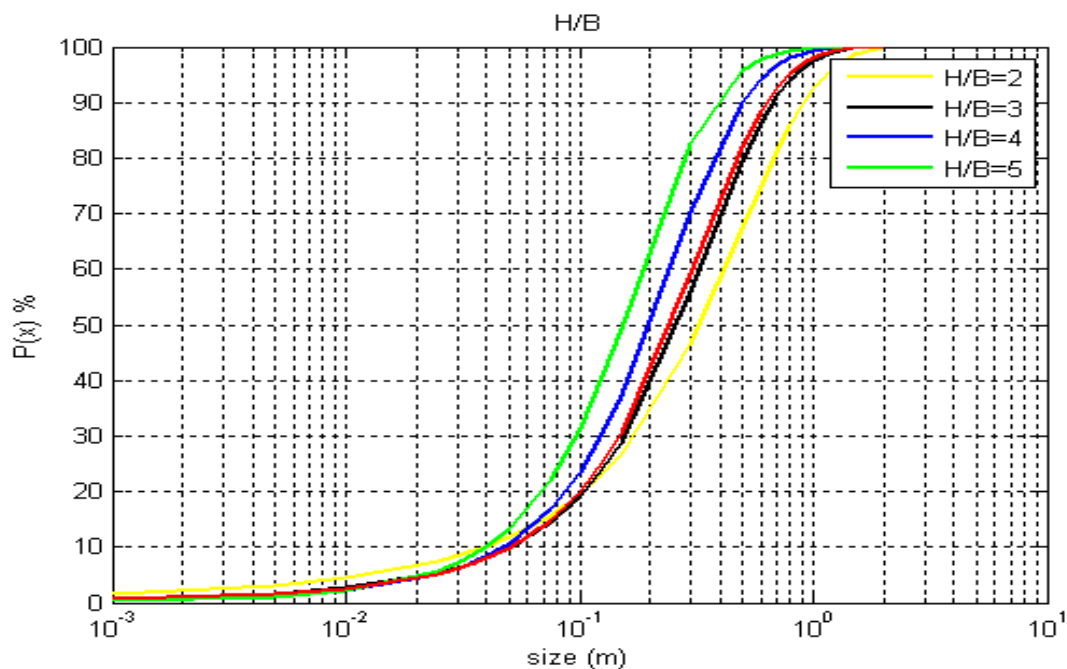
Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.5, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου H/B, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας (n) και επομένως τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η θραύση η οποία επιτυγχάνεται. Επιπλέον, οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50% και 75%, μειώνονται σημαντικά καθώς μεγαλώνει η τιμή του λόγου H/B. Η τιμή της ειδικής κατανάλωσης E.Y. (q), από $0,21\text{kg/m}^3$ που είναι στην περίπτωση του σεναρίου #1, αυξάνεται σχεδόν κατά 2,5 φορές στην περίπτωση του σεναρίου #4. Η διαφορά στην τιμή της ειδικής κατανάλωσης E.Y. οφείλεται στη μεταβολή του φορτίου, το οποίο από 11,32m στην περίπτωση του #1 σεναρίου, μειώθηκε στα 4,53m στην περίπτωση του #4, γεγονός το οποίο επιφέρει μείωση

της τιμής που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, από 0,33m (σενάριο #1) σε 0,154m (σενάριο #4). Μειώνοντας επομένως την τιμή του φορτίου κατά 60%, επιτυγχάνουμε αύξηση της ειδικής κατανάλωσης κατά 150%, η οποία τελικά επιφέρει αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας κατά 63,7% και μείωση της τιμής του x_{50} κατά περίπου 53%.

Πίνακας 6.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B.

	ΣΕΝΑΡΙΟ			
	#1 H/B=2	#2 H/B=3	#3 H/B=4	#4 H/B=5
H (m)	22,63	22,63	22,63	22,63
S (m)	6,97	6,97	6,97	6,97
B (m)	11,32	7,54	5,66	4,53
H₀ (m)	3,60	3,60	3,60	3,60
A	4,17	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	373	373	373	373
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,210	0,315	0,419	0,524
n	1,002	1,326	1,515	1,640
b	3,000	3,947	4,799	5,564
x_{25%} (m)	0,138	0,131	0,107	0,085
x_{50%} (m)	0,330	0,265	0,201	0,154
x_{75%} (m)	0,602	0,451	0,333	0,251

Στην Εικόνα 6.13 που ακολουθεί, παρατίθενται οι κοκκομετρικές κατανομές που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα υποθετικά σενάρια. Σε όλα τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν στο παρόν κεφάλαιο, με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται η καμπύλη που αντιστοιχεί στην κοκκομετρική κατανομή που υπολογίστηκε, βάσει του σχεδίου ανατίναξης (σενάριο αναφοράς) που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ.



Εικόνα 6.13: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B .

Παρατηρώντας μόνο τις τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα 25%, 50% και 75% αθροιστικά διερχόμενου, θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι το σενάριο #4 ($H/B=5$) είναι το καταλληλότερο, λόγω του ότι εξασφαλίζει λεπτομερέστερη και πιο ομοιόμορφη κατανομή σε σχέση με τα υπόλοιπα τρία σενάρια. Παρόλα αυτά, η τιμή της ειδικής κατανάλωσης $E.Y.$ που αντιστοιχεί στο σενάριο αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλή ($0,524\text{kg/m}^3$), γεγονός το οποίο ενδεχομένως να οδηγήσει σε εκτόξευση των τεμαχίων του θραυσμένου πετρώματος σε πολύ μεγάλη απόσταση, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό μέτρο του προς εξόρυξη όγκου. Επιπλέον, η αυξημένη τιμή της ειδικής κατανάλωσης $E.Y.$, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους ανατίναξης. Η αύξηση αυτή ωστόσο, ενδεχομένως να μπορεί να αντισταθμίζεται, από τη μείωση του κόστους θραύσης/ταξινόμησης, που επιτυγχάνεται λόγω της ομοιομορφίας που παρουσιάζει η κοκκομετρική κατανομή. Προκειμένου λοιπόν να αξιολογηθούν περαιτέρω τα διάφορα υποθετικά σενάρια, απαιτείται η ύπαρξη επιπλέον δεδομένων, τα οποία ωστόσο δεν ήταν διαθέσιμα στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Στη συνέχεια διαμορφώθηκαν επιπλέον υποθετικά σενάρια για τον λόγο H/B , τα οποία αναφέρονταν σε περιπτώσεις με μικρότερο ύψος βαθμίδας. Οι τιμές ύψους που

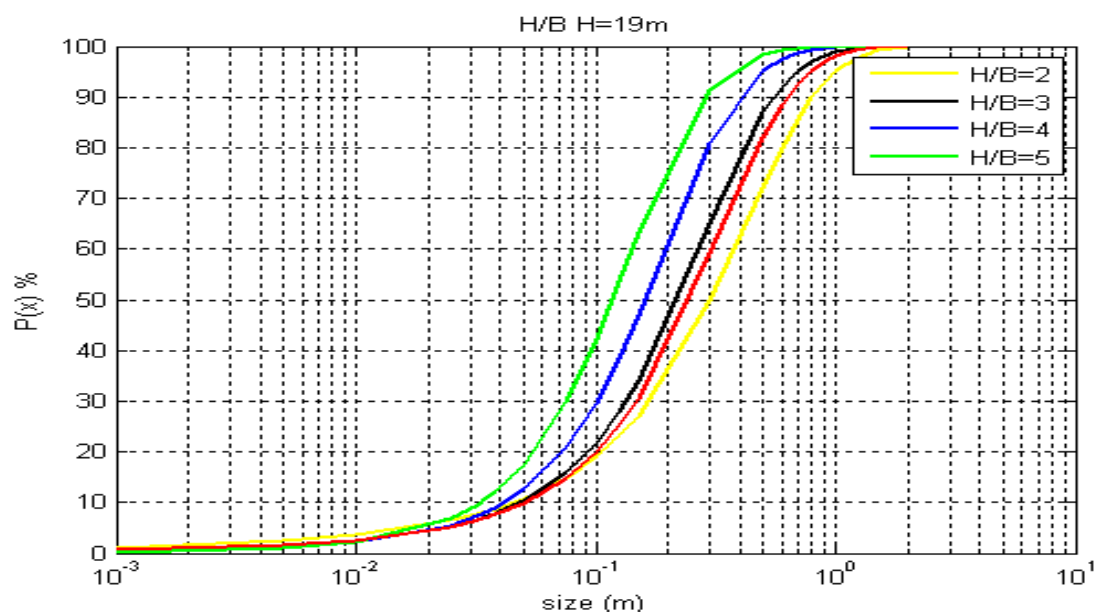
επιλέχτηκαν ήταν 15m και 19m, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον Πίνακα 6.6 που ακολουθεί.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.6 και σε ότι αφορά τις βαθμίδες των 19m, μειώνοντας την τιμή του φορτίου του σεναρίου #5 ($H/B=2$) κατά 60%, επιτυγχάνεται αύξηση της ειδικής κατανάλωσης Ε.Υ. κατά 150%, η οποία οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας κατά 53,3% και μείωση του x_{50} κατά 61,4% (σενάριο #8, $H/B=5$). Αντίστοιχα, για τις βαθμίδες των 15m, μείωση της τιμής του φορτίου του σεναρίου #9 ($H/B=2$) κατά 60%, επιφέρει αύξηση της ειδικής κατανάλωσης Ε.Υ. κατά 150%, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας κατά 45,2% και τη μείωση του x_{50} κατά 70% (σενάριο #12, $H/B=5$).

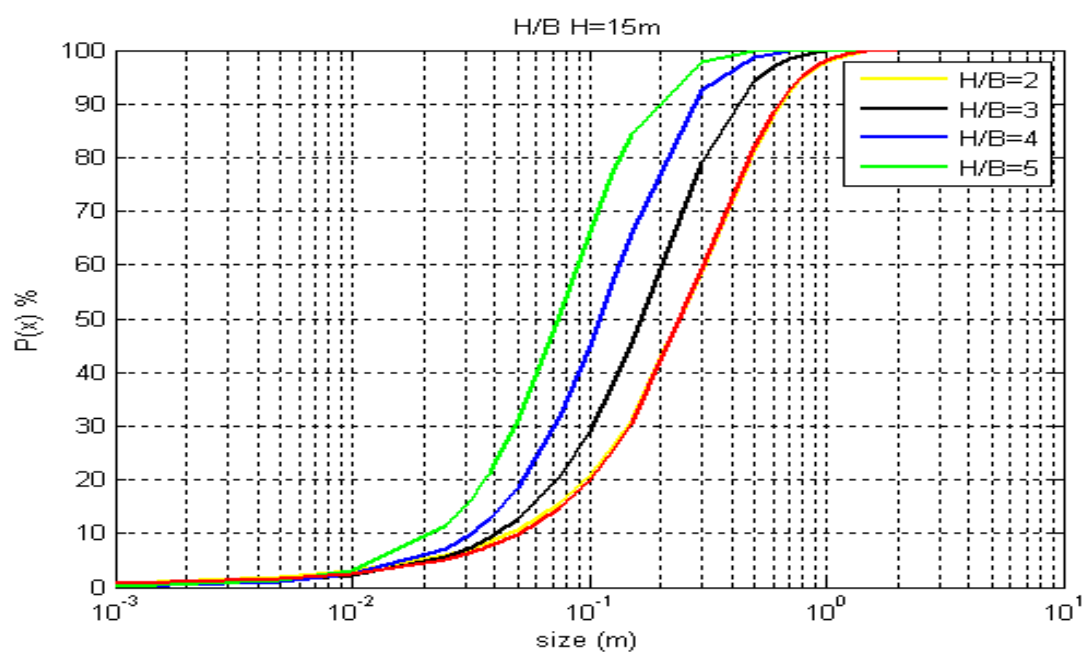
Πίνακας 6.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B , για $H=19m$ και $H=15m$.

	ΣΕΝΑΡΙΟ							
	#5 $H/B=2$	#6 $H/B=3$	#7 $H/B=4$	#8 $H/B=5$	#9 $H/B=2$	#10 $H/B=3$	#11 $H/B=4$	#12 $H/B=5$
H (m)	19	19	19	19	15	15	15	15
S (m)	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97
B (m)	9,50	6,33	4,75	3,80	7,50	5,00	3,75	3,00
H₀ (m)	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
A	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	306	306	306	306	232	232	232	232
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086	17,086	17,086	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,243	0,365	0,487	0,609	0,296	0,445	0,593	0,741
n	1,139	1,441	1,624	1,747	1,294	1,577	1,756	1,880
b	3,374	4,467	5,443	6,337	3,961	5,264	6,457	7,612
x_{25%} (m)	0,137	0,114	0,088	0,066	0,121	0,089	0,063	0,044
x_{50%} (m)	0,303	0,221	0,160	0,117	0,248	0,165	0,111	0,075
x_{75%} (m)	0,534	0,370	0,262	0,189	0,428	0,273	0,180	0,119

Οι κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B , για $H=19m$ και $H=15m$, απεικονίζονται στα διαγράμματα της Εικόνας 6.14 και της Εικόνας 6.15, αντίστοιχα.



Εικόνα 6.14: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B για $H=19\text{m}$.



Εικόνα 6.15: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου H/B για $H=15\text{m}$.

6.6.2 Επίδραση του λόγου B/d

Τα επόμενα υποθετικά σενάρια που διαμορφώθηκαν περιελάμβαναν μεταβολή του λόγου του φορτίου (B) προς την διάμετρο του διατρήματος (d). Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης, καθώς και οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα

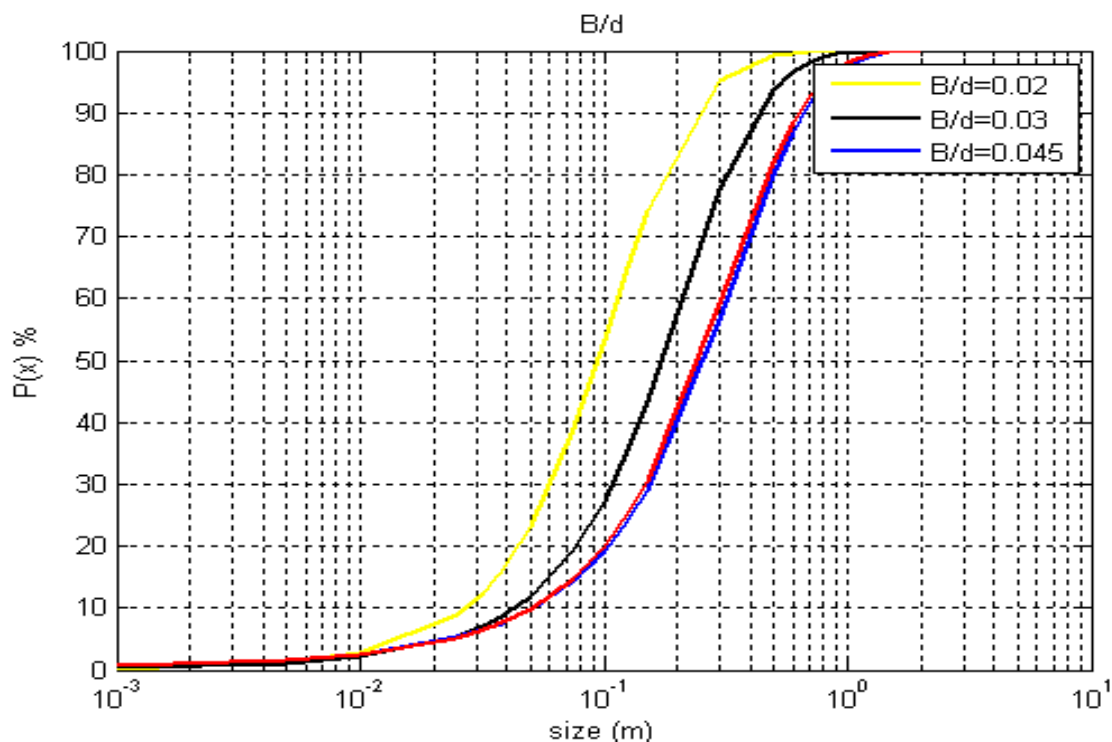
25%, 50% και 75% αθροιστικά διερχόμενου, για κάθε ένα από τα υποθετικά σενάρια, παρατίθενται στον Πίνακα 6.7 που ακολουθεί.

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον Πίνακα 6.7, όσο μικρότερη είναι η τιμή του λόγου B/d , τόσο μεγαλύτερη είναι η ομοιομορφία που παρουσιάζει η κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος. Για την περίπτωση του σεναρίου #13 ($B/d=0,02$), η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας n είναι 1,773, ενώ για το σενάριο #15 ($B/d=0,045$) η τιμή του είναι ίση με 1,336. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της ιδιαίτερα υψηλής τιμής της ειδικής κατανάλωσης $E.Y.$ ($0,717\text{kg/m}^3$), η τιμή του μεγέθους τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο για το σενάριο #13, είναι ιδιαίτερα μικρή ($x_{50}=0,095\text{m}$), γεγονός το οποίο ενδεχομένως καθιστά το εξορυγμένο πέτρωμα ακατάλληλο προς εκμετάλλευση/πώληση. Η αύξηση της τιμής του φορτίου του σεναρίου #13 κατά 125%, επιφέρει μείωση της ειδικής κατανάλωσης $E.Y.$ κατά 55,5%, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ομοιομορφίας κατά 24,6% και την αύξηση της τιμής του x_{50} κατά 175% (σενάριο #15).

Πίνακας 6.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/d .

	ΣΕΝΑΡΙΟ		
	#13 $B/d=0,02$	#14 $B/d=0,03$	#15 $B/d=0,045$
H (m)	22,63	22,63	22,63
S (m)	6,97	6,97	6,97
B (m)	3,30	4,95	7,43
H_o (m)	3,60	3,60	3,60
A	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	373	373	373
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,717	0,478	0,319
n	1,773	1,591	1,336
b	6,807	5,233	3,981
x_{25%} (m)	0,054	0,094	0,130
x_{50%} (m)	0,095	0,173	0,262
x_{75%} (m)	0,153	0,283	0,445

Στην Εικόνα 6.16 που ακολουθεί, απεικονίζονται οι κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου του φορτίου (B) προς την διάμετρο του διατρήματος (d).



Εικόνα 6.16: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/d.

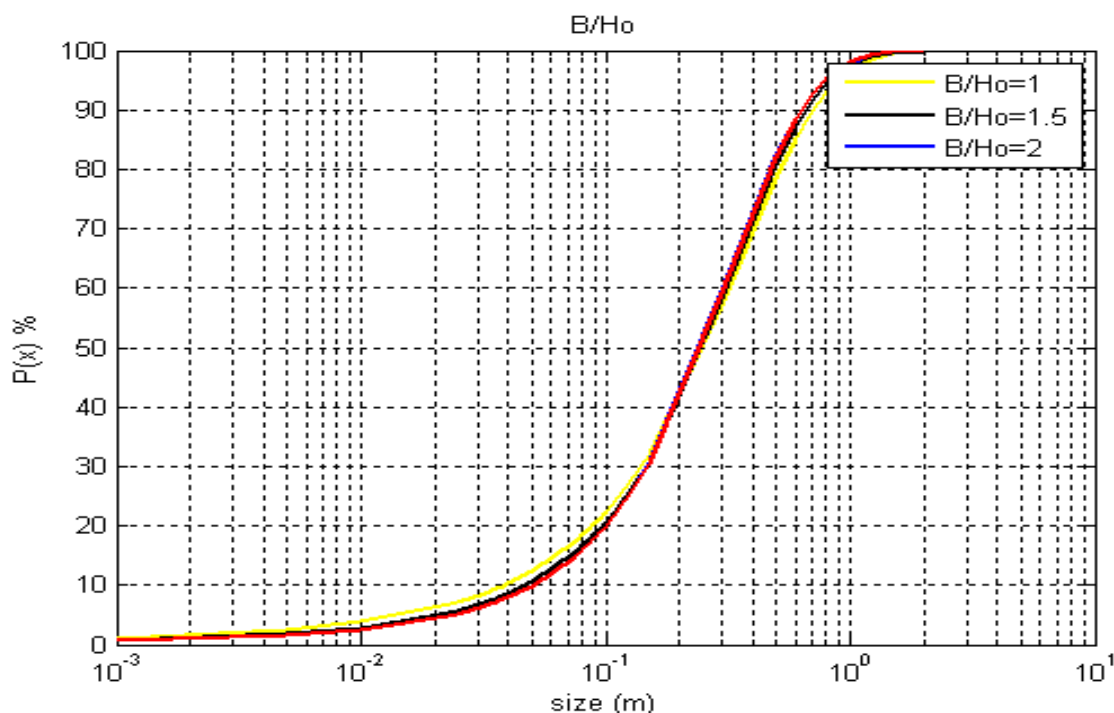
6.6.3 Επίδραση του λόγου B/H₀

Εν συνεχεία μελετήθηκαν υποθετικά σενάρια τα οποία προέκυψαν από τη μεταβολή του λόγου του φορτίου (B) προς την επιγύμωση (H₀), διατηρώντας σταθερή την τιμή του φορτίου. Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης, καθώς και οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα 25%, 50% και 75% αθροιστικά διερχόμενου, για κάθε ένα από τα υποθετικά σενάρια, παρατίθενται στον Πίνακα 6.8 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/H_0 , διατηρώντας σταθερή την τιμή του B .

	ΣΕΝΑΡΙΟ		
	#16 $B/H_0=1$	#17 $B/H_0=1,5$	#18 $B/H_0=2$
H (m)	22,63	22,63	22,63
S (m)	6,97	6,97	6,97
B (m)	7,05	7,05	7,05
H₀ (m)	7,05	4,70	3,52
A	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	314	354	374
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,286	0,322	0,340
n	1,157	1,305	1,379
b	3,618	3,974	4,163
x_{25%} (m)	0,116	0,123	0,126
x_{50%} (m)	0,256	0,252	0,249
x_{75%} (m)	0,459	0,434	0,420

Τόσο από τον Πίνακα 6.8 όσο και από την Εικόνα 6.17 που ακολουθεί, προκύπτει ότι η μεταβολή του μήκους της επιγόμωσης επιφέρει μικρές μόνο αλλαγές, τόσο στην ομοιομορφία της κοκκομετρικής κατανομής, όσο και στο μέγεθος του εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο. Η τιμή μεγέθους που αντιστοιχεί στο 75% αθροιστικά διερχόμενο, από 0,459m (σενάριο #16, $B/H_0=1$) μειώνεται κατά 8,5% λαμβάνοντας την τιμή των 0,42m (σενάριο #18, $B/H_0=2$), ενώ η αντίστοιχη ελάττωση μεταξύ των δύο σεναρίων για την τιμή του x_{50} , είναι ίση με 2,73%. Η μείωση του ποσοστού των χονδρομερών τεμαχίων, σχετίζεται με τον υποδιπλασιασμό του μήκους επιγόμωσης και επομένως με τη μείωση του τμήματος της βαθμίδας που βρίσκεται στο ύψος της επιγόμωσης, από το οποίο συνήθως προέρχονται τα χονδρομερή τεμάχια πετρώματος. Ωστόσο, πλην της επιθυμητής κοκκομετρίας, η επιλογή του μήκους επιγόμωσης θα πρέπει πάντοτε να γίνεται έχοντας ως γνώμονα τον ικανοποιητικό εγκλεισμό την εκρηκτικής εντός τους διατρήματος.



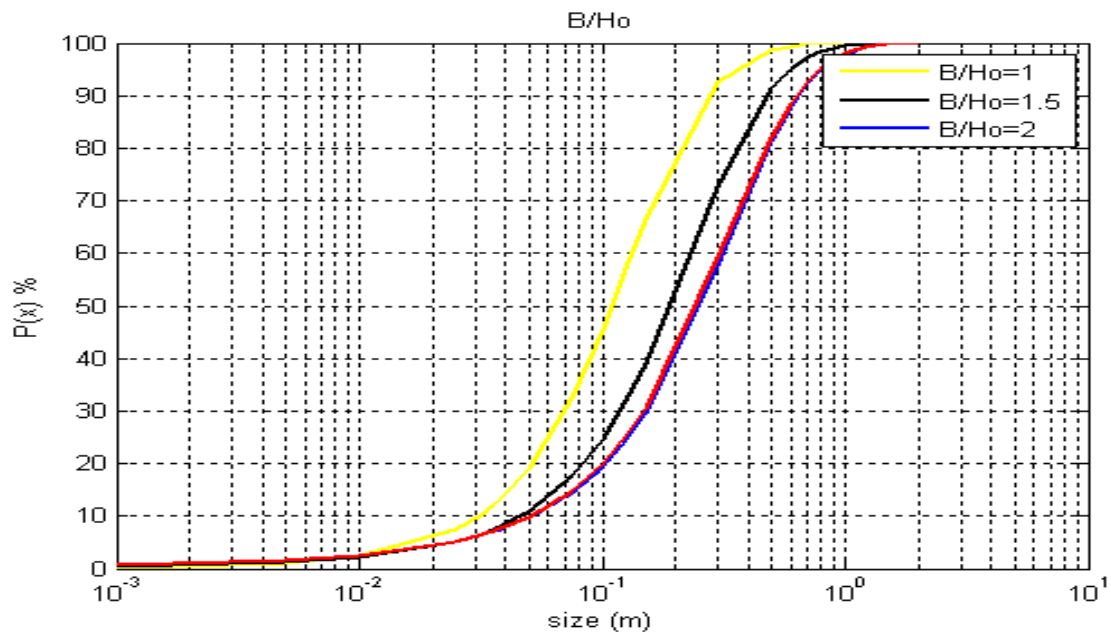
Εικόνα 6.17: Κοκκομετρική κατανομή των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/H_o , διατηρώντας σταθερή την τιμή του B .

Τα επόμενα υποθετικά σενάρια που μελετήθηκαν, περιελάμβαναν και πάλι μεταβολή του λόγου B/H_o , διατηρώντας αυτή τη φορά σταθερή την τιμή του φορτίου, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον Πίνακα 6.9 που ακολουθεί. Από τον Πίνακα 6.9 προκύπτει ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του λόγου B/H_o , τόσο μεγαλύτερη είναι η ομοιομορφία που παρουσιάζει η κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος. Για την περίπτωση του σεναρίου #19 ($B/H_o=1$), η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας n είναι 1,742, ενώ για το σενάριο #21 ($B/H_o=2$) η τιμή του n είναι ίση με 1,357. Ο διπλασιασμός της τιμής του φορτίου του σεναρίου #19, οδηγεί σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης E.Y. κατά 50%, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ομοιομορφίας κατά 22% και την αύξηση της τιμής του x_{50} κατά 132% (σενάριο #21). Η αντίστοιχη αύξηση μεταξύ των δύο σεναρίων για την τιμή του x_{25} είναι ίση με 106%, ενώ για την τιμή του x_{75} είναι 143%.

Πίνακας 6.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/H_0 , διατηρώντας σταθερή την τιμή του H_0 .

	ΣΕΝΑΡΙΟ		
	#19 $B/H_0=1$	#20 $B/H_0=1,5$	#21 $B/H_0=2$
H (m)	22,63	22,63	22,63
S (m)	6,97	6,97	6,97
B (m)	3,60	5,40	7,20
H_0 (m)	3,60	3,60	3,60
A	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	373	373	373
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,657	0,438	0,329
n	1,742	1,542	1,357
b	6,437	4,939	4,066
X_{25%} (m)	0,062	0,102	0,128
X_{50%} (m)	0,110	0,191	0,255
X_{75%} (m)	0,178	0,315	0,432

Στην Εικόνα 6.18 που ακολουθεί, απεικονίζονται οι κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/H_0 .



Εικόνα 6.18: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου B/H_0 , διατηρώντας σταθερή την τιμή του H_0 .

6.6.4 Επίδραση του λόγου S/B

Τα σενάρια που μελετήθηκαν στη συνέχεια περιελάμβαναν μεταβολή του λόγου της απόστασης μεταξύ των διατηρημάτων (S) προς το φορτίο (B), διατηρώντας την τιμή της απόστασης μεταξύ των διατηρημάτων σταθερή. Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης, καθώς και οι τιμές μεγέθους που αντιστοιχούν στα 25%, 50% και 75% αθροιστικά διερχόμενου, για κάθε ένα από τα υποθετικά σενάρια, παρατίθενται στον Πίνακα 6.10 που ακολουθεί.

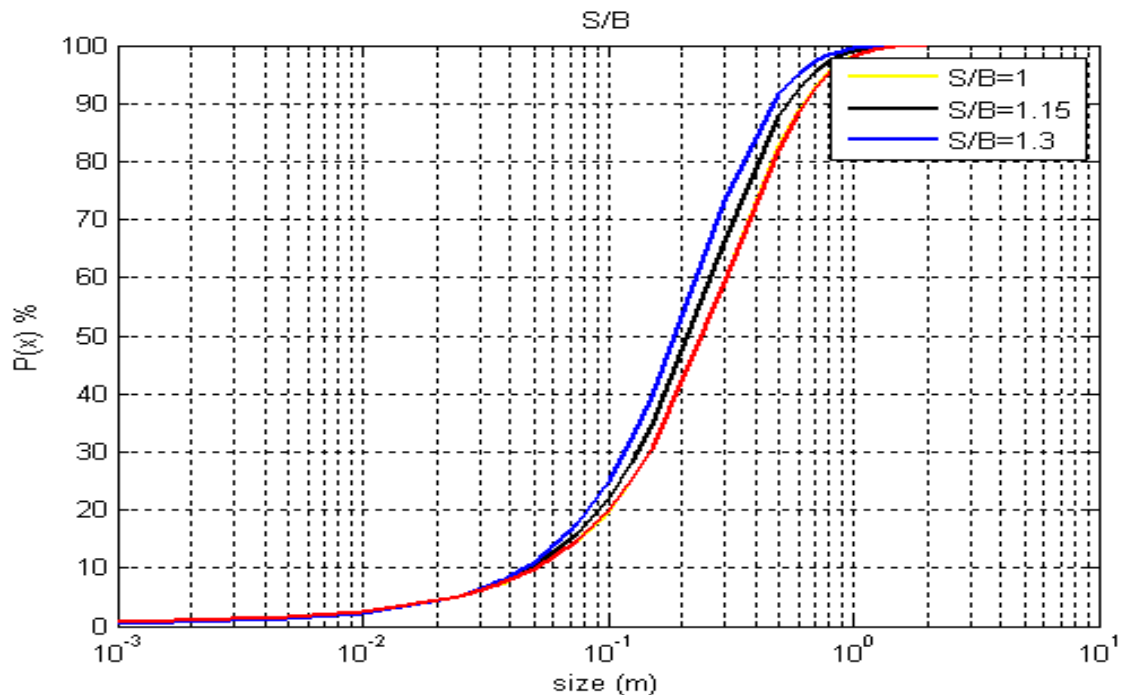
Πίνακας 6.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B, διατηρώντας σταθερή την τιμή του S.

	ΣΕΝΑΡΙΟ		
	#22 S/B=1	#23 S/B=1,15	#24 S/B=1,3
H (m)	22,63	22,63	22,63
S (m)	6,97	6,97	6,97
B (m)	6,97	6,06	5,36
H₀ (m)	3,60	3,60	3,60
A	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	373	373	373
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,340	0,391	0,442
n	1,380	1,472	1,546
b	4,161	4,576	4,967
x_{25%} (m)	0,126	0,113	0,101
x_{50%} (m)	0,248	0,217	0,190
x_{75%} (m)	0,418	0,360	0,312

Από τον Πίνακα 6.10 προκύπτει ότι η μείωση της τιμής του φορτίου, επιφέρει μείωση της τιμής του x_{50} , με ταυτόχρονη αύξηση της τιμής του συντελεστή ομοιομορφίας. Η τιμή του φορτίου από 6,97m (σενάριο #22, S/B=1), μειώνεται κατά 23%, λαμβάνοντας την τιμή 5,36m (σενάριο #24, S/B=1,3), γεγονός το οποίο οδηγεί σε μείωση της τιμής του x_{50} κατά 23,4% και σε αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας κατά 12%. Σε ότι αφορά το 25% αθροιστικά διερχόμενο, η τιμή του μειώνεται κατά 19,8%, ενώ η τιμή του 75% αθροιστικά διερχόμενου μειώνεται κατά σχεδόν 25%. Ως εκ τούτου, η μεταβολή του λόγου S/B, διατηρώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ των διατηρημάτων, επιφέρει

μεγαλύτερες μεταβολές στο τμήμα της κοκκομετρικής κατανομής που σχετίζεται με τα χονδρομερή τεμάχια πετρώματος.

Στην Εικόνα 6.19 που ακολουθεί, απεικονίζονται οι κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , διατηρώντας σταθερή την τιμή της απόστασης μεταξύ των διαδοχικών διατρημάτων.



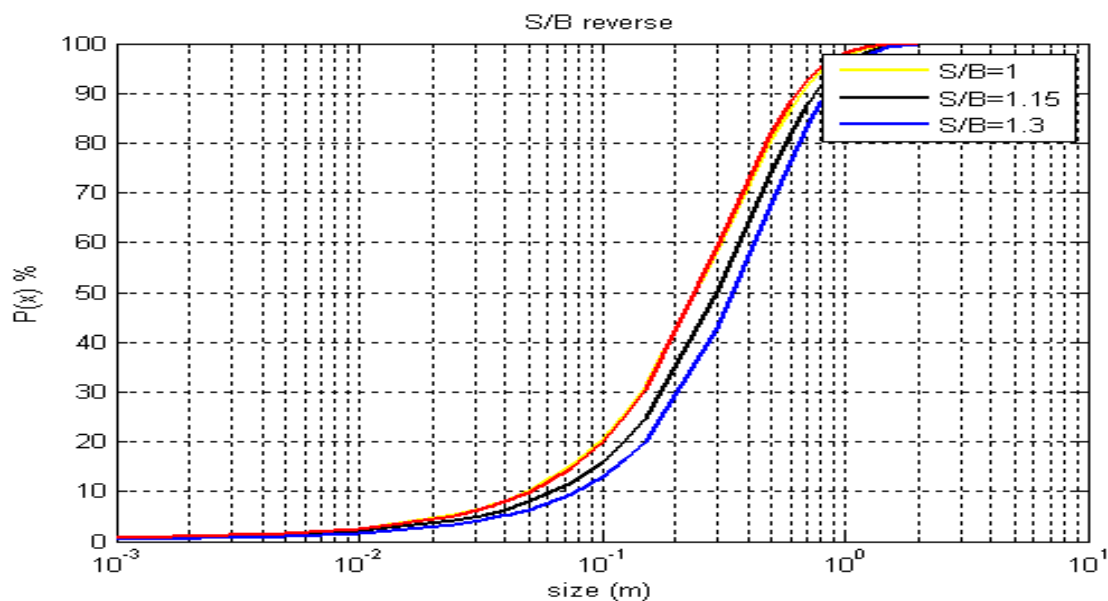
Εικόνα 6.19: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B , διατηρώντας σταθερή την τιμή του S .

Τα επόμενα σενάρια που μελετήθηκαν, περιελάμβαναν μεταβολή του λόγου S/B , διατηρώντας αυτή τη φορά σταθερή την τιμή του φορτίου. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.11, η αύξηση της απόστασης των διατρημάτων κατά 29,9%, μεταξύ των σεναρίων #25 ($S/B=1$) και # 27 ($S/B=1,3$), έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του 25% αθροιστικά διερχόμενου κατά 48,8%, του 50% αθροιστικά διερχόμενου κατά 41% και του 75% αθροιστικά διερχόμενου κατά 34%. Ως εκ τούτου, η μεταβολή του λόγου S/B , για σταθερή τιμή φορτίου, επιφέρει μεγαλύτερες μεταβολές στο τμήμα της κοκκομετρικής κατανομής που σχετίζεται με τα λεπτομερή τεμάχια πετρώματος.

Πίνακας 6.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B, διατηρώντας σταθερή την τιμή του B.

	ΣΕΝΑΡΙΟ		
	#25 S/B=1	#26 S/B=1,15	#27 S/B=1,3
H (m)	22,63	22,63	22,63
S (m)	7,05	8,11	9,16
B (m)	7,05	7,05	7,05
H₀ (m)	3,60	3,60	3,60
A	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	373	373	373
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,340	0,295	0,261
n	1,374	1,425	1,474
b	4,140	3,980	3,845
x_{25%} (m)	0,129	0,160	0,192
x_{50%} (m)	0,255	0,308	0,360
x_{75%} (m)	0,429	0,504	0,575

Στην Εικόνα 6.20 απεικονίζονται οι κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B, διατηρώντας σταθερή την τιμή του φορτίου.



Εικόνα 6.20: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B, διατηρώντας σταθερή την τιμή του B.

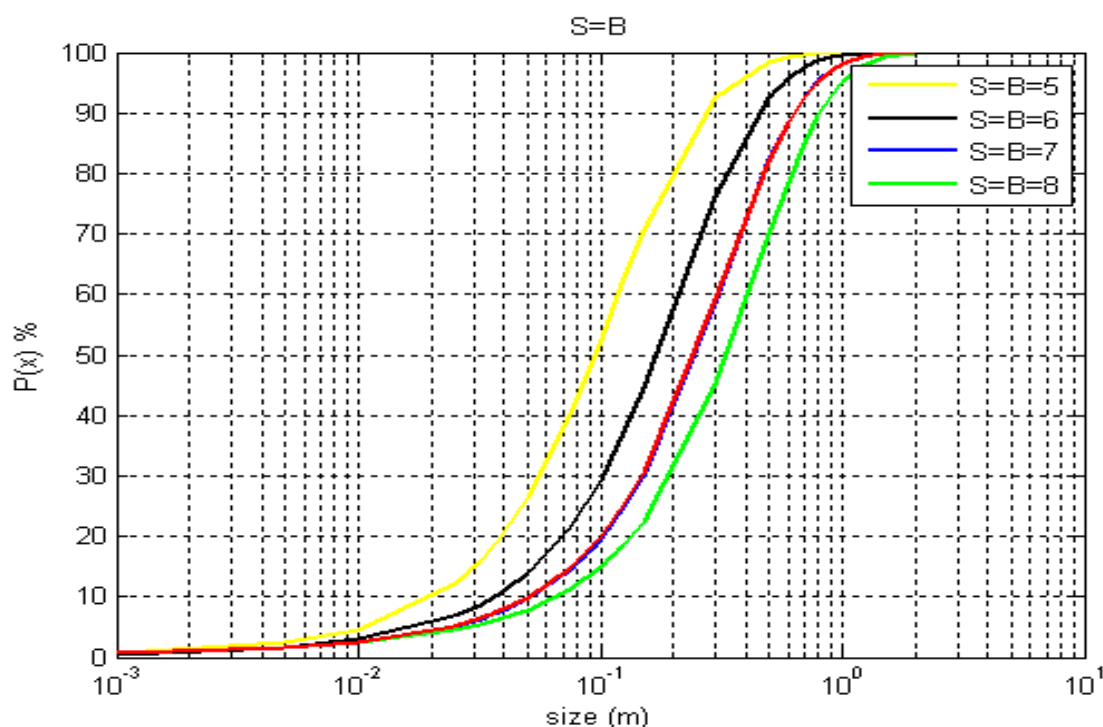
Σε ότι αφορά τα σενάρια #22 και #25, τα οποία αναφέρονται σε σχέδια ανατίναξης με λόγο $S/B=1$, παρατηρείται ότι αυξάνοντας το φορτίο και επομένως την απόσταση διατηρημάτων κατά περίπου 1,2%, επιτυγχάνεται αύξηση του x_{50} κατά σχεδόν 3% και ελάττωση του συντελεστή ομοιομορφίας n , μόλις κατά 0,4%.

Στον Πίνακα 6.12 που ακολουθεί, περιγράφονται επιπλέον υποθετικά σενάρια για τα οποία ο λόγος $S/B=1$.

Πίνακας 6.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή των S και B , διατηρώντας τον λόγο $S/B=1$.

	ΣΕΝΑΡΙΟ			
	#28 $S/B=1$	#29 $S/B=1$	#30 $S/B=1$	#31 $S/B=1$
H (m)	22,63	22,63	22,63	22,63
S (m)	5,00	6,00	7,00	8,00
B (m)	5,00	6,00	7,00	8,00
H₀ (m)	3,60	3,60	3,60	3,60
A	4,17	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	373	373	373	373
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,659	0,457	0,336	0,257
n	1,450	1,422	1,378	1,326
b	5,735	4,797	4,139	3,630
x_{25%} (m)	0,048	0,087	0,127	0,168
x_{50%} (m)	0,095	0,171	0,251	0,334
x_{75%} (m)	0,167	0,292	0,422	0,556

Όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 6.21, όσο μικρότερη είναι η τιμή των S και B , τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ομοιομορφίας n και επομένως τόσο πιο ομοιόμορφη η κατανομή των εξορυγμένων τεμαχίων πετρώματος.



Εικόνα 6.21: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή των S και B, διατηρώντας τον λόγο S/B=1.

Στον Πίνακα 6.13 που ακολουθεί, δίδονται οι επί τοις εκατό μεταβολές των τεχνικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, του συντελεστή ομοιομορφίας n , καθώς και των τιμών μεγέθους που αντιστοιχούν στα 25%, 50% και 75% αθροιστικά διερχόμενου, μεταξύ του σεναρίου #28 ($S=B=5\text{m}$) και των σεναρίων #29 ($S=B=6\text{m}$), #30 ($S=B=7\text{m}$), #31 ($S=B=8\text{m}$).

Πίνακας 6.13: Επί τοις εκατό μεταβολές των τεχνικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, του συντελεστή ομοιομορφίας και των τιμών μεγέθους, μεταξύ των σεναρίων #28 και #29, #30, #31.

	% μεταβολή σε σχέση με το σενάριο #28						
	B	S	q	n	X ₂₅	X ₅₀	X ₇₅
#29	20	20	-30,56	-1,92	79,44	79,04	75,08
#30	40	40	-48,98	-4,91	162,56	163,21	153,38
#31	60	60	-60,94	-8,55	246,86	250,71	233,36

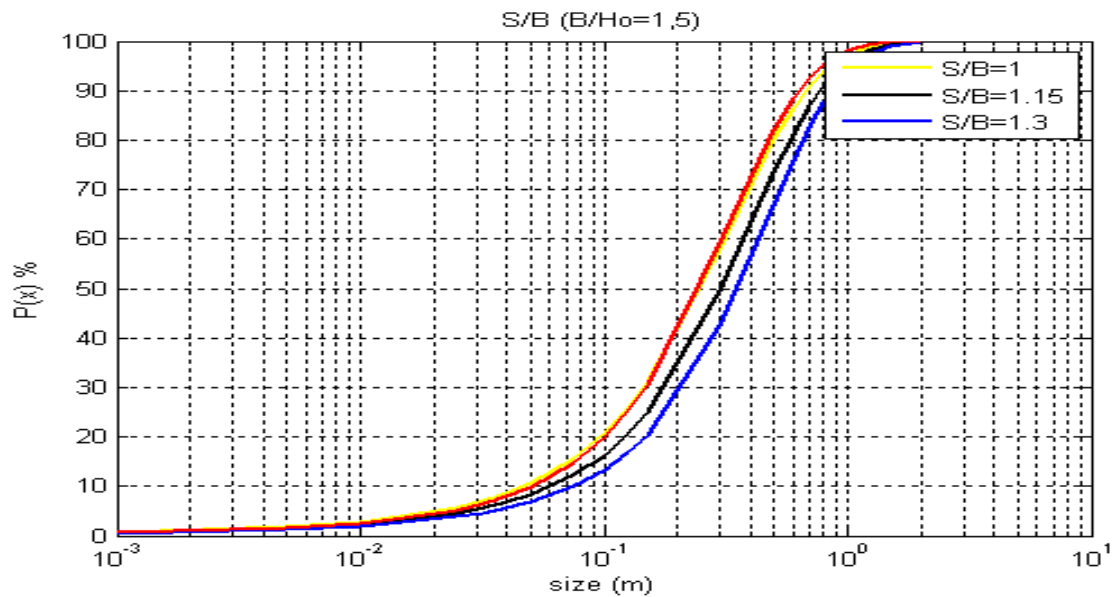
Τα επόμενα σενάρια που μελετήθηκαν, περιελάμβαναν μεταβολή του λόγου S/B, ορίζοντας ταυτόχρονα την τιμή του λόγου B/H₀ ίση με 1,5. Στον Πίνακα 6.14 που

ακολουθεί, παρατίθενται αρχικά τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν διατηρώντας σταθερή την τιμή του B (σενάριο #32, #33, #34) και εν συνεχεία εκείνα που προέκυψαν διατηρώντας σταθερή την τιμή του S (σενάριο #35, #36, #37).

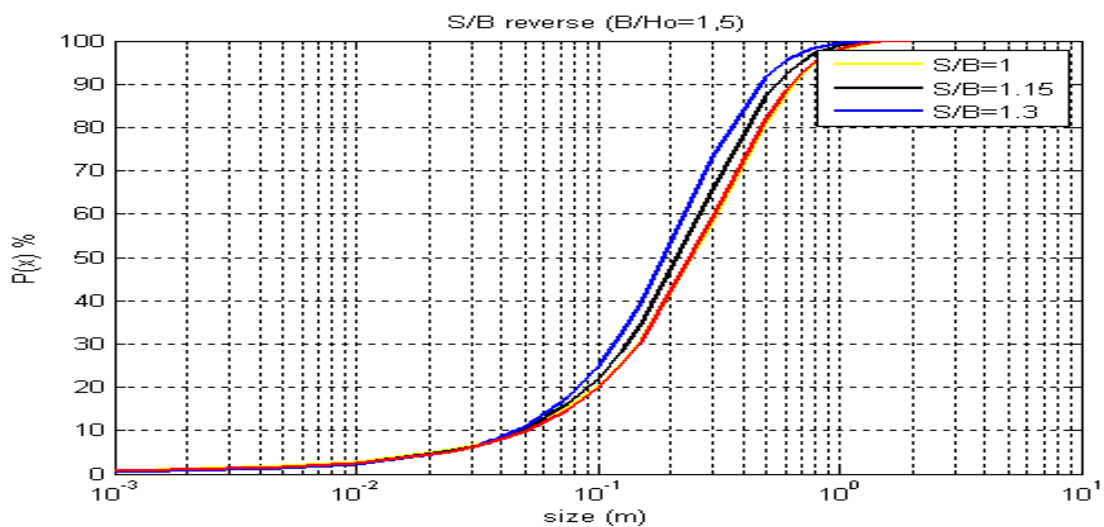
Πίνακας 6.14: Τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B, για B/H₀=1,5.

	ΣΕΝΑΡΙΟ					
	#32 S/B=1	#33 S/B=1,15	#34 S/B=1,3	#35 S/B=1	#36 S/B=1,15	#37 S/B=1,3
H (m)	22,63	22,63	22,63	22,63	22,63	22,63
S (m)	7,05	8,11	9,16	6,97	6,97	6,97
B (m)	7,05	7,05	7,05	6,97	6,06	5,36
H₀ (m)	4,70	4,70	4,70	4,64	4,04	3,57
A	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17
Q (kg)	354	354	354	355	365	373
ρ_L (kg/m)	17,086	17,086	17,086	17,086	17,086	17,086
q (kg/m³)	0,324	0,281	0,249	0,324	0,383	0,443
n	1,305	1,353	1,400	1,314	1,442	1,548
b	3,971	3,815	3,685	3,991	4,492	4,974
x_{25%} (m)	0,126	0,158	0,190	0,124	0,113	0,101
x_{50%} (m)	0,259	0,313	0,366	0,251	0,218	0,189
x_{75%} (m)	0,443	0,520	0,593	0,430	0,366	0,312

Οι κοκκομετρικές κατανομές των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχούν στα σενάρια #32-#34 αποτυπώνονται στην Εικόνα 6.22 και οι κοκκομετρικές κατανομές των τεμαχίων εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχούν στα σενάρια #35-#37 στην Εικόνα 6.23.



Εικόνα 6.22: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B, για σταθερή τιμή του B και για $B/H_o=1,5$.



Εικόνα 6.23: Κοκκομετρικές κατανομές των υποθετικών σεναρίων που προκύπτουν από τη μεταβολή του λόγου S/B, για σταθερή τιμή του S και για $B/H_o=1,5$.

6.7 Αξιολόγηση προσομοιώσεων

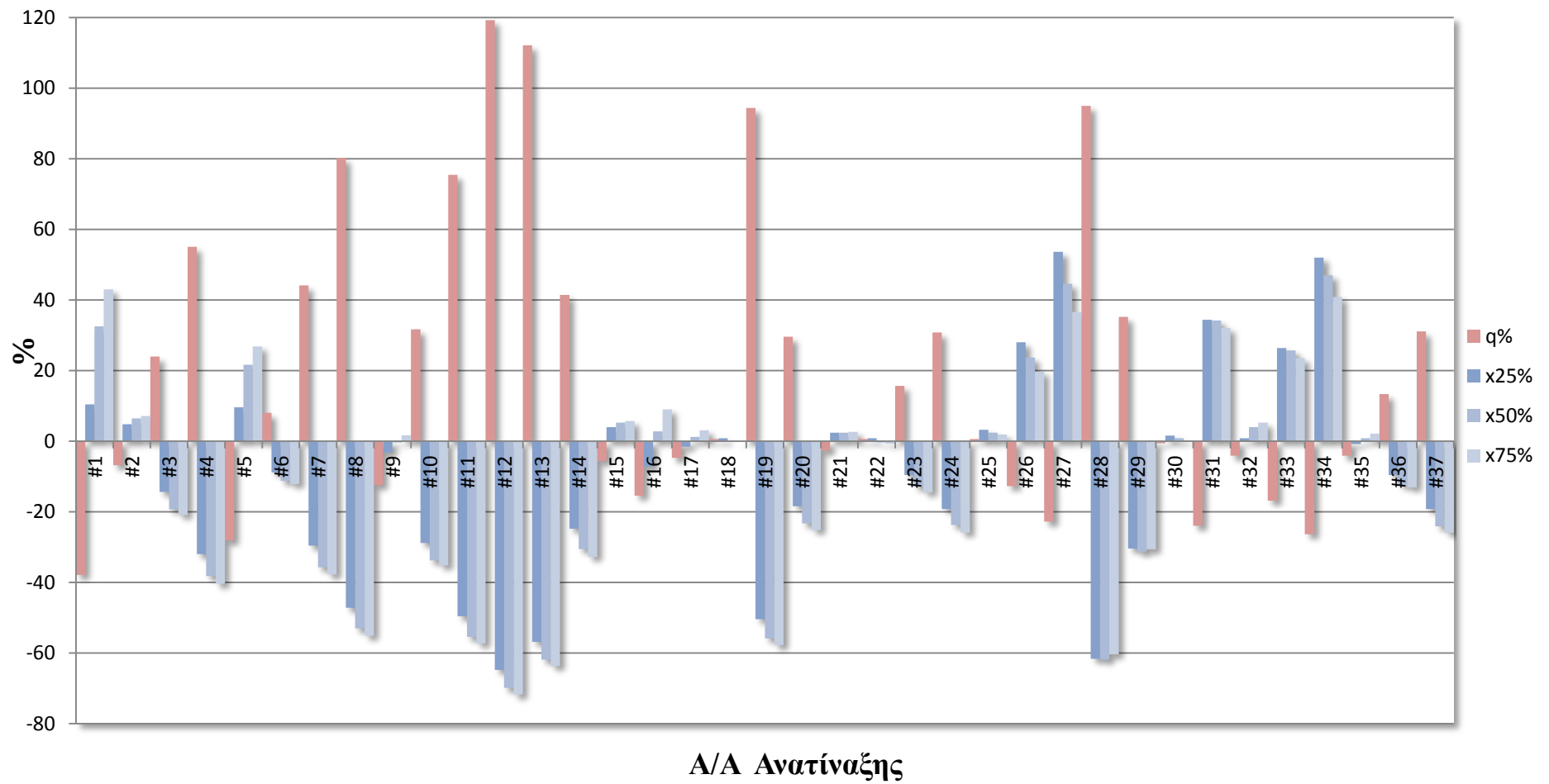
Στον Πίνακα 6.15 και στις Εικόνες 6.24 - 6.26 που ακολουθούν, παρατίθενται οι επί τοις εκατό μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, του συντελεστή ομοιομορφίας n , καθώς και των τιμών μεγέθους που αντιστοιχούν στα 25%, 50% και 75% αθροιστικά διερχόμενου, μεταξύ του σχεδίου ανατίναξης που εφαρμόζεται

στο λατομείο Χάλυψ (σενάριο αναφοράς) και των 37 υποθετικών σεναρίων, για τα οποία πραγματοποιήθηκαν πιθανολογικές προσομοιώσεις.

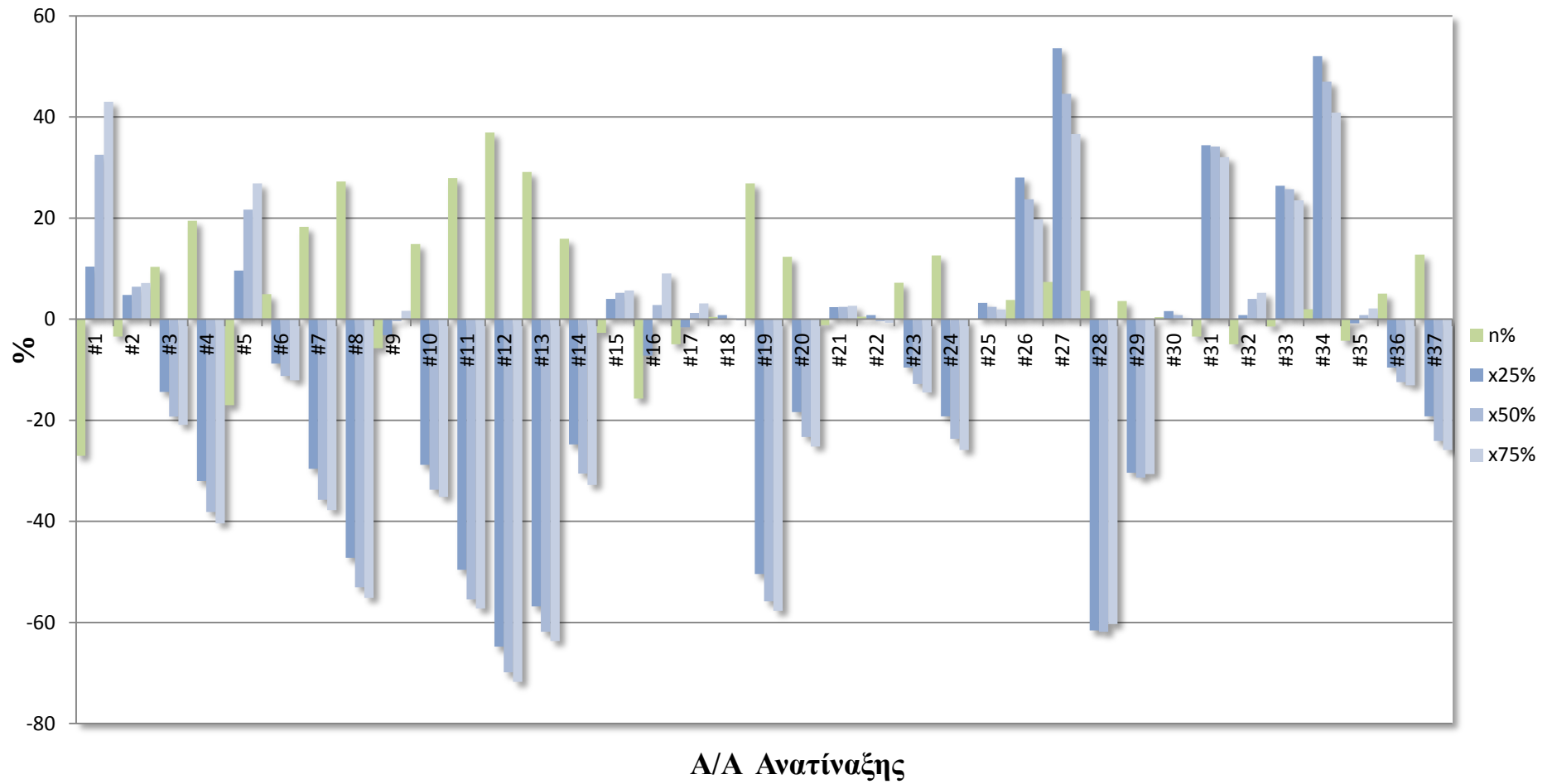
Πίνακας 6.15: Επί τοις εκατό μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, του συντελεστή ομοιομορφίας και των τιμών μεγέθους που αντιστοιχούν στο 25% 50% κ 75% αθροιστικά διερχόμενο, μεταξύ του σχεδίου ανατίναξης που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ και των 37 υποθετικών σεναρίων.

	B (m)	S (m)	H₀ (m)	P.F. (kg/m³)	x₂₅ (m)	x₅₀ (m)	x₇₅ (m)	n	B%	S%	H₀%	q%	x₂₅%	x₅₀%	x₇₅%	n%
Σενάριο Αναφοράς	7,05	6,97	3,60	0,338	0,125	0,249	0,421	1,373	---	---	---	---	---	---	---	---
#1	11,32	6,97	3,60	0,210	0,138	0,330	0,602	1,002	60,57	0,00	0,00	-37,87	10,40	32,53	42,99	-27,02
#2	7,54	6,97	3,60	0,315	0,131	0,265	0,451	1,326	6,95	0,00	0,00	-6,80	4,80	6,43	7,13	-3,42
#3	5,66	6,97	3,60	0,419	0,107	0,201	0,333	1,515	-19,72	0,00	0,00	23,96	-14,40	-19,28	-20,90	10,34
#4	4,53	6,97	3,60	0,524	0,085	0,154	0,251	1,640	-35,74	0,00	0,00	55,03	-32,00	-38,15	-40,38	19,45
#5	9,50	6,97	3,60	0,243	0,137	0,303	0,534	1,139	34,75	0,00	0,00	-28,11	9,60	21,69	26,84	-17,04
#6	6,33	6,97	3,60	0,365	0,114	0,221	0,370	1,441	-10,21	0,00	0,00	7,99	-8,80	-11,24	-12,11	4,95
#7	4,75	6,97	3,60	0,487	0,088	0,160	0,262	1,624	-32,62	0,00	0,00	44,08	-29,60	-35,74	-37,77	18,28
#8	3,80	6,97	3,60	0,609	0,066	0,117	0,189	1,747	-46,10	0,00	0,00	80,18	-47,20	-53,01	-55,11	27,24
#9	7,50	6,97	3,60	0,296	0,121	0,248	0,428	1,294	6,38	0,00	0,00	-12,43	-3,20	-0,40	1,66	-5,75
#10	5,00	6,97	3,60	0,445	0,089	0,165	0,273	1,577	-29,08	0,00	0,00	31,66	-28,80	-33,73	-35,15	14,86
#11	3,75	6,97	3,60	0,593	0,063	0,111	0,180	1,756	-46,81	0,00	0,00	75,44	-49,60	-55,42	-57,24	27,90
#12	3,00	6,97	3,60	0,741	0,044	0,075	0,119	1,880	-57,45	0,00	0,00	119,23	-64,80	-69,88	-71,73	36,93
#13	3,30	6,97	3,60	0,717	0,054	0,095	0,153	1,773	-53,19	0,00	0,00	112,13	-56,80	-61,85	-63,66	29,13
#14	4,95	6,97	3,60	0,478	0,094	0,173	0,283	1,591	-29,79	0,00	0,00	41,42	-24,80	-30,52	-32,78	15,88
#15	7,43	6,97	3,60	0,319	0,130	0,262	0,445	1,336	5,39	0,00	0,00	-5,62	4,00	5,22	5,70	-2,69
#16	7,05	6,97	7,05	0,286	0,116	0,256	0,459	1,157	0,00	0,00	95,83	-15,38	-7,20	2,81	9,03	-15,73
#17	7,05	6,97	4,70	0,322	0,123	0,252	0,434	1,305	0,00	0,00	30,56	-4,73	-1,60	1,20	3,09	-4,95

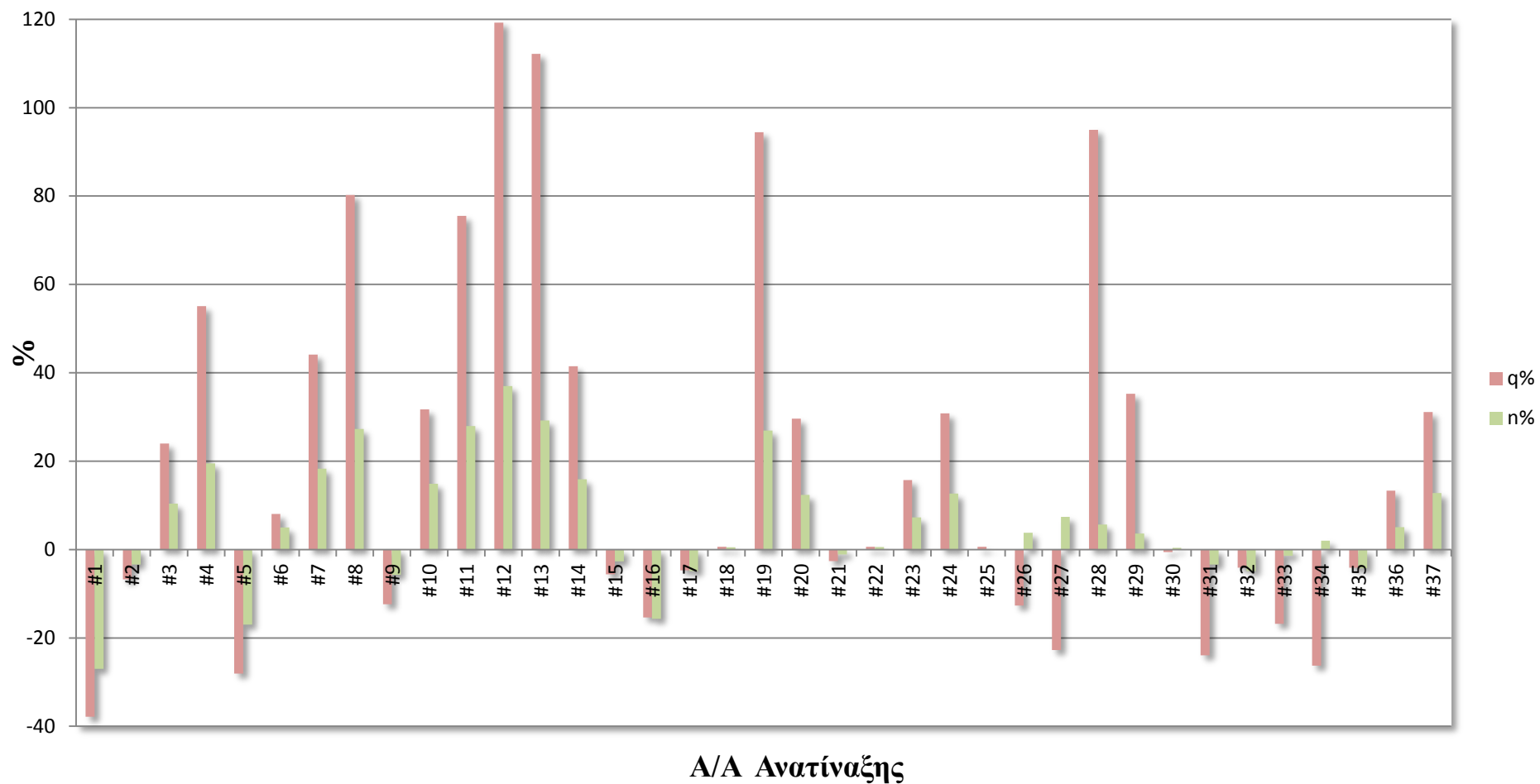
	B (m)	S (m)	H₀ (m)	P.F. (kg/m³)	x₂₅ (m)	x₅₀ (m)	x₇₅ (m)	n	B%	S%	H₀%	q%	x₂₅%	x₅₀%	x₇₅%	n%
#18	7,05	6,97	3,52	0,340	0,126	0,249	0,420	1,379	0,00	0,00	-2,22	0,59	0,80	0,00	-0,24	0,44
#19	3,60	6,97	3,60	0,657	0,062	0,110	0,178	1,742	-48,94	0,00	0,00	94,38	-50,40	-55,82	-57,72	26,88
#20	5,40	6,97	3,60	0,438	0,102	0,191	0,315	1,542	-23,40	0,00	0,00	29,59	-18,40	-23,29	-25,18	12,31
#21	7,20	6,97	3,60	0,329	0,128	0,255	0,432	1,357	2,13	0,00	0,00	-2,66	2,40	2,41	2,61	-1,17
#22	6,97	6,97	3,60	0,340	0,126	0,248	0,418	1,380	-1,13	0,00	0,00	0,59	0,80	-0,40	-0,71	0,51
#23	6,06	6,97	3,60	0,391	0,113	0,217	0,360	1,472	-14,04	0,00	0,00	15,68	-9,60	-12,85	-14,49	7,21
#24	5,36	6,97	3,60	0,442	0,101	0,190	0,312	1,546	-23,97	0,00	0,00	30,77	-19,20	-23,69	-25,89	12,60
#25	7,05	7,05	3,60	0,340	0,129	0,255	0,429	1,374	0,00	1,15	0,00	0,59	3,20	2,41	1,90	0,07
#26	7,05	8,11	3,60	0,295	0,160	0,308	0,504	1,425	0,00	16,36	0,00	-12,72	28,00	23,69	19,71	3,79
#27	7,05	9,16	3,60	0,261	0,192	0,360	0,575	1,474	0,00	31,42	0,00	-22,78	53,60	44,58	36,58	7,36
#28	5,00	5,00	3,60	0,659	0,048	0,095	0,167	1,450	-29,08	-28,26	0,00	94,97	-61,60	-61,85	-60,33	5,61
#29	6,00	6,00	3,60	0,457	0,087	0,171	0,292	1,422	-14,89	-13,92	0,00	35,21	-30,40	-31,33	-30,64	3,57
#30	7,00	7,00	3,60	0,336	0,127	0,251	0,422	1,378	-0,71	0,43	0,00	-0,59	1,60	0,80	0,24	0,36
#31	8,00	8,00	3,60	0,257	0,168	0,334	0,556	1,326	13,48	14,78	0,00	-23,96	34,40	34,14	32,07	-3,42
#32	7,05	7,05	4,70	0,324	0,126	0,259	0,443	1,305	0,00	1,15	30,56	-4,14	0,80	4,02	5,23	-4,95
#33	7,05	8,11	4,70	0,281	0,158	0,313	0,520	1,353	0,00	16,36	30,56	-16,86	26,40	25,70	23,52	-1,46
#34	7,05	9,16	4,70	0,249	0,190	0,366	0,593	1,400	0,00	31,42	30,56	-26,33	52,00	46,99	40,86	1,97
#35	6,97	6,97	4,64	0,324	0,124	0,251	0,430	1,314	-1,13	0,00	28,89	-4,14	-0,80	0,80	2,14	-4,30
#36	6,06	6,97	4,04	0,383	0,113	0,218	0,366	1,442	-14,04	0,00	12,22	13,31	-9,60	-12,45	-13,06	5,03
#37	5,36	6,97	3,57	0,443	0,101	0,189	0,312	1,548	-23,97	0,00	-0,83	31,07	-19,20	-24,10	-25,89	12,75



Εικόνα 6.24: Επί τoις εκατό μεταβολές της ειδικής κατανάλωσης Ε.Υ. και των τιμών μεγέθους που αντιστοιχούν στο 25% 50% κ 75% αθροιστικά διερχόμενο των 37 υποθετικών σεναρίων ως προς το σχέδιο ανατίναξης (σενάριο αναφοράς) που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ.



Εικόνα 6.25: Επί τοις εκατό μεταβολές του συντελεστή ομοιομορφίας και των τιμών μεγέθους που αντιστοιχούν στο 25% 50% κ 75% αθροιστικά διερχόμενο των 37 υποθετικών σεναρίων ως προς το σχέδιο ανατίναξης (σενάριο αναφοράς) που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ και.



Εικόνα 6.29: Επί τοις εκατό μεταβολές της ειδικής κατανάλωσης Ε.Υ. και του συντελεστή ομοιομορφίας των 37 υποθετικών σεναρίων ως προς το σχέδιο ανατίναξης (σενάριο αναφοράς) που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ και.

Στον Πίνακα 6.16 παρουσιάζονται για κάθε ένα από τα 37 υποθετικά σενάρια, η μέση τιμή μεγέθους για τα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50% και 75%, καθώς και το εύρος τιμών για τα διαστήματα πρόβλεψης των 25%, 50% και 95%, που αντιστοιχούν στα παραπάνω ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου.

Πίνακας 6.16: Η μέση τιμή μεγέθους και τα διαστήματα πρόβλεψης 25%, 50% και 95%, που αντιστοιχούν στα ποσοστά αθροιστικά διερχόμενου 25%, 50% και 75% των 37 υποθετικών σεναρίων.

		Mean Value	Confidence Interval					
			-95%	+95%	-50%	+50%	-25%	+25%
Σενάριο Αναφοράς	x _{25%} (m)	0,126	0,100	0,152	0,117	0,135	0,121	0,130
	x _{50%} (m)	0,249	0,193	0,306	0,230	0,269	0,240	0,259
	x _{75%} (m)	0,421	0,322	0,520	0,387	0,455	0,405	0,437
Σενάριο #1	x _{25%} (m)	0,138	0,114	0,163	0,130	0,147	0,134	0,142
	x _{50%} (m)	0,330	0,278	0,382	0,312	0,348	0,321	0,338
	x _{75%} (m)	0,602	0,504	0,700	0,569	0,636	0,586	0,618
Σενάριο #2	x _{25%} (m)	0,131	0,106	0,157	0,123	0,140	0,127	0,136
	x _{50%} (m)	0,265	0,213	0,317	0,247	0,283	0,257	0,274
	x _{75%} (m)	0,451	0,362	0,539	0,421	0,481	0,436	0,465
Σενάριο #3	x _{25%} (m)	0,107	0,083	0,130	0,099	0,115	0,103	0,110
	x _{50%} (m)	0,201	0,155	0,247	0,186	0,217	0,194	0,209
	x _{75%} (m)	0,333	0,258	0,408	0,307	0,359	0,321	0,345
Σενάριο #4	x _{25%} (m)	0,085	0,063	0,106	0,077	0,092	0,081	0,088
	x _{50%} (m)	0,154	0,114	0,194	0,140	0,168	0,147	0,160
	x _{75%} (m)	0,251	0,187	0,316	0,229	0,273	0,241	0,262
Σενάριο #5	x _{25%} (m)	0,137	0,114	0,161	0,129	0,146	0,134	0,141
	x _{50%} (m)	0,303	0,256	0,349	0,287	0,318	0,295	0,310
	x _{75%} (m)	0,534	0,456	0,613	0,508	0,561	0,522	0,547
Σενάριο #6	x _{25%} (m)	0,114	0,094	0,135	0,107	0,121	0,111	0,118
	x _{50%} (m)	0,221	0,183	0,259	0,208	0,234	0,215	0,227
	x _{75%} (m)	0,370	0,311	0,429	0,350	0,390	0,360	0,380
Σενάριο #7	x _{25%} (m)	0,088	0,070	0,106	0,082	0,094	0,085	0,091
	x _{50%} (m)	0,160	0,129	0,191	0,150	0,171	0,155	0,165
	x _{75%} (m)	0,262	0,214	0,310	0,245	0,278	0,254	0,270
Σενάριο #8	x _{25%} (m)	0,066	0,051	0,082	0,061	0,072	0,064	0,069
	x _{50%} (m)	0,117	0,091	0,144	0,108	0,126	0,113	0,122
	x _{75%} (m)	0,189	0,148	0,230	0,175	0,203	0,182	0,196

		Mean Value	Confidence Interval					
			-95%	+95%	-50%	+50%	-25%	+25%
Σενάριο #9	x _{25%} (m)	0,121	0,100	0,142	0,114	0,128	0,117	0,124
	x _{50%} (m)	0,248	0,208	0,289	0,234	0,262	0,242	0,255
	x _{75%} (m)	0,428	0,362	0,494	0,405	0,450	0,417	0,438
Σενάριο #10	x _{25%} (m)	0,089	0,071	0,107	0,083	0,095	0,086	0,092
	x _{50%} (m)	0,165	0,134	0,197	0,154	0,176	0,160	0,170
	x _{75%} (m)	0,273	0,223	0,322	0,256	0,289	0,264	0,281
Σενάριο #11	x _{25%} (m)	0,063	0,048	0,078	0,058	0,068	0,061	0,066
	x _{50%} (m)	0,111	0,086	0,137	0,103	0,120	0,107	0,116
	x _{75%} (m)	0,180	0,140	0,220	0,166	0,193	0,173	0,186
Σενάριο #12	x _{25%} (m)	0,044	0,031	0,057	0,039	0,048	0,042	0,046
	x _{50%} (m)	0,075	0,053	0,097	0,067	0,082	0,071	0,078
	x _{75%} (m)	0,119	0,085	0,153	0,107	0,131	0,113	0,125
Σενάριο #13	x _{25%} (m)	0,054	0,040	0,068	0,049	0,059	0,052	0,056
	x _{50%} (m)	0,095	0,070	0,119	0,086	0,103	0,091	0,099
	x _{75%} (m)	0,153	0,115	0,191	0,140	0,166	0,147	0,159
Σενάριο #14	x _{25%} (m)	0,094	0,075	0,112	0,087	0,100	0,091	0,097
	x _{50%} (m)	0,173	0,140	0,205	0,161	0,184	0,167	0,178
	x _{75%} (m)	0,283	0,232	0,334	0,266	0,300	0,275	0,291
Σενάριο #15	x _{25%} (m)	0,130	0,108	0,153	0,123	0,138	0,127	0,134
	x _{50%} (m)	0,262	0,220	0,304	0,248	0,277	0,255	0,269
	x _{75%} (m)	0,445	0,377	0,512	0,422	0,468	0,434	0,456
Σενάριο #16	x _{25%} (m)	0,116	0,094	0,137	0,108	0,123	0,112	0,119
	x _{50%} (m)	0,256	0,202	0,309	0,238	0,274	0,247	0,265
	x _{75%} (m)	0,459	0,352	0,565	0,422	0,495	0,441	0,476
Σενάριο #17	x _{25%} (m)	0,123	0,099	0,147	0,115	0,131	0,119	0,127
	x _{50%} (m)	0,252	0,195	0,310	0,233	0,272	0,243	0,262
	x _{75%} (m)	0,434	0,328	0,540	0,398	0,470	0,417	0,451
Σενάριο #18	x _{25%} (m)	0,126	0,100	0,151	0,117	0,134	0,121	0,130
	x _{50%} (m)	0,249	0,191	0,307	0,229	0,269	0,239	0,258
	x _{75%} (m)	0,420	0,316	0,525	0,384	0,456	0,403	0,437
Σενάριο #19	x _{25%} (m)	0,062	0,047	0,077	0,057	0,067	0,060	0,065
	x _{50%} (m)	0,110	0,084	0,136	0,101	0,119	0,106	0,114
	x _{75%} (m)	0,178	0,138	0,218	0,164	0,192	0,171	0,185
Σενάριο #20	x _{25%} (m)	0,102	0,083	0,122	0,096	0,109	0,099	0,105
	x _{50%} (m)	0,191	0,157	0,226	0,179	0,203	0,186	0,197
	x _{75%} (m)	0,315	0,261	0,369	0,297	0,334	0,306	0,324

		Mean Value	Confidence Interval					
			-95%	+95%	-50%	+50%	-25%	+25%
Σενάριο #21	x _{25%} (m)	0,128	0,106	0,151	0,120	0,136	0,124	0,132
	x _{50%} (m)	0,255	0,214	0,297	0,241	0,269	0,249	0,262
	x _{75%} (m)	0,432	0,365	0,498	0,409	0,454	0,421	0,442
Σενάριο #22	x _{25%} (m)	0,126	0,101	0,150	0,117	0,134	0,122	0,129
	x _{50%} (m)	0,248	0,201	0,295	0,232	0,264	0,240	0,256
	x _{75%} (m)	0,418	0,342	0,494	0,392	0,444	0,405	0,430
Σενάριο #23	x _{25%} (m)	0,113	0,090	0,137	0,105	0,121	0,109	0,117
	x _{50%} (m)	0,217	0,173	0,260	0,202	0,232	0,209	0,224
	x _{75%} (m)	0,360	0,291	0,430	0,336	0,384	0,349	0,372
Σενάριο #24	x _{25%} (m)	0,101	0,079	0,124	0,094	0,109	0,098	0,105
	x _{50%} (m)	0,190	0,149	0,230	0,176	0,203	0,183	0,196
	x _{75%} (m)	0,312	0,248	0,377	0,290	0,334	0,302	0,323
Σενάριο #25	x _{25%} (m)	0,129	0,073	0,185	0,110	0,148	0,120	0,138
	x _{50%} (m)	0,255	0,143	0,367	0,217	0,294	0,237	0,274
	x _{75%} (m)	0,429	0,249	0,609	0,368	0,491	0,400	0,459
Σενάριο #26	x _{25%} (m)	0,160	0,095	0,226	0,138	0,183	0,150	0,171
	x _{50%} (m)	0,308	0,180	0,436	0,264	0,352	0,287	0,329
	x _{75%} (m)	0,504	0,305	0,702	0,436	0,572	0,471	0,536
Σενάριο #27	x _{25%} (m)	0,192	0,116	0,269	0,166	0,219	0,180	0,205
	x _{50%} (m)	0,360	0,217	0,504	0,311	0,409	0,337	0,384
	x _{75%} (m)	0,575	0,359	0,791	0,501	0,649	0,539	0,610
Σενάριο #28	x _{25%} (m)	0,048	0,037	0,060	0,044	0,052	0,046	0,050
	x _{50%} (m)	0,095	0,073	0,117	0,088	0,103	0,092	0,099
	x _{75%} (m)	0,167	0,130	0,203	0,154	0,179	0,161	0,173
Σενάριο #29	x _{25%} (m)	0,087	0,072	0,102	0,082	0,092	0,084	0,089
	x _{50%} (m)	0,171	0,142	0,200	0,161	0,180	0,166	0,175
	x _{75%} (m)	0,292	0,244	0,339	0,276	0,308	0,284	0,300
Σενάριο #30	x _{25%} (m)	0,127	0,107	0,146	0,120	0,134	0,124	0,130
	x _{50%} (m)	0,251	0,214	0,287	0,238	0,263	0,245	0,257
	x _{75%} (m)	0,422	0,363	0,482	0,402	0,443	0,413	0,432
Σενάριο #31	x _{25%} (m)	0,168	0,143	0,192	0,159	0,176	0,164	0,172
	x _{50%} (m)	0,334	0,289	0,379	0,319	0,349	0,327	0,341
	x _{75%} (m)	0,556	0,483	0,628	0,531	0,580	0,544	0,568
Σενάριο #32	x _{25%} (m)	0,126	0,075	0,178	0,109	0,144	0,118	0,135
	x _{50%} (m)	0,259	0,145	0,373	0,220	0,298	0,240	0,277
	x _{75%} (m)	0,443	0,251	0,634	0,377	0,508	0,412	0,474

		Mean Value	Confidence Interval					
			-95%	+95%	-50%	+50%	-25%	+25%
Σενάριο #33	x _{25%} (m)	0,158	0,096	0,220	0,137	0,179	0,148	0,168
	x _{50%} (m)	0,313	0,182	0,444	0,268	0,358	0,291	0,334
	x _{75%} (m)	0,520	0,307	0,732	0,447	0,592	0,485	0,554
Σενάριο #34	x _{25%} (m)	0,190	0,117	0,263	0,165	0,215	0,178	0,202
	x _{50%} (m)	0,366	0,218	0,514	0,316	0,417	0,342	0,390
	x _{75%} (m)	0,593	0,361	0,824	0,513	0,672	0,555	0,630
Σενάριο #35	x _{25%} (m)	0,124	0,100	0,147	0,115	0,132	0,120	0,127
	x _{50%} (m)	0,251	0,204	0,299	0,235	0,268	0,244	0,259
	x _{75%} (m)	0,430	0,351	0,510	0,403	0,458	0,417	0,443
Σενάριο #36	x _{25%} (m)	0,113	0,090	0,136	0,105	0,121	0,109	0,117
	x _{50%} (m)	0,218	0,174	0,263	0,203	0,234	0,211	0,226
	x _{75%} (m)	0,366	0,294	0,438	0,341	0,390	0,354	0,377
Σενάριο #37	x _{25%} (m)	0,101	0,079	0,124	0,094	0,109	0,098	0,105
	x _{50%} (m)	0,189	0,148	0,231	0,175	0,203	0,183	0,196
	x _{75%} (m)	0,312	0,247	0,378	0,290	0,335	0,301	0,323

Μέσω του Πίνακα 6.15 και του Πίνακα 6.16 δύναται να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται, όχι μόνο ποιοτικά αλλά και ποσοτικά, η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, ως αποτέλεσμα των αλλαγών που πραγματοποιούνται στα χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης που εφαρμόζεται στο λατομείο Χάλυψ. Η πραγματοποίηση προσομοιώσεων με τη βοήθεια του μοντέλου που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, επιτρέπει στον μηχανικό ανατινάξεων να κάνει ποσοτικές πλέον εκτιμήσεις, αναφορικά με την κοκκομετρία που πρόκειται να επιτευχθεί, έπειτα από την εφαρμογή ενός νέου σχεδίου ανατίναξης.

Η χρήση στατιστικών κατανομών, για την περιγραφή της συμπεριφοράς εκείνων των παραμέτρων για τις οποίες, είτε έχει παρατηρηθεί μεταβλητότητα, είτε τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί δεν είναι επαρκή, έχει ως αποτέλεσμα την ενσωμάτωση της έννοιας της αβεβαιότητας στο μοντέλο. Επιπλέον, η χρήση των βαθμονομημένων εξισώσεων που σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου λατομικού χώρου, αποτυπώνει καλύτερα των βαθμό αλληλεπίδρασης, που παρατηρείται μεταξύ των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και της κοκκομετρίας που επιτυγχάνεται. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε θεωρία ή υπόθεση σχετικά με τον τρόπο που θα μετατοπιστεί η

κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, καθίσταται εφικτό να ελεγχθεί και να ποσοτικοποιηθεί μέσω της προσομοίωσης.

Η συλλογή νέων δεδομένων, τα οποία θα προκύψουν έπειτα από την πραγματοποίηση ανατινάξεων, για τη σχεδίαση των οποίων γνώμονας ήταν τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από την πραγματοποίηση προσομοιώσεων, θα επιτρέψει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου, καθώς και τη συνεχή διόρθωση αυτού, προκειμένου να καταστεί περαιτέρω αποδοτική η εκτιμητική του ικανότητα. Ως εκ τούτου, το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ένα ιδιαίτερος χρήσιμο εργαλείο για τον μηχανικό ανατινάξεων, μέσω του οποίου παρέχεται η δυνατότητα προσαρμογής της κοκκομετρικής κατανομής στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα, την αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία όλων των διεργασιών που έπονται μιας ανατίναξης.

7 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις

7.1 Σύνοψη του προβλήματος

Στις καθημερινές τους δραστηριότητες, οι άνθρωποι έρχονται σε επαφή με αντικείμενα τα οποία αποτελούν το τελικό προϊόν της επεξεργασίας ορυκτών ή μεταλλευμάτων. Τα ορυκτά/μεταλλεύματα βρίσκονται στην επιφάνεια της γης ή στο υπέδαφος και απαιτείται συγκεκριμένη διαδικασία ώστε να αποσπαστούν από τη φυσική τους θέση. Η διαδικασία αυτή καλείται εξόρυξη των πετρωμάτων και αποσκοπεί στην κατάτμηση του επί τόπου (in situ) πετρώματος σε τεμάχια κατάλληλου μεγέθους. Ανεξάρτητα από τις μεγάλες τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια στον τομέα της εξόρυξης με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, η χρήση εκρηκτικών υλών για την εξόρυξη των περισσότερων τύπων πετρωμάτων αποτελεί μονόδρομο καθώς παραμένει η οικονομικότερη λύση.

Για την εξορυκτική βιομηχανία, το πέτρωμα παρουσιάζει οικονομική αξία καθότι αποτελεί το αντικείμενο εμπορίας τους, είτε ως έχει, είτε κατόπιν ορισμένης επεξεργασίας. Αντικειμενικός στόχος των εξορυκτικών επιχειρήσεων είναι η επίτευξη της μεγίστης δυνατής παραγωγής προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της αγοράς, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Η πραγματοποίηση μιας ανατίναξης ακολουθείται από μια σειρά διεργασιών οι οποίες αποσκοπούν στο να μετασχηματιστεί το θραυσμένο πέτρωμα στο τελικό προς πώληση προϊόν. Κάθε μια από τις επιμέρους διεργασίες (φόρτωση, μεταφορά, θραύση), έχει το δικό της κόστος υλοποίησης. Προκειμένου το κόστος του συστήματος εξόρυξης-φόρτωσης-μεταφοράς-θραύσης να είναι το ελάχιστο δυνατό, το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος θα πρέπει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων. Ως εκ τούτου, το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος αναδεικνύεται σε καθοριστικό παράγοντα της διαδικασίας εξόρυξης πετρωμάτων με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Η αλλαγή του μεγέθους των τεμαχίων του πετρώματος, από εκείνο το μέγεθος που έχουν στη φυσική τους θέση, σε εκείνο το οποίο έχουν στον σωρό του εξορυγμένου πετρώματος, αποτελεί την κεντρική παράμετρο σχεδιασμού μιας ανατίναξης.

Από τα παραπάνω καθίσταται επομένως προφανές ότι η ύπαρξη μιας τεχνικής ελέγχου της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τον μηχανικό που σχεδιάζει ανατινάξεις. Ο καθορισμός του σχεδίου ανατίναξης έχοντας

ως βασικό γνώμονα την επιθυμητή κοκκομετρία θα μπορεί να υλοποιείται περιορίζοντας σημαντικά τον βαθμό αβεβαιότητας που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη διαδικασία, αφού πλέον θα υπάρχουν μαθηματικές σχέσεις που θα συνδέουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης με την κοκκομετρία που επιδιώκεται να επιτευχθεί. Το γεγονός αυτό θα επιτρέψει τη γρήγορη και αποτελεσματική εκτίμηση της ορθότητας των τιμών που έχουν επιλεγεί για κάθε μια από τις παραμέτρους που ορίζουν ένα σχέδιο ανατίναξης, ενώ επιπλέον, θα παρέχει τη δυνατότητα συσχετισμού της παραγωγικότητας του λατομείου/μεταλλείου με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε μετώπου.

7.2 Μεθοδολογική προσέγγιση - Αποτελέσματα

Τα μαθηματικά μοντέλα εκτίμησης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος που κατά καιρούς έχουν προταθεί, εκτιμούν την τιμή του μεγέθους των τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (x_{50}) χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχεδίου ανατίναξης, τον τύπο της εκρηκτικής ύλης, καθώς και ορισμένα στοιχεία που σχετίζονται με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η προς εξόρυξη βραχομάζα. Οι υπολογισμοί ωστόσο που επιτυγχάνονται μέσω των γενικευμένων εξισώσεων των μοντέλων αυτών επιτρέπουν μια προσεγγιστική μόνο εκτίμηση της κοκκομετρίας που πρόκειται να επιτευχθεί και ως εκ τούτου, με την υφιστάμενη μορφή τους, δεν είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική σχεδίαση ανατινάξεων παραγωγής.

Η κοσκίνιση του συνόλου του εξορυγμένου όγκου αμέσως μετά την ολοκλήρωση μιας ανατίναξης για την κατασκευή της αθροιστικής κατανομής μεγέθους των εξορυγμένων τεμαχίων, είναι μια χρονοβόρος και πρακτικά μη εφικτή διαδικασία, λόγω του εξαιρετικά υψηλού κόστους υλοποίησης. Η χρήση φωτογραφικών μεθόδων για τον σκοπό αυτό τυγχάνει πλέον ιδιαίτερης αποδοχής από πολλούς μελετητές αλλά και από μεγάλο αριθμό λατομικών επιχειρήσεων, κυρίως λόγω της αυξημένης «συνέπειας» (precision) των υπολογισμών που πραγματοποιούνται μέσω των λογισμικών ανάλυσης εικόνων.

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν έπειτα από την πραγματοποίηση επί τόπου μετρήσεων, μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνων WipFrag, για την καταγραφή δεδομένων από δέκα ανατινάξεις πλήρους κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στο λατομείο ασβεστολίθου Μάνδρας Αττικής της Χάλυψ Δομικά

Υλικά Α.Ε., αρχικά δημιουργήθηκαν σχέσεις υπολογισμού του μεγέθους τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο (x_{50}), αλλά και ολόκληρης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος. Μέσω των εξισώσεων αυτών παρέχεται πλέον η δυνατότητα αποτελεσματικότερου σχεδιασμού των μελλοντικών ανατινάξεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στον συγκεκριμένο λατομικό χώρο αλλά και γενικότερα σε λατομεία ασβεστολίθου. Η σχεδίαση τους δεν θα βασίζεται σε γενικευμένες εξισώσεις αλλά σε εξισώσεις οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του χώρου, αποτυπώνοντας καλύτερα τον βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και της κοκκομετρίας που επιτυγχάνεται κατά την εξόρυξη του πετρώματος με εκρηκτικές ύλες.

Προχωρώντας σε περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων που είχαν καταγραφεί, εξετάστηκε η ύπαρξη συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων του σχεδίου ανατίναξης και του ελάχιστου χρόνου απόκρισης T_{min} , που μεσολαβεί από τη στιγμή που γίνεται η πυροδότηση της εκρηκτικής ύλης στον πυθμένα του διατρήματος, μέχρι τη στιγμή που το πέτρωμα αρχίζει να κινείται προκειμένου τελικά να αποσπαστεί από τη φυσική του θέση. Ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης αποτελεί βασική παράμετρο για τον προσδιορισμό του κατάλληλου χρόνου επιβράδυνσης, τόσο μεταξύ των διατρημάτων της ίδιας σειράς, όσο και μεταξύ των διαδοχικών σειρών διατρημάτων. Ως εκ τούτου σχετίζεται άμεσα με την θρυμματισμό που επιτυγχάνεται κατά την εξόρυξη του πετρώματος με εκρηκτικές ύλες. Όπως προέκυψε από τη μήτρα συσχετίσεων που δημιουργήθηκε, ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης παρουσιάζει αυξημένη συσχέτιση με την ειδική κατανάλωση εκρηκτικής ύλης (q), με το «τοπικό» φορτίο (B_L) στη θέση υπολογισμού του ελάχιστου χρόνου απόκρισης, καθώς επίσης και με την τιμή μεγέθους που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο του εξορυγμένου πετρώματος (x_{50}). Εν συνεχεία, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της διαστασιακής ανάλυσης δημιουργήθηκε μια εξίσωση για τον υπολογισμό του λόγου κατάτμησης RR_{50} , συναρτήσει του ελάχιστου χρόνου απόκρισης (T_{min}), της ειδικής κατανάλωσης της εκρηκτικής ύλης (q) και της τιμής του «τοπικού» φορτίου (B_L). Με τη βοήθεια της συγκεκριμένης εξίσωσης επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του μεγέθους των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, συναρτήσει της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το *in situ* πέτρωμα από πλευράς κερματισμού αλλά και ορισμένων από τις παραμέτρους που σχετίζονται με το σχέδιο ανατίναξης, αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα που σχετίζονται με τον συγκεκριμένο λατομικό χώρο.

Αποσκοπώντας στη διαχείριση της αβεβαιότητας που εμπεριέχεται στους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται μέσω των ντετερμινιστικών εξισώσεων των μαθηματικών μοντέλων εκτίμησης, η οποία οφείλεται είτε στην έλλειψη ικανοποιητικού όγκου δεδομένων εισόδου, είτε στη μεταβλητότητα που παρατηρείται μεταξύ των τιμών σχεδιασμού και των μετρούμενων τιμών ορισμένων παραμέτρων, εφαρμόστηκε πιθανολογική προσομοίωση Monte Carlo. Με τη βοήθεια των πιθανολογικών προσομοιώσεων επιτυγχάνεται η αποδέσμευση των υπολογισμών από τη λογική των ντετερμινιστικών αποτελεσμάτων. Ως δεδομένα εισόδου δεν λαμβάνονται μόνο οι μέσες τιμές των μετρήσεων που έχουν προηγηθεί, αλλά συνυπολογίζεται η σημασία τόσο της διασποράς γύρω από τη μέση τιμή, όσο και της ύπαρξης ορισμένων «ακραίων» τιμών. Για τον λόγο αυτό, η συμπεριφορά των διαφόρων μεταβλητών εισόδου αποτυπώθηκε με τη χρήση στατιστικών κατανομών πιθανότητας.

Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο δημιουργήθηκε για την πραγματοποίηση των πιθανολογικών προσομοιώσεων αποδίδει την κοκκομετρική κατανομή του εξορυγμένου πετρώματος συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σχεδίου ανατίναξης, των ιδιοτήτων της Ε.Υ, καθώς και των μηχανικών χαρακτηριστικών του προς εξόρυξη πετρώματος. Ως έξοδος του μοντέλου ορίστηκε η κοκκομετρική κατανομή των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, ενώ επιπλέον δημιουργήθηκε μια περιβάλλουσα γύρω από τη μέση τιμή μεγέθους που αντιστοιχεί στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα αθροιστικά διερχόμενου. Αξιοποιώντας τη δυνατότητα συγγραφής κώδικα που παρέχει το λογισμικό MATLAB, καθώς και την ικανότητα της να παράγει ψευδοτυχαίους αριθμούς, μελετήθηκαν διάφορα υποθετικά σενάρια σχεδίων ανατίναξης και κατέστη δυνατή η ποσοτικοποίηση της μετατόπισης της κοκκομετρικής κατανομής των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα των αλλαγών που πραγματοποιούνται στα σενάρια σχεδιασμού ανατινάξεων που εξετάστηκαν.

Μέσω της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή κατέστη εφικτή η δημιουργία ενός εργαλείου το οποίο παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογής της κοκκομετρικής κατανομής στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την αποδοτικότερη και ταυτόχρονα οικονομικότερη λειτουργία όλων των διεργασιών που έπονται μιας ανατίναξης. Το εν λόγω εργαλείο είναι προσαρμοσμένο στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του λατομικού χώρου και δύναται να βελτιώνει συνεχώς την εκτιμητική του ικανότητα με την προσθήκη νέων δεδομένων, τα οποία θα προκύψουν έπειτα από την πραγματοποίηση ανατινάξεων, για τον σχεδιασμό των

οποίων έχει γίνει χρήση των εξισώσεων που προτάθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία καθώς και τα υπολογιστικά εργαλεία μέσω των οποίων πραγματοποιήθηκε η παραπάνω ανάλυση, αποτελούν βασικές κατευθύνσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αντίστοιχων εξισώσεων, προσαρμοσμένων στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά άλλων χώρων εξόρυξης. Οι εξισώσεις που θα προκύψουν θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό ανατινάξεων στους χώρους αυτούς, καθότι θα περιγράφουν με αυξημένη ακρίβεια τον βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων ενός σχεδίου ανατίναξης και της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος που πρόκειται να επιτευχθεί.

7.3 Προτάσεις

Δεδομένου του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει σε επίπεδο βιομηχανικής εφαρμογής, το αντικείμενο του αποτελεσματικού σχεδιασμού των ανατινάξεων για την επίτευξη της κοκκομετρίας που θα ικανοποιήσει τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής και σε συνδυασμό με το ότι η μέχρι σήμερα ερευνητική προσπάθεια στο συγκεκριμένο πεδίο είναι σχετικά περιορισμένη, κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω επέκταση της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας στους ακόλουθους άξονες:

- Συλλογή δεδομένων από ανατινάξεις παραγωγής που θα πραγματοποιηθούν σύμφωνα με σχέδια που βασίζονται στη χρήση των εξισώσεων που προτάθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, προκειμένου αφενός να αποτιμηθεί, αφετέρου να βελτιωθεί περαιτέρω, η εκτιμητική ικανότητα των εξισώσεων αυτών.
- Λεπτομερέστερη καταγραφή των στοιχείων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, κυρίως σε ότι αφορά τις ασυνέχειες (απόσταση, προσανατολισμός, υλικό πλήρωσης) και ενσωμάτωση αυτών στην προτεινόμενη μεθοδολογία.
- Ενσωμάτωση στις προτεινόμενες εξισώσεις του χρόνου επιβράδυνσης που μεσολαβεί ανάμεσα σε δυο διαδοχικές πυροδοτήσεις, προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς της κοκκομετρικής κατανομής του εξορυγμένου πετρώματος, η συνέργεια των διαφόρων εκρηκτικών κυμάτων που δημιουργούνται εξαιτίας της πυροδότησης περισσότερων του ενός διατρήματος.
- Πραγματοποίηση ανατινάξεων πλήρους κλίμακας με τη χρήση διαφορετικής εκρηκτικής ύλης και συλλογή δεδομένων από τις ανατινάξεις αυτές, προκειμένου να

μπορέσει να γενικευθεί και για άλλους τύπους εκρηκτικής ύλης, η εξίσωση υπολογισμού του μεγέθους των εξορυγμένων τεμαχίων που αντιστοιχεί στο 50% αθροιστικά διερχόμενο, η οποία προέκυψε μέσω της διαστασιακής ανάλυσης.

- Συλλογή οικονομικών στοιχείων με σκοπό την αξιολόγηση της μεταβολής που επιφέρει στο συνολικό λειτουργικό κόστος μιας εξορυκτικής επιχείρησης, η αλλαγή ενός σχεδίου ανατίναξης, στην προσπάθεια προσαρμογής της κοκκομετρικής κατανομής του εξορυγμένου πετρώματος στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της παραγωγής.
- Χρήση στατιστικών κατανομών πιθανότητας, για την αποτύπωση της συμπεριφοράς των ακόλουθων μεταβλητών εισόδου: κλίση διατρημάτων, μήκος υποδιάτρησης, ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης. Μέσω αυτών, θα καταστεί αποτελεσματικότερη η διαχείριση της αβεβαιότητας που εμπεριέχεται στη διαδικασία της εκτίμησης της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Adel G., Kojovic T. & Thornton D.: «Mine-to-Mill optimization of aggregate production, Semi Annual Report No.4», 2006.

Al-Shayea N.: «Comparison of Fracture Toughness Behavior of Reservoir and Outcrop Specimens for Mixed Mode I–II Fracture Toughness of a Limestone Rock Formation Tested at Various Conditions», Rock Mechanics and Rock Engineering. 2002, Vol. 35, No. 4, pp. 271-297.

Bhandari S. & Radal R.: «Post-blast studies of jointed rocks», Engineering Fracture Mechanics, 1990, Vol. 35, No. 1/2/3, pp. 439-445.

Bhandari S.: «Changes in fragmentation processes with blasting conditions», Proceedings of the Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 5, Montreal, Canada, 1996, pp. 301-309.

Bhandari S.: «Engineering Rock Blasting Operations», A.A. Balkema Ed., Rotterdam, 1997.

Berta G., «Explosives: An engineering tool», Italesplosivi, Milano, 1990.

Bohlooli B., Gustafson G. & Ronge B.: «A laboratory study on reducing the quantity of rock fines at failure: Application to rock blasting and crushing», Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2001, Vol. 60, No. 4, pp. 271-276.

Brady B.H.G. & Brown E.T.: «Rock mechanics for underground mining», Chapman & Hall, London, 1993.

Brinkmann J. R.: «An Experimental Study of the Effects of Shock and Gas Penetration in Blasting». Proceedings of the Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 3, Brisbane, Australia, 1990, pp. 55-66.

Chavez R. & Chantry R.: «Actual benefits from new technology related to constant timing with electronic detonators and uniform energy control», Proceedings of EFEE Second World Conference on Explosives and Blasting Technique, Prague, Czech Republic, 2003, pp. 303-311.

Cunningham C.V.B.: «Optical fragmentation assessment – A technical challenge», Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 13-19.

Cunningham C.V.B.: «The effect of timing precision on control of blasting effects», In R. Holmberg, Explosives & Blasting Technique, Munich – Rotterdam, Balkema, 2000, pp 123-128

Cunningham C.V.B.: «The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on», Proceedings from the third EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Brighton, UK, 2005, pp 201-210.

Dick R.D., Fournery W.L., Wang X.J. & Young C.: «Results from instrumented small scale tests», Proceedings of the Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 4, Vienna, Austria, 1993, pp. 47-54.

Djordjevic N.: «Two-component model of blast fragmentation», Proceedings of the Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, SAIMM, Johannesburg, 1999, pp. 213-219.

Djordjevic N.: «Origin of blast-induced fines», Institution Mining and Metallurgy, Transactions, Section A: Mining Technology, 2002, Vol. 111, pp. A143–A146.

Eberhardt E., Stimpson B. & Stead D.: «Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures», Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, Vol. 32, No. 2, pp. 81-99.

Eden D.J. & Franklin J.A.: «Disintegration, fusion and edge net fidelity», Proceedings of the Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 5, Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement, Montreal, A. A. Balkema 1996, pp 127-132.

Eloranta J.: «Selection of powder factor in large diameter blastholes», General Proceeding & 21st Annual Conference, International Society of Explosives Engineers, 1995, pp. 68-77.

Eloranta J.: «The efficiency of blasting versus crushing and grinding», General Proceeding & 23rd Annual Conference, International Society of Explosives Engineers, 1997, pp. 157-163.

Eloranta J., Palangio T., Palangio T.C. & Workman L.: «Size matters on the Mesabi Range», International Society of Explosives Engineers, 2007, Vol. 1.

Esen S., Onederra I. & Bilgin H.A.: «Modeling the size of the crushed zone around a blasthole», *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2003, Vol. 40, pp. 485-495.

Exadaktylos G.E. & Tsoutrelis C.E.: «Fragmentation analysis using the photographic method», *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 1991, Vol.5, pp. 55-64.

Franklin J.A., Maerz N.H. & Caralyn P.B.: «Rock mass characterization using photoanalysis», *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1988, Vol. 6, pp. 97-112.

Fordyce D.L., Fournery W.L., Dick R.D. & Wang X.J.: «Effect of joints on stress wave transmission» *Proceedings of the Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 4*, Vienna, Austria, 1993, pp. 211-219.

Gheibie S., Aghababaeu H., Hoseinie S.H. & Pourahimian Y.: «Modified Kuz-Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine», *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2009, Vol. 46, pp. 967-973.

Grundstrom C., Kanchibotla S. M., Jankovich A. & Thornton D.: «Blast fragmentation for maximizing the SAG mill throughput at Porgera gold mine», *Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, ISEE, Orlando, Florida, USA, 2001, pp. 383–399.

Hagan T.N.: «Rock breakage by explosives»: *Acta Astronautica*, Pergamon Press, Great Britain, 1979, Vol. 6, pp. 329-340.

Hall J. & Brunton I.: «Critical Comparison of Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC) Blast Fragmentation Models», *International Journal for Blasting and Fragmentation, Fragblast*, 2002, Vol.6, No. 2, pp. 207-220.

Hamdi E. & Mouza J.: «A methodology for rock mass characterization and classification to improve blast results», *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 42, 2005, pp 177–194.

Hamdi E. & Mouza J.: «Fragmentation energy in rock blasting» *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, Vol. 26, pp 133–146.

Huang J.A. & Wang S.J.: «An experimental investigation concerning the comprehensive fracture toughness of some brittle rocks», *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1985, No 22, No 2, pp. 99-104.

Hunter G.C., McDermott C., Miles N.J., Singh A. & Scoble M.J.: «A review of image analysis techniques for measuring blast fragmentation», *Mining Science and Technology*, 1990, Vol.11, pp. 19-36.

Jaeger J.G., Cook N.G.W. & Zimmerman R.W.: «Fundamentals of rock mechanics», 4th edition, Blackwell Publishing Ltd, 2007.

Jern M.: «Determination of the damaged zone in quarries, related to aggregate production», *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2001, Vol. 60, No. 2, pp.157-166.

Jimeno C.L., Jimeno E.L. & Carcedo F.J.A.: «Drilling and Blasting of Rocks», A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1995.

JKMRC: «Open Pit Blast Design - Analysis and Optimization», Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Australia, 1996.

Johansson D., Ouchterlony F. & Nyberg U.: «Blasting against aggregate confinement, fragmentation and swelling in model scale», *Proceedings from the forth EFEE World Conference on Explosives and Blasting*, Vienna, Austria, 2007, pp 13-26.

Jupp E.W.: «An introduction to dimensional method», Cleaver-Hume Press, London, 1962.

Just G.D.: «The application of size distribution equations to rock breakage by explosives», *Rock Mechanics*, 1973, Vol. 5, No. 3, pp. 151-162.

Kanchibotla S., Morrell S., Valery W. & Loughlin, P.: «Exploring the effect of blast design on SAG mill throughput at KCGM», *Proceedings of Mine to Mill Conference*, Brisbane, 1998, pp. 153–158.

Kanchibotla S.S., Valery W. & Morell S.: «Modeling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding», *Proceedings from Explo Conference*, Carlton, Victoria, Australia, AusIMM, 1999, pp. 137-144.

Kanchibotla S.S.: «Optimum Blasting? Is it Minimum Cost Per Broken Rock or Maximum Value Per Broken Rock?», *International Journal for Blasting and Fragmentation, Fragblast*, 2003, Vol.7, No. 1, pp. 35-48.

Kaushik D. & Phalguni S.: «Concept of blastability – an update», The Indian Mining & Engineering Journal, 2003, Vol. 42, No. 8&9.

Kemeny J., Girdner K., Bobo T. & Norton B.: «Improvements for fragmentation measurement by digital imaging: accurate estimation of fines», Proceedings of the Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Johannesburg, 1999, pp. 103–109.

Kent J.A.: «Kent and Reigel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology», Vol.1, Eleventh Edition, Springer Science and Business Media, 2007.

Kheir N.A.: «Systems modeling and computer simulation», 2nd Edition, Marcel Dekker, New York, 1996.

Konya C.J.: «Rock Blasting and Overbreak Control», U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, 2006.

Kramadibrata S., Rai M.A., Juanda J., Simangunsong G.M. & Priagung N.: «The use of dimensional analysis to analyse the relationship between penetration rate of Jack Hammer and rock properties and operational characteristics», Indonesian Mining Conference and Exhibition, Jakarta, 2001.

Kuznetsov V.M.: «The mean diameter of the fragments formed by blasting rock», Soviet Mining Science, 1973, Vol.9, No.2, pp. 144-148.

Kutter H.K. & Fairhurst C.: «On the fracture process in blasting», International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1971, No 8, No3, pp.181-202.

Langefors V. & Kihlstrom B.: «The Modern Technique of Rock Blasting», Almqvist & Wiksells/Gebbers Förlag, Stockholm, Sweden, 1963.

Langhaar H.L.: «Dimensional analysis and theory of models», Huntington, R. E. Krieger Pub. Co., NY, 1951.

Latham J.P. & Lu P.: «Development of an assessment system for the blastability of rock masses», International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1999, Vol. 36, No.1, pp. 41-55.

- Latham J.P., Kemeny J., Maerz N., Noy M., Schleifer J. & Tose S.: «A blind comparison between results of four image analysis systems using a photo-library of piles of sieved fragments», *International Journal of Blast Fragmentation*, 2003, Vol. 7, No. 2, pp. 105–132
- Law A.M. & Kelton W.D.: «Simulation modeling and analysis», 2nd Edition, McGraw–Hill, New York, 1991.
- Lilly P.: «An empirical method of assessing rock mass blastability», *Proceedings Large Open Pit Mining Conference, The Aus IMM/IE, Newman Combined Group*, October 1986, pp. 89-92.
- Liu Q. & Katsabanis P.D.: «A theoretical approach to the stress waves around a borehole and their effect on rock crushing», *Proceedings of the Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 4*, Vienna, Austria, 1993, pp. 9-16.
- Lewandowski T., Luan Mai V.K. & Danell R.E.: «Influence of discontinuities on presplitting effectiveness», *Proceedings of the Fifth Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 5*, Montreal, Canada, 1996, pp. 217-225.
- Maerz N.H., Franklin J.A., Rothenburg L. & Coursen D.L.: «Measurement of rock fragmentation by digital photoanalysis». *ISRM. 6th International Congress on Rock Mechanics*, Montreal, Canada, 1987, pp. 687-692.
- Maerz N.H., Palangio T.C. & Franklin J.A.: «WipFrag image based granulometry system», *Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*, Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 91-99.
- Maerz N.H.: «Reconstructing 3-D block size distributions from 2-D measurements on sections», *Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*, Montreal, Quebec, Canada, 1996a, pp 39-43.
- Maerz N.H.: «Image sampling techniques and requirements for automated image analysis of rock fragmentation», *Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*, Montreal, Quebec, Canada, 1996b, pp. 115-120.
- Maerz N.H. & Zhou W.: «Optical digital fragmentation measuring systems - inherent sources of error», *The International Journal for Blasting and Fragmentation, Fragblast*, 1998, Vol. 2, No. 4, pp. 415-431.

- Maerz, N. H. & Zhou W.: «Calibration of optical digital fragmentation measuring systems», Proceedings of the Sixth International Symposium for rock fragmentation by blasting, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 1999, 125-130.
- Maerz N.H. & Palangio T.: «Online fragmentation analysis for grinding and crushing control», SME Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, 2000, pp.109-116.
- Maerz N.H & Palangio T.W.: «Post-Muckpile, Pre-Primary Crusher, automated optical blast fragmentation sizing», *Fragblast*, 2004, Vol. 8, No. 2, pp. 119 -136.
- Maerz N.H., Palangio T.C., Palangio T.W. & Elsey K.: «Optical sizing analysis of blasted rock: lessons learned», Proceedings from the forth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Vienna, Austria, 2007, pp 75-82.
- Mohanty B & Nasser M.H.B.: «Effect of explosive energy density on growth of microfractures in two selected rocks», Proceedings from the forth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Vienna, Austria, 2007, pp 39-45.
- Monjezi M., Mohamadi H.A., Barati B. & Khandelwal M.: «Application of soft computing in predicting rock fragmentation to reduce environmental blasting side effects», *Arabian Journal of Geosciences*, 2012.
- Mortazavi A. & Katsabanis P.D.: «Modelling burden size and strata dip effects on the surface blasting process», *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol .38, 2001, pp 481–498.
- Moser P. & Cheimanoff N., Ortiz R. & Hochholdinger R.: «Breakage characteristics in rock blasting», In R. Holmberg, Proceedings from the first EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Rotterdam, Balkema, 2000, pp 165-170.
- Moser P.: «Less fines production in aggregate and industrial minerals industry», In R. Holmberg, Proceedings from the second EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Rotterdam, Balkema, 2003a, pp 335-343.
- Moser P., Olsson M., Ouchterlony F. & Grasedieck A.: «Comparison of the blast fragmentation from lab-scale and full-scale tests at Bararp», In R. Holmberg, Proceedings from the second EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Rotterdam, Balkema, 2003b, pp 449-458.

Moser P., Grasedieck A., du Mouza J., & Hamdi E.: «Breakage energy in rock blasting», Proceedings of the 2nd World Conference on Explosives and Blasting Techniques, Prague, Czech Republic, 2003c, pp 323–334.

Moser P.: «Less fines production in aggregate and industrial minerals industry – Results of a European research project», In R. Holmberg, Proceedings from the third EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Brighton, UK, 2005, pp 567-573.

Murrey S.G.: «Commercial Explosives», Encyclopedia of Forensic Sciences, Elsevier Ltd., 2012, Vol.2, pp 85-92.

Ozkahraman H.T.: «Fragmentation assessment and design of blast pattern at Goltas limestone quarry Turkey», International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, Vol. 43, pp. 628-633.

Olofsson S.O.: «Applied explosives technology for construction & mining», Applex, Sweden, 1990.

Olsson M., Nie S., Bergqvist I. & Ouchterlony, F.: «What causes cracks in rock blasting?», International Journal for Blasting and Fragmentation, Fragblast, 2002, Vol.6, No. 2, pp. 221-233.

Onederra I.A. & Esen, S.: «Selection of inter hole and inter row timing for surface blasting- an approach based on burden relief analysis», Proceedings of EFEE Second World Conference on Explosives and Blasting Technique, Prague, Czech Republic, 2003, pp. 269-275.

Onederra I.A. & Esen, S.: «An alternative approach to determine the Holmberg–Persson Constants for modelling near field Peak Particle Velocity attenuation», Fragblast, Vol. 8, No. 2, 2004a, pp. 61–84.

Onederra I., Esen S. & Jankovic A. «Estimation of fines generated by blasting - applications for the mining and quarrying industries», Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 2004b, Vol. 113, pp. 237-247.

Onederra I.: «Delay timing factor for empirical fragmentation models», Mining Technology, Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, Section A, 2007, Vol. 116, No. 4 ,pp. 176-179.

Ouchterlony F.: «Influence of blasting on the size distribution and properties of muckpile fragments, a state-of-the art review, MinFo P2000-10: Energioptimizering vidnedbrytning /

Energy optimization in comminution, Swebrec», Lulea University of Technology, Sweden, 2003.

Ouchterlony F, Nyberg U, Olsson M, Bergqvist I, Granlund L & Grind H: «The energy balance of production blasts at Nordkalk's Klinthagen quarry», Proceedings of the 2nd World Conference on Explosives and Blasting, Prague, Balkema, Rotterdam, 2003, pp 193–203.

Ouchterlony F.: «The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing», Mining Technology Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, 2005a.

Ouchterlony F.: «What does the fragment size distribution from blasting look like?», Proceedings from the third EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Brighton, UK, 2005b, pp 189-199.

Ouchterlony F., Olsson M., Nyberg U., Andersson P. & Gustavsson L.: «Constructing the fragment size distribution of a bench blasting round using the new Swebrec function», Proceedings of the eighth International Symposium on Fragmentation by Blasting, Santiago, Chile, 2006a, pp. 332-344.

Ouchterlony F. & Moser P.: «Likenesses and differences in the fragmentation of full-scale and model scale blasts», Proceedings of the eighth International Symposium on Fragmentation by Blasting, Santiago, Chile, 2006b, pp. 207-220.

Ouchterlony F., Nyberg U., Bergman P. & Esen S.: «Monitoring the blast fragmentation at Boliden Mineral's Aitik copper mine», Proceedings from the forth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Vienna, Austria, 2007, pp 47-62.

Palangio T.C. & Franklin J.A.: «Practical guidelines for lighting and photography», Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 111-114.

Palangio T.C. & Maerz N.H.: «Case studies using the WipFrag image analysis system», Sixth International Symposium For Rock Fragmentation By Blasting, FRAGBLAST 6, Johannesburg, South Africa, 1999, pp. 117-120.

Palangio, T.C.: «Using WipFrag to measure, record and predict blast results», Presented at the 13th Aggregate and Ready-Mixed Concrete Conference for Holderbank Management & Consulting Ltd, Chiclana, Spain, 2000.

- Palangio T.C., Palangio T.W. & Maerz N.H.: «Advanced automatic optical blast fragmentation sizing and tracking», Proceedings from the third EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Brighton, UK, 2005, pp 259-267.
- Pankhurst R.C.: «Dimensional analysis and scale factors», Chapman and Hall, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1964.
- Persson P.A., Holmberg R. & Lee J.: «Rock Blasting and Explosives Engineering», CRC Press Inc., Boca Raton, USA. 1994.
- Pijush P.R.: «Rock Blasting Effects & Operations», A.A. Balkema Publishers. Leiden, Netherlands, 2005.
- Pinksen R. & Proulx R.P.: «Oversize Reduction Project At The Iron Ore Company Of Canada», Mining Engineering, Vol. 63, No. 5, 2011, pp. 20-40.
- Παναγιώτου Γ.Ν.: «Εξόρυξη Πετρωμάτων I-OnLine Υλικό Διδασκαλίας», (<http://goo.gl/3A4iAC>, τελευταία πρόσβαση στις 17/02/2012), χ.χ
- Rakishev B.R.: «A new characteristic of the blastability of rock in quarries», Soviet Mining Science, 1982, No. 17, pp. 248-251.
- Roxborough F.F. & Eskikaya S.: «Dimensional considerations in the design criteria of a scale model for coal-face production system research», Int. Journal of Rock Mech. Mining & Sci. Geomech., 1974, Vol. 11, pp. 129–137.
- Saharan M. R., Mitri H. S. & Jethwa J. L.: «Rock fracturing by explosive energy: review of state-of-the-art», Fragblast, Vol. 10, No. 1, 2006, pp. 61—81.
- Sanchidrian J.A., Segarra P. & Lopez L.M.: «On the relation of rock face response time and initial velocity with blasting parameters», Proceedings from the third EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Brighton, UK, 2005, pp. 375-389.
- Sanchidrian J.A., Segarra P. & Lopez L.M.: «A practical procedure for the measurement of fragmentation by blasting by image analysis», Rock Mechanics and Rock Engineering. 2006, Vol. 39, No. 4, pp. 359-382.
- Sanchidrian J.A., Segarra P. & Lopez L.M.: «On specific surface and fragmentation energy of blasted rock», Proceedings from the forth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Vienna, Austria, 2007a, pp 63-73.

- Sanchidrian J.A., Segarra P. & Lopez L.M.: «Energy components in rock blasting», International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007b Vol. 44, pp. 130–147.
- Scott A.: «Blastability and blast design», Proceedings of the Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST-5, Montreal, Canada, 1996, pp.27-36.
- Segarra P., Sanchidrián J.A., López L.M., Pascual J.A., Ortiz R., Gómez A. & Smoech B.: «Analysis of bench face movement in quarry blasting», Proceedings of EFEE Second World Conference on Explosives and Blasting Technique, Prague, Czech Republic, 2003, pp. 485-497.
- Segarra P., Sanchidrian J.A., Moser P., Grasedieck A., Smoech B. & Pascual J.A.: «Energy controlled blasting for less fines production», Proceedings of the Third World Conference on Explosives and Blasting, EFEE, Brighton, Reading, UK, 2005, pp. 535–543.
- Sonin A.A.: «The physical basics of Dimensional Analysis», 2nd Edition, Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge, 2001.
- Spathis A.T.: «A correction relating to the analysis of the original Kuz-Ram model», International Journal for Blasting and Fragmentation, Fragblast, 2004, Vol.8, No.4, pp. 201-205.
- Σταμπολτζής Γ.Α.: «Σημειώσεις μηχανικής προπαρασκευής μεταλλευμάτων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1989.
- Σταμπολτζής Γ.Α.: «Μηχανική προπαρασκευή μεταλλευμάτων, βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1994.
- Stimpson B.: «Modeling materials for engineering rock mechanics», International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1970, Vol. 7, No1, pp. 77-121.
- Sudhakar J., Adhikari G.R., Gupta R.N.: «Comparison of Fragmentation Measurements by Photographic and Image Analysis Techniques», Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, Vol. 39, No. 2, pp. 159-168.
- Svahn V.: «Generation of fines in bench blasting», Licentiate thesis, Dep. of Geology, publication A104, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2003.

Thornton D., Kanghibotla S.S. & Esterle J.S.: «A fragmentation model to estimate run-of-mine distribution of soft rock types», Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, ISEE, Orlando, Florida, USA, 2001, pp. 41–53.

Thornton D., Kanghibotla S.S. & Brunton I.: «Modeling the Impact of Rockmass and Blast Design Variation on Blast Fragmentation», International Journal for Blasting and Fragmentation, Fragblast, 2002, Vol.6, No.2, pp. 169-188.

Τσουτρέλης Χ.Ε.: «Εκρηκτικές Ύλεις και Τεχνική των Ανατινάξεων», Τόμος 2^{ος}, Τεχνική των ανατινάξεων, 2001.

UNEP: «2011 Annual Report», United Nations Environment Programme, (<http://goo.gl/s0k6GA>, τελευταία πρόσβαση στις 11/11/2012), 2012.

Workman L. & Eloranta J.: «The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption», Proceedings of the 29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technology, ISEE, 2003, pp. 131-140.

Zhang Z.X., Kou S.Q., Yu J., Yu Y., Jiang L.G. & Lindqvist P.A.: «Effects of loading rate on rock fracture», International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1999, Vol. 36, pp. 597-611.

Zhang Z.X., Kou S.Q., Jiang L.G. & Lindqvist P.A.: «Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning», International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, Vol. 37, pp. 745-762.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΔΙΑΣΤΑΣΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (Buckingham Pi Theorem)

Ο γενικός τύπος της εξίσωσης του διαστασιακού προβλήματος είναι ο εξής:

$$f(T_{\min}, B_L, EEEY, RR_{50}, M_0) = 0$$

Χρησιμοποιώντας ως βασικές μεταβλητές τα $T_{\min}$, B_L και $EEEY$ και εφαρμόζοντας το θεώρημα του Buckingham, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να μετασχηματιστεί ως εξής:

$$f(\Pi_1, \Pi_2) = 0$$

όπου:

$$\Pi_1 = T_{\min}^{a_1} \cdot B_L^{b_1} \cdot EEEY^{c_1} \cdot RR_{50}$$

$$\Pi_2 = T_{\min}^{a_2} \cdot B_L^{b_2} \cdot EEEY^{c_2} \cdot M_0$$

Επιλύοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτουν οι τιμές των a_i , b_i , c_i :

$$\Pi_1 = T_{\min}^{a_1} \cdot B_L^{b_1} \cdot EEEY^{c_1} \cdot RR_{50}$$

$$\Pi_1 = (M^0 \cdot L^0 \cdot T^1)^{a_1} \cdot (M^0 \cdot L^1 \cdot T^0)^{b_1} \cdot (M^1 \cdot L^2 \cdot T^{-2})^{c_1} \cdot (M^0 \cdot L^0 \cdot T^0)$$

$$M: 0 = 0 \cdot a_1 + 0 \cdot b_1 + c_1 + 0$$

$$L: 0 = 0 \cdot a_1 + b_1 + 2 \cdot c_1 + 0$$

$$T: 0 = a_1 + 0 \cdot b_1 - 2 \cdot c_1 + 0$$

$$a_1 = 0, \quad b_1 = 0, \quad c_1 = 0$$

$$\Pi_2 = T_{\min}^{a_2} \cdot B_L^{b_2} \cdot EEEY^{c_2} \cdot M_0$$

$$\Pi_2 = (M^0 \cdot L^0 \cdot T^1)^{a_2} \cdot (M^0 \cdot L^1 \cdot T^0)^{b_2} \cdot (M^1 \cdot L^2 \cdot T^{-2})^{c_2} \cdot (M^1 \cdot L^0 \cdot T^0)$$

$$M: 0 = 0 \cdot a_2 + 0 \cdot b_2 + c_2 + 1$$

$$L: 0 = 0 \cdot a_2 + b_2 + 2 \cdot c_2 + 0$$

$$T: 0 = a_2 + 0 \cdot b_2 - 2 \cdot c_2 + 0$$

$$a_2 = -2, \quad b_2 = 2, \quad c_2 = -1$$

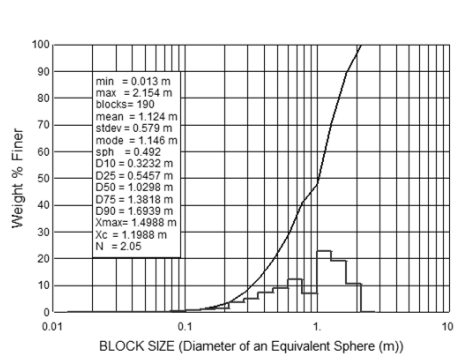
Οι αδιάστατες ομάδες Π_1 και Π_2 που τελικά δημιουργούνται είναι οι εξής.

$$\Pi_1 = RR_{50}$$

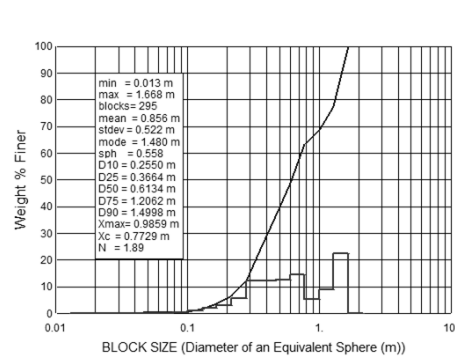
$$\Pi_2 = T_{\min}^{-2} \cdot B_L^2 \cdot EEEY^{-1} \cdot M_0$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

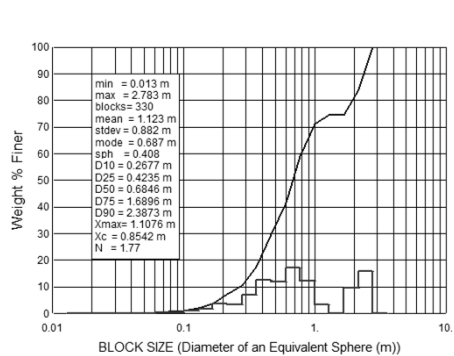
ΜΕΤΩΠΟ #1



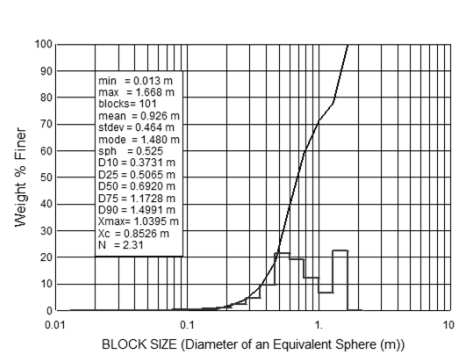
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	47.7%
500 mm	22.0%
300 mm	8.6%
150 mm	1.7%
125 mm	1.1%
100 mm	0.6%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



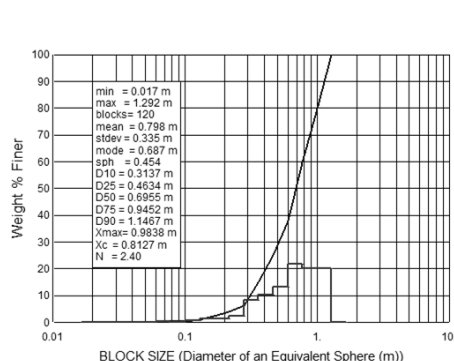
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	68.7%
500 mm	39.6%
300 mm	15.3%
150 mm	2.7%
125 mm	1.5%
100 mm	0.6%
75.0 mm	0.4%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	0.2%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	0.1%
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



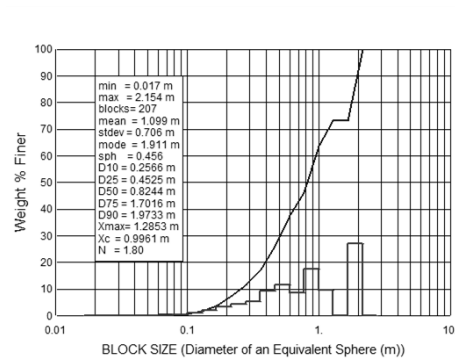
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	71.2%
500 mm	32.9%
300 mm	12.4%
150 mm	3.0%
125 mm	1.9%
100 mm	1.1%
75.0 mm	0.5%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



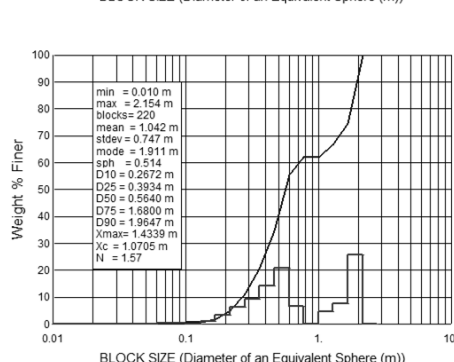
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	71.0%
500 mm	24.0%
300 mm	5.4%
150 mm	0.7%
125 mm	0.6%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



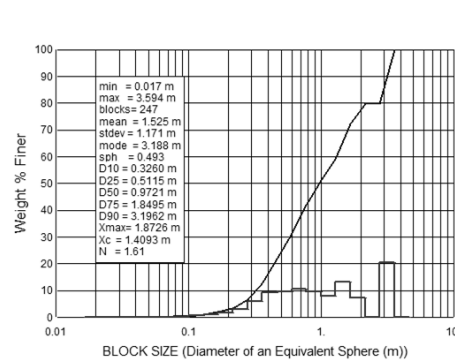
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	79.9%
500 mm	28.5%
300 mm	8.8%
150 mm	1.8%
125 mm	1.1%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



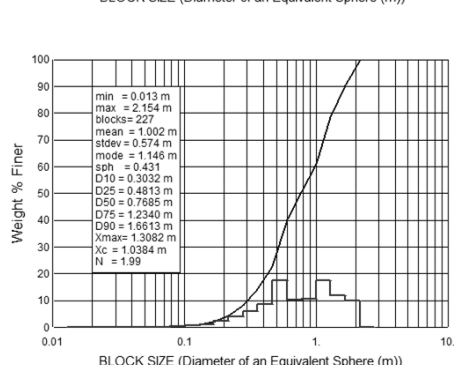
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	63.5%
500 mm	28.1%
300 mm	12.8%
150 mm	2.8%
125 mm	1.6%
100 mm	0.7%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



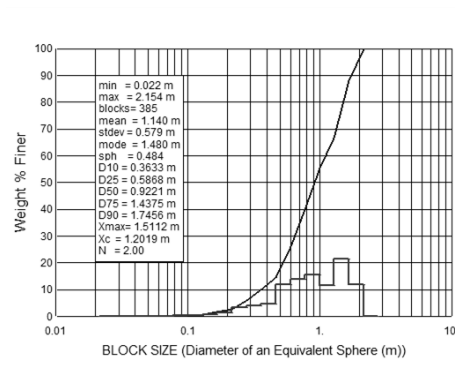
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	62.1%
500 mm	40.2%
300 mm	13.6%
150 mm	1.3%
125 mm	0.7%
100 mm	0.6%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



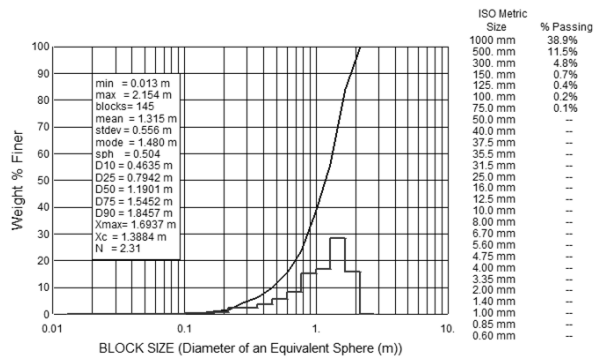
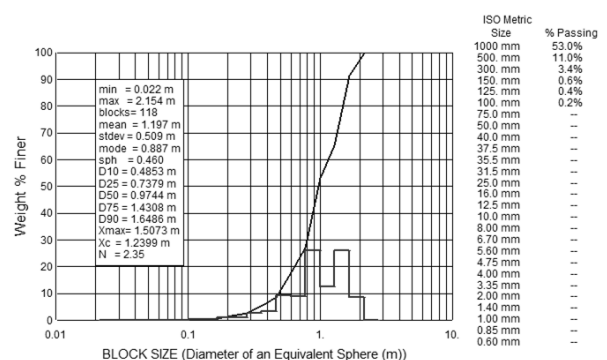
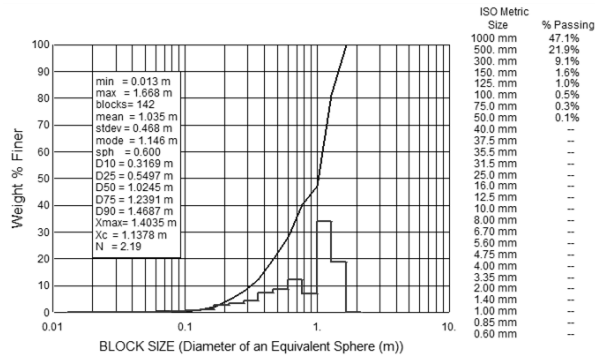
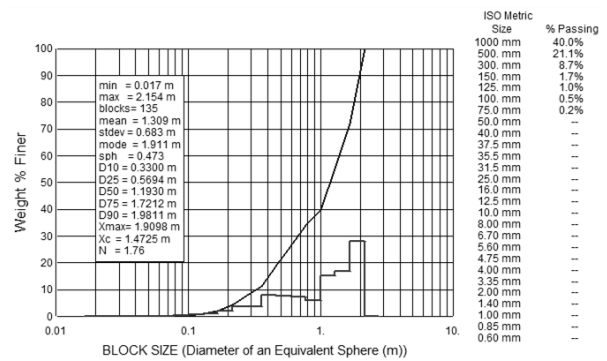
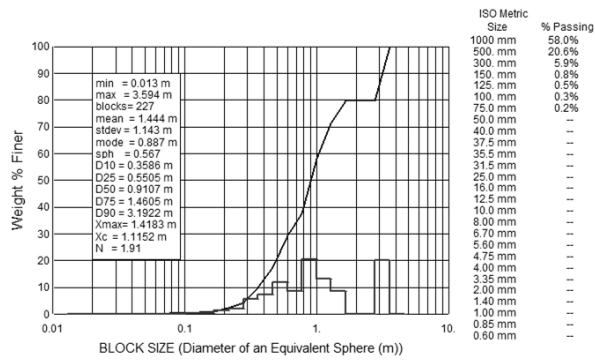
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	51.2%
500 mm	24.2%
300 mm	8.1%
150 mm	1.4%
125 mm	0.8%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



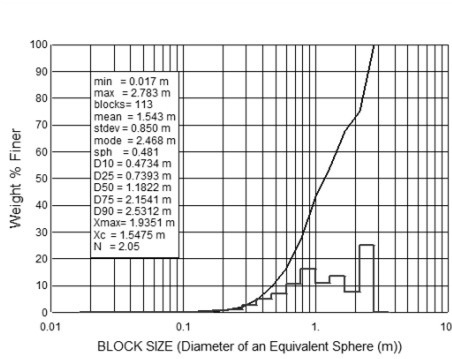
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	60.9%
500 mm	27.4%
300 mm	9.8%
150 mm	1.7%
125 mm	1.1%
100 mm	0.5%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



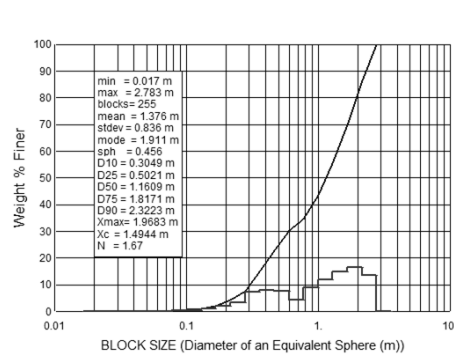
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	55.3%
500 mm	17.5%
300 mm	7.0%
150 mm	1.2%
125 mm	0.8%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
18.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



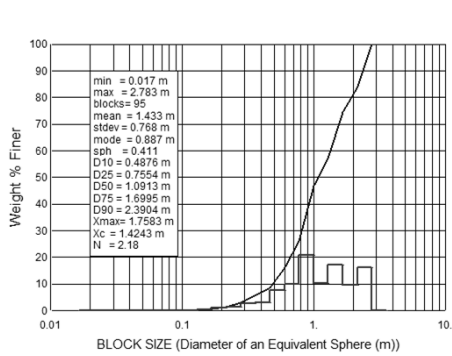
ΜΕΤΩΠΟ #2



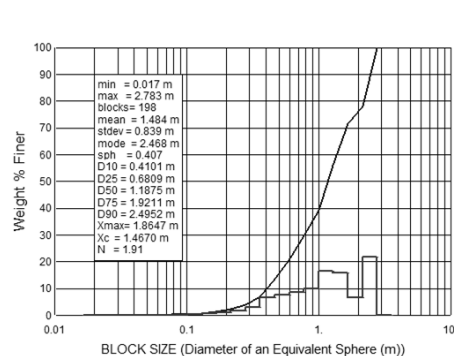
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	43.3%
500 mm	11.4%
300 mm	2.7%
150 mm	0.3%
125 mm	0.2%
100 mm	0.1%
75.0 mm	—
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



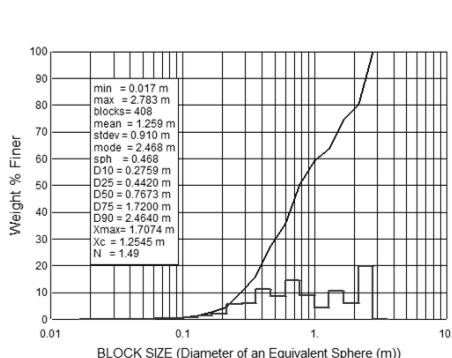
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	43.5%
500 mm	39.4%
300 mm	24.9%
150 mm	9.6%
125 mm	1.7%
100 mm	1.0%
75.0 mm	0.6%
50.0 mm	0.3%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



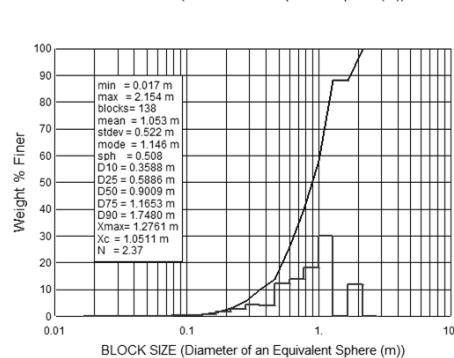
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	45.8%
500 mm	10.7%
300 mm	3.6%
150 mm	0.4%
125 mm	0.2%
100 mm	0.2%
75.0 mm	—
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



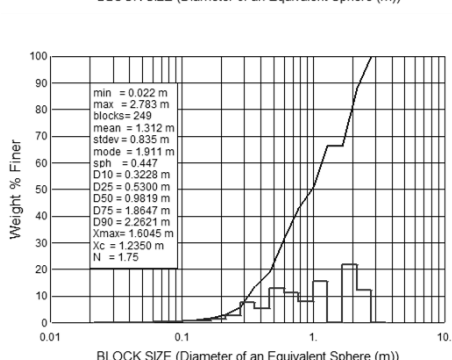
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	45.8%
500 mm	39.4%
300 mm	15.5%
150 mm	4.6%
125 mm	1.0%
100 mm	0.7%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



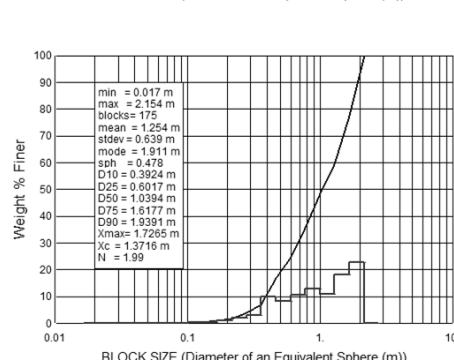
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	59.5%
500 mm	29.7%
300 mm	11.8%
150 mm	2.0%
125 mm	1.2%
100 mm	0.7%
75.0 mm	0.4%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



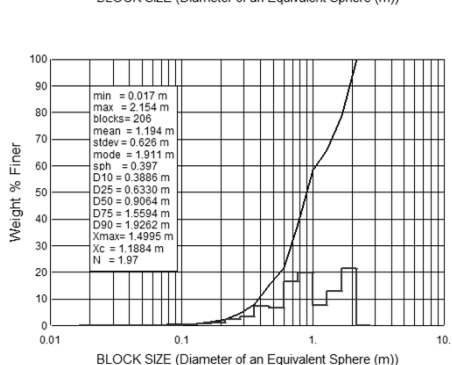
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	57.9%
500 mm	17.1%
300 mm	6.9%
150 mm	1.1%
125 mm	0.8%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



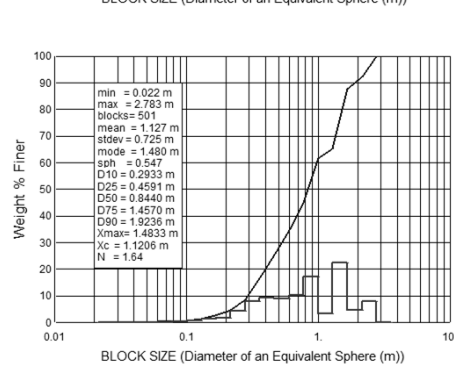
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	50.6%
500 mm	22.1%
300 mm	7.9%
150 mm	1.5%
125 mm	1.1%
100 mm	0.5%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



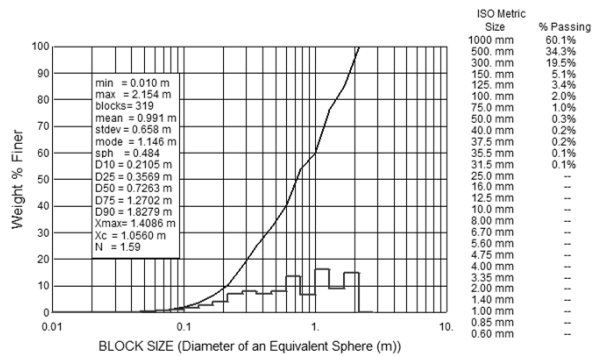
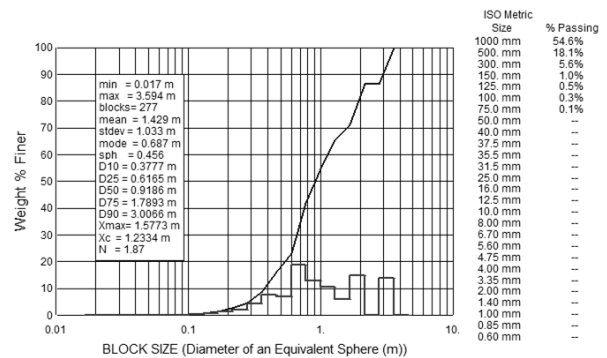
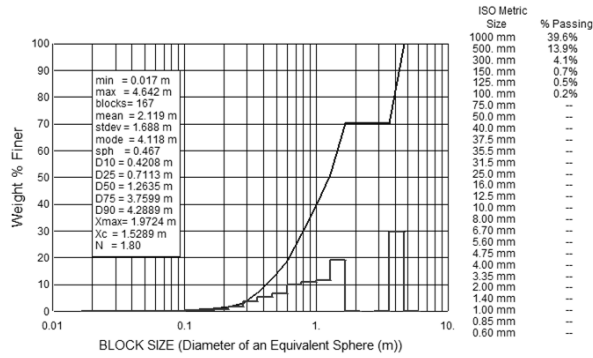
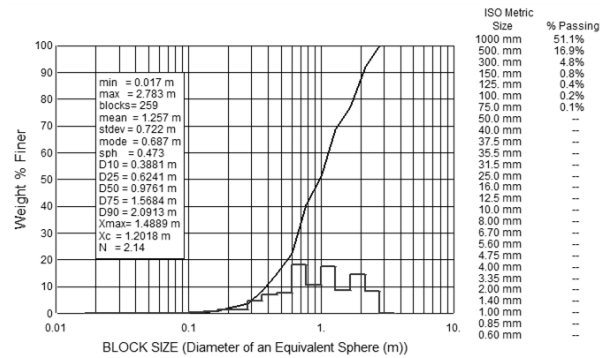
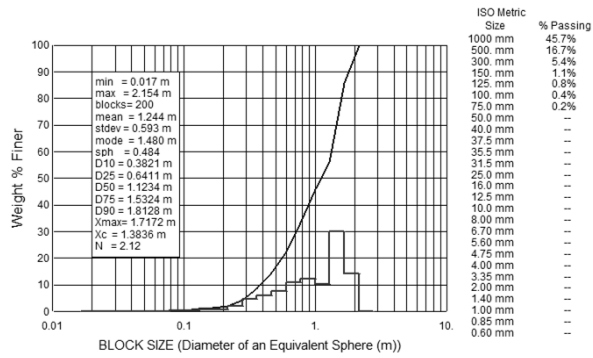
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	48.5%
500 mm	18.9%
300 mm	4.6%
150 mm	0.7%
125 mm	0.4%
100 mm	0.2%
75.0 mm	0.1%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



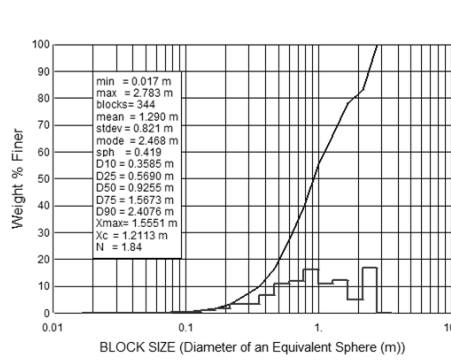
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	58.2%
500 mm	17.0%
300 mm	5.5%
150 mm	1.0%
125 mm	0.6%
100 mm	0.2%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



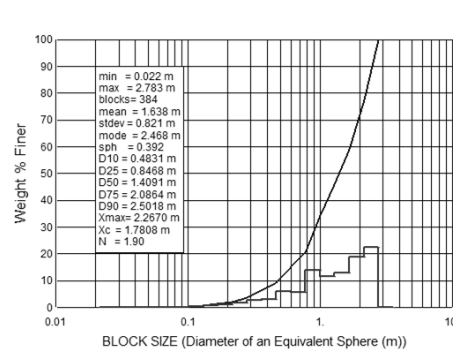
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	61.8%
500 mm	27.8%
300 mm	10.8%
150 mm	2.1%
125 mm	1.3%
100 mm	0.7%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



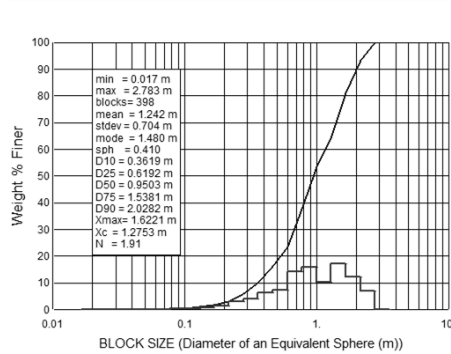
ΜΕΤΩΠΟ #3



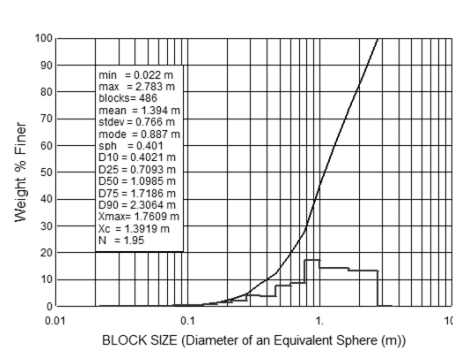
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	55.4%
500 mm	19.4%
300 mm	7.6%
150 mm	1.4%
125 mm	0.9%
100 mm	0.5%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



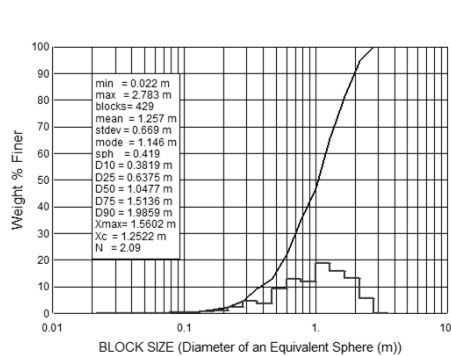
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	34.4%
500 mm	10.7%
300 mm	4.4%
150 mm	0.9%
125 mm	0.5%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.1%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



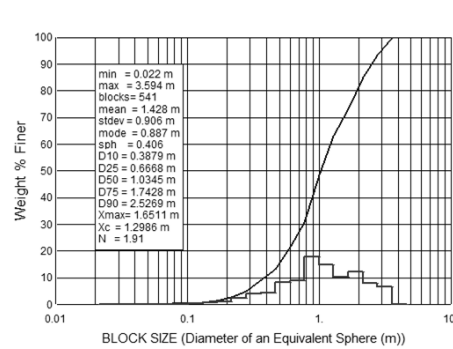
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	53.5%
500 mm	18.0%
300 mm	7.0%
150 mm	1.3%
125 mm	0.9%
100 mm	0.5%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



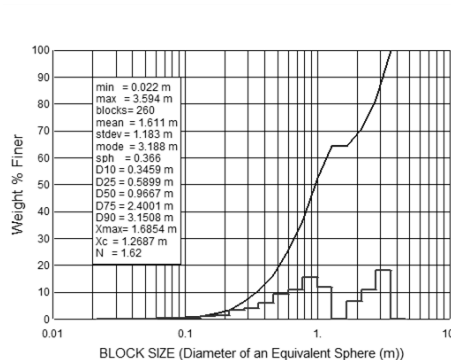
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	45.2%
500 mm	14.1%
300 mm	5.7%
150 mm	1.0%
125 mm	0.6%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



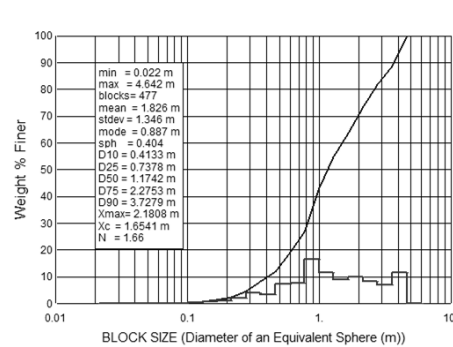
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	46.9%
500 mm	15.3%
300 mm	5.9%
150 mm	1.1%
125 mm	0.7%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



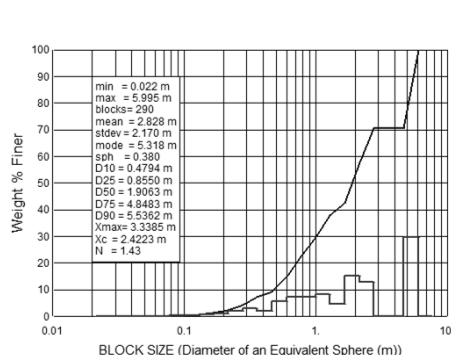
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	48.3%
500 mm	15.3%
300 mm	5.9%
150 mm	1.0%
125 mm	0.6%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



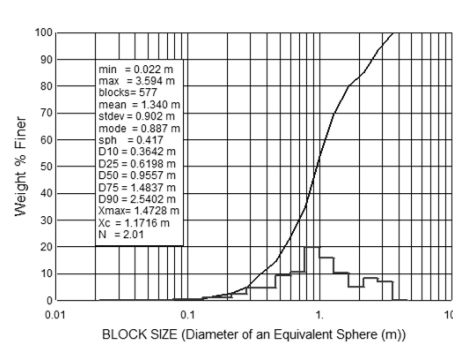
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	52.3%
500 mm	18.9%
300 mm	7.7%
150 mm	1.6%
125 mm	0.9%
100 mm	0.5%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



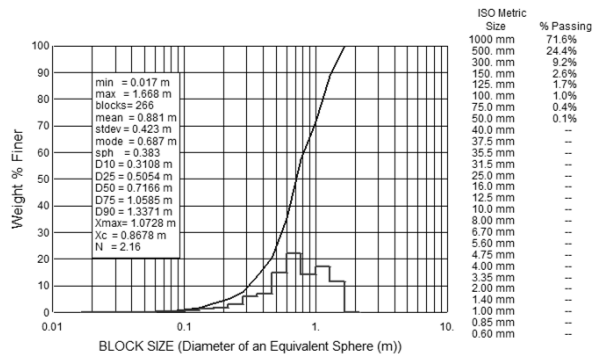
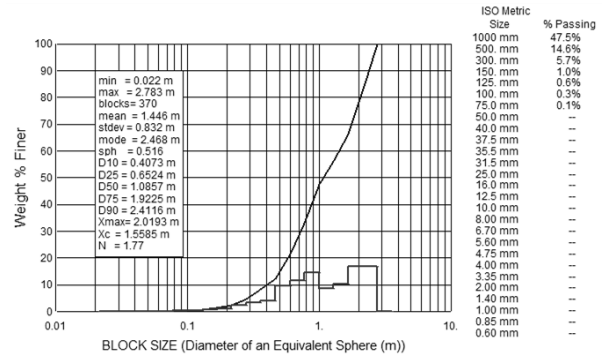
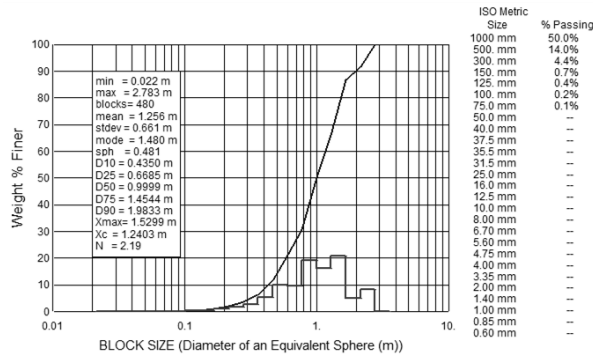
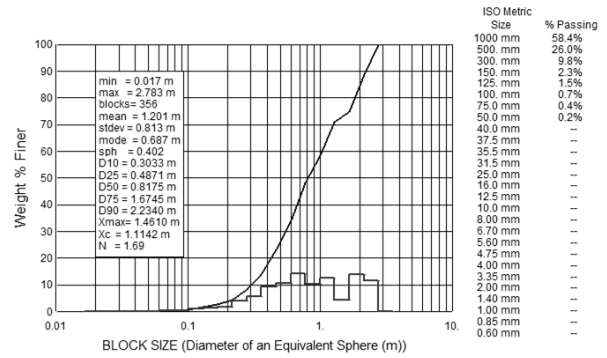
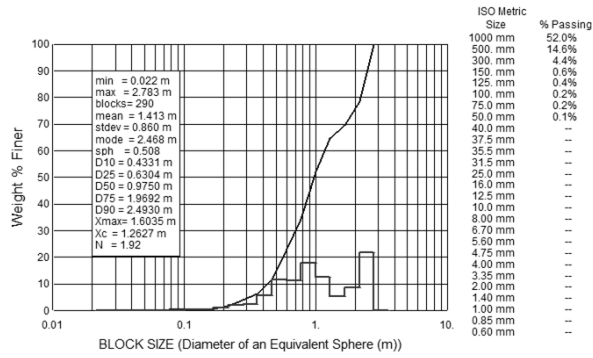
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	43.1%
500 mm	13.6%
300 mm	5.5%
150 mm	1.0%
125 mm	0.5%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



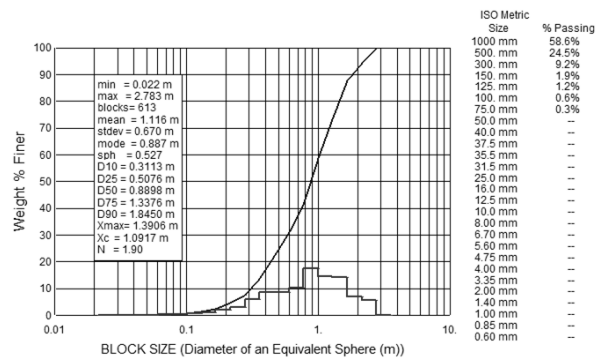
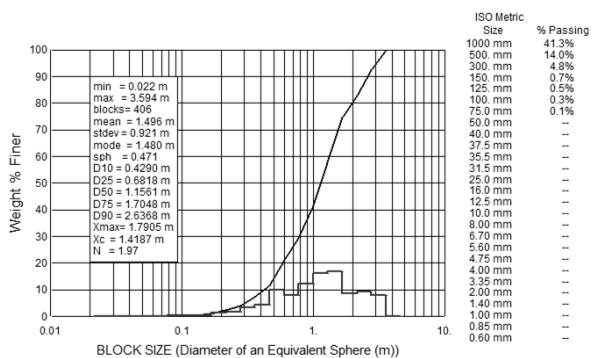
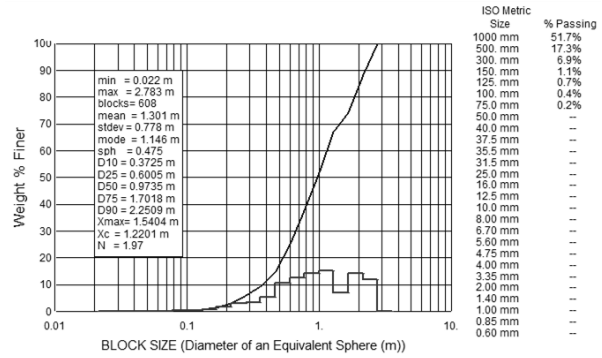
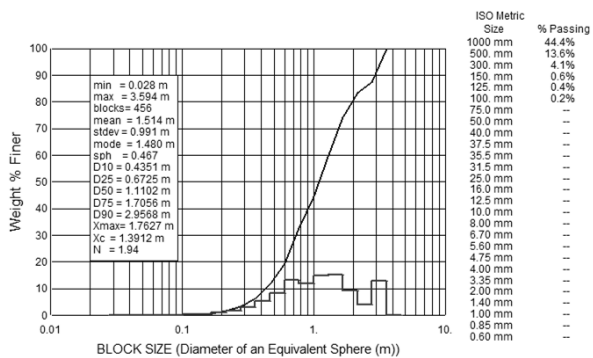
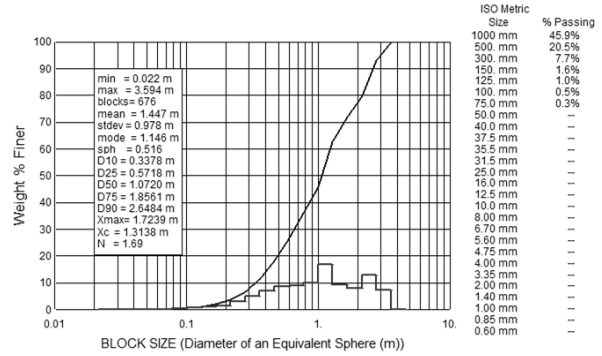
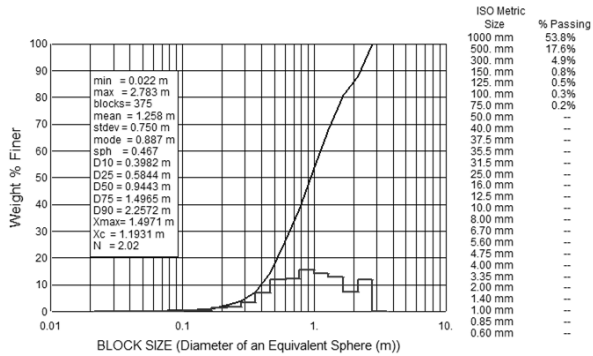
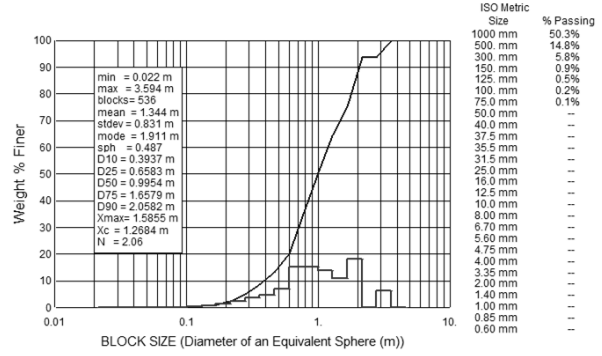
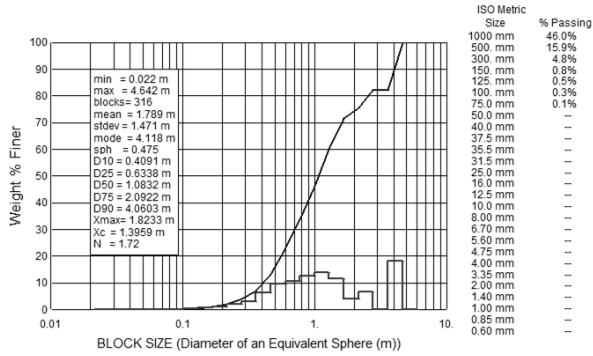
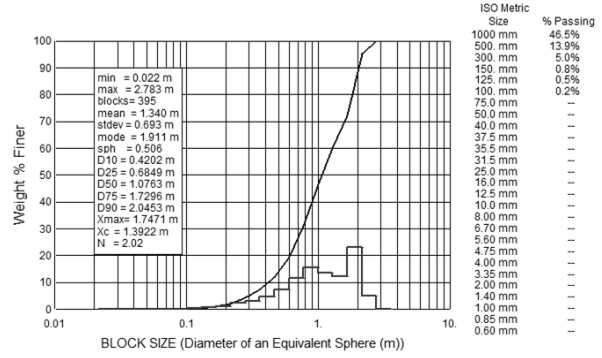
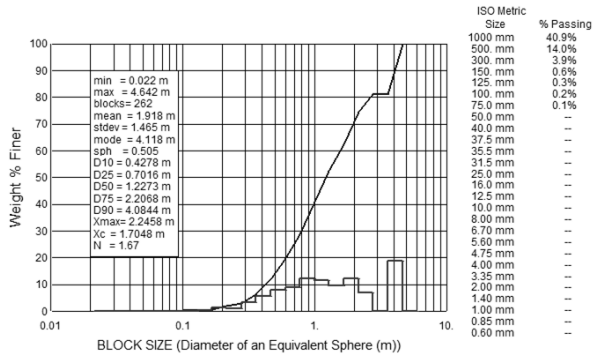
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	29.7%
500 mm	10.9%
300 mm	5.0%
150 mm	1.0%
125 mm	0.6%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—

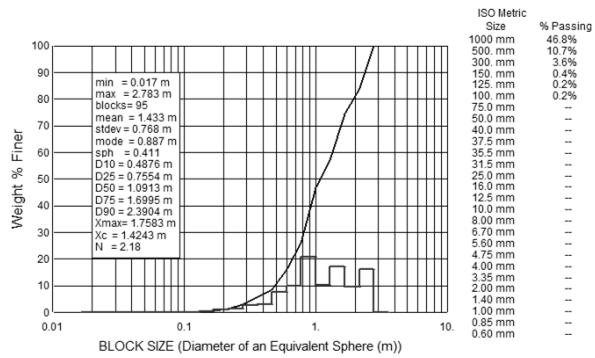
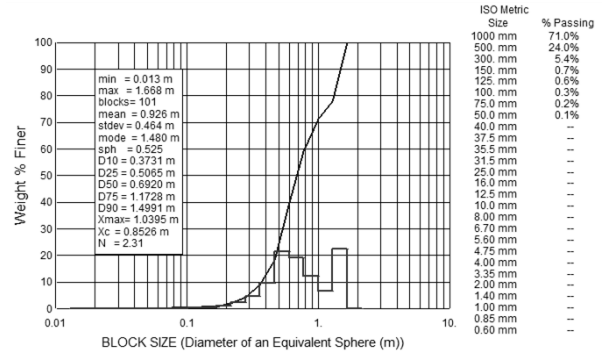
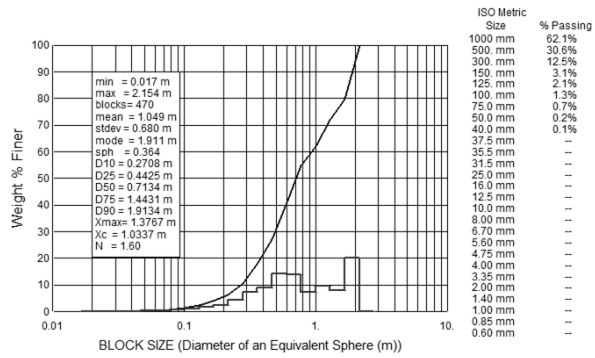
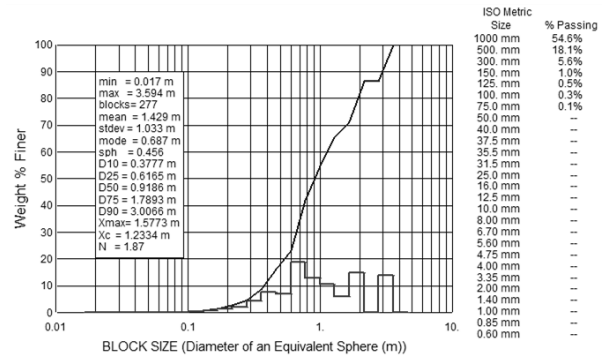
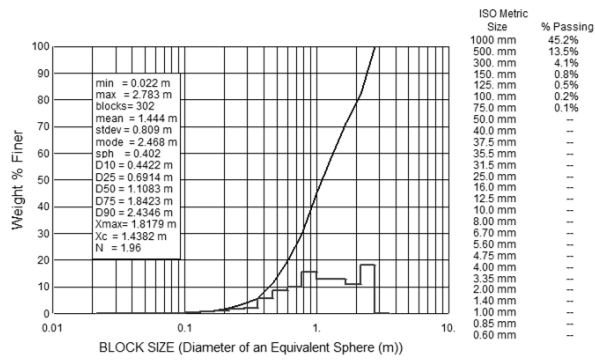


ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	53.8%
500 mm	16.9%
300 mm	6.3%
150 mm	1.1%
125 mm	0.6%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	—
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—

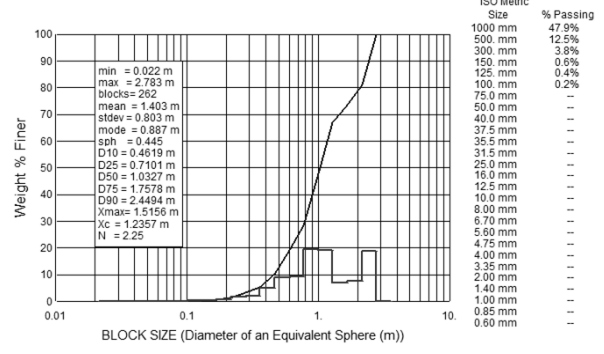
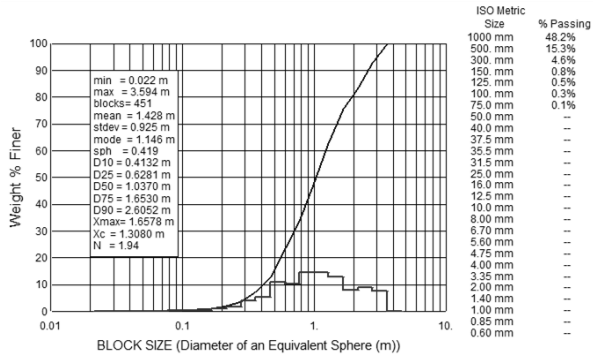
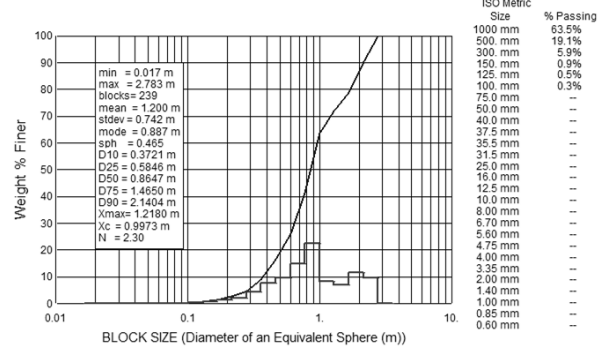
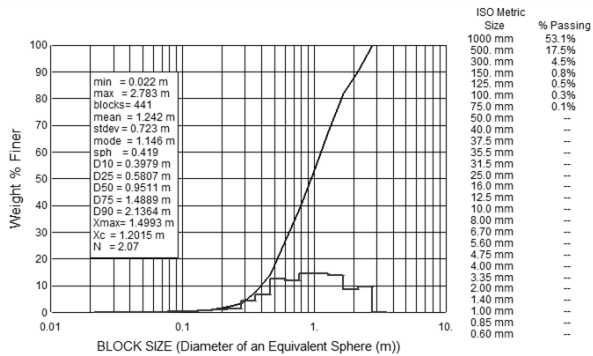
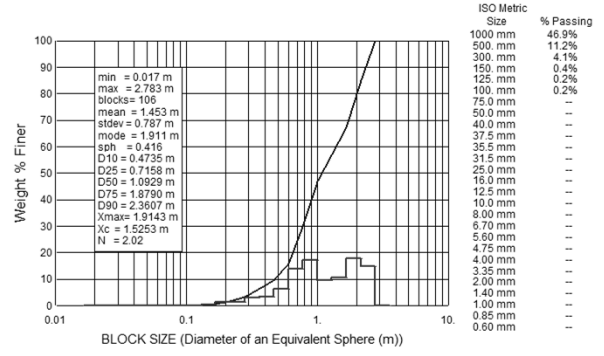
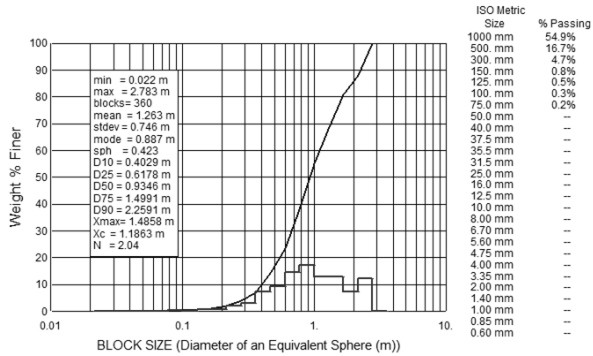
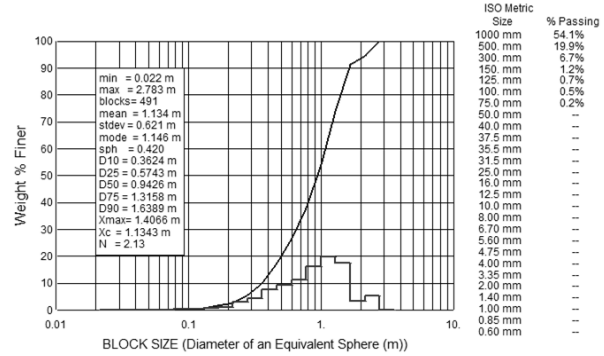
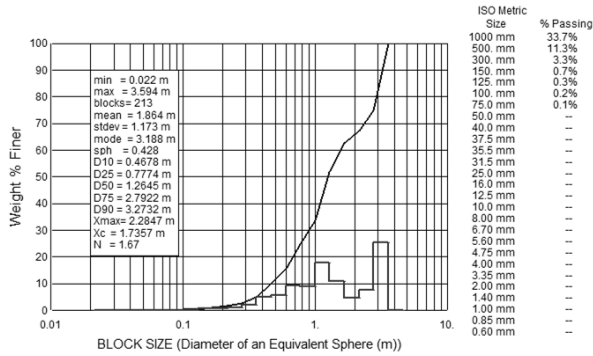
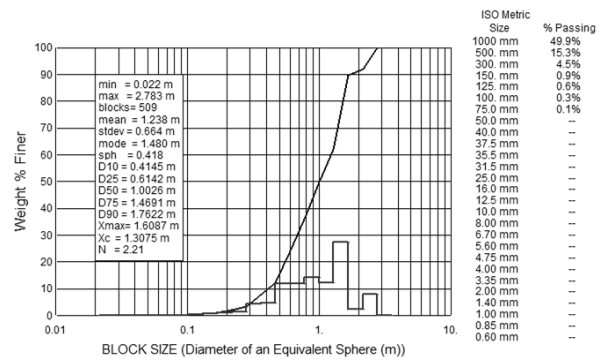
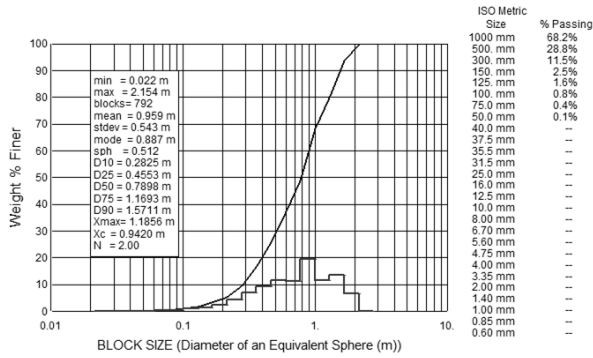


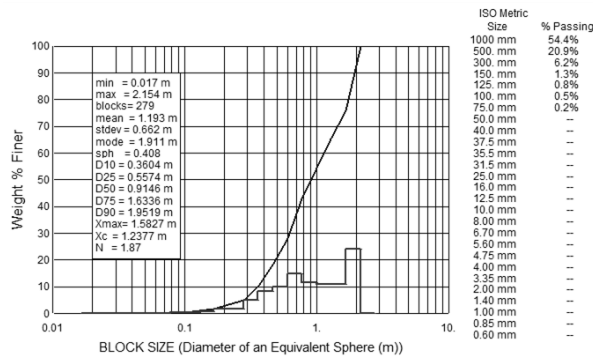
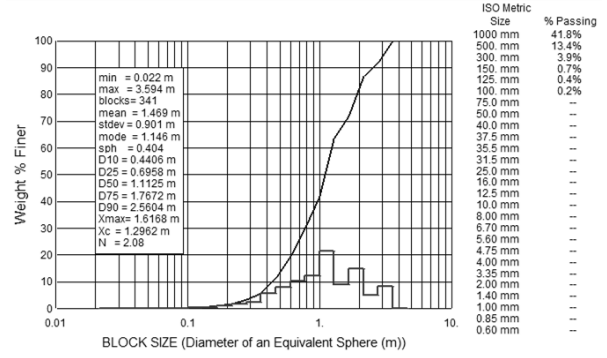
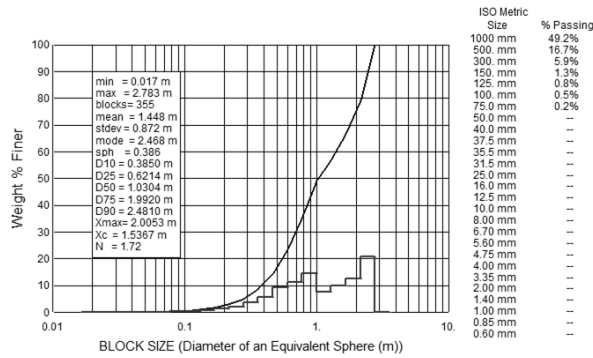
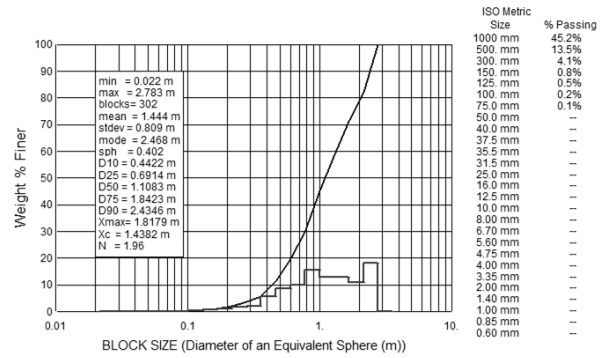
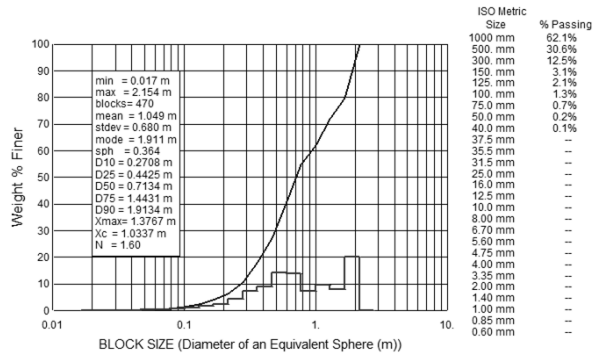
METΩΠΟ #4



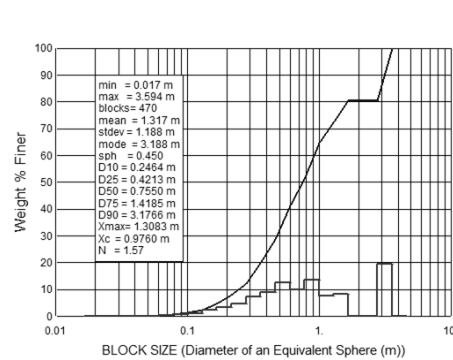
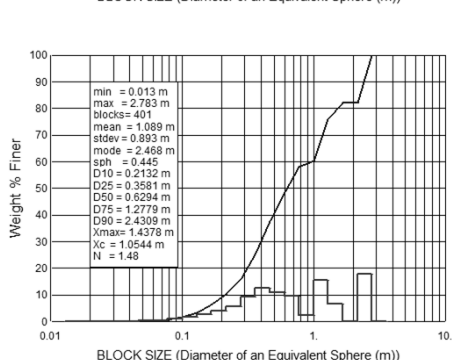
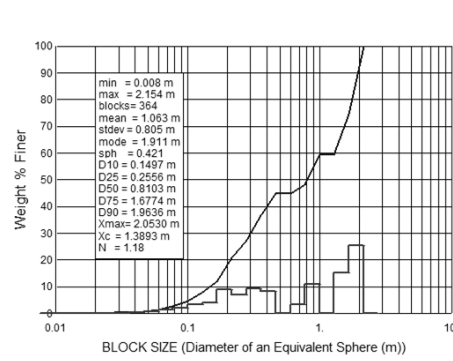
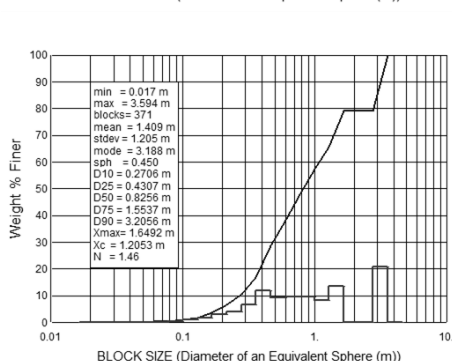
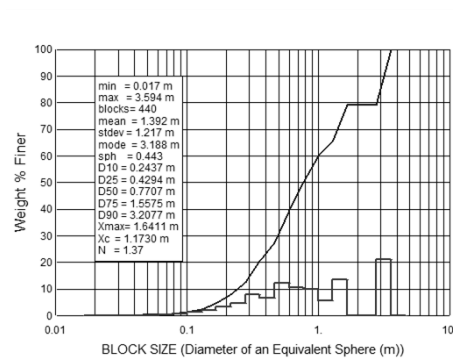
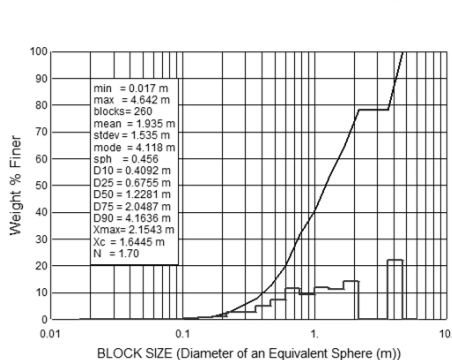
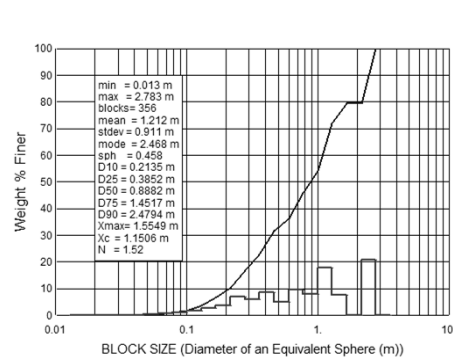
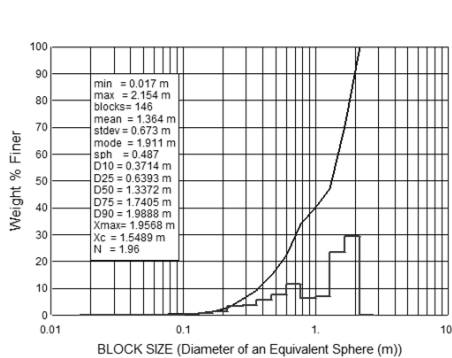
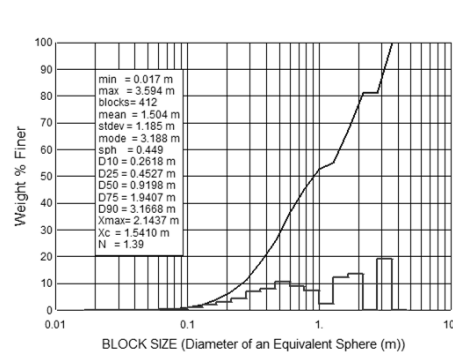
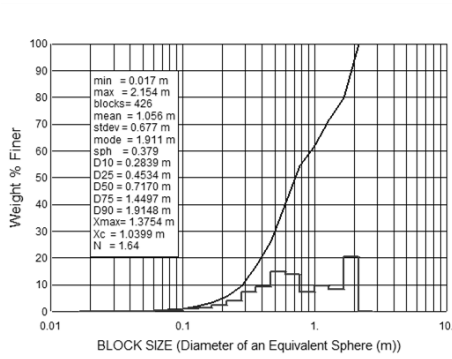


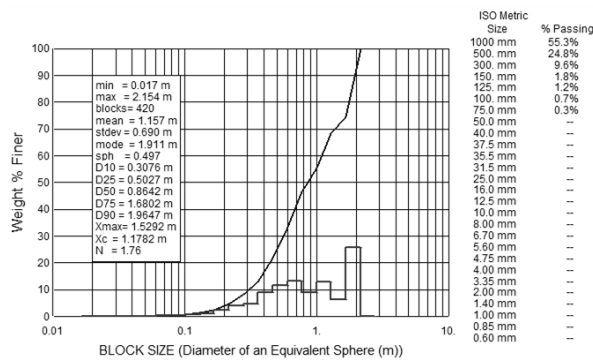
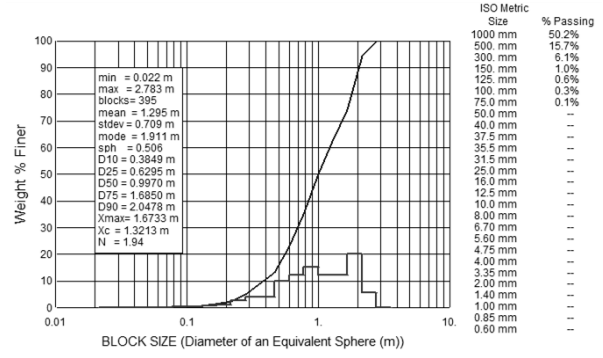
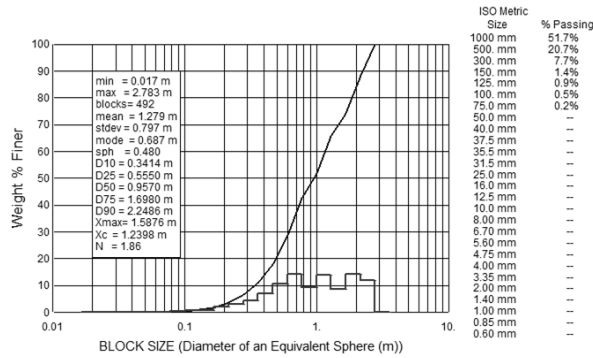
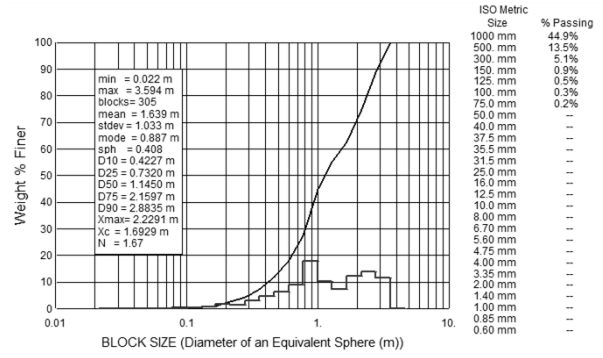
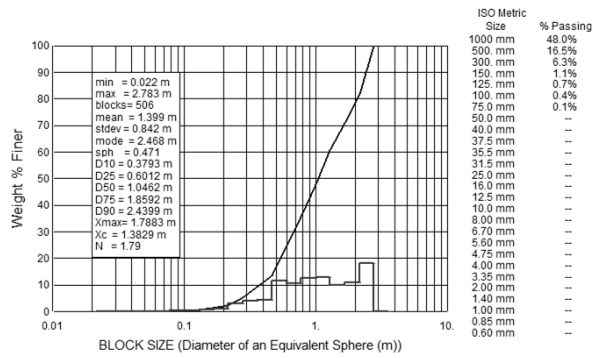
ΜΕΤΩΠΟ #5



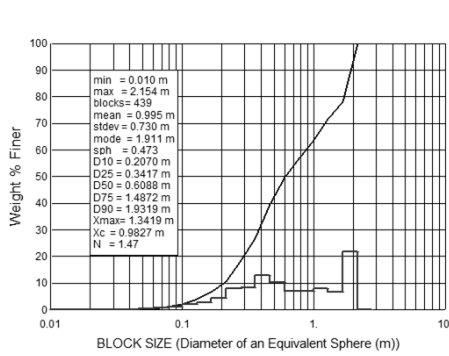


ΜΕΤΩΠΟ #6

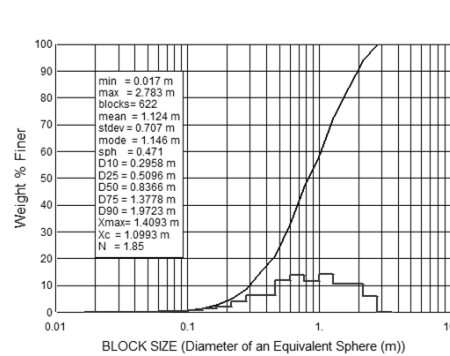




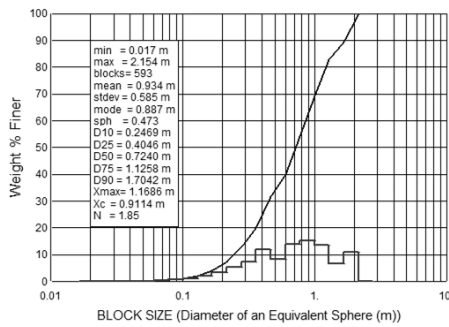
ΜΕΤΩΠΟ #7



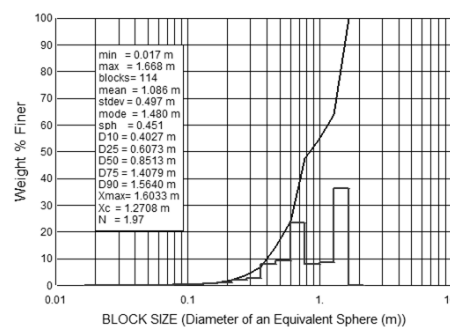
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	63.7%
500 mm	42.2%
300 mm	20.8%
150 mm	5.3%
125 mm	3.6%
100 mm	1.9%
75.0 mm	0.9%
50.0 mm	0.3%
40.0 mm	0.2%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



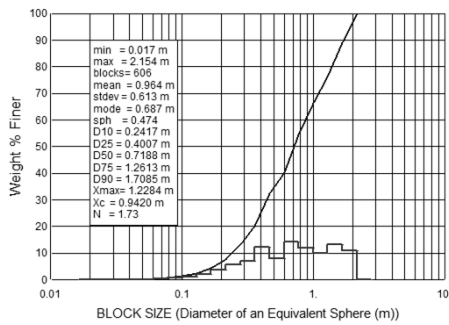
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	58.4%
500 mm	24.2%
300 mm	10.3%
150 mm	2.1%
125 mm	1.2%
100 mm	0.7%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	---
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



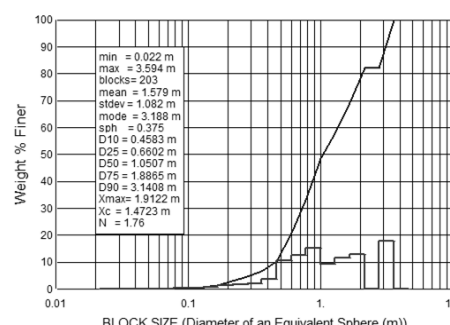
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	69.1%
500 mm	33.9%
300 mm	14.6%
150 mm	3.2%
125 mm	2.0%
100 mm	1.1%
75.0 mm	0.6%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



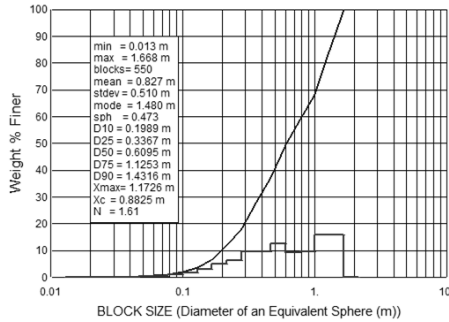
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	55.1%
500 mm	17.1%
300 mm	4.8%
150 mm	0.9%
125 mm	0.6%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	---
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



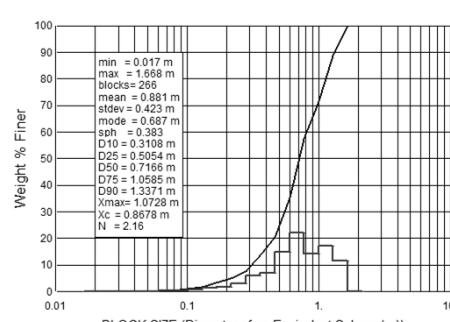
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	66.2%
500 mm	34.5%
300 mm	15.1%
150 mm	3.3%
125 mm	2.1%
100 mm	1.2%
75.0 mm	0.6%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



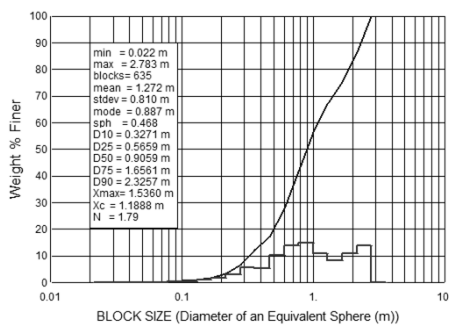
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	48.4%
500 mm	13.0%
300 mm	5.0%
150 mm	1.1%
125 mm	0.7%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	---
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



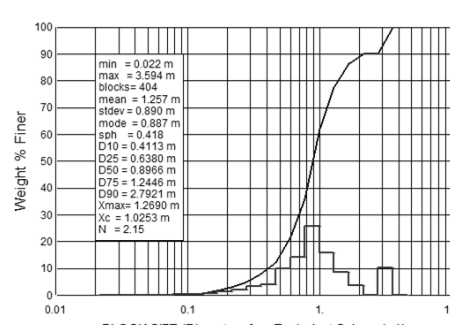
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	68.2%
500 mm	40.4%
300 mm	20.6%
150 mm	5.3%
125 mm	3.3%
100 mm	2.0%
75.0 mm	1.0%
50.0 mm	0.3%
40.0 mm	0.2%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



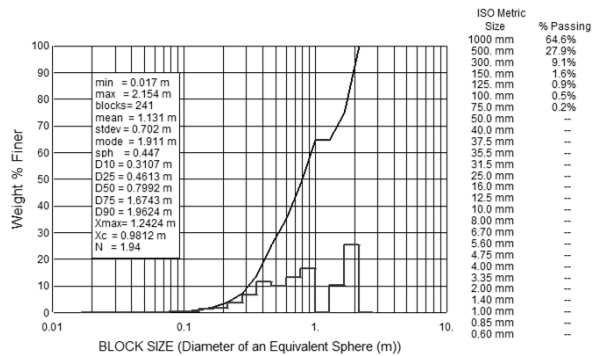
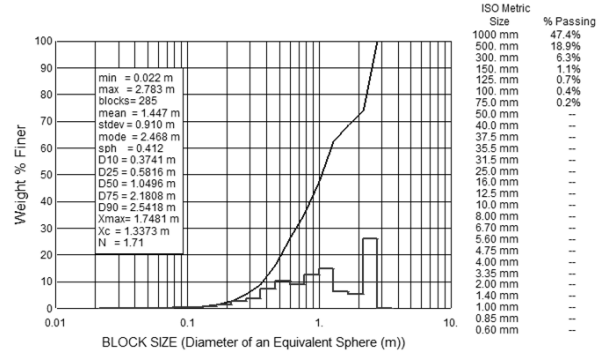
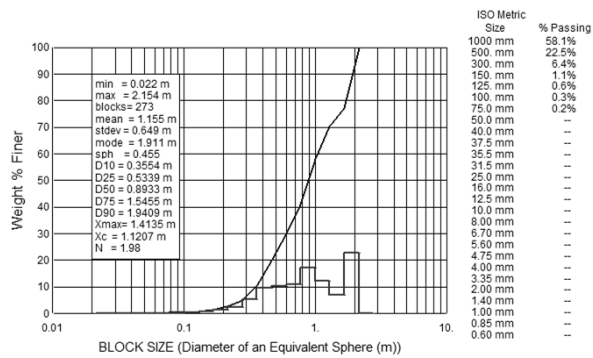
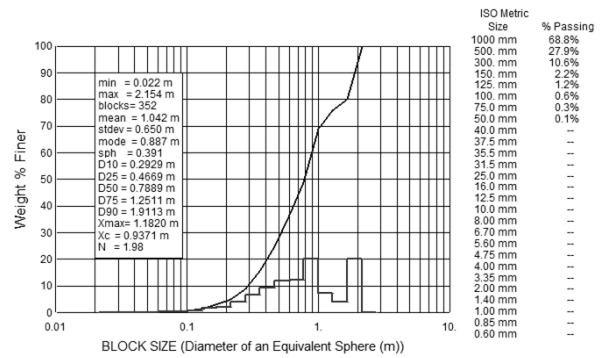
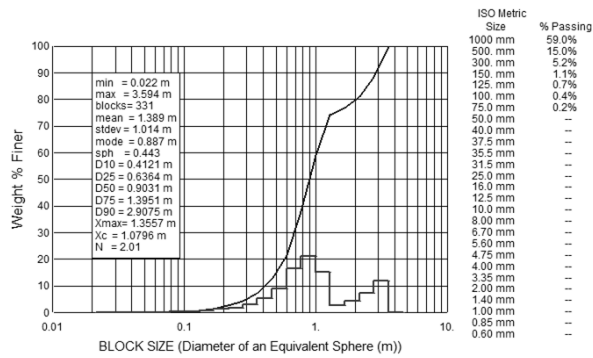
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	71.6%
500 mm	24.4%
300 mm	9.2%
150 mm	2.6%
125 mm	1.7%
100 mm	1.0%
75.0 mm	0.4%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



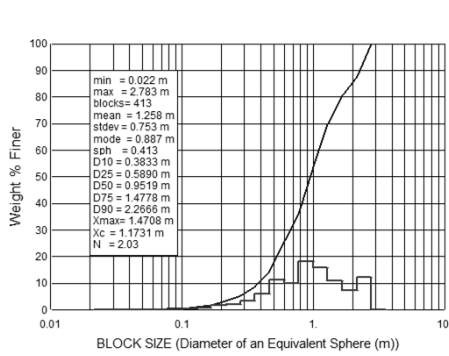
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	58.2%
500 mm	20.0%
300 mm	8.1%
150 mm	1.4%
125 mm	0.9%
100 mm	0.6%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	---
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



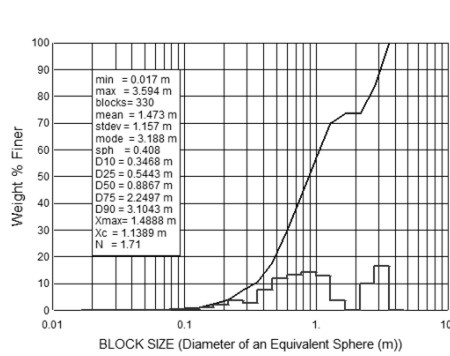
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	61.8%
500 mm	14.7%
300 mm	5.6%
150 mm	1.2%
125 mm	0.8%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	---
40.0 mm	---
37.5 mm	---
35.5 mm	---
31.5 mm	---
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



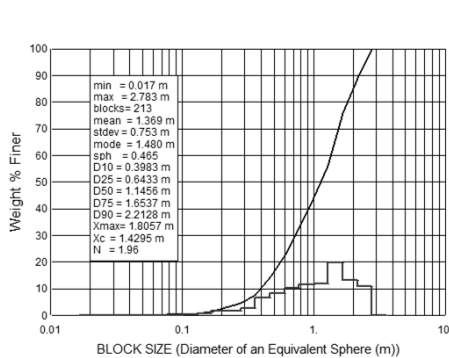
METΩΠΟ #8



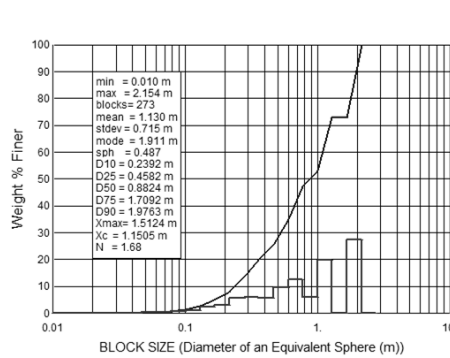
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	53.9%
500 mm	17.6%
300 mm	6.2%
150 mm	1.2%
125 mm	0.8%
100 mm	0.4%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	--
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



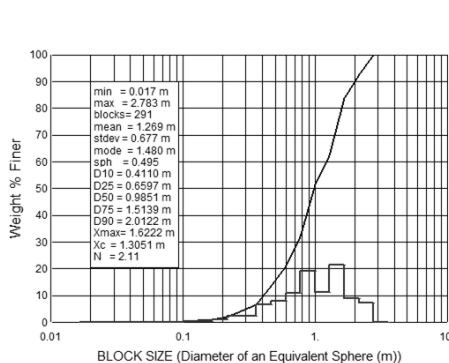
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	57.1%
500 mm	21.1%
300 mm	8.4%
150 mm	1.7%
125 mm	1.0%
100 mm	0.7%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	--
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



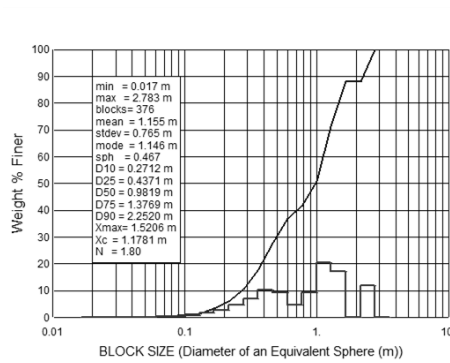
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	44.1%
500 mm	16.4%
300 mm	5.5%
150 mm	1.0%
125 mm	0.6%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	--
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



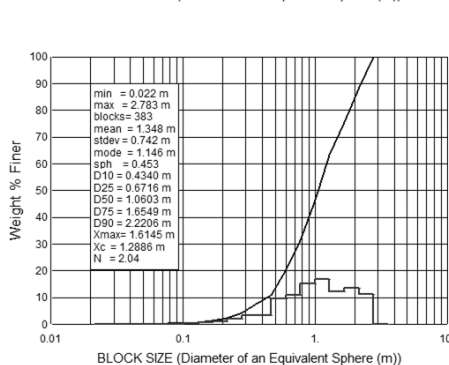
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	53.1%
500 mm	27.8%
300 mm	15.2%
150 mm	3.8%
125 mm	2.4%
100 mm	1.5%
75.0 mm	0.7%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



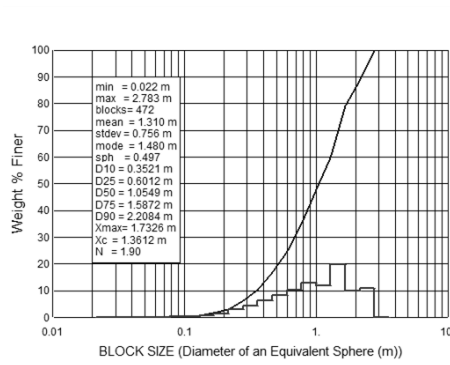
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	51.3%
500 mm	15.4%
300 mm	4.9%
150 mm	0.8%
125 mm	0.5%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	--
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



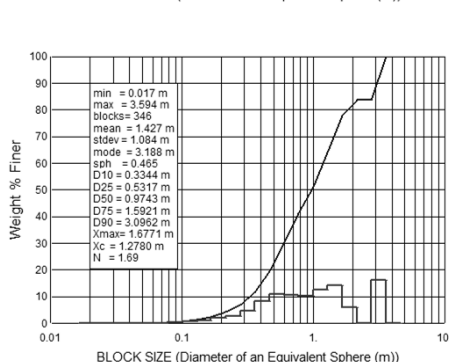
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	50.7%
500 mm	30.1%
300 mm	12.4%
150 mm	2.4%
125 mm	1.4%
100 mm	0.9%
75.0 mm	0.4%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



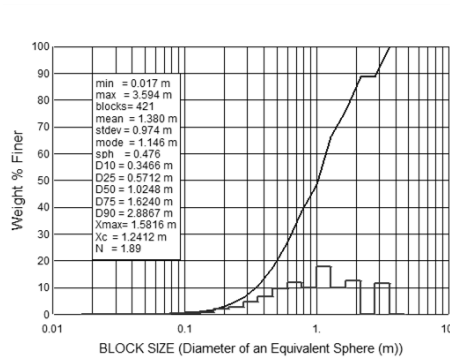
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	46.5%
500 mm	13.5%
300 mm	5.2%
150 mm	1.0%
125 mm	0.8%
100 mm	0.3%
75.0 mm	0.2%
50.0 mm	--
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



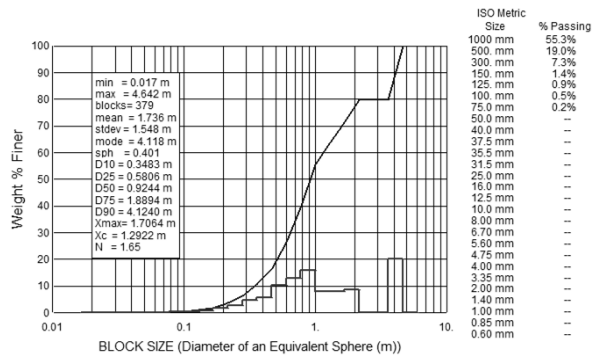
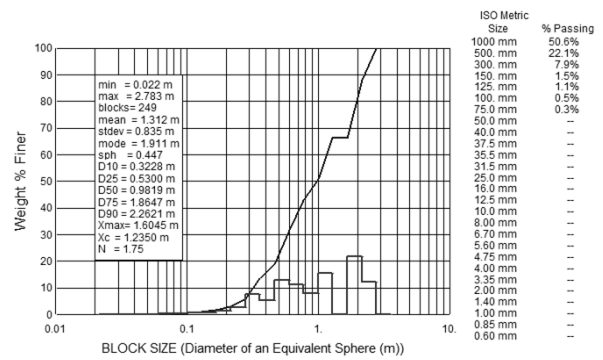
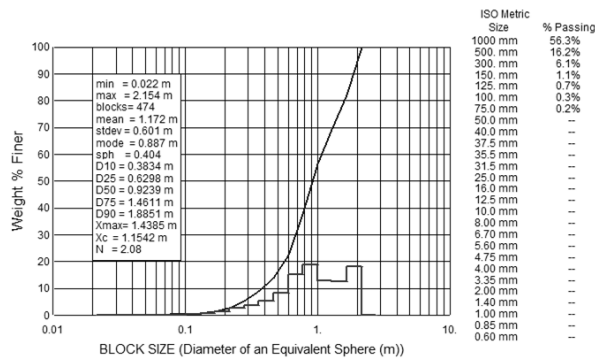
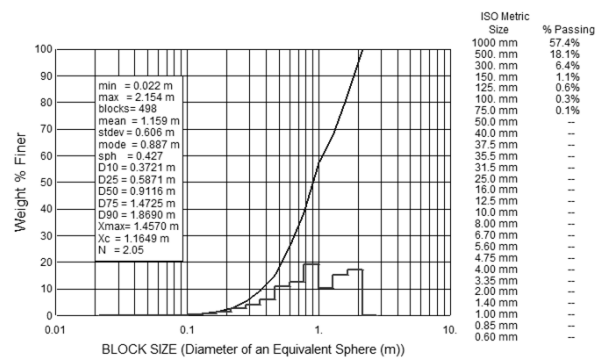
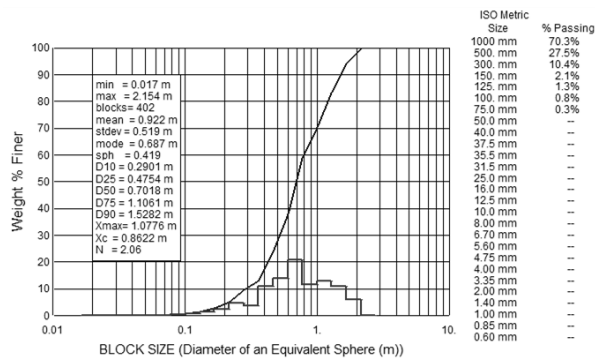
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	47.8%
500 mm	18.9%
300 mm	7.2%
150 mm	0.8%
125 mm	0.4%
100 mm	0.2%
75.0 mm	--
50.0 mm	--
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



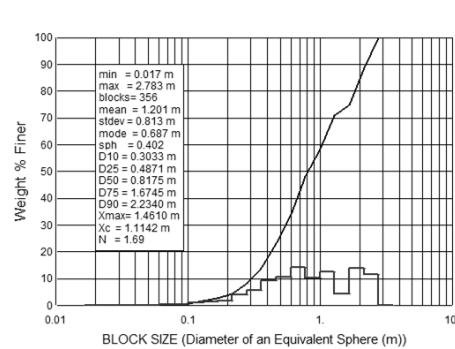
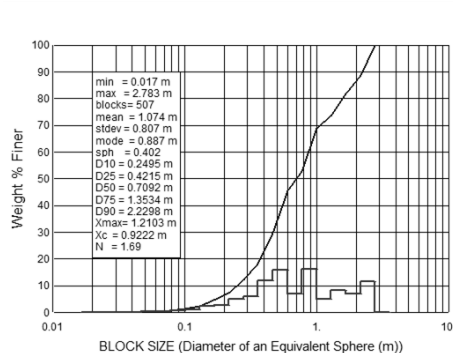
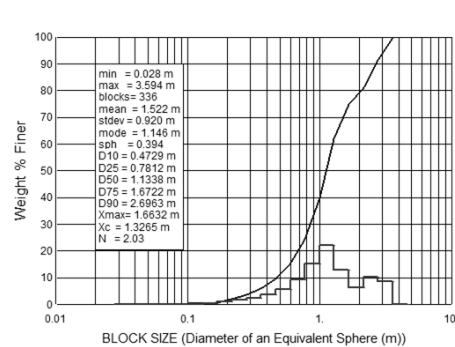
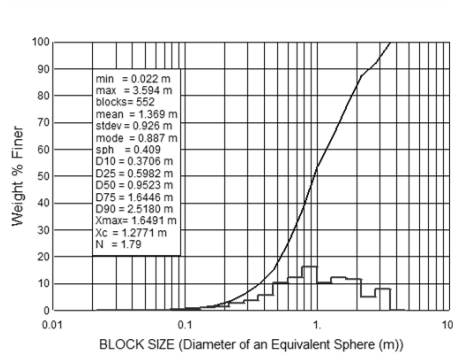
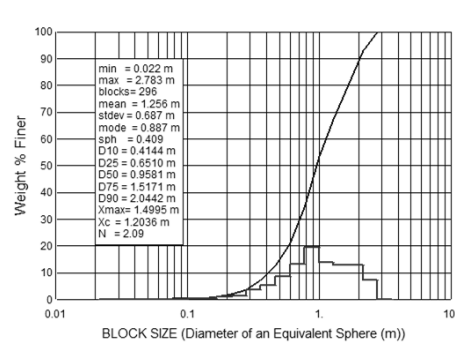
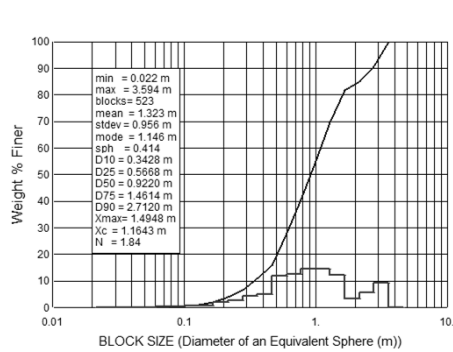
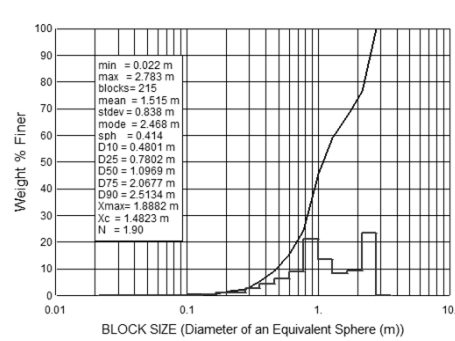
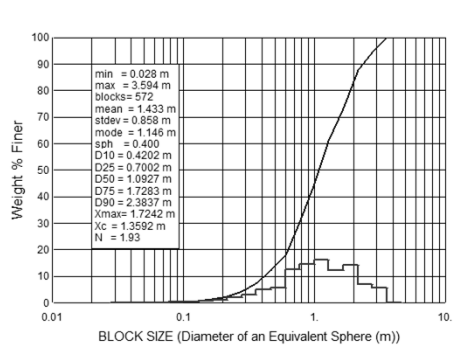
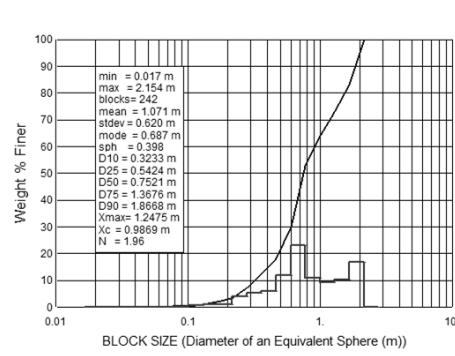
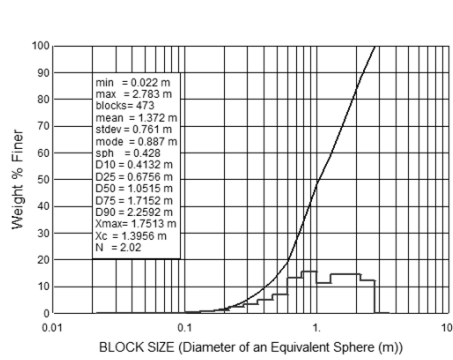
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	51.2%
500 mm	22.5%
300 mm	8.1%
150 mm	1.9%
125 mm	1.2%
100 mm	0.7%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--

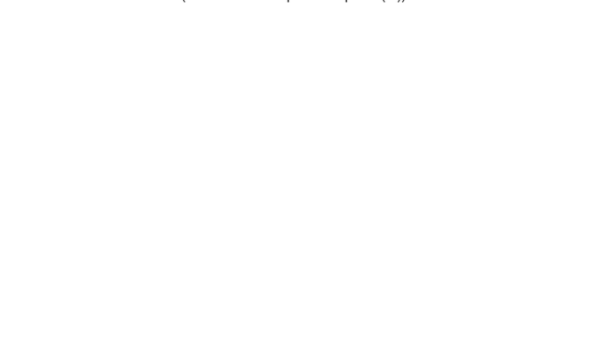
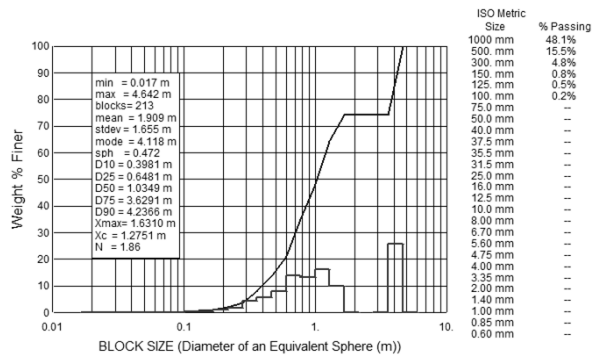
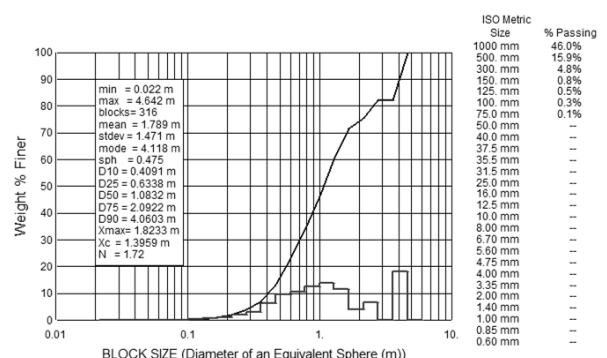
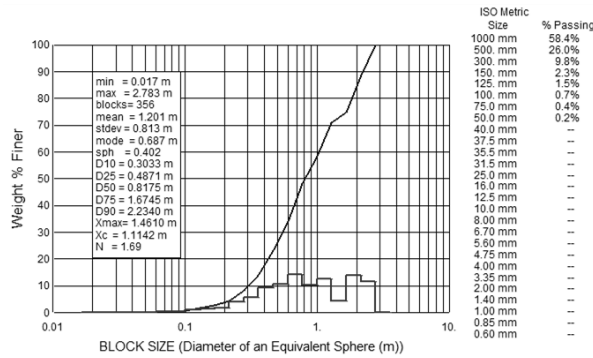
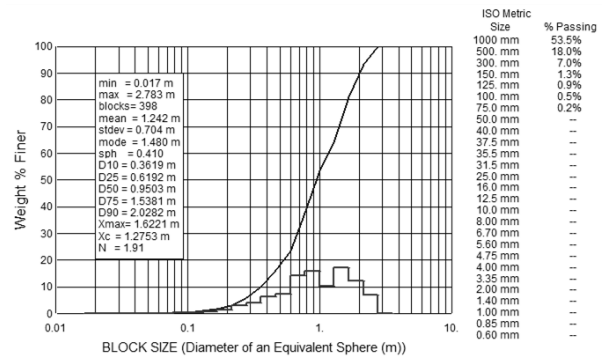
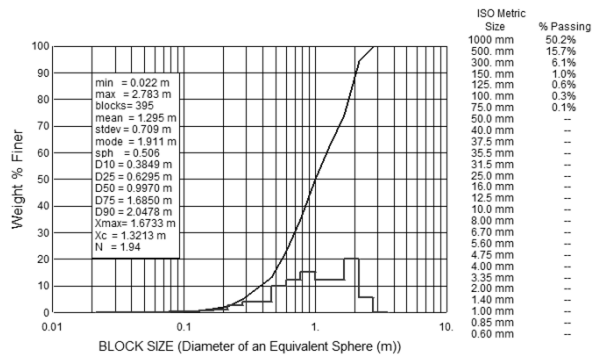


ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	48.5%
500 mm	20.0%
300 mm	7.4%
150 mm	1.4%
125 mm	0.9%
100 mm	0.5%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	--
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--

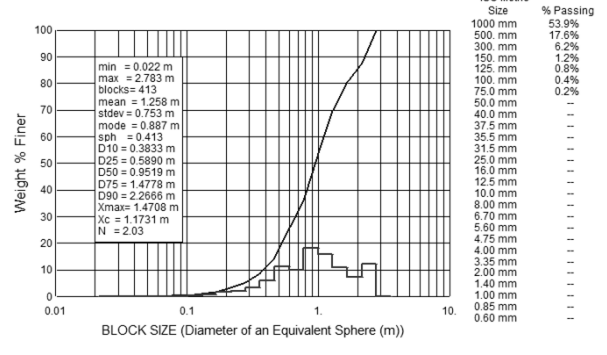
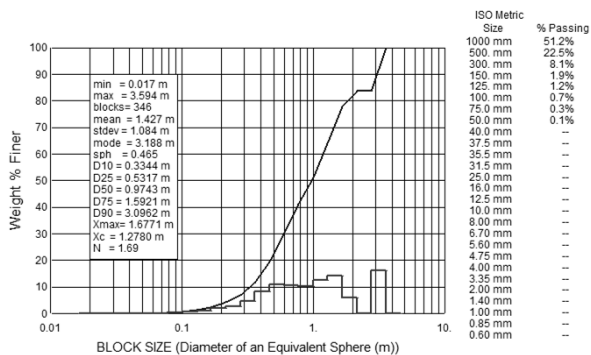
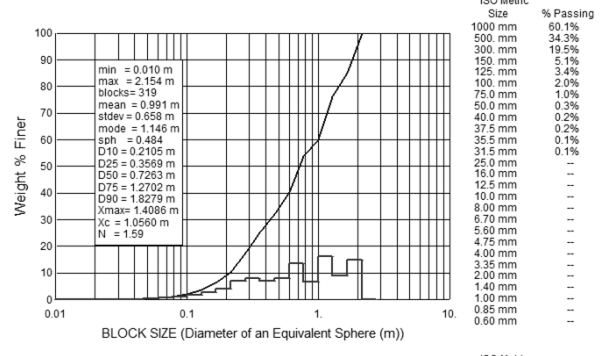
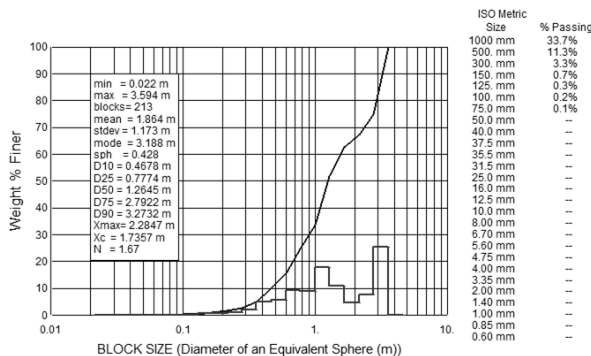
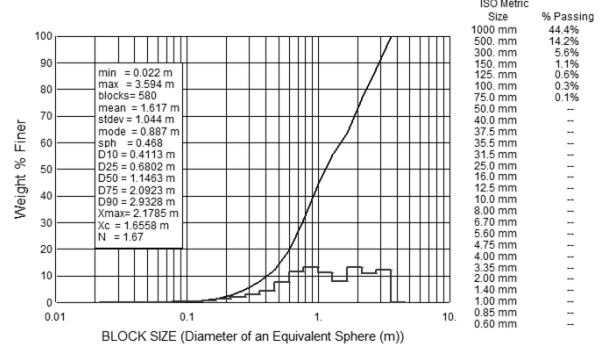
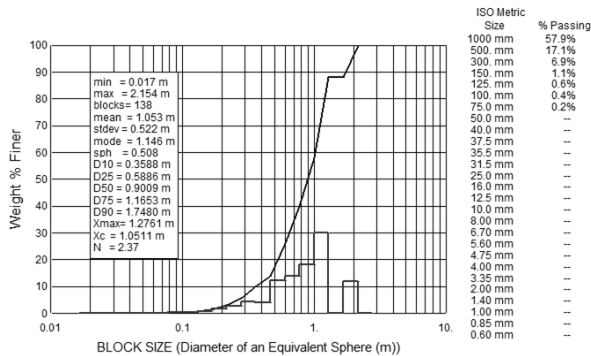
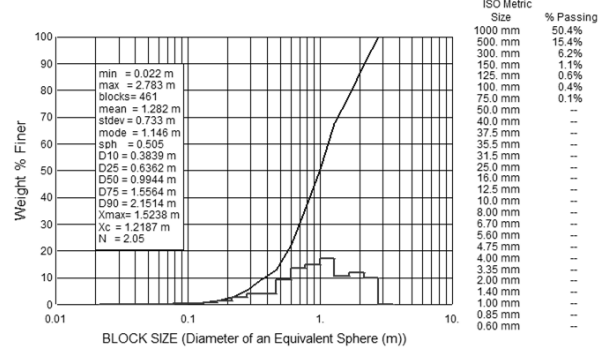
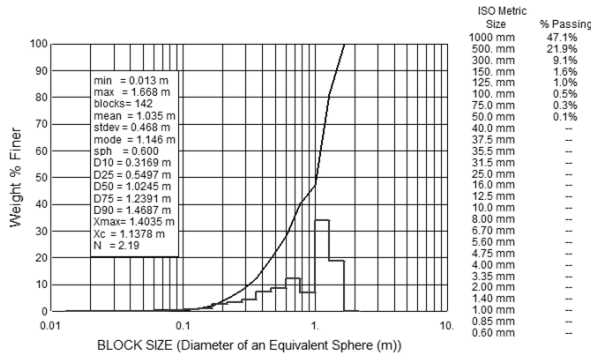
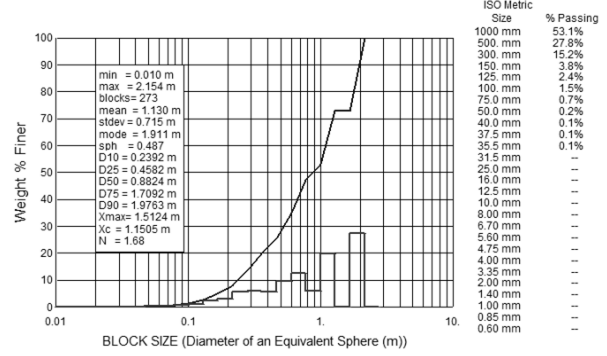
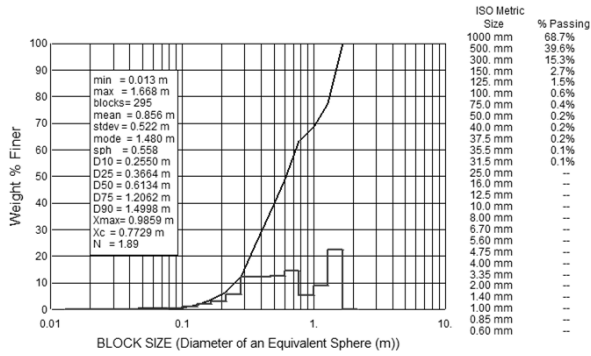


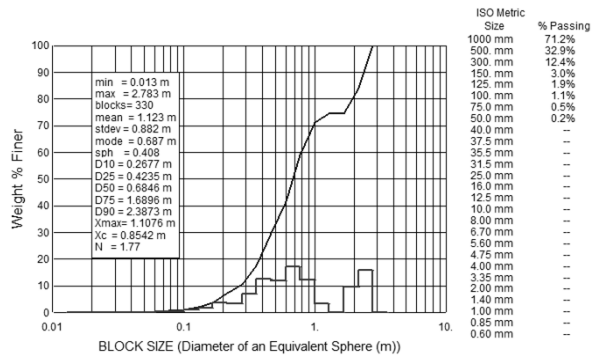
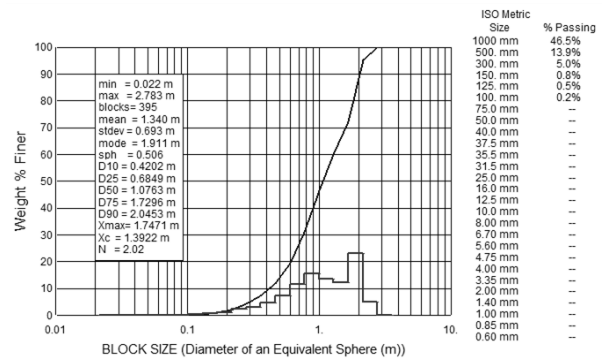
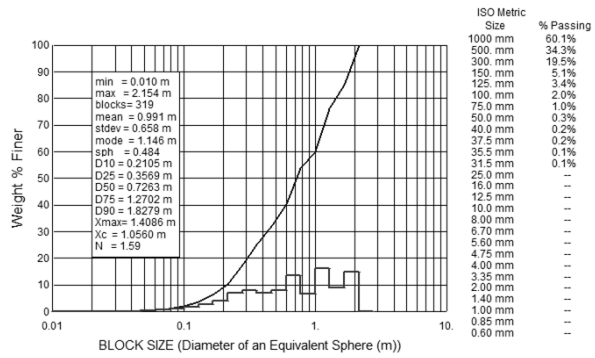
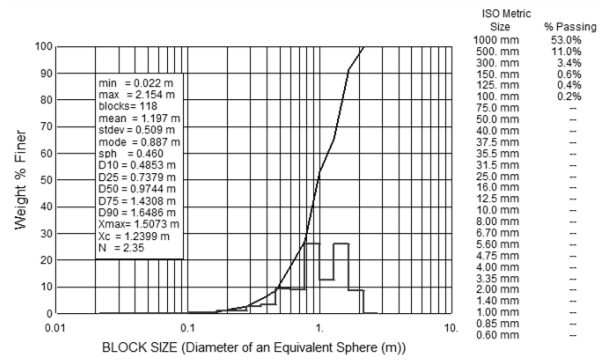
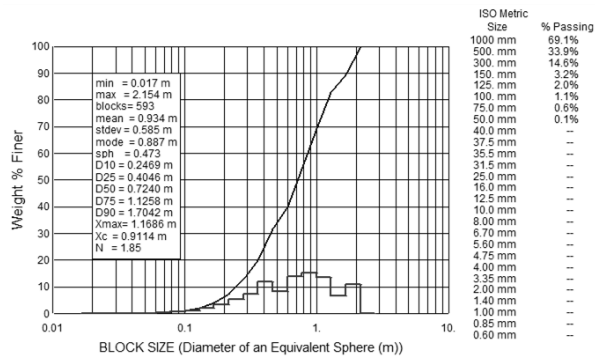
METΩΠΟ #9



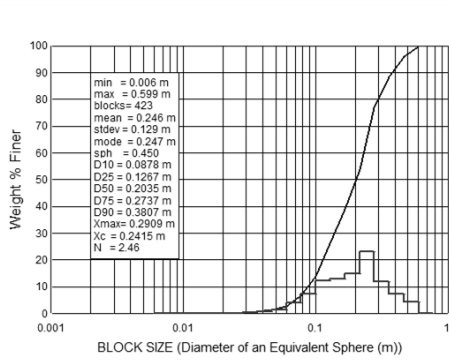


ΜΕΤΩΠΟ #10

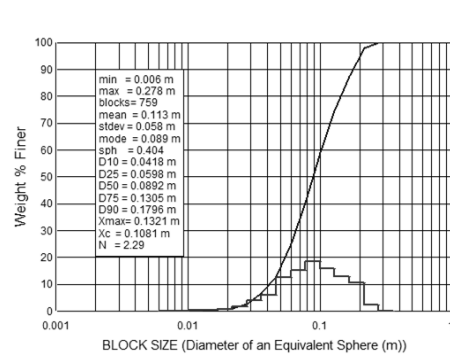




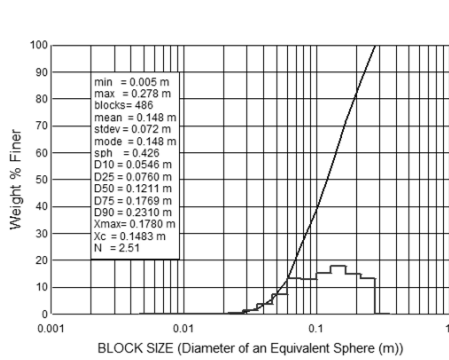
ANATINAÆH #1



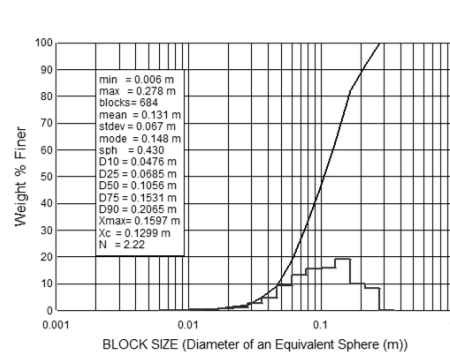
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	97.0%
300 mm	78.8%
150 mm	33.1%
125 mm	24.3%
100 mm	13.8%
75.0 mm	6.2%
50.0 mm	1.7%
40.0 mm	0.8%
37.5 mm	0.5%
35.5 mm	0.5%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



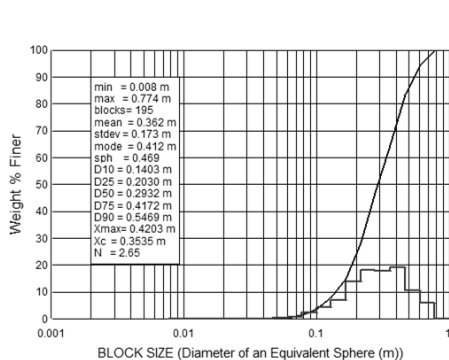
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	—
300 mm	100.0%
150 mm	81.6%
125 mm	72.3%
100 mm	58.9%
75.0 mm	38.2%
50.0 mm	16.0%
40.0 mm	9.0%
37.5 mm	7.5%
35.5 mm	6.4%
31.5 mm	4.5%
25.0 mm	2.1%
16.0 mm	0.5%
12.5 mm	0.3%
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



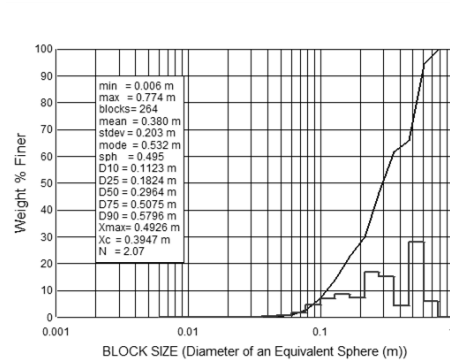
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	—
300 mm	100.0%
150 mm	64.0%
125 mm	52.0%
100 mm	39.1%
75.0 mm	24.3%
50.0 mm	7.5%
40.0 mm	3.4%
37.5 mm	2.5%
35.5 mm	1.9%
31.5 mm	1.3%
25.0 mm	0.5%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



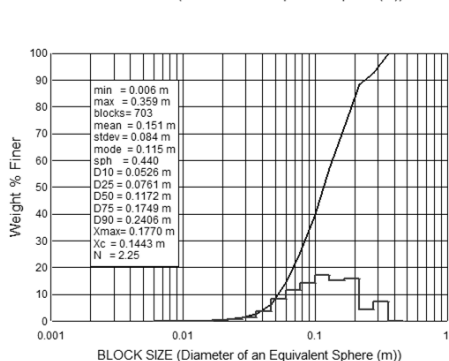
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	—
300 mm	100.0%
150 mm	73.4%
125 mm	60.6%
100 mm	47.0%
75.0 mm	29.8%
50.0 mm	11.7%
40.0 mm	6.5%
37.5 mm	5.4%
35.5 mm	4.6%
31.5 mm	3.3%
25.0 mm	1.7%
16.0 mm	0.6%
12.5 mm	0.2%
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



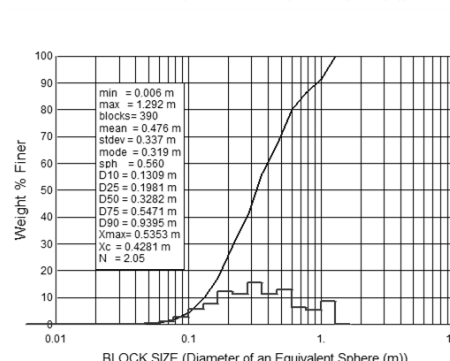
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	86.3%
300 mm	51.5%
150 mm	11.8%
125 mm	7.4%
100 mm	3.7%
75.0 mm	1.2%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



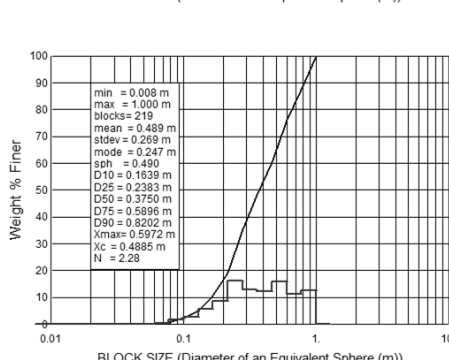
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	73.4%
300 mm	50.7%
150 mm	18.8%
125 mm	13.0%
100 mm	7.1%
75.0 mm	2.3%
50.0 mm	0.6%
40.0 mm	0.3%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



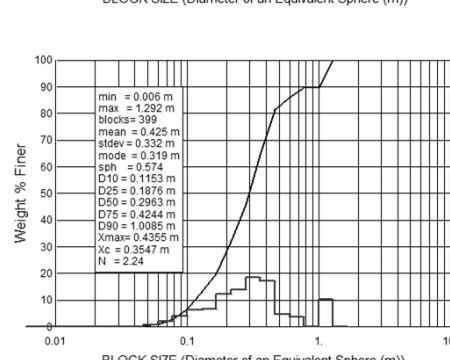
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	94.6%
300 mm	65.5%
150 mm	54.6%
100 mm	38.9%
75.0 mm	24.3%
50.0 mm	8.4%
40.0 mm	4.1%
37.5 mm	2.2%
35.5 mm	2.6%
31.5 mm	1.9%
25.0 mm	0.9%
16.0 mm	0.3%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



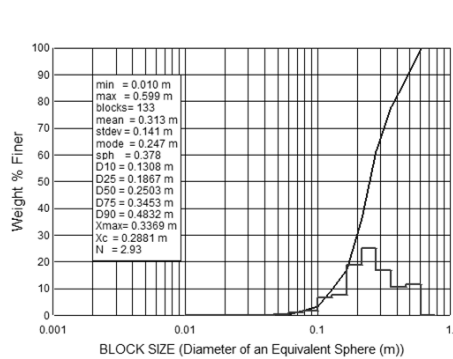
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	91.4%
500 mm	70.5%
300 mm	44.7%
150 mm	13.8%
125 mm	8.9%
100 mm	4.1%
75.0 mm	1.4%
50.0 mm	0.3%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



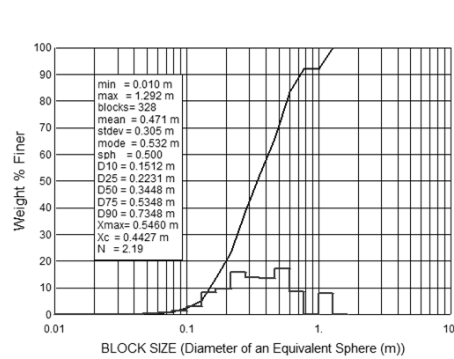
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	64.5%
300 mm	38.7%
150 mm	7.9%
125 mm	4.5%
100 mm	2.3%
75.0 mm	0.6%
50.0 mm	0.1%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



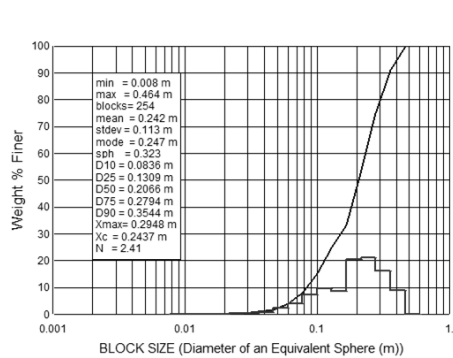
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	89.7%
500 mm	82.7%
300 mm	50.8%
150 mm	16.7%
125 mm	12.1%
100 mm	6.6%
75.0 mm	2.5%
50.0 mm	0.4%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



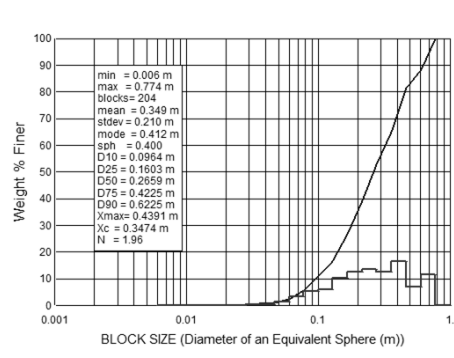
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	91.4%
300 mm	65.7%
150 mm	13.9%
125 mm	8.7%
100 mm	3.2%
75.0 mm	1.4%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



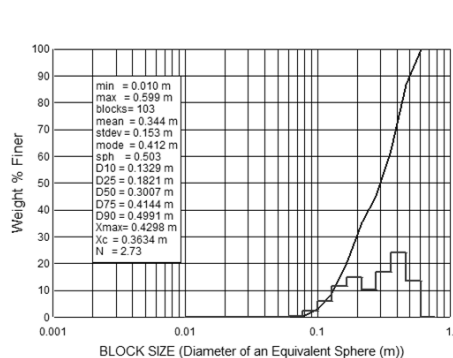
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	92.0%
500 mm	70.5%
300 mm	42.4%
150 mm	8.7%
125 mm	4.7%
100 mm	2.2%
75.0 mm	0.8%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	--
500 mm	100.0%
300 mm	79.1%
150 mm	29.4%
125 mm	23.2%
100 mm	15.2%
75.0 mm	7.5%
50.0 mm	2.3%
40.0 mm	1.2%
37.5 mm	1.0%
35.5 mm	0.9%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--

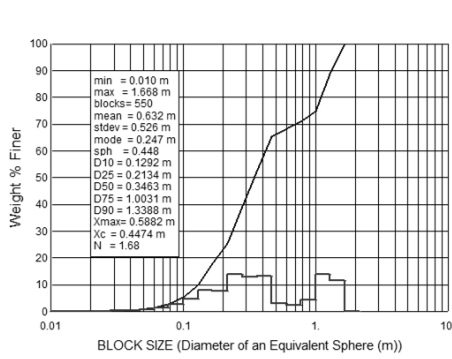


ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	83.4%
300 mm	55.9%
150 mm	22.2%
125 mm	15.8%
100 mm	10.8%
75.0 mm	5.2%
50.0 mm	1.5%
40.0 mm	0.8%
37.5 mm	0.7%
35.5 mm	0.6%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--

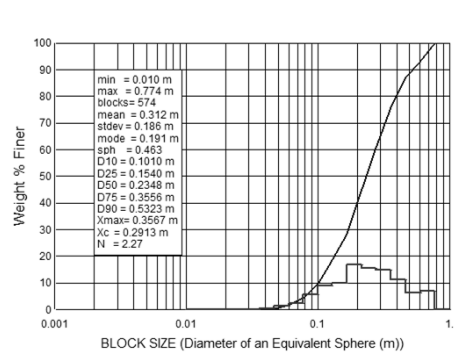


ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	90.1%
300 mm	49.9%
125 mm	8.0%
100 mm	2.9%
75.0 mm	0.4%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	--
37.5 mm	--
35.5 mm	--
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--

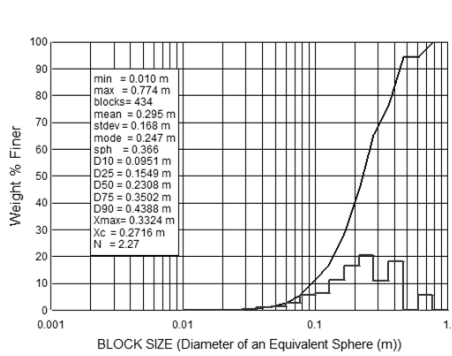
ANATINAÆH #2



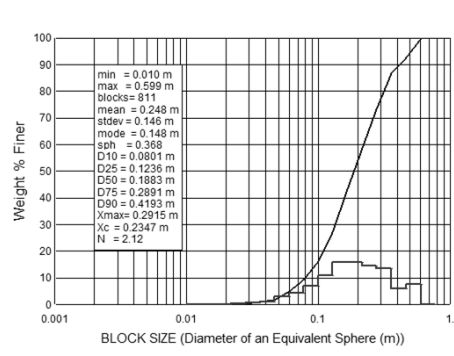
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	74.9%
500 mm	66.1%
300 mm	42.7%
150 mm	14.4%
125 mm	9.3%
100 mm	5.4%
75.0 mm	2.5%
50.0 mm	0.8%
40.0 mm	0.4%
37.5 mm	0.3%
35.5 mm	0.3%
31.5 mm	0.2%
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



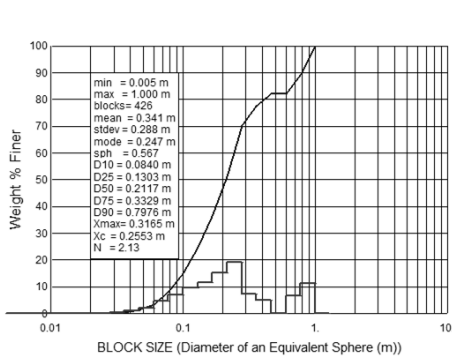
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	88.5%
300 mm	64.8%
150 mm	24.0%
125 mm	17.3%
100 mm	9.7%
75.0 mm	3.9%
50.0 mm	0.8%
40.0 mm	0.3%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.2%
31.5 mm	0.1%
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



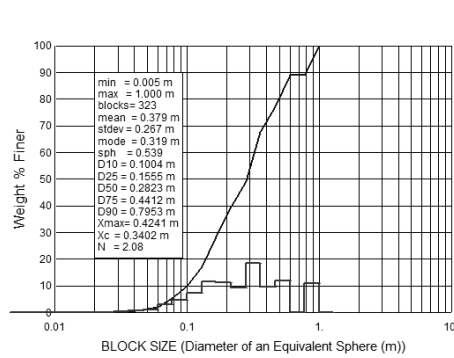
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	94.4%
300 mm	68.3%
150 mm	23.5%
125 mm	16.5%
100 mm	11.2%
75.0 mm	5.1%
50.0 mm	1.8%
40.0 mm	1.0%
37.5 mm	0.8%
35.5 mm	0.6%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



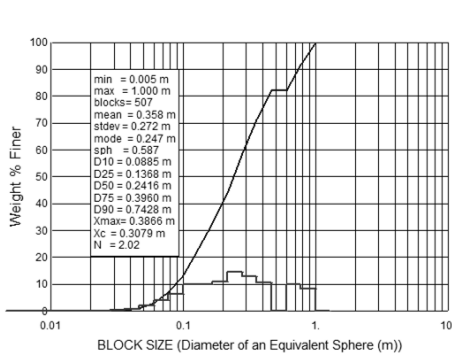
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	94.5%
300 mm	78.8%
150 mm	35.9%
125 mm	25.5%
100 mm	16.0%
75.0 mm	8.6%
50.0 mm	2.6%
40.0 mm	1.3%
37.5 mm	1.0%
35.5 mm	0.9%
31.5 mm	0.8%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



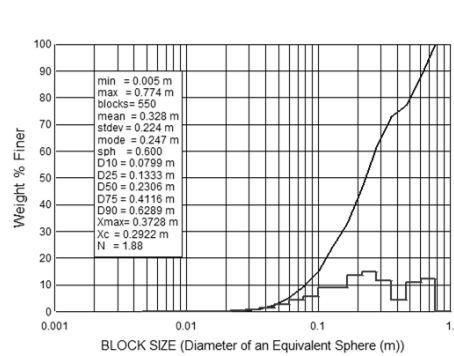
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	82.2%
300 mm	72.1%
150 mm	31.0%
125 mm	23.3%
100 mm	15.0%
75.0 mm	7.3%
50.0 mm	2.0%
40.0 mm	0.8%
37.5 mm	0.6%
35.5 mm	0.5%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



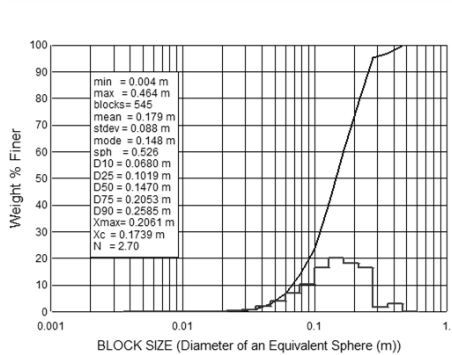
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	80.2%
300 mm	54.0%
150 mm	23.4%
125 mm	16.0%
100 mm	9.9%
75.0 mm	4.7%
50.0 mm	1.3%
40.0 mm	0.6%
37.5 mm	0.5%
35.5 mm	0.4%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



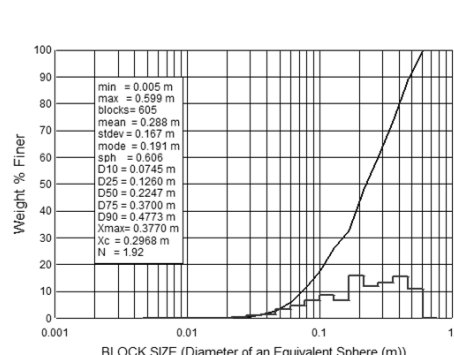
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	81.9%
300 mm	62.0%
150 mm	28.4%
125 mm	21.6%
100 mm	13.1%
75.0 mm	6.5%
50.0 mm	1.5%
40.0 mm	0.6%
37.5 mm	0.4%
35.5 mm	0.3%
31.5 mm	0.2%
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



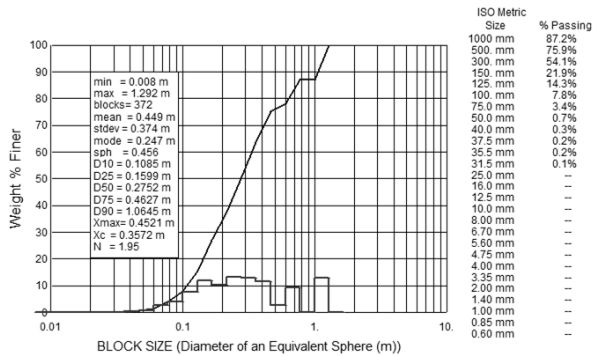
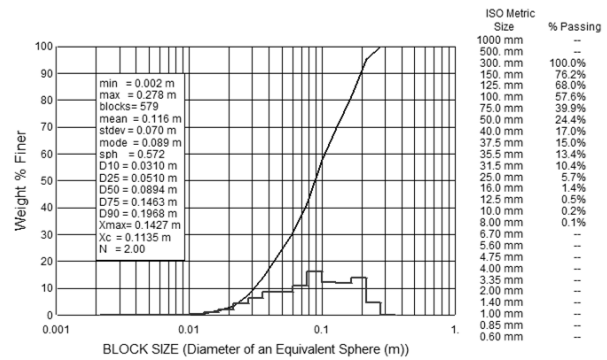
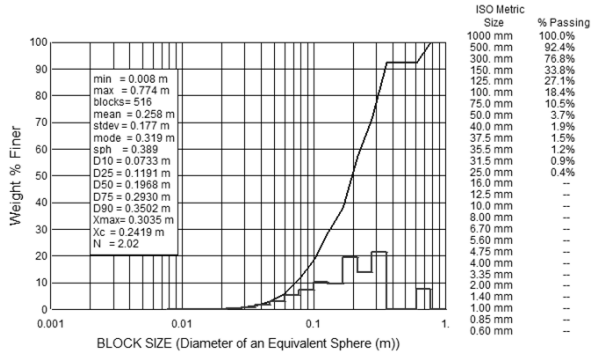
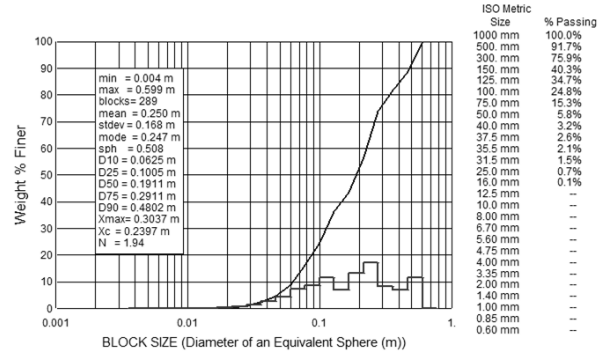
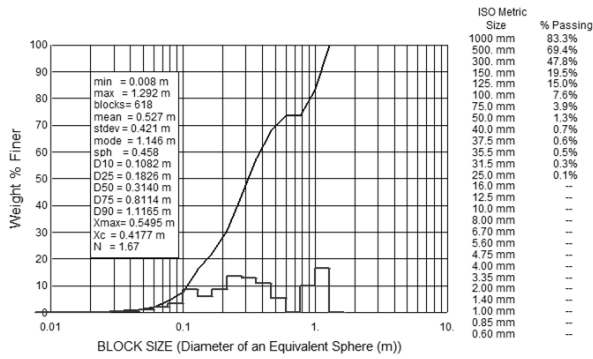
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	80.0%
300 mm	64.3%
150 mm	28.0%
125 mm	22.7%
100 mm	15.0%
75.0 mm	8.8%
50.0 mm	3.1%
40.0 mm	1.5%
37.5 mm	1.1%
35.5 mm	0.9%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



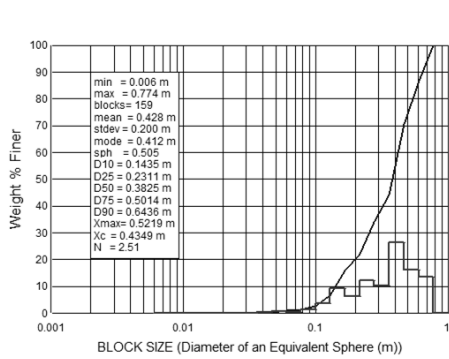
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	--
500 mm	100.0%
300 mm	95.6%
150 mm	51.6%
125 mm	38.2%
100 mm	23.9%
75.0 mm	12.8%
50.0 mm	3.9%
40.0 mm	1.6%
37.5 mm	1.2%
35.5 mm	0.8%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



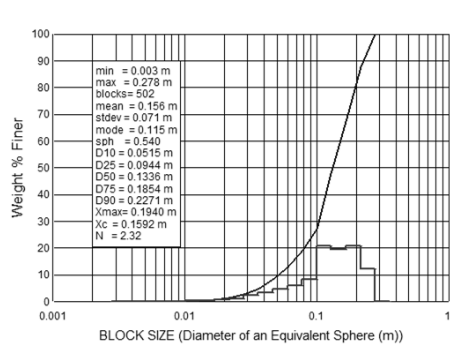
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	91.9%
300 mm	63.7%
150 mm	29.6%
125 mm	24.7%
100 mm	17.4%
75.0 mm	10.1%
50.0 mm	3.6%
40.0 mm	1.9%
37.5 mm	1.6%
35.5 mm	1.3%
31.5 mm	0.8%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



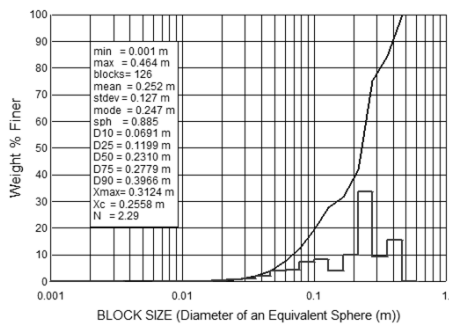
ANATINAÆH #3



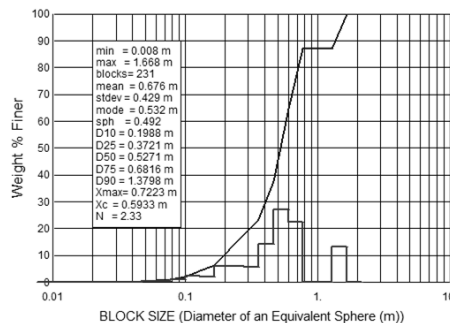
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	74.8%
300 mm	36.8%
150 mm	11.9%
125 mm	5.9%
100 mm	2.7%
75.0 mm	1.2%
50.0 mm	0.5%
40.0 mm	0.2%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



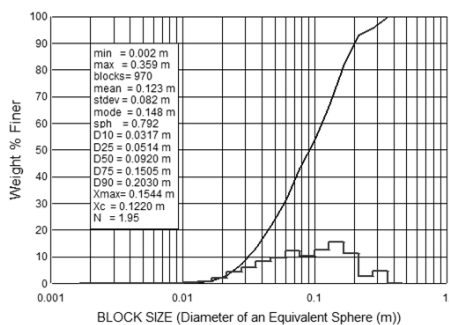
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	100.0%
300 mm	58.4%
150 mm	44.7%
125 mm	27.1%
100 mm	18.0%
75.0 mm	9.5%
50.0 mm	6.1%
37.5 mm	5.3%
35.5 mm	4.6%
31.5 mm	3.5%
25.0 mm	2.0%
16.0 mm	0.5%
12.5 mm	0.2%
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



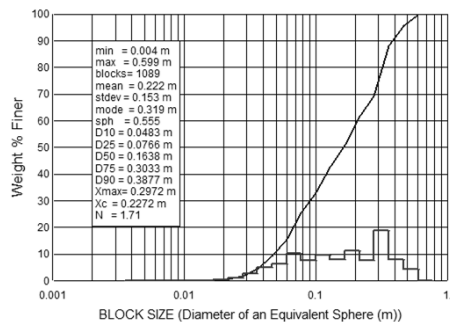
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	100.0%
300 mm	77.7%
150 mm	29.8%
125 mm	26.5%
100 mm	19.3%
75.0 mm	11.5%
50.0 mm	4.9%
40.0 mm	2.7%
37.5 mm	2.3%
35.5 mm	1.9%
31.5 mm	1.5%
25.0 mm	0.8%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



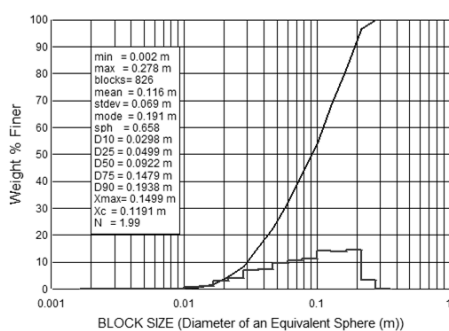
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	86.9%
500 mm	44.6%
300 mm	19.3%
150 mm	6.3%
125 mm	3.9%
100 mm	2.0%
75.0 mm	0.9%
50.0 mm	0.3%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



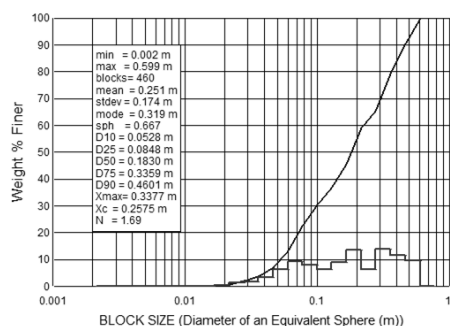
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	96.7%
300 mm	74.8%
150 mm	64.5%
125 mm	53.7%
100 mm	41.6%
75.0 mm	24.0%
50.0 mm	16.3%
40.0 mm	14.3%
37.5 mm	12.7%
35.5 mm	9.8%
31.5 mm	5.4%
25.0 mm	1.0%
16.0 mm	0.3%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



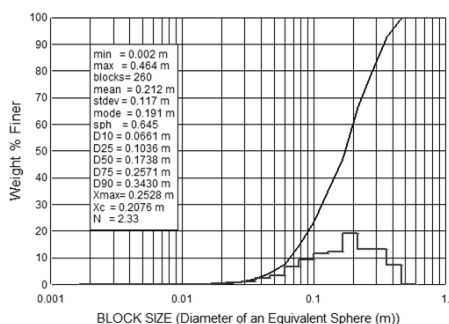
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	96.8%
300 mm	74.3%
150 mm	47.0%
125 mm	41.2%
100 mm	33.0%
75.0 mm	24.1%
50.0 mm	10.8%
40.0 mm	6.1%
37.5 mm	4.9%
35.5 mm	4.1%
31.5 mm	2.8%
25.0 mm	1.3%
16.0 mm	0.2%
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



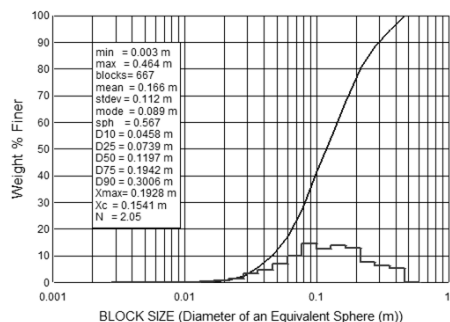
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	100.0%
300 mm	75.8%
150 mm	66.1%
125 mm	53.9%
100 mm	41.2%
75.0 mm	25.1%
50.0 mm	18.1%
40.0 mm	16.3%
37.5 mm	14.8%
35.5 mm	11.4%
31.5 mm	6.6%
25.0 mm	1.4%
16.0 mm	0.6%
12.5 mm	0.2%
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



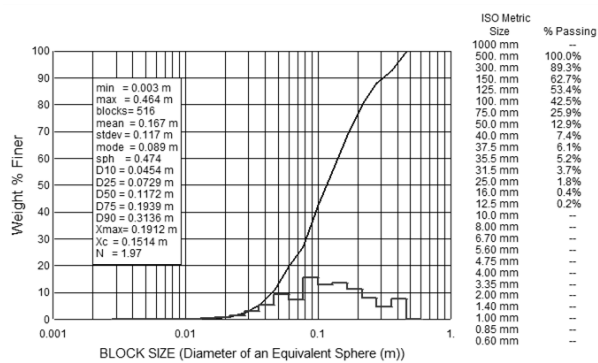
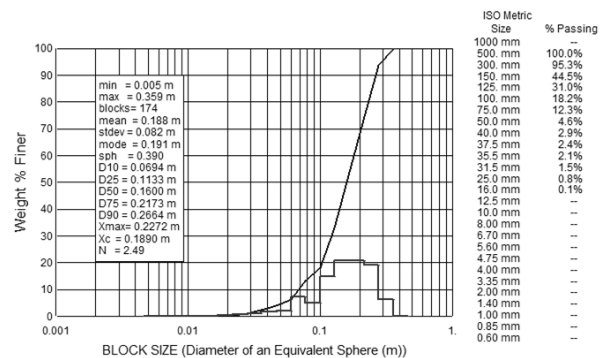
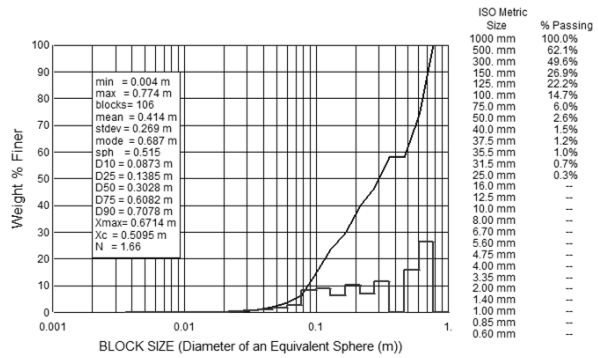
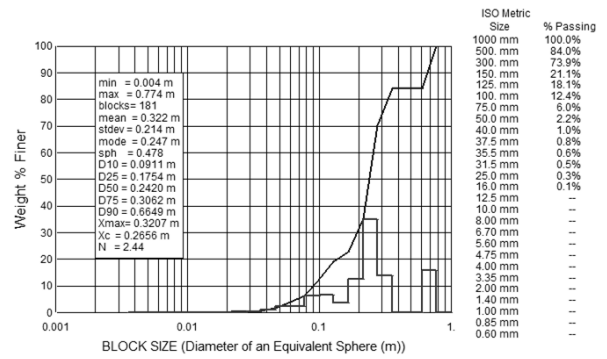
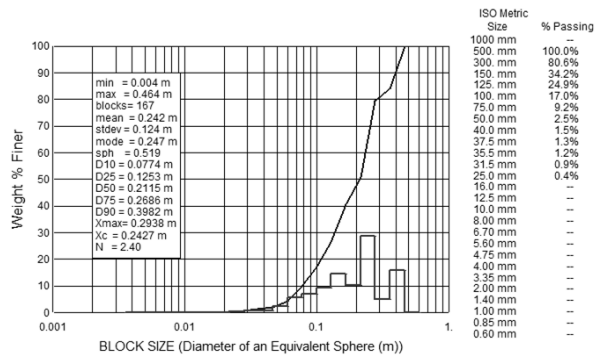
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	93.0%
300 mm	68.9%
150 mm	41.5%
125 mm	35.7%
100 mm	30.4%
75.0 mm	21.1%
50.0 mm	8.7%
40.0 mm	4.9%
37.5 mm	4.1%
35.5 mm	3.5%
31.5 mm	2.8%
25.0 mm	1.3%
16.0 mm	0.2%
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



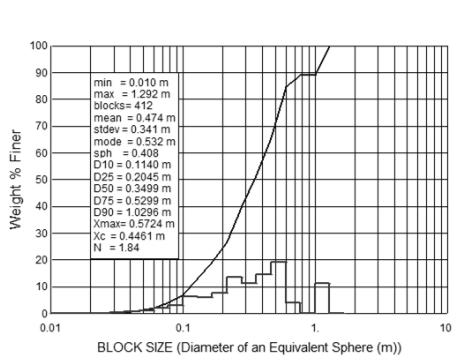
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	100.0%
300 mm	83.0%
150 mm	41.8%
125 mm	33.3%
100 mm	23.8%
75.0 mm	13.4%
50.0 mm	5.1%
40.0 mm	2.9%
37.5 mm	2.3%
35.5 mm	2.0%
31.5 mm	1.5%
25.0 mm	0.7%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



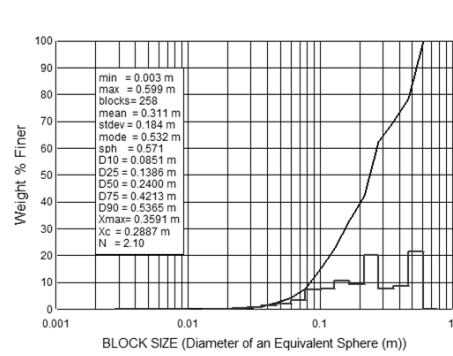
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	90.0%
300 mm	61.7%
150 mm	52.3%
125 mm	41.6%
100 mm	25.0%
75.0 mm	12.1%
50.0 mm	7.4%
40.0 mm	6.3%
37.5 mm	5.4%
35.5 mm	3.8%
31.5 mm	1.7%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



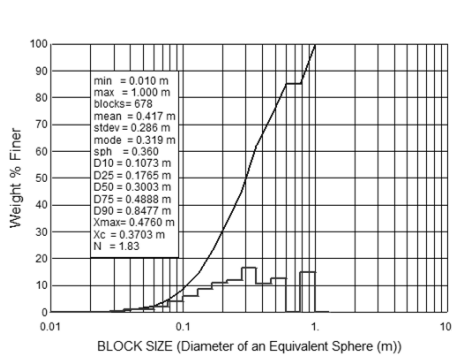
ANATINAEH #4



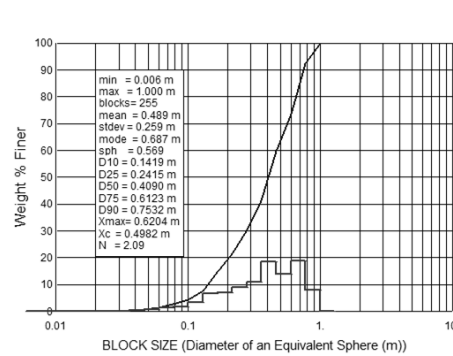
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	88.9%
500 mm	70.8%
300 mm	43.1%
150 mm	16.6%
125 mm	12.4%
100 mm	7.0%
75.0 mm	3.7%
50.0 mm	1.2%
40.0 mm	0.6%
37.5 mm	0.4%
35.5 mm	0.3%
31.5 mm	0.2%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



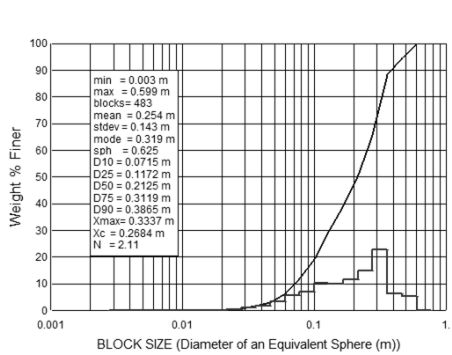
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	84.2%
150 mm	28.2%
125 mm	21.3%
100 mm	14.7%
75.0 mm	7.1%
50.0 mm	2.9%
40.0 mm	1.5%
37.5 mm	1.2%
35.5 mm	1.0%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



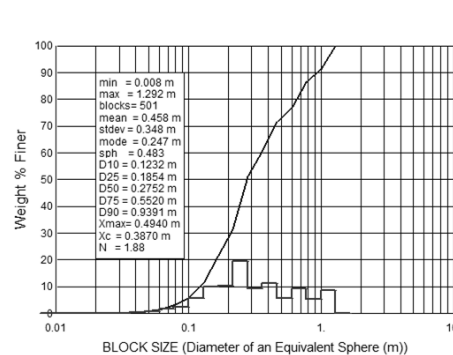
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	76.0%
300 mm	49.8%
150 mm	19.0%
125 mm	13.5%
100 mm	8.6%
75.0 mm	4.3%
50.0 mm	1.7%
40.0 mm	1.0%
37.5 mm	0.7%
35.5 mm	0.6%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



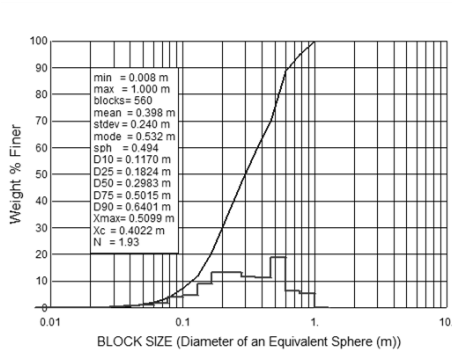
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	53.4%
300 mm	33.2%
150 mm	11.4%
125 mm	7.2%
100 mm	4.4%
75.0 mm	2.4%
50.0 mm	0.7%
40.0 mm	0.3%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.2%
31.5 mm	0.1%
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



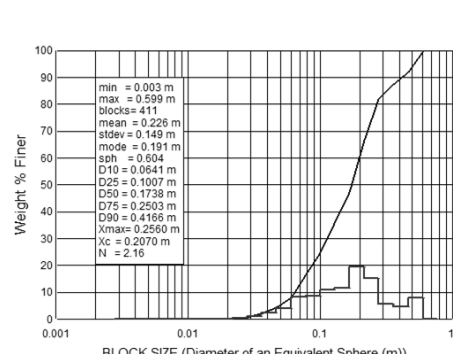
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	96.1%
300 mm	71.7%
150 mm	34.7%
125 mm	27.8%
100 mm	18.9%
75.0 mm	11.1%
50.0 mm	4.0%
40.0 mm	2.2%
37.5 mm	1.9%
35.5 mm	1.6%
31.5 mm	1.0%
25.0 mm	0.4%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



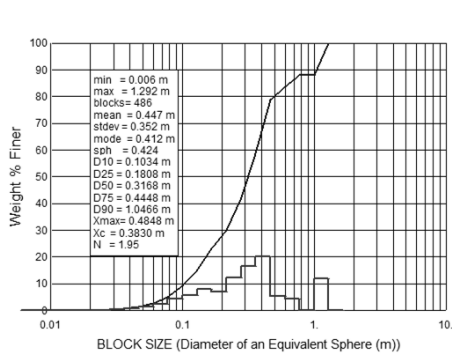
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	91.4%
500 mm	72.9%
300 mm	53.4%
150 mm	10.3%
125 mm	10.3%
100 mm	5.5%
75.0 mm	2.8%
50.0 mm	0.8%
40.0 mm	0.4%
37.5 mm	0.3%
35.5 mm	0.2%
31.5 mm	0.2%
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



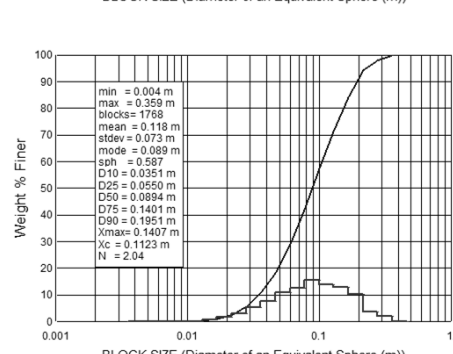
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	74.8%
300 mm	50.2%
150 mm	16.8%
125 mm	11.2%
100 mm	7.4%
75.0 mm	3.3%
50.0 mm	1.2%
40.0 mm	0.6%
37.5 mm	0.4%
35.5 mm	0.4%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



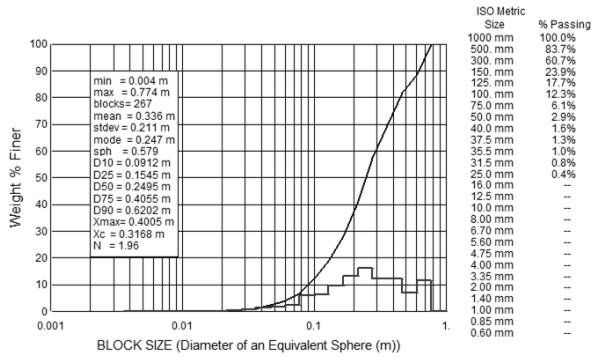
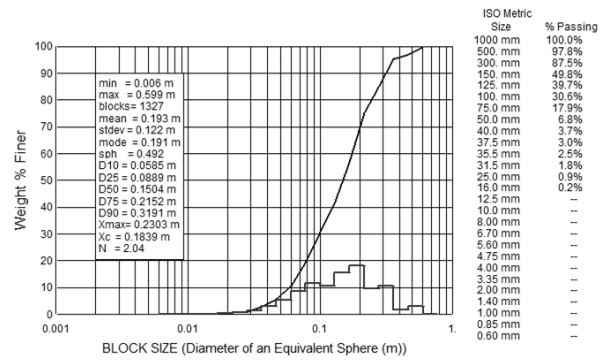
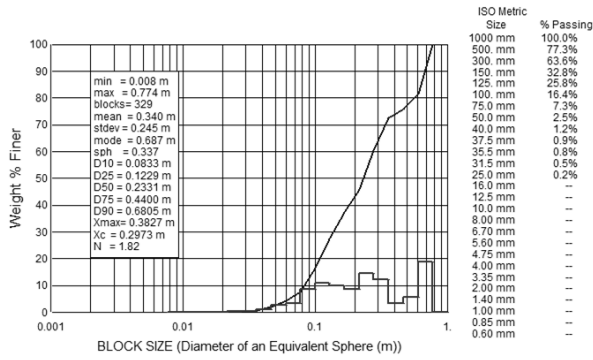
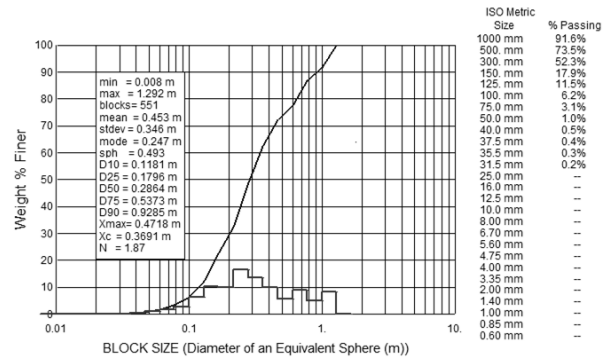
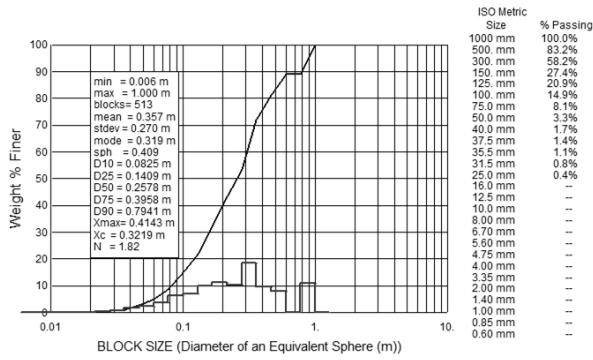
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	94.2%
300 mm	83.3%
150 mm	42.1%
125 mm	34.1%
100 mm	24.7%
75.0 mm	15.1%
50.0 mm	5.2%
40.0 mm	2.7%
37.5 mm	1.8%
35.5 mm	1.2%
31.5 mm	0.5%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



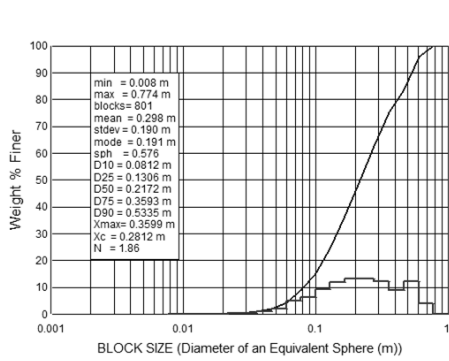
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	88.1%
500 mm	80.0%
300 mm	46.6%
150 mm	19.5%
125 mm	14.2%
100 mm	9.3%
75.0 mm	4.7%
50.0 mm	1.6%
40.0 mm	0.8%
37.5 mm	0.6%
35.5 mm	0.5%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



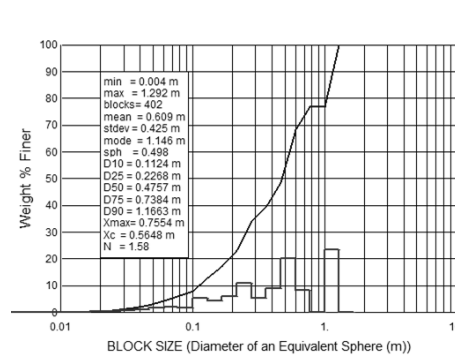
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	98.5%
300 mm	78.3%
150 mm	68.3%
125 mm	57.3%
100 mm	39.9%
75.0 mm	20.9%
50.0 mm	13.4%
40.0 mm	11.7%
37.5 mm	10.3%
35.5 mm	7.8%
31.5 mm	4.1%
25.0 mm	0.8%
16.0 mm	0.3%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



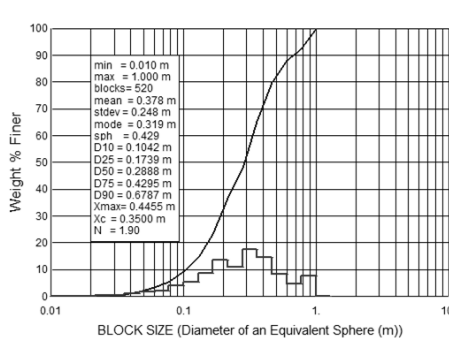
ANATINAÆH #5



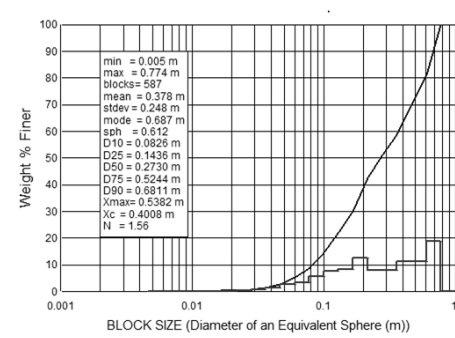
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	87.0%
300 mm	66.0%
150 mm	31.1%
125 mm	23.2%
100 mm	15.2%
75.0 mm	8.3%
50.0 mm	2.9%
40.0 mm	1.3%
37.5 mm	1.0%
35.5 mm	0.9%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



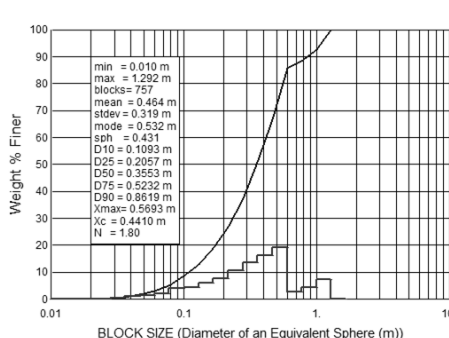
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	76.7%
500 mm	53.6%
300 mm	35.3%
150 mm	15.3%
125 mm	12.2%
100 mm	7.8%
75.0 mm	5.8%
50.0 mm	3.0%
40.0 mm	2.0%
37.5 mm	1.7%
35.5 mm	1.5%
31.5 mm	1.2%
25.0 mm	0.7%
16.0 mm	0.3%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



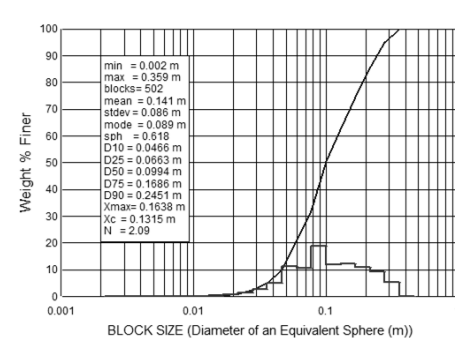
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	82.0%
300 mm	52.4%
150 mm	19.2%
125 mm	13.7%
100 mm	9.3%
75.0 mm	5.0%
50.0 mm	2.2%
40.0 mm	1.2%
37.5 mm	1.0%
35.5 mm	0.8%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



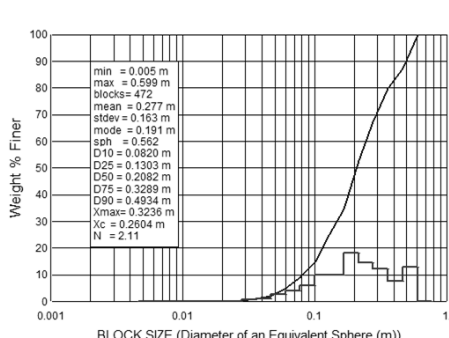
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	73.0%
300 mm	52.8%
150 mm	26.4%
125 mm	20.8%
100 mm	14.4%
75.0 mm	8.2%
50.0 mm	3.3%
40.0 mm	1.9%
37.5 mm	1.6%
35.5 mm	1.3%
31.5 mm	0.9%
25.0 mm	0.4%
16.0 mm	0.2%
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



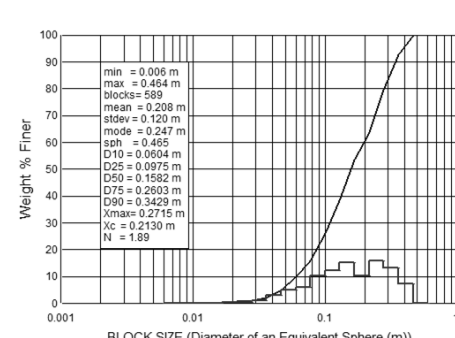
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	92.7%
500 mm	71.8%
300 mm	40.7%
150 mm	16.2%
125 mm	12.2%
100 mm	8.7%
75.0 mm	4.6%
50.0 mm	1.9%
40.0 mm	1.0%
37.5 mm	0.8%
35.5 mm	0.7%
31.5 mm	0.5%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



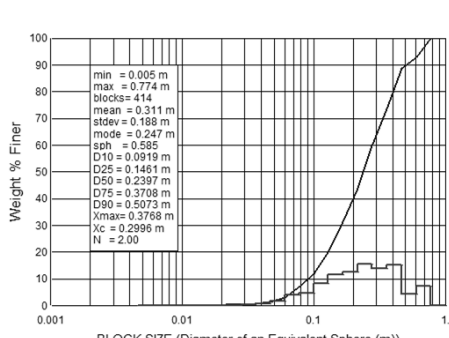
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	96.2%
300 mm	69.2%
150 mm	46.7%
125 mm	39.7%
100 mm	50.5%
75.0 mm	30.4%
50.0 mm	12.9%
40.0 mm	6.9%
37.5 mm	5.8%
35.5 mm	4.9%
31.5 mm	3.6%
25.0 mm	1.7%
16.0 mm	0.4%
12.5 mm	0.2%
10.0 mm	0.2%
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



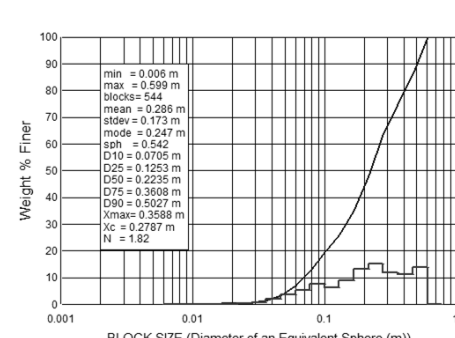
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	90.6%
300 mm	70.6%
150 mm	30.2%
125 mm	23.3%
100 mm	14.6%
75.0 mm	8.3%
50.0 mm	2.7%
40.0 mm	1.3%
37.5 mm	1.0%
35.5 mm	0.8%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



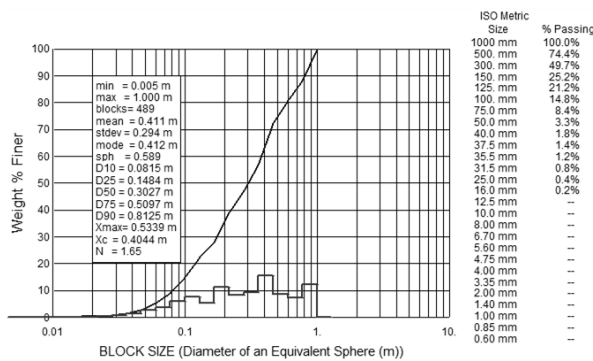
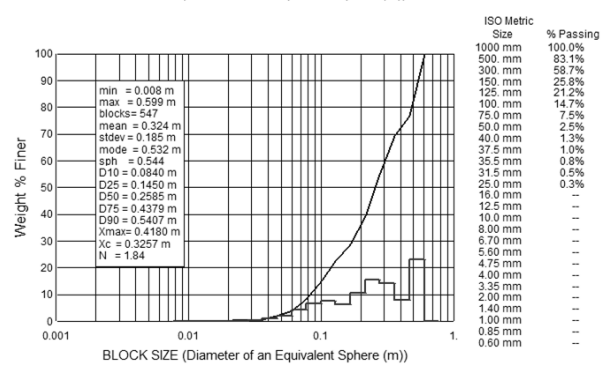
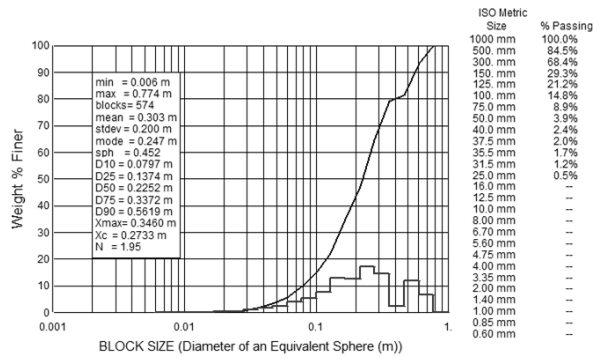
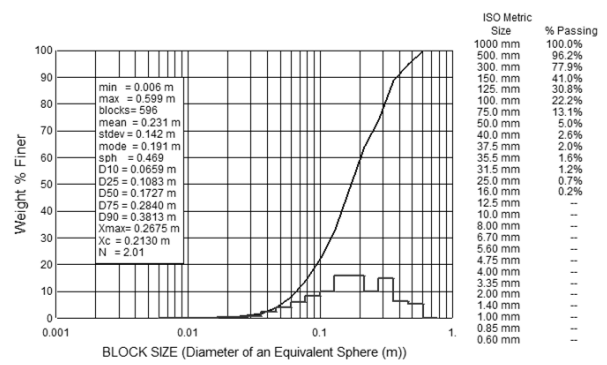
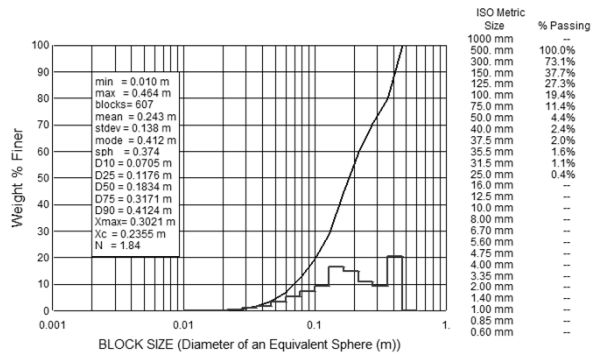
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	83.0%
150 mm	46.7%
125 mm	36.6%
100 mm	26.1%
75.0 mm	14.9%
50.0 mm	6.3%
40.0 mm	3.2%
37.5 mm	2.5%
35.5 mm	2.0%
31.5 mm	1.5%
25.0 mm	0.8%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



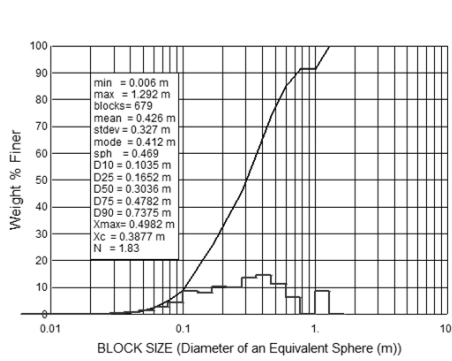
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	89.8%
300 mm	63.3%
150 mm	26.2%
125 mm	18.7%
100 mm	11.7%
75.0 mm	6.4%
50.0 mm	1.9%
40.0 mm	0.9%
37.5 mm	0.8%
35.5 mm	0.6%
31.5 mm	0.5%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



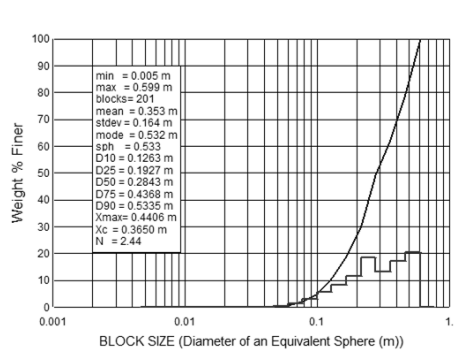
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	89.7%
300 mm	66.3%
150 mm	30.8%
125 mm	24.9%
100 mm	19.5%
75.0 mm	11.3%
50.0 mm	4.2%
40.0 mm	2.1%
37.5 mm	1.7%
35.5 mm	1.4%
31.5 mm	1.0%
25.0 mm	0.5%
16.0 mm	0.2%
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



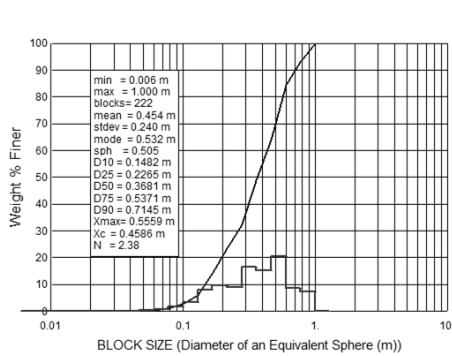
ANATINAÆH #6



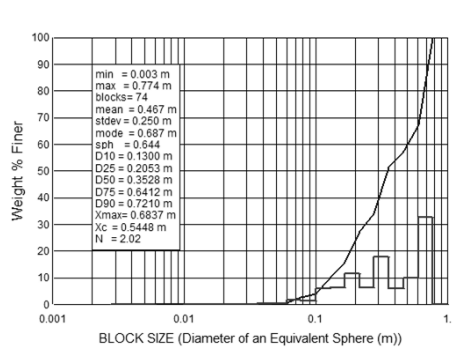
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	91.3%
500 mm	76.8%
300 mm	49.4%
150 mm	21.8%
125 mm	16.3%
100 mm	9.0%
75.0 mm	4.5%
50.0 mm	1.4%
40.0 mm	0.7%
35.5 mm	0.6%
37.5 mm	0.6%
35.0 mm	0.5%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



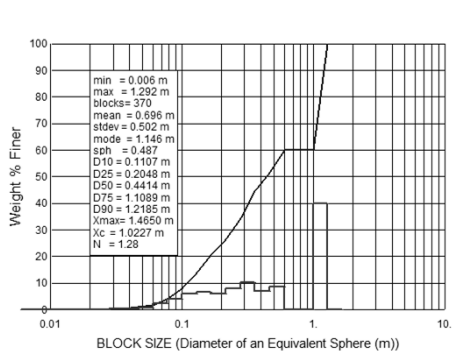
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	100.0%
150 mm	15.1%
125 mm	9.8%
100 mm	5.0%
75.0 mm	1.9%
50.0 mm	0.4%
40.0 mm	0.2%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



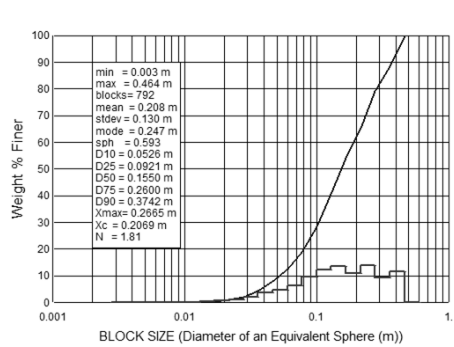
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	69.4%
300 mm	36.7%
150 mm	10.4%
125 mm	5.5%
100 mm	2.9%
75.0 mm	0.9%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	—
37.5 mm	—
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



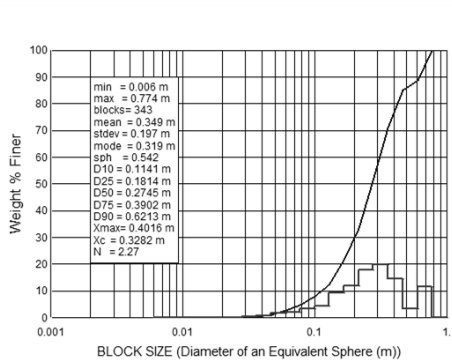
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	59.9%
300 mm	38.5%
150 mm	13.2%
125 mm	9.0%
100 mm	3.9%
75.0 mm	2.3%
50.0 mm	0.4%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



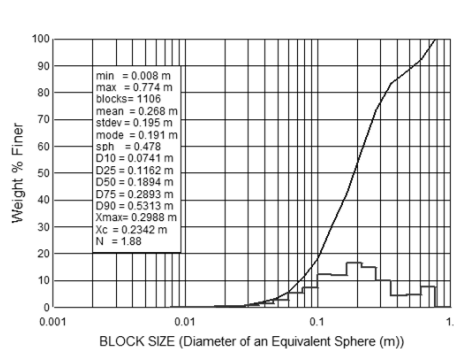
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	50.1%
500 mm	53.8%
300 mm	37.1%
150 mm	17.4%
125 mm	12.9%
100 mm	7.9%
75.0 mm	3.6%
50.0 mm	1.1%
40.0 mm	0.6%
37.5 mm	0.5%
35.5 mm	0.4%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



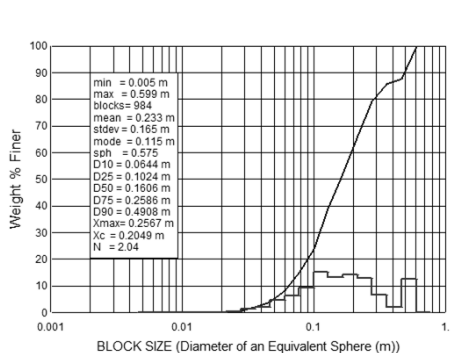
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	—
500 mm	100.0%
300 mm	81.5%
150 mm	48.2%
125 mm	38.9%
100 mm	28.4%
75.0 mm	17.8%
50.0 mm	9.1%
40.0 mm	5.6%
37.5 mm	4.7%
35.5 mm	4.1%
31.5 mm	3.0%
25.0 mm	1.8%
16.0 mm	0.4%
12.5 mm	0.2%
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



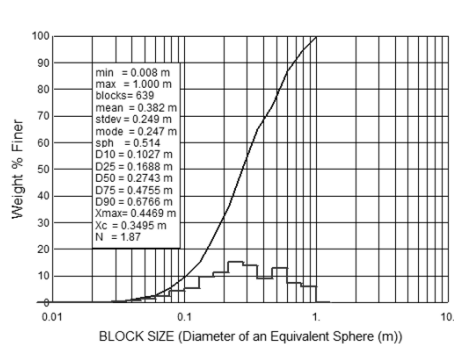
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	86.1%
300 mm	56.4%
150 mm	17.3%
125 mm	11.5%
100 mm	8.0%
75.0 mm	4.4%
50.0 mm	1.4%
40.0 mm	0.7%
37.5 mm	0.5%
35.5 mm	0.4%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



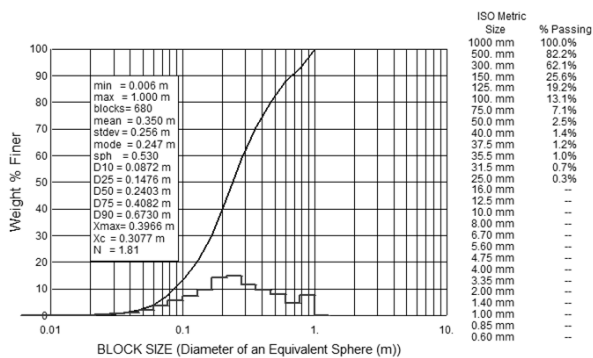
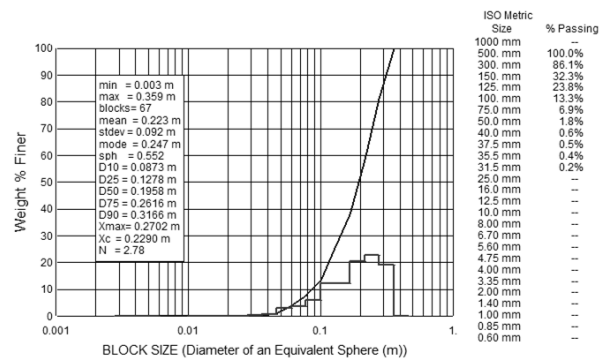
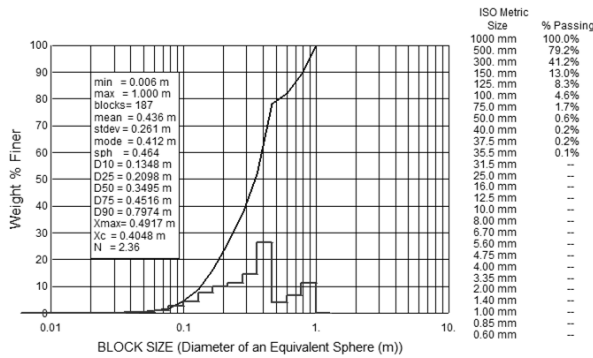
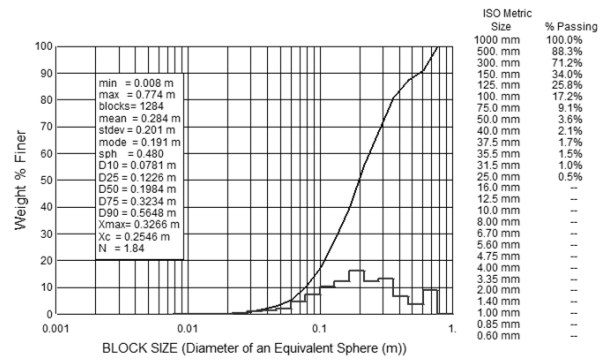
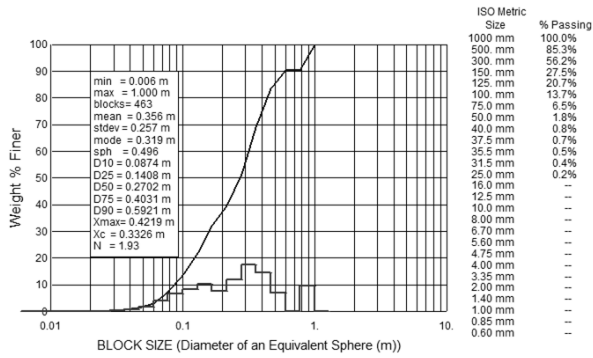
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	88.9%
300 mm	76.3%
150 mm	37.1%
125 mm	28.7%
100 mm	18.2%
75.0 mm	10.3%
50.0 mm	3.7%
40.0 mm	2.1%
37.5 mm	1.8%
35.5 mm	1.5%
31.5 mm	1.2%
25.0 mm	0.6%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



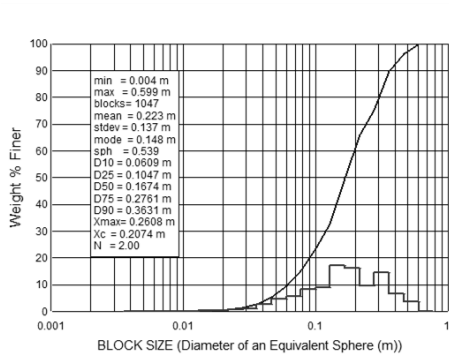
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	90.9%
300 mm	80.8%
150 mm	46.3%
125 mm	36.8%
100 mm	23.8%
75.0 mm	13.8%
50.0 mm	5.1%
40.0 mm	2.7%
37.5 mm	2.2%
35.5 mm	1.8%
31.5 mm	1.2%
25.0 mm	0.4%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



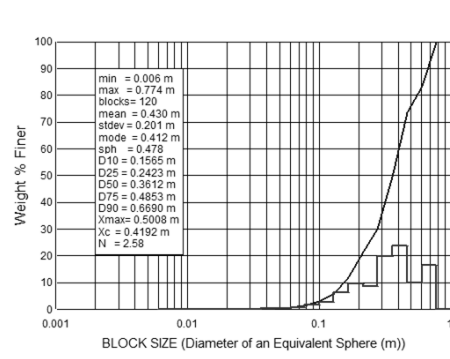
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	77.3%
300 mm	54.7%
150 mm	20.2%
125 mm	14.1%
100 mm	9.5%
75.0 mm	4.8%
50.0 mm	1.8%
40.0 mm	1.0%
37.5 mm	0.8%
35.5 mm	0.7%
31.5 mm	0.5%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



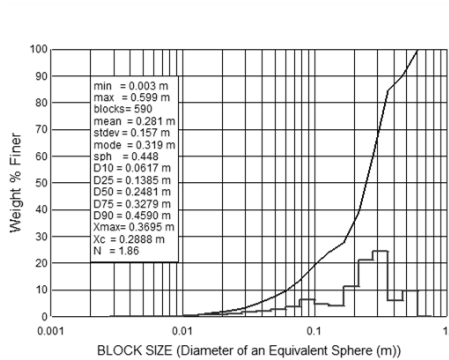
ANATINAÆH #7



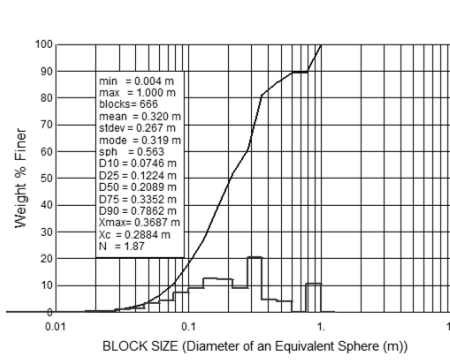
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	97.3%
300 mm	79.2%
150 mm	42.1%
125 mm	31.3%
100 mm	23.6%
75.0 mm	14.5%
50.0 mm	6.5%
40.0 mm	3.6%
37.5 mm	2.9%
35.5 mm	2.5%
31.5 mm	1.9%
25.0 mm	1.1%
16.0 mm	0.3%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



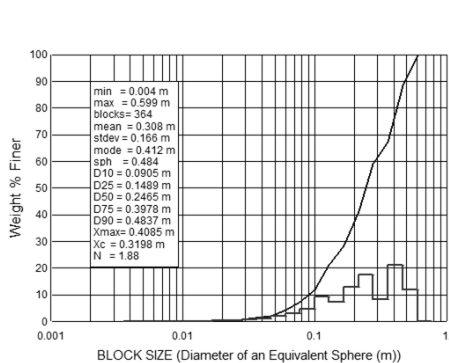
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	98.7%
300 mm	76.1%
150 mm	35.2%
125 mm	8.9%
100 mm	3.0%
75.0 mm	1.4%
50.0 mm	0.5%
40.0 mm	0.2%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



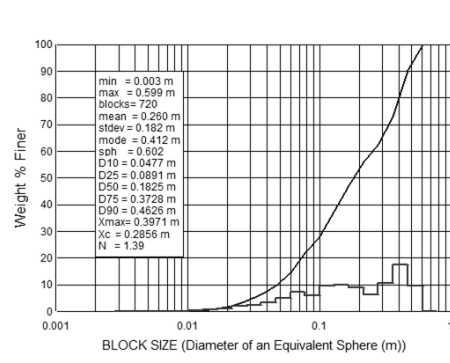
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	92.9%
300 mm	66.6%
150 mm	26.2%
125 mm	23.4%
100 mm	19.6%
75.0 mm	12.8%
50.0 mm	7.6%
40.0 mm	5.5%
37.5 mm	5.0%
35.5 mm	4.6%
31.5 mm	3.9%
25.0 mm	2.7%
16.0 mm	1.1%
12.5 mm	0.5%
10.0 mm	0.2%
8.00 mm	0.1%
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



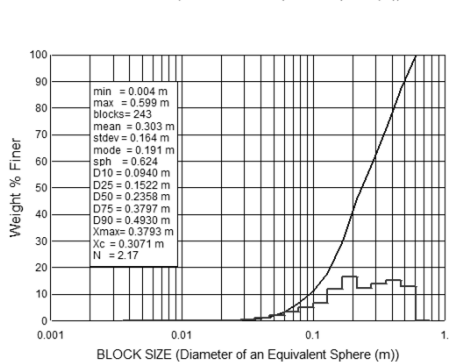
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	98.7%
300 mm	66.1%
150 mm	33.9%
125 mm	25.8%
100 mm	18.1%
75.0 mm	10.1%
50.0 mm	3.9%
40.0 mm	2.1%
37.5 mm	1.8%
35.5 mm	1.5%
31.5 mm	1.1%
25.0 mm	0.5%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



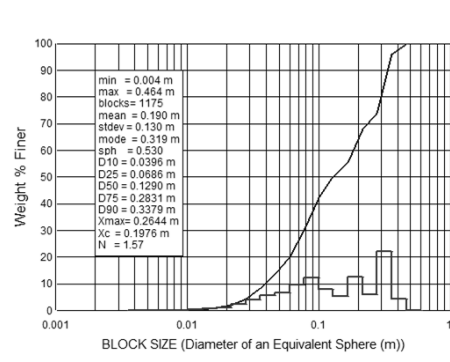
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	91.4%
300 mm	61.2%
150 mm	25.2%
125 mm	19.8%
100 mm	12.0%
75.0 mm	6.9%
50.0 mm	2.7%
40.0 mm	1.6%
37.5 mm	1.4%
35.5 mm	1.2%
31.5 mm	0.9%
25.0 mm	0.6%
16.0 mm	0.2%
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



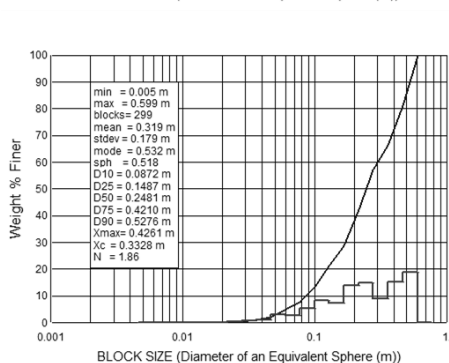
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	92.8%
300 mm	65.1%
150 mm	42.8%
125 mm	36.0%
100 mm	27.9%
75.0 mm	20.9%
50.0 mm	10.9%
40.0 mm	7.5%
37.5 mm	6.8%
35.5 mm	6.1%
31.5 mm	5.0%
25.0 mm	3.1%
16.0 mm	0.9%
12.5 mm	0.4%
10.0 mm	0.2%
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



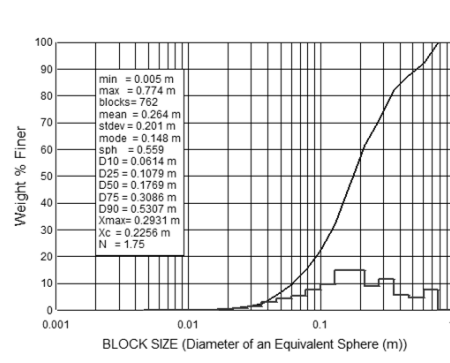
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	90.7%
300 mm	62.0%
150 mm	24.3%
125 mm	16.8%
100 mm	11.3%
75.0 mm	6.1%
50.0 mm	2.0%
40.0 mm	0.9%
37.5 mm	0.7%
35.5 mm	0.6%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



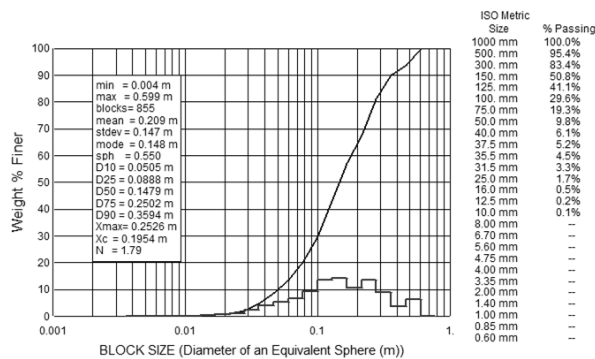
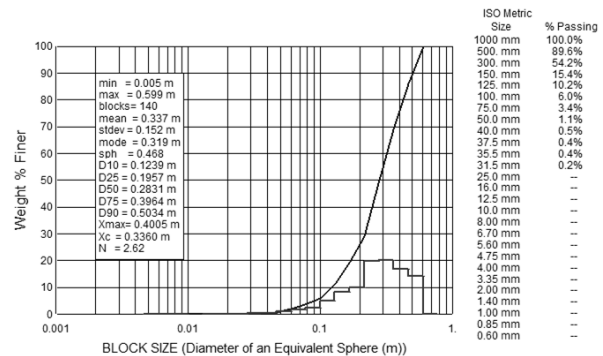
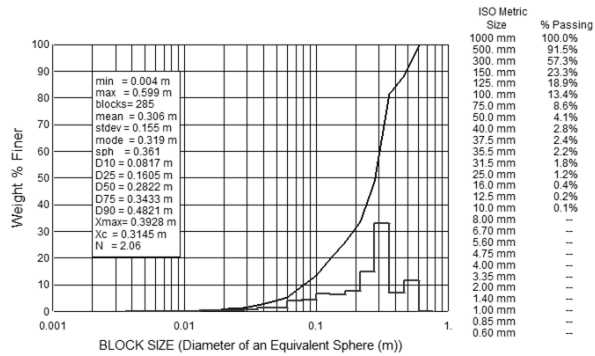
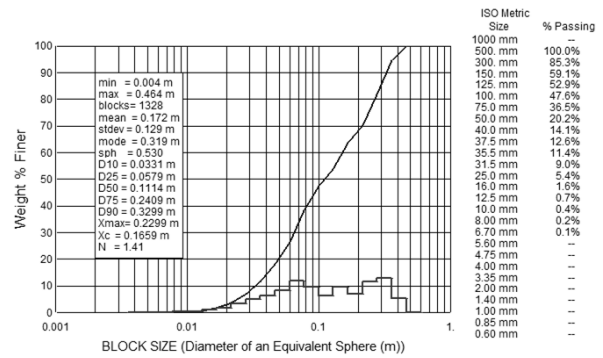
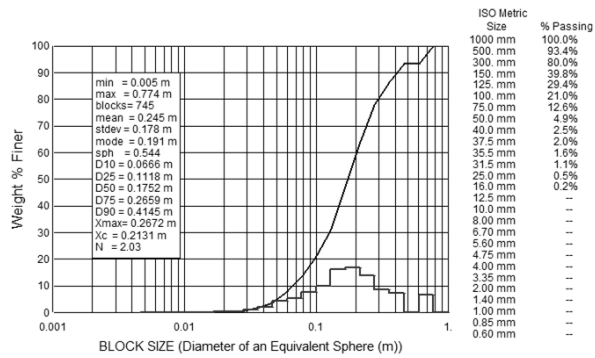
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	79.6%
300 mm	53.0%
150 mm	48.8%
125 mm	42.1%
100 mm	28.5%
75.0 mm	15.3%
50.0 mm	10.2%
40.0 mm	8.9%
37.5 mm	7.9%
35.5 mm	6.0%
31.5 mm	3.3%
25.0 mm	0.8%
16.0 mm	0.3%
12.5 mm	0.2%
10.0 mm	0.1%
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



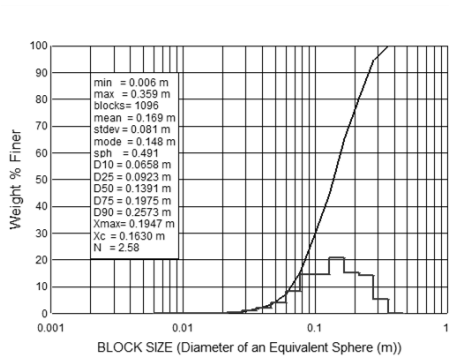
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	96.2%
300 mm	59.6%
150 mm	25.3%
125 mm	20.1%
100 mm	13.1%
75.0 mm	7.3%
50.0 mm	2.9%
40.0 mm	1.5%
37.5 mm	1.2%
35.5 mm	1.1%
31.5 mm	0.7%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



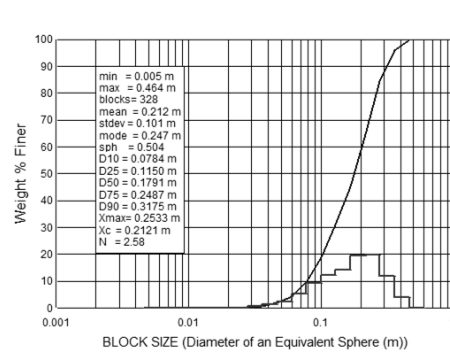
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	89.0%
300 mm	73.8%
150 mm	40.3%
125 mm	30.6%
100 mm	22.4%
75.0 mm	14.1%
50.0 mm	6.5%
40.0 mm	3.8%
37.5 mm	2.4%
35.5 mm	1.8%
31.5 mm	1.8%
25.0 mm	0.9%
16.0 mm	0.2%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



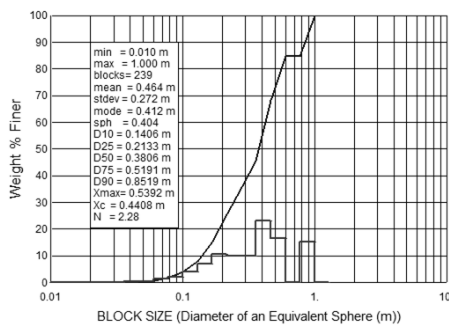
ANATINAEH #8



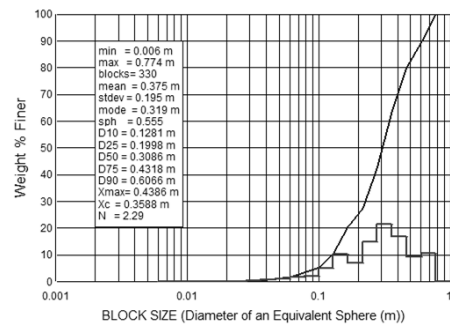
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	96.1%
150 mm	56.0%
125 mm	42.4%
100 mm	29.9%
75.0 mm	14.3%
50.0 mm	4.5%
40.0 mm	2.3%
37.5 mm	1.8%
35.5 mm	1.5%
31.5 mm	1.0%
25.0 mm	0.4%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



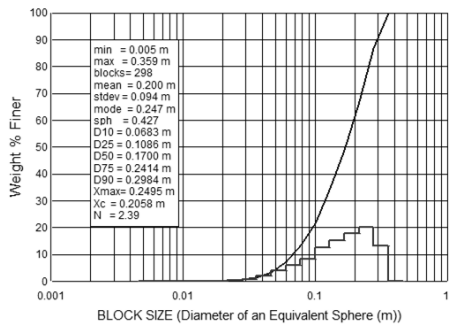
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	87.5%
150 mm	38.8%
125 mm	29.2%
100 mm	18.7%
75.0 mm	8.9%
50.0 mm	2.6%
40.0 mm	1.2%
37.5 mm	0.9%
35.5 mm	0.7%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



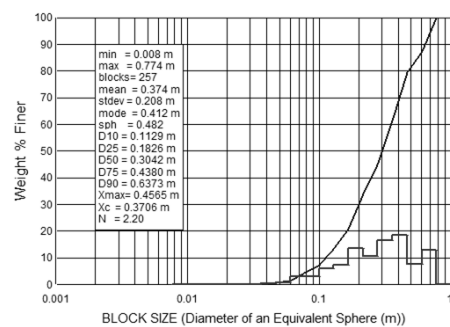
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	72.7%
300 mm	38.1%
150 mm	11.7%
125 mm	7.3%
100 mm	3.8%
75.0 mm	1.7%
50.0 mm	0.4%
40.0 mm	0.2%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	—
31.5 mm	—
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



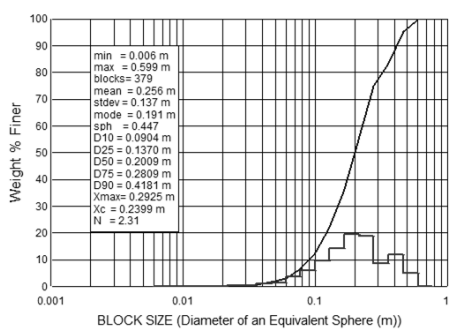
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	82.7%
300 mm	47.7%
150 mm	15.8%
125 mm	9.8%
100 mm	5.3%
75.0 mm	3.1%
50.0 mm	1.1%
40.0 mm	0.6%
37.5 mm	0.5%
35.5 mm	0.4%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



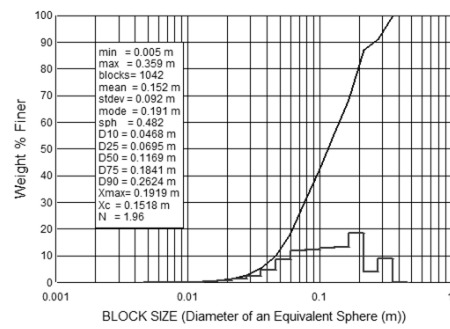
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	90.3%
300 mm	42.1%
150 mm	32.0%
125 mm	21.3%
100 mm	12.3%
75.0 mm	4.3%
50.0 mm	2.0%
40.0 mm	1.6%
37.5 mm	1.1%
35.5 mm	1.2%
31.5 mm	0.9%
25.0 mm	0.4%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



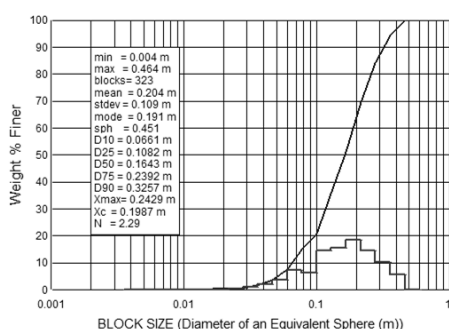
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	81.6%
300 mm	49.2%
150 mm	17.4%
125 mm	12.4%
100 mm	7.4%
75.0 mm	4.2%
50.0 mm	0.8%
40.0 mm	0.3%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.2%
31.5 mm	0.1%
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



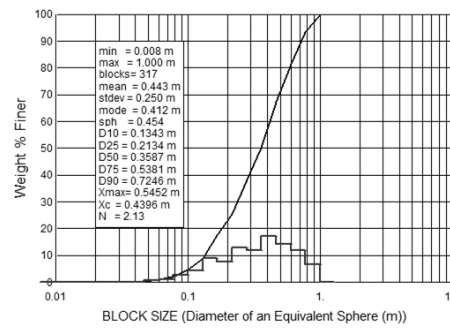
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	95.4%
300 mm	77.1%
150 mm	30.0%
125 mm	20.7%
100 mm	12.5%
75.0 mm	6.1%
50.0 mm	2.1%
40.0 mm	1.2%
37.5 mm	1.0%
35.5 mm	0.8%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



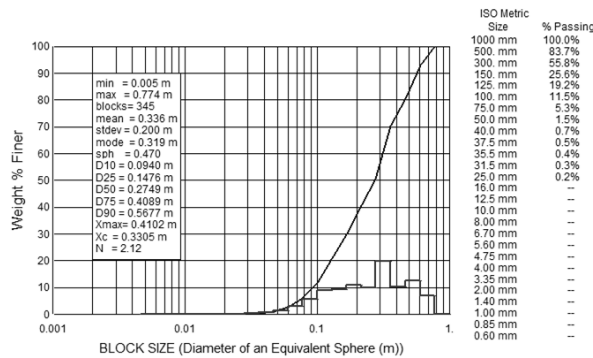
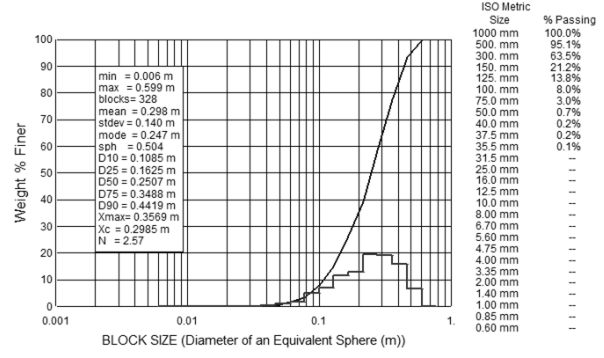
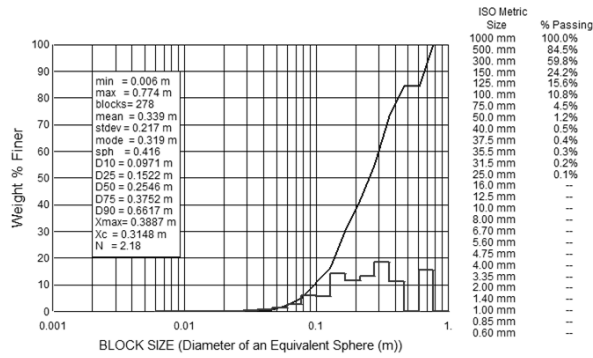
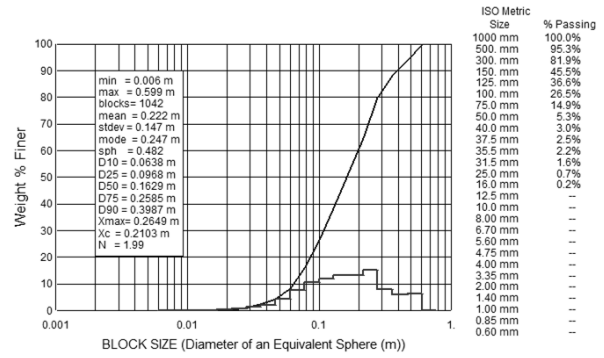
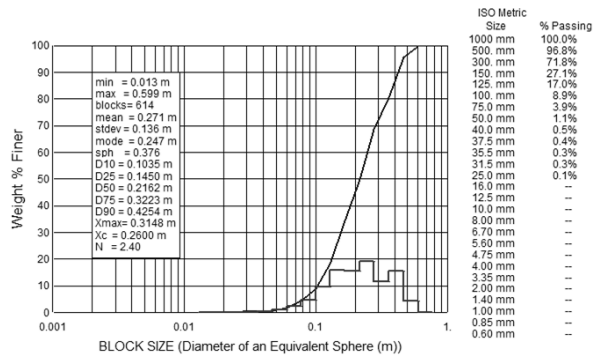
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	93.4%
150 mm	62.8%
125 mm	53.5%
100 mm	42.6%
75.0 mm	28.8%
50.0 mm	12.1%
40.0 mm	6.9%
37.5 mm	5.8%
35.5 mm	5.0%
31.5 mm	3.8%
25.0 mm	2.1%
16.0 mm	0.5%
12.5 mm	0.3%
10.0 mm	0.1%
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



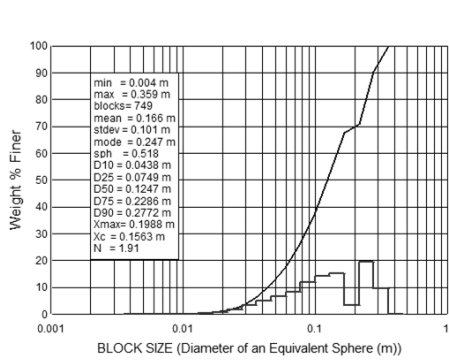
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	86.7%
300 mm	44.1%
150 mm	33.4%
125 mm	20.9%
100 mm	13.7%
75.0 mm	4.7%
50.0 mm	2.4%
40.0 mm	1.9%
37.5 mm	1.6%
35.5 mm	1.1%
31.5 mm	0.5%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



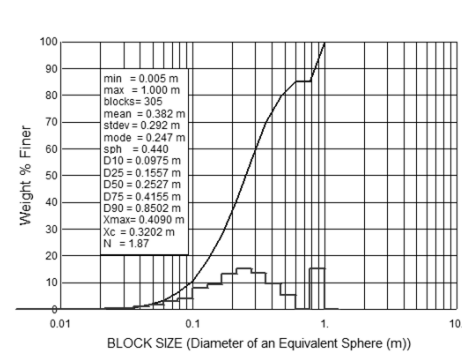
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	71.0%
300 mm	41.3%
150 mm	13.7%
125 mm	8.2%
100 mm	4.7%
75.0 mm	1.9%
50.0 mm	0.5%
40.0 mm	0.2%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.2%
31.5 mm	0.1%
25.0 mm	—
16.0 mm	—
12.5 mm	—
10.0 mm	—
8.00 mm	—
6.70 mm	—
5.60 mm	—
4.75 mm	—
4.00 mm	—
3.35 mm	—
2.00 mm	—
1.40 mm	—
1.00 mm	—
0.85 mm	—
0.60 mm	—



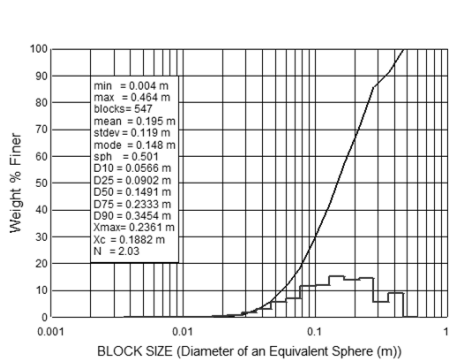
ANATINAÆH #9



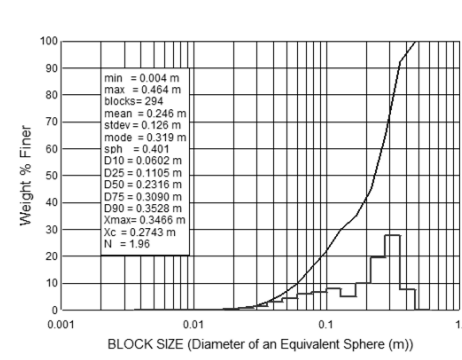
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	92.9%
150 mm	50.1%
125 mm	50.1%
100 mm	38.0%
75.0 mm	25.1%
50.0 mm	12.9%
40.0 mm	8.2%
37.5 mm	7.1%
35.5 mm	6.2%
31.5 mm	4.6%
25.0 mm	2.3%
16.0 mm	0.5%
12.5 mm	0.2%
10.0 mm	0.1%
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



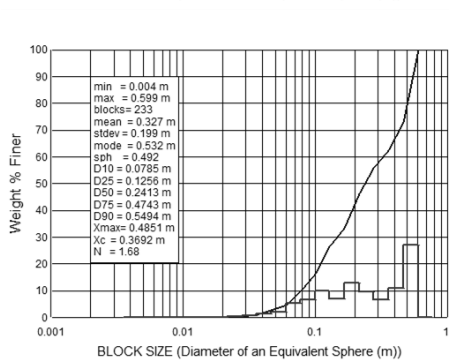
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	81.0%
300 mm	81.0%
150 mm	23.6%
125 mm	17.3%
100 mm	10.4%
75.0 mm	6.0%
50.0 mm	2.1%
40.0 mm	1.1%
37.5 mm	0.9%
35.5 mm	0.7%
31.5 mm	0.6%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



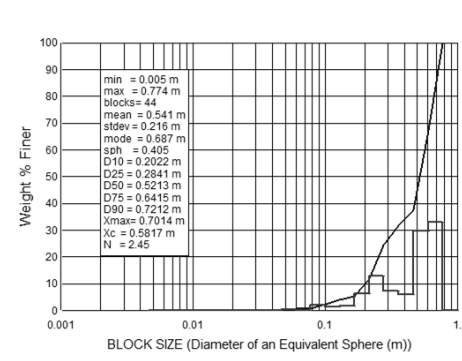
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	87.0%
300 mm	50.4%
150 mm	40.3%
125 mm	30.1%
100 mm	17.5%
75.0 mm	7.3%
50.0 mm	3.9%
40.0 mm	3.1%
37.5 mm	2.6%
35.5 mm	1.8%
31.5 mm	0.8%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



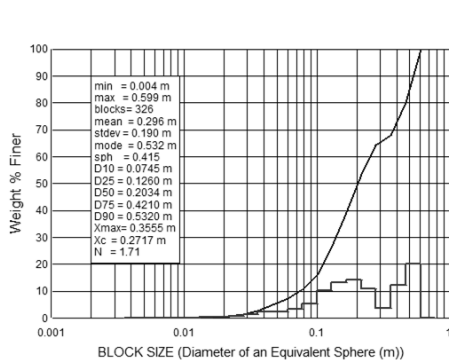
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	71.9%
300 mm	32.7%
150 mm	28.9%
125 mm	22.2%
100 mm	14.9%
75.0 mm	4.0%
50.0 mm	3.3%
40.0 mm	2.8%
37.5 mm	2.1%
35.5 mm	1.1%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



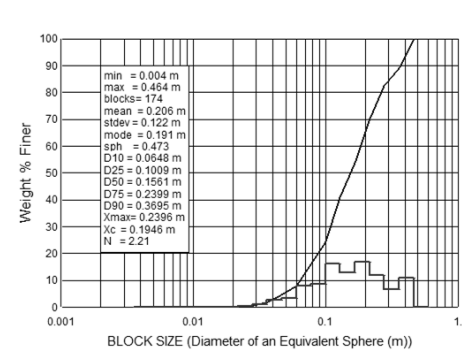
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	80.1%
300 mm	57.4%
150 mm	30.1%
125 mm	24.8%
100 mm	16.2%
75.0 mm	9.0%
50.0 mm	3.1%
40.0 mm	1.6%
37.5 mm	1.3%
35.5 mm	1.0%
31.5 mm	0.7%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



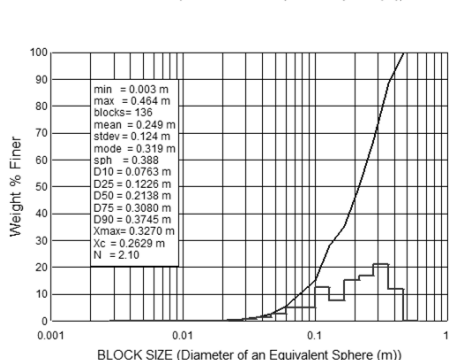
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	45.3%
300 mm	28.4%
150 mm	4.7%
125 mm	3.8%
100 mm	0.5%
75.0 mm	0.3%
50.0 mm	0.2%
40.0 mm	0.1%
37.5 mm	0.1%
35.5 mm	0.1%
31.5 mm	--
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



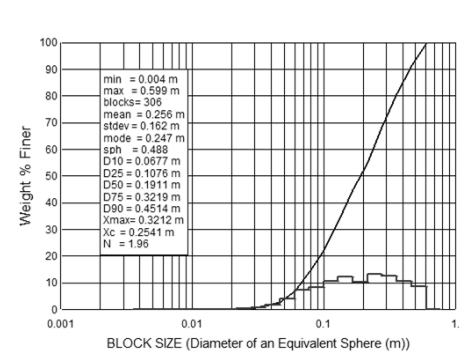
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	85.3%
300 mm	65.3%
150 mm	33.4%
125 mm	24.6%
100 mm	15.9%
75.0 mm	10.1%
50.0 mm	5.5%
40.0 mm	3.8%
37.5 mm	3.0%
35.5 mm	2.6%
31.5 mm	2.0%
25.0 mm	1.1%
16.0 mm	0.3%
12.5 mm	0.1%
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



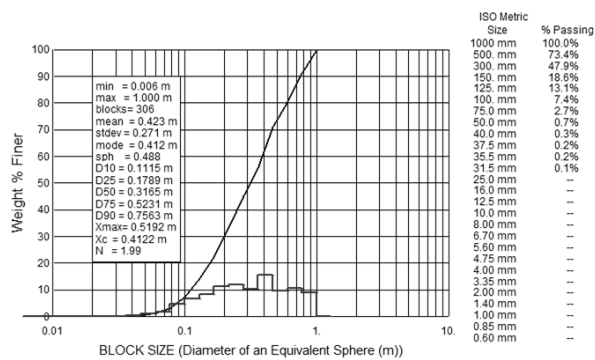
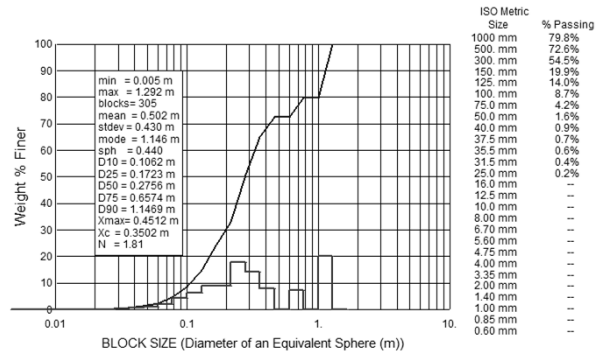
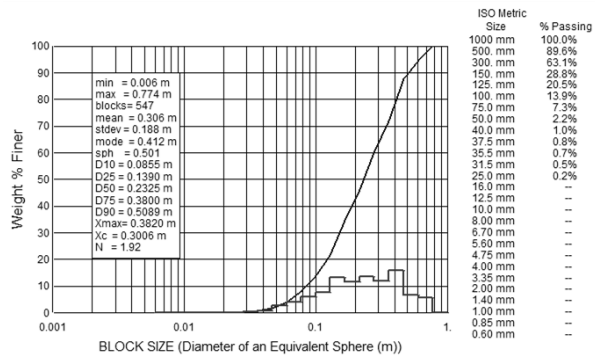
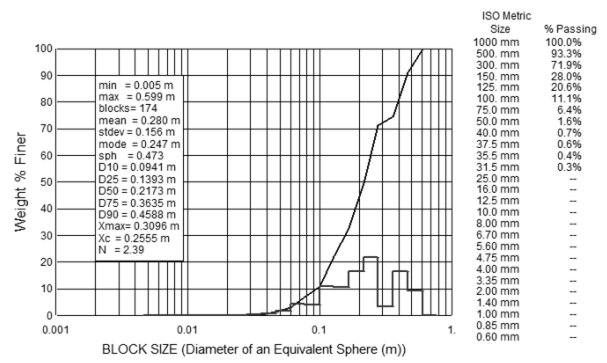
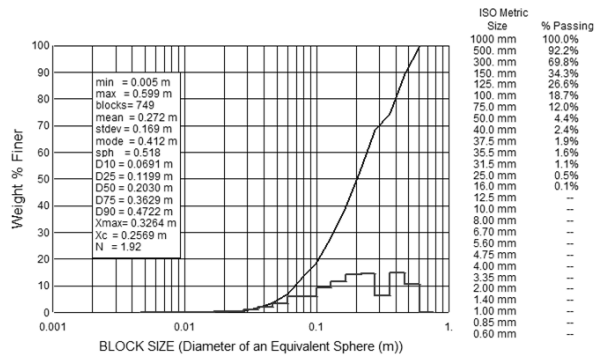
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	84.1%
300 mm	47.9%
150 mm	38.5%
125 mm	24.5%
100 mm	14.9%
75.0 mm	5.3%
50.0 mm	2.7%
40.0 mm	2.1%
37.5 mm	1.6%
35.5 mm	1.1%
31.5 mm	0.4%
25.0 mm	--
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



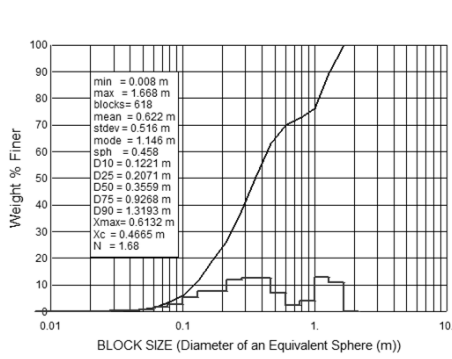
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	72.9%
300 mm	32.0%
150 mm	25.1%
125 mm	15.2%
100 mm	9.8%
75.0 mm	5.4%
50.0 mm	1.9%
40.0 mm	1.5%
37.5 mm	1.3%
35.5 mm	0.9%
31.5 mm	0.5%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	0.1%
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



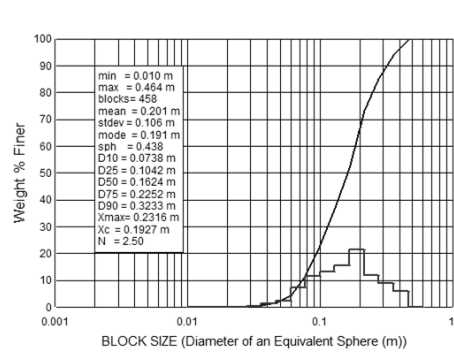
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	93.6%
300 mm	71.6%
150 mm	39.5%
125 mm	31.3%
100 mm	22.2%
75.0 mm	13.0%
50.0 mm	3.9%
40.0 mm	1.9%
37.5 mm	1.5%
35.5 mm	1.2%
31.5 mm	0.8%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	--
12.5 mm	--
10.0 mm	--
8.00 mm	--
6.70 mm	--
5.60 mm	--
4.75 mm	--
4.00 mm	--
3.35 mm	--
2.00 mm	--
1.40 mm	--
1.00 mm	--
0.85 mm	--
0.60 mm	--



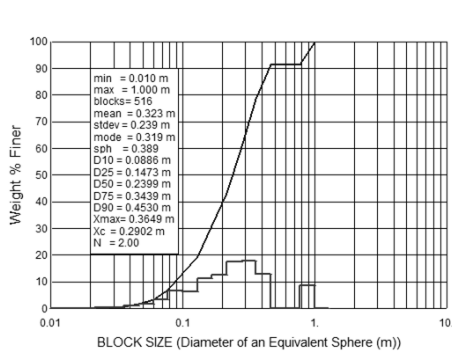
ANATINAÆH #10



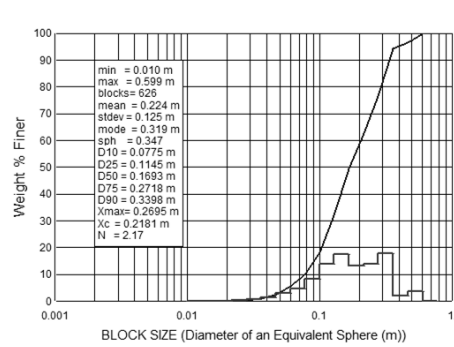
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	76.3%
500 mm	64.9%
300 mm	41.4%
150 mm	15.4%
125 mm	10.5%
100 mm	6.0%
75.0 mm	2.9%
50.0 mm	0.8%
40.0 mm	0.4%
37.5 mm	0.3%
35.5 mm	0.3%
31.5 mm	0.2%
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



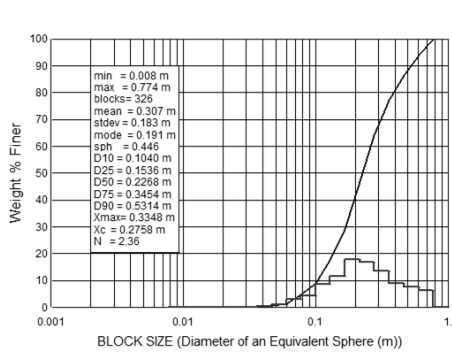
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	---
500 mm	100.0%
300 mm	97.4%
150 mm	44.9%
125 mm	34.4%
100 mm	23.1%
75.0 mm	10.5%
50.0 mm	2.4%
40.0 mm	1.1%
37.5 mm	0.6%
35.5 mm	0.4%
31.5 mm	0.2%
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



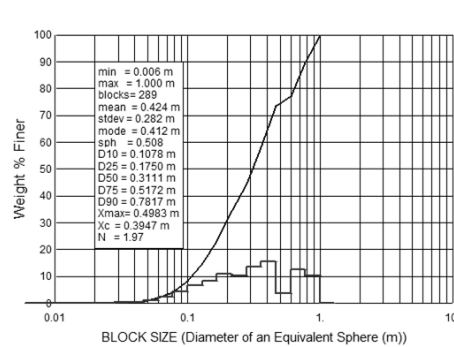
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	91.4%
300 mm	65.4%
150 mm	25.8%
125 mm	18.7%
100 mm	13.3%
75.0 mm	6.3%
50.0 mm	2.1%
40.0 mm	1.1%
37.5 mm	0.8%
35.5 mm	0.7%
31.5 mm	0.5%
25.0 mm	0.2%
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



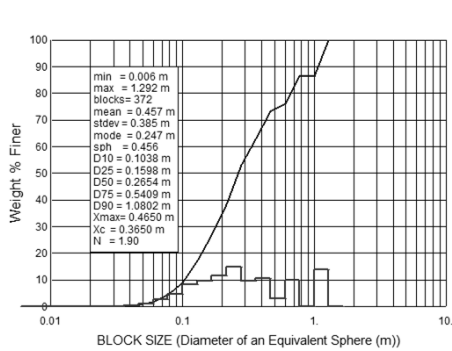
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	81.2%
150 mm	41.8%
125 mm	30.0%
100 mm	18.1%
75.0 mm	9.4%
50.0 mm	4.2%
40.0 mm	1.5%
37.5 mm	1.1%
35.5 mm	0.9%
31.5 mm	0.8%
25.0 mm	0.3%
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



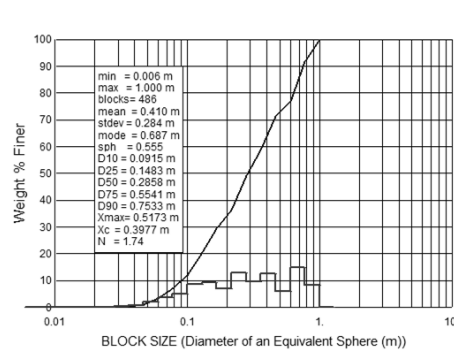
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	88.3%
300 mm	67.5%
150 mm	23.9%
125 mm	16.3%
100 mm	8.8%
75.0 mm	4.1%
50.0 mm	0.8%
40.0 mm	0.4%
37.5 mm	0.3%
35.5 mm	0.3%
31.5 mm	0.2%
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



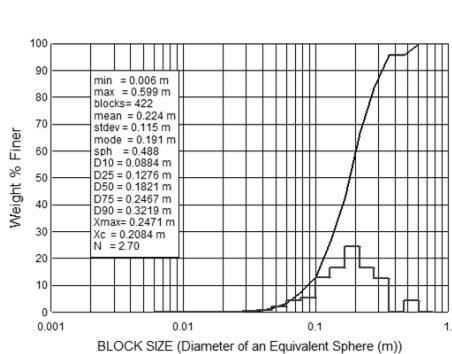
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	74.5%
300 mm	48.2%
150 mm	19.4%
125 mm	13.9%
100 mm	8.2%
75.0 mm	3.7%
50.0 mm	1.0%
40.0 mm	0.5%
37.5 mm	0.3%
35.5 mm	0.2%
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



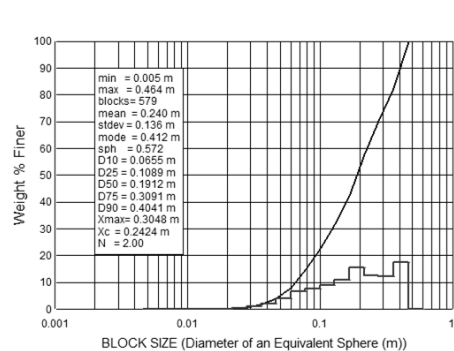
ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	86.2%
500 mm	74.1%
300 mm	55.6%
150 mm	22.6%
125 mm	16.1%
100 mm	8.9%
75.0 mm	4.0%
50.0 mm	0.9%
40.0 mm	0.4%
37.5 mm	0.2%
35.5 mm	0.2%
31.5 mm	0.1%
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	72.6%
300 mm	51.7%
150 mm	25.4%
125 mm	19.1%
100 mm	11.8%
75.0 mm	6.5%
50.0 mm	1.7%
40.0 mm	0.7%
37.5 mm	0.5%
35.5 mm	0.4%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	---
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	96.8%
300 mm	86.7%
150 mm	34.9%
125 mm	23.9%
100 mm	12.8%
75.0 mm	6.8%
50.0 mm	1.9%
40.0 mm	0.8%
37.5 mm	0.6%
35.5 mm	0.5%
31.5 mm	0.3%
25.0 mm	0.1%
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---



ISO Metric Size	% Passing
1000 mm	100.0%
500 mm	100.0%
300 mm	73.6%
150 mm	37.3%
125 mm	30.0%
100 mm	22.3%
75.0 mm	13.6%
50.0 mm	4.9%
40.0 mm	2.5%
37.5 mm	2.0%
35.5 mm	1.7%
31.5 mm	1.1%
25.0 mm	0.4%
16.0 mm	---
12.5 mm	---
10.0 mm	---
8.00 mm	---
6.70 mm	---
5.60 mm	---
4.75 mm	---
4.00 mm	---
3.35 mm	---
2.00 mm	---
1.40 mm	---
1.00 mm	---
0.85 mm	---
0.60 mm	---

