



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΛΑΜΠΡΙΝΗ Σ. ΔΗΜΗΤΡΑΚΗ
MSc Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ
ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ, ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ
ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ, ΣΕ ΛΑΤΟΜΕΙΑ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

« Η διδακτορική διατριβή υλοποιήθηκε με υποτροφία του ΙΚΥ η οποία χρηματοδοτήθηκε από την Πράξη «Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών για μεταπτυχιακές σπουδές δεύτερου κύκλου σπουδών» από πόρους του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», 2014-2020 με τη συγχρηματοδότηση του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (Ε.Κ.Τ.) και του Ελληνικού Δημοσίου»

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2018





ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI
FACULTY OF SCIENCES
SCHOOL OF GEOLOGY

LAMPRINI S. DIMITRAKI

MSc Geologist

Ph.D. THESIS

ASSESSMENT OF LIMESTONE EXCAVATION ABILITY, WITH
EXPLOSIVES, REGARDING TO THEIR ROCKMASS QUALITY, IN
AGGREGATES QUARRIES

« The present Ph.D. thesis was carried out with scholarship by
State Scholarships Foundation (IKY) that was funded in the framework of
«Scholarships for second cycle postgraduate courses» by the « Operational
Program Human Resources Development, Education and
Lifelong Learning », 2014–2020 with the co-financing of the European
Social Fund (ESF) and the Greek Public Investment»

THESSALONIKI

2018



Do something meaningful with your life,
learn, adapt, move forward
and make your magic...



ΛΑΜΠΡΙΝΗ Σ. ΔΗΜΗΤΡΑΚΗ

MSc Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ
ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ, ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ
ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ, ΣΕ ΛΑΤΟΜΕΙΑ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. τον Νοέμβριο του 2018

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 23/11/2018

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°:189

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ., Βασίλειος Χρηστάρας, Επιβλέπων

Αν. Καθηγητής Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ., Κωνσταντίνος Βουδούρης, Μέλος Τριμελούς
Συμβουλευτικής Επιτροπής

Αν. Καθηγητής Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ., Βασίλειος Μαρίνος, Μέλος Τριμελούς
Συμβουλευτικής Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ., Βασίλειος Χρηστάρας, Επιβλέπων

Αν. Καθηγητής Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ., Κωνσταντίνος Βουδούρης

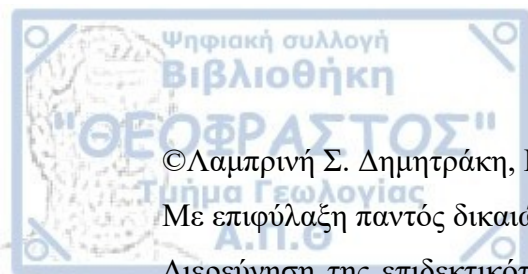
Αν. Καθηγητής Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ., Βασίλειος Μαρίνος

Καθηγητής Τμ. Πληροφορικής Α.Π.Θ., Ιωάννης Βλαχάβας

Αν. Καθηγητής Σχ. Μεταλλειολόγων Ε.Μ.Π., Ανδρέας Μπενάρδος

Αν. Καθηγητής Σχ. Μεταλλειολόγων Ε.Μ.Π., Κωνσταντίνος Λουπασάκης

Αν. Καθηγητής Τμ. Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείο Κρήτης, Εμμανουήλ Στειακάκης



©Λαμπρινή Σ. Δημητράκη, MSc Γεωλόγος, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Διερεύνηση της επιδεκτικότητας των ασβεστολιθικών σχηματισμών σε εκσκαφή με εκρηκτικά, σε σχέση με την ποιότητα της βραχομάζας, σε λατομεία αδρανών υλικών.

– Διδακτορική Διατριβή

©Lamprini S. Dimitraki, MSc Geologist, 2018

All rights reserved.

Assessment of limestone excavation ability, with explosives, regarding to their rockmass quality, in aggregates quarries. – *Ph.D. Thesis*

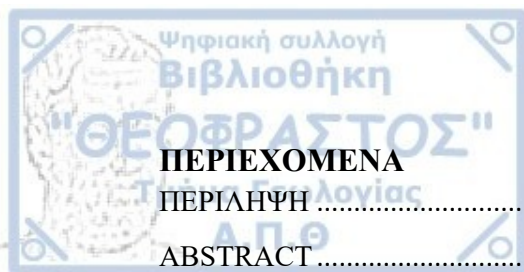
Citation:

Δημητράκη Σ. Λ., 2018 – Διερεύνηση της επιδεκτικότητας των ασβεστολιθικών σχηματισμών, σε εκσκαφή με εκρηκτικά, σε σχέση με την ποιότητα της βραχομάζας, σε λατομεία αδρανών υλικών. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμ. Γεωλογίας Νο 189

Dimitraki S. L., 2018 – Assessment of limestone excavation ability, with explosives, regarding to their rockmass quality, in aggregates quarries. Ph.D. Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Annex Number of Scientific Annals of School of Geology No189

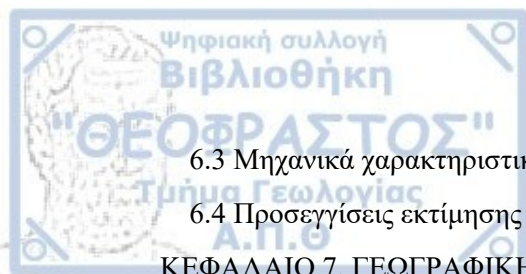
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

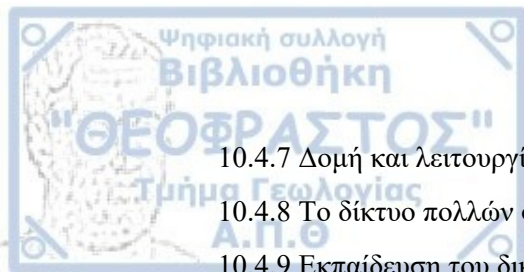


ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
ABSTRACT	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ	20
2.1 Ορισμός της εκρηκτικής ύλης	20
2.2 Ιστορική αναδρομή	21
2.3 Επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών στις εκρηκτικές ύλες	23
2.4 Χαρακτηριστικά της απόδοσης των εκρηκτικών υλών	26
2.5 Τύποι εκρηκτικών υλών	33
2.6 Η ασφάλεια μεταφοράς και χρήσης των εκρηκτικών υλών	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ	47
3.1 Εισαγωγή	47
3.2 Ο μηχανισμός της κατάκαυσης και της έκρηξης	48
3.3 Η επίδραση της έκρηξης περιμετρικά του διατρήματος	50
3.4 Η επίδραση της έκρηξης στο πέτρωμα και ο μηχανισμός της θραύσης του	52
3.4.1 Γενικά	52
3.4.2 Τα στάδια απόσπασης του πετρώματος από το μέτωπο	53
3.4.3 Διάχυση της εκλυόμενης ενέργειας στον περιβάλλοντα χώρο	57
3.4.4 Επίδραση των γεωλογικών συνθηκών στην απόσπαση του πετρώματος με εκρηκτικές ύλες	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ	64
4.1 Εισαγωγή	64
4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφανειακής ανατίναξης	65
4.3 Διάταξη των διατρημάτων (blasthole pattern) και χρονικά διαστήματα έναυσης μεταξύ αυτών (delay timing)	73
4.4 Κατηγοριοποίηση μέσων έναυσης	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	90
5.1 Εισαγωγή	90
5.2 Η λατομική δραστηριότητα στην Ελλάδα	91
5.3 Αδρανή υλικά και η χρήση τους	93
5.4 Εργασίες παραγωγής αδρανών υλικών σε υπαίθριο λατομείο	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	104
6.1 Εισαγωγή	104
6.2 Χαρακτηρισμός της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας	105



6.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά επίδρασης στην εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας ..	108
6.4 Προσεγγίσεις εκτίμησης της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας.....	117
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	124
7.1 Εισαγωγή.....	124
7.2 Περιγραφή της λατομικής περιοχής των δύο λατομείων έρευνας.....	124
7.3 Γεωλογία των λατομικών χώρων και της ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	132
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΗ ΜΑΖΑ.....	138
8.1 Εισαγωγή.....	138
8.2 Βέλτιστο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχίων	139
8.3 Παράγοντες επίδρασης στο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχίων	141
9.4 Ποσοτικοποίηση του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχίων	146
8.5 Μοντέλα πρόβλεψης της θραύσης του πετρώματος.....	148
8.6 Ψηφιακή ανάλυση του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχίων.....	152
8.7. Περιορισμοί στη χρήση των ψηφιακών αναλύσεων εικόνων	155
8.8 Λογισμικά προγράμματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνων.....	156
8.9 Ψηφιακή ανάλυση εικόνων στα δύο λατομεία έρευνας	157
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ	165
9.1 Εισαγωγή.....	165
9.2 Ανάλυση των σταδίων έρευνας και αποτελεσμάτων	166
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ.....	201
10.1 Εισαγωγή.....	201
10.2 Ιστορική αναδρομή.....	202
10.3 Δομή και λειτουργία του τεχνητού νευρώνα.....	204
10.4 Σύνθεση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	206
10.4.1 Δομή του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου	206
10.4.2 Λειτουργία του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.....	208
10.4.3 Συναρτήσεις μεταφοράς	209
10.4.4 Εκπαίδευση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	211
10.4.5 Ταξινόμηση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	213
10.4.6 ANN & εκτίμηση του μέσου μεγέθους των τεμαχίων του εξορυσσόμενου υλικού	214



10.4.7 Δομή και λειτουργία του εφαρμοζόμενου νευρωνικού δικτύου.....	215
10.4.8 Το δίκτυο πολλών στρωμάτων (Multilayer Perceptron-MLP).....	216
10.4.9 Εκπαίδευση του δικτύου MLP με τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης του σφάλματος (Back-propagation algorithm)	218
10.4.10 Η παράμετρος του βήματος εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και τα κριτήρια τερματισμού της εκπαίδευσης	221
10.4.11 Τοπικά ελάχιστα και η χρήση της ορμής (momentum) στον αλγόριθμο	222
10.5 Διαδικασία υλοποίησης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου για την πρόβλεψη του μέσου μεγέθους των τεμαχίων του εξορυσσόμενου υλικού.....	224
10.5.1 Επιλογή του βέλτιστου Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου & σύγκριση με το συμβατικό στατιστικό μοντέλο	232
10.5.2 Αξιολόγηση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου	239
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	244
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	251
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	267



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τη διερεύνηση της σχέσης της τεχνικογεωλογικής δομής της βραχομάζας των ασβεστολίθων (εκρηκτική ικανότητα, αντοχή, δομή, ποιότητα της βραχομάζας, κατάσταση των ασυνεχειών), του εκάστοτε μετώπου εξόρυξης, σε λατομεία παραγωγής αδρανών υλικών, με την κοκκομετρία του υλικού που προκύπτει μετά την ανατίναξη, συνυπολογίζοντας την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO που εφαρμόζεται. Η κοκκομετρία του εξορυσσόμενου υλικού αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα στα λατομεία αδρανών, καθώς αυτή αποτελεί έναν δείκτη της αποτελεσματικότητας της ανατίναξης. Ένα αποδεκτό αποτέλεσμα, θεωρείται όταν τα τεμάχια που προκύπτουν δεν είναι απαραίτητο να υποστούν δευτερογενή θράυση με τη χρήση υδραυλικού σφυριού και επιπλέον υπάρχει μικρό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού στην εξορυσσόμενη σωρό. Το μέγεθος των τεμαχίων εξαρτάται από παραμέτρους που διέπουν τόσο τα χαρακτηριστικά του ασβεστολίθου στο εξορυσσόμενο μέτωπο όσο και από παραμέτρους που συνθέτουν τη διαδικασία της ανατίναξης. Η παρούσα έρευνα εστιάζει στην επίδραση των τεχνικογεωλογικών παραγόντων και των παραμέτρων που διέπουν την ανατίναξη, μέσω της στατιστικής ανάλυσης αυτών αλλά και τη δημιουργία εύκολα διαχειρίσιμων νομογραμμάτων για επί τόπου χρήση στο πεδίο και αυτοματοποιημένων μοντέλων (ANN).

Ειδικότερα, το σύνολο των δεδομένων (100 καταγραφές, από 50 για κάθε λατομείο) συλλέχθηκε από δύο λατομεία εξόρυξης αδρανών υλικών της εταιρίας Ιντερμπετόν του ομίλου TITAN, το λατομείο του Δρυμού και των Ταγαράδων στην Κεντρική Μακεδονία, πλησίον της πόλης της Θεσσαλονίκης, όπου οι υπόλοιπες παράμετροι σύνθεσης των ανατινάξεων, παραμένουν σχεδόν σταθερές (κάνναβος διάταξης διατρημάτων, διάμετρος και βάθος διατρημάτων κ.α.). Ο δείκτης εκρηκτικής ικανότητας αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο εκτίμησης της ευκολίας ή της δυσκολίας εκσκαφής της βραχομάζας με τη χρήση εκρηκτικών υλών, υπό συγκεκριμένες συνθήκες σχεδιασμού της ανατίναξης, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση των εκρηκτικών, (Latham and Lu 1999). Η εκρηκτική ικανότητα (BI) εξαρτάται από τη δομή της βραχομάζας, την απόσταση και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, το ειδικό βάρος του πετρώματος και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

(Lilly 1986, 1992). Στην παρούσα διατριβή η δομή αποδόθηκε μέσω του Γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI) (Marinos et al. 2005), προκειμένου να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η κατάσταση της βραχομάζας, οδηγώντας σε μία πιο ακριβή ταξινόμηση της εκρηκτικής ικανότητας ορίζοντας τον τροποποιημένο Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI), (Modified Blastability Index).

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι δύο παράγοντες επιδρούν στο μέγεθος των αποσπώμενων τεμαχών και ο πρώτος αφορά τη συμπεριφορά της βραχομάζας (εκρηκτική ικανότητα και ποιότητα του ασβεστολίθου) ενώ ο δεύτερος την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO που εφαρμόζεται στην εκάστοτε ανατίναξη. Περιγράφονται από υψηλούς συντελεστές συσχέτισης με την εκρηκτική ικανότητα να παρουσιάζει τον υψηλότερο με $r=0.70$, την ποιότητα του ασβεστολίθου με $r=0.60$ και την κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης Powder Factor (ANFO kg/m^3) με $r=-0.67$. Παρατηρήθηκε ότι η κατανομή του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας στα δεδομένα ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό την κατανομή του μέσου και μέγιστου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών. Οι υψηλές τιμές του MBI (81) αντιστοιχούν σε μέγεθος τεμαχών που ορίζουν τη μεγαλύτερη σχεδόν μέση τιμή (45 cm), ενώ στην περίπτωση που η εκρηκτική ικανότητα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (περίπου 44 με 52), τότε και το μέσο μέγεθος κυμαίνεται σε μικρές τιμές μεταξύ 18 και 22 cm. Ακόμα και ογκόλιθοι μεγέθους από 1.10m έως 1.33m αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές GSI (70-80), όπου η βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως τεμαχώδης με καλή ποιότητα ασυνεχειών και αντίστοιχα το MBI κυμαίνεται μεταξύ 69 και 80.

Επιπλέον, από τις καταγραφές συμπεραίνεται ότι στην περίπτωση που το GSI του ασβεστολίθου κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα, με υψηλές τιμές αντοχής από 55 MPa έως 70 MPa, το σύνολο των τιμών του MBI έχει εύρος μεταξύ 40 και 65. Αντίθετα, στις περιπτώσεις, όπου επικρατούν χαμηλότερες αντοχές (52 με 60 MPa), και υψηλοί δείκτες GSI, τότε οι τιμές του MBI κινούνται σε υψηλά επίπεδα (60 έως 80). Από αυτό γίνεται κατανοητό το γεγονός της σημαντικής επίδρασης που ασκεί η ποιότητα της βραχομάζας στην εκρηκτική ικανότητα, έναντι της αντοχής της.

Τέλος, δημιουργήθηκαν νομογράμματα εύρεσης της μίας παραμέτρου σε σχέση με την άλλη, για επί τόπου χρήση στο πεδίο, που εκκινούν από την ταξινόμηση του ασβεστολίθου στο μέτωπο της εξόρυξης μέσω του GSI και καταλήγουν στους παράγοντες που περιγράφουν την ανατίναξη (κατανάλωση ANFO, αριθμός διατηρημάτων, ποσότητα εξορυσσόμενης ύλης, μέσο μέγεθος αποσπώμενων τεμαχών).

Παράλληλα με τις συμβατικές μεθόδους, προτείνεται τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) πρόβλεψης του μέσου μεγέθους των αποσπώμενων τεμαχίων (με δεδομένα εισόδου τον τροποποιημένο Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας, την κατανάλωση εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO kg/m^3 , την ποσότητα της εξορυσσόμενης μάζας), με πολλά στρώματα, με δομή 3-5-1, εμπρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward net) με επίβλεψη (supervised training), εκπαιδευμένο με τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης με ορμή (back propagation with momentum) και βήμα εκπαίδευσης 0.5. Το δίκτυο αυτό υποδεικνύει υψηλή στατιστική αξιοπιστία, με ακρίβεια πρόβλεψης τα 2.5 cm και υψηλή υπεροχή έναντι της συμβατικής στατιστικής ανάλυσης (multiple regression analysis), (Dimitraki et al. 2018).

The present Ph.D. thesis concerns about the investigation between the geotechnical characteristics of the limestone rock mass (blastability, strength, structure, quality, condition of the discontinuities) on pit faces, in aggregates quarries, and the size of the fragments in blasted rock piles, taking into account the quantity of the explosives (ANFO). The ultimate target is to assess the interaction of these parameters on blasted rocks. The size of fragments in blasted rock piles, is an appropriate index of the effectiveness of the blasting process in a pit face. An optimum fragmentation is considered when the fragments do not need to be subjected to secondary breaking (fewer oversize boulders) and the blasted rock pile is described by a small percent of ultra-fines. The fragment size depends on parameters which describe not only the rock mass but also the blasting process (specific charge, spacing, burden, etc.), (Lyana et al. 2016). The present study focuses on these parameters, using the statistical analysis and powerful, advanced computational tools, creating useful nomograms for field implementation.

For the aim of this study, 100 blasting processes were attended at the Drymos and Tagarades quarries in the Central Macedonia region of Greece and recorded for over two years. These two quarries belong to the Titan Company and offer a broad category of coarse to medium grained aggregate materials, including sand, gravels, and crushed stone. At this point, it is worth noting that the blast design (blasthole diameter, burden, space, height of the pit face, sub-drill, detonators), which concerns the blasting process for each quarry, is approximately the same for each blasting event. The BI is a significant mechanical parameter for estimating the vulnerability for the excavation of the rock mass under a specified blast design, by taking into consideration the explosives consumption (Latham and Lu 1999). The BI is related to the rock mass description (RMD), the space (JPS) and the orientation of the joints (JPO), the specific gravity of the rock (SGI) and the uniaxial compressive strength (UCS), through Lilly's equation (Lilly 1986, 1992). In this equation the RMD is considered as a very wide parameter and needs more precision. Therefore, the geological strength index (GSI) (Marinos et al. 2005) was used, which is more precise for estimating and evaluating the rock mass behavior, leading to a specific classification of the blastability through the Modified Blastability Index (MBI).

After evaluating the results, it is concluded that two factors have an impact on the blasted fragment size. The first one is the rock mass behavior (blastability and quality of the limestone), while the second one concerns about the explosive quantity of ANFO, which is implemented in each blasting process. These factors are described by high correlation coefficients and more specifically the modified blastability index has the highest one with $r=0.70$, the quality of limestone with $r=0.60$ and the explosive consumption, Powder Factor (ANFO kg/m^3) with $r=-0.67$. It is noticed that the modified blastability index distribution follows, to a great extent, the distribution of the average and maximum size of the blasted rocks. The high values of MBI (81) correspond to large values of average size (45 cm), while in case of ranging the MBI in low levels (approximately 44-52), and then the average size has lower values between 18 and 22 cm. Even the boulders with size from 1.10 to 1.33m correspond to high values of GSI (70-80), where the rock mass is characterized as blocky with good quality of discontinuities and the MBI ranges between 69 and 80. Furthermore, according to the recordings, it is assumed that in case of the GSI limestone fluctuates in lower levels, with high strength values (55-70 MPa), then the MBI values ranges from 40 to 65. On the contrary, limestone with lower strength (52-60) and high GSI then MBI ranges from 60 to 80. According to these results, it is obvious that the rock mass quality plays a significant role in the MBI contrary to the strength.

Finally, nomograms were created for determining the one parameter in relation to the other, for field implementation, which start from the rock mass classification of the pit face and result in the factors that describe the explosion (ANFO consumption, number of blastholes, quantity of blasted rock, and average size of blasted rock). At the same time, it is proposed an Artificial Neural Network (ANN), for predicting the average size of fragments in aggregate blasted rock piles, with three input parameters: the MBI, the explosive consumption Powder Factor (ANFO kg/m^3), the quantity of the rock pile. This ANN model is a feed-forward, supervised, multilayer perceptron network, with 3-5-1 structure. The model was trained with back propagation algorithm with momentum and learning rate 0.5. Furthermore, the statistical parameters ensure its efficiency, with prediction accuracy at 2.5 cm. On the other hand, the relationship between dependent and independent variables with the conventional regression analysis is described by unfavorable values of the statistical parameters, (Dimitraki et al. 2018).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της επιδεκτικότητας των ασβεστολιθικών σχηματισμών στην εκσκαφή με εκρηκτικές ύλες, στα λατομεία αδρανών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η σχέση της τεχνικογεωλογικής δομής της βραχομάζας των ασβεστολίθων (εκρηκτική ικανότητα, αντοχή, δομή, ποιότητα της βραχομάζας, κατάσταση των ασυνεχειών), του εκάστοτε μετώπου εξόρυξης, σε λατομεία παραγωγής αδρανών υλικών, με την κοκκομετρία του υλικού που προκύπτει μετά την ανατίναξη, συνυπολογίζοντας την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου Ammonium Nitrate and Fuel Oil που εφαρμόζεται.

Η χρήση των εκρηκτικών υλών στα λατομεία αδρανών αποτελεί μία ευρέως διαδεδομένη πρακτική σε διεθνές επίπεδο, με σκοπό την εξόρυξη των βραχωδών όγκων και την παραγωγή των κατάλληλων υλικών, διαφόρων μεγεθών κοκκομετρίας, για τη χρήση τους τόσο στα τεχνικά έργα όσο και στη βιομηχανία. Σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα της ανατίναξης διαδραματίζει η εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας. Ο όρος εκρηκτική ικανότητα (blastability) προσδιορίζει την ευαισθησία με την οποία αντιδρά η βραχομάζα υπό μία συγκεκριμένη διάταξη των διατρημάτων που πληρώνονται με την εκρηκτική ύλη, τα χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης και των ειδικών νομοθετικών περιορισμών που διέπουν την τοποθεσία που βρίσκεται το λατομείο (Lilly 1986). Οι παράγοντες που προσδιορίζουν την εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη κατηγορία αφορά τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, όπως είναι η αντοχή. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τη δομή των ασυνεχειών της βραχομάζας και περιλαμβάνει την απόσταση των ασυνεχειών, τον προσανατολισμό και το μέγεθος των τεμαχίων που αυτές ορίζουν.

Η βραχομάζα στο μέτωπο της εξόρυξης, χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο ασυνεχειών, δηλαδή οι επιφάνειες αποχωρισμού που διασπούν τον ενωτικό δεσμό του βράχου, που είναι αποτέλεσμα της διεργασίας γένεσης του πετρώματος, της τεκτονικής καταπόνησης που υφίσταται στην περιοχή αλλά και λόγω προγενέστερης ανατίναξης που πραγματοποιήθηκε στο μέτωπο. Η αξιολόγηση της ποιότητας της

βραχομάζας γίνεται μέσα από έναν αριθμό συστημάτων ταξινόμησης που έχουν αναπτυχθεί για γεωτεχνικούς λόγους και στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται ο Γεωλογικός δείκτης αντοχής (Geological Strength Index), (Hoek & Marinos 2000).

Η καινοτομία της παρούσας έρευνας έγκειται στη δημιουργία νέων, εύχρηστων και λειτουργικών συστημάτων, ώστε με βάση την ποιότητα της βραχομάζας των ασβεστολίθων στο μέτωπο της εξόρυξης, να προσδιορίζεται γρήγορα η εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας, η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, ο αριθμός των διατρημάτων και η τελική κοκκομετρία του εξορυσσόμενου υλικού που θα προκύψει από την ανατίναξη. Ιδιαίτερο πλεονέκτημα του συστήματος θα αποτελεί η εύκολη εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικών με τη σύνθεση των παραμέτρων που διέπουν την ανατίναξη, ακόμα και από προσωπικό χωρίς ιδιαίτερες επιστημονικές γνώσεις. Το σύστημα αυτό θα δύναται να αξιοποιηθεί με ευχέρεια στα λατομεία παραγωγής αδρανών υλικών, ανάλογα με την παρούσα κατάσταση του μετώπου που πρόκειται να εξορυχτεί, προκειμένου να υπολογίζονται εκ των προτέρων τόσο οι ποσότητες των εκρηκτικών που θα πρέπει να εφαρμοστούν στο μέτωπο αλλά και η κοκκομετρία του εξορυσσόμενου υλικού που θα προκύψει.

Τα στάδια τα οποία ακολουθήθηκαν προκειμένου να διεξαχθεί η παρούσα έρευνα είναι τα κάτωθι:

- Επισταμένη βιβλιογραφική αναζήτηση για τη λήψη εμπεριστατωμένων γνώσεων σχετικά με την εξόρυξη υλικού με τη χρήση εκρηκτικών υλικών.
- Παρακολούθηση της διαδικασίας υλοποίησης των ανατινάξεων στα μέτωπα εξόρυξης σε δύο λατομεία εξόρυξης αδρανών υλικών της εταιρίας Ιτερμπετόν του Ομίλου TITAN: στο Λατομείο Δρυμού του Δήμου Ωραιοκάστρου, στον Ν. Θεσσαλονίκης και στο Λατομείο Ταγαράδων του Δήμου Θέρμης στον Ν. Θεσσαλονίκης. Κατά το στάδιο αυτό συλλέχθηκε ένας μεγάλος αριθμός (100) καταγραφών των ανατινάξεων που περιελάμβανε:
 - α) επί τόπου ποιοτική ταξινόμηση της βραχομάζας του ασβεστολίθου στο μέτωπο (πριν την ανατίναξη) που επρόκειτο να αποσπαστεί, σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης GSI (Geological Strength Index) και φωτογράφιση του μετώπου

β) καταγραφή των ασυνεχειών του μετώπου (απόσταση, προσανατολισμό, κατάσταση των ασυνεχειών), εντοπισμός παρουσίας εδαφικού αργιλικού υλικού

γ) εκτίμηση της μονοαξονικής αντοχής του άρρηκτου βράχου επί τόπου με τη χρήση σφύρας Schmidt

δ) καταγραφή της διάταξης των διατρημάτων, του αριθμού των διατρημάτων, του ύψους του μετώπου, των ποσοτήτων των εκρηκτικών υλών, του βάθους των διατρημάτων

ε) παρακολούθηση της ανατίναξης και καταγραφή της με φωτογράφιση και βιντεοσκόπηση

στ) επί τόπου αξιολόγηση του αποτελέσματος της ανατίναξης, του αποσπώμενου υλικού που προέκυψε και φωτογράφησή του

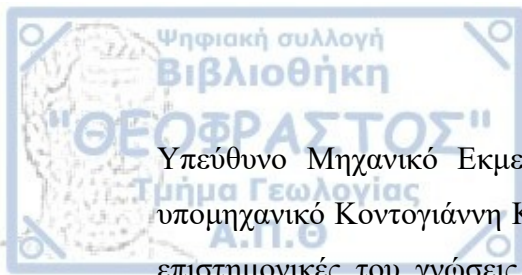
- Δημιουργία βάσης δεδομένων με το σύνολο των καταγραφών των ανατινάξεων και από τα δύο λατομεία που περιλαμβάνει τόσο τα δεδομένα που καταγράφηκαν επί τόπου, όσο και τις πρόσθετες πληροφορίες και υπολογισμούς που προέκυψαν από τα επόμενα στάδια εργασιών.
- Υπολογισμός του Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (BI) της βραχομάζας του ασβεστολίθου κάθε ανατίναξης, σύμφωνα με τα στοιχεία που τη διέπουν, ανάλογα με την ποιότητά της σύμφωνα με το GSI και τις ασυνέχειές της (λαμβάνοντας υπόψη και το ήδη υπάρχον σύστημα BQS), (Χατζηαγγέλου Μ., Χρηστάρας Β., 2013, 2014).
- Χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού ανάλυσης εικόνας WipFrag 3.0[®]. Το ειδικό αυτό λογισμικό έδωσε τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η κοκκομετρία του εξορυσσόμενου υλικού, εισάγοντας τις εικόνες με τα αδρανή υλικά, που λήφθηκαν μετά από κάθε ανατίναξη. Ως αποτέλεσμα προέκυψε η εκτίμηση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης τιμής της κοκκομετρίας. Επίσης, διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ του αποτελέσματος από τη χρήση του εν λόγω λογισμικού και του αντίστοιχου όμοιου από την εφαρμογή της μαθηματικής εξίσωσης Kuz-Ram Model, 1987 για την εύρεση της κοκκομετρίας του υλικού. Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε εμπειρική μαθηματική σχέση πρόβλεψης της μίας παραμέτρου εκ της άλλης.

- Στατιστική επεξεργασία όλων των παραμέτρων (εκρηκτική ικανότητα, ποιότητα βραχομάζας, μέγεθος εξορυσσόμενων τεμαχών, κατανάλωση εκρηκτικής ύλης, πλήθος διατρημάτων) με τη χρήση στατιστικού υπολογιστικού πακέτου (ενδεικτικά αναφέρονται το «STATISTICA» και το «R»).
- Συνδυασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με σκοπό τη δημιουργία νομογραμμάτων για την πρόβλεψη του αποτελέσματος της ανατίναξης, πριν αυτή λάβει χώρα στα λατομεία αδρανών υλικών.
- Βιβλιογραφική αναζήτηση και παρακολούθηση διαδικτυακών διαλέξεων για τη δημιουργία τεχνητών νευρωνικών δικτύων για κάθε λατομείο έρευνας, με σκοπό την πρόβλεψη του μέσου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών, με σημαντική ικανότητα γενίκευσης. Με δεδομένα εισόδου τον Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας, το Powder Factor (ANFO kg /m^3), την ποσότητα της εξορυσσόμενης ύλης σε τόνους. Η διαδικασία υλοποίησης των νευρωνικών δικτύων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού το Neuroph Java Neural Network Framework®.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να ευχαριστήσω θερμά, συγκεκριμένα άτομα τα οποία διαδραμάτισαν συμβουλευτικό και υποστηρικτικό ρόλο στην πορεία ολοκλήρωσης του παρόντος διδακτορικού. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Βασίλειο Χρηστάρα, επιβλέποντα της παρούσας διατριβής, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την ενθάρρυνση σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δύο μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον Αν. Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη και τον Αν. Καθηγητή κ. Βασίλειο Μαρίνο, για τα εποικοδομητικά σχόλιά τους.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στους υπεύθυνους μεταλλειολόγους και υπομηχανικούς των δύο λατομείων αδρανών υλικών της εταιρίας Ιντερμπετόν του ομίλου TITAN, στα οποία πραγματοποιήθηκε η διατριβή. Πιο συγκεκριμένα θερμά ευχαριστώ τον κ. Αιμίλιο Γεωργίου, Προϊστάμενο Υπηρεσίας Α΄ Υλών, κλάδος Τσιμέντου, TITAN, τον κ. Θεόφιλο Λουκά, Μεταλλειολόγο-Υπεύθυνο Μηχανικό Εκμετάλλευσης του λατομείου Δρυμού, τον κ. Σπύρο Σκιαδά, Μεταλλειολόγο-



Υπεύθυνο Μηχανικό Εκμετάλλευσης του λατομείου Ταγαράδων, τον εκλιπόντα υπομηχανικό Κοντογιάννη Κωνσταντίνο, ο οποίος μου προσέφερε απλόχερα όλες τις επιστημονικές του γνώσεις και με μύησε στον κόσμο των λατομείων, καθώς και όλους τους εργοδηγούς και υπεύθυνους ανατινάξεων.

Επιπλέον, ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου, οι οποίοι έχουν παίξει σπουδαίο ρόλο, όχι μόνο στην ολοκλήρωση του διδακτορικού αλλά και σε όλη την πορεία της ζωής μου, δίνοντάς μου πάντα την κινητήριο δύναμη, την υποστήριξη και την προτροπή να συνεχίσω. Επίσης, δύο πολύ σημαντικά πρόσωπα έχουν διαδραματίσει έναν αξιοσημείωτο ρόλο αποδεικνύοντας έμπρακτα την υποστήριξή τους και οφείλω να τα ευχαριστήσω. Τον συνοδοιπόρο και σπουδαίο επιστήμονα, Πολιτικό Μηχανικό Νικόλαο Αραμπέλο. Τη φίλη και συνταξιδιώτη σε όλο το ταξίδι της εξερεύνησης της επιστήμης μας, Υπ. Δρ. Γεωλογίας Παναγιώτα Βενετσάνου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την παροχή της υποτροφίας, προκειμένου να διευκολυνθώ στη διεκπεραίωση της παρούσας διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ

2.1 Ορισμός της εκρηκτικής ύλης

Η εκρηκτική ύλη (explosive) ορίζεται ως μία χημική ουσία ή ένα μίγμα χημικών ουσιών, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί θερμικά υπό την επίδραση της θερμότητας (φλόγα) ή μηχανικά (κρούση) λόγω της θερμοδυναμικής της αστάθειας, οδηγώντας την σε ραγδαία, αυτό-διαδιδόμενη, εξώθερμη αντίδραση, προκαλώντας την έκρηξη, (Hartman 1987, Bhandari 1997, National park service handbook 1999). Η αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης παράγει μεγάλες ποσότητες αέριων προϊόντων (CO_2 , N_2 , H_2O -ατμός) τα οποία ασκούν υψηλές δυνάμεις διαστολής οδηγώντας στη θραύση του πετρώματος. Η αποδοτικότητά της εξαρτάται πρωταρχικά από την ποσότητα τα θερμότητας που εκλύεται κατά τη διάρκεια της έκρηξης. Κατά τη διαδικασία της έκρηξης η χημική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια και έπειτα ως μηχανική ενέργεια προκαλεί τον κερματισμό του πετρώματος μεταξύ των σειρών των διατρημάτων και της ελεύθερης επιφάνειας του μετώπου εξόρυξης, προκαλώντας την απόσπασή του από το μέτωπο.

Ο ρυθμός της αντίδρασης της εκρηκτικής ύλης εξαρτάται από το είδος της χημικής ουσίας. Η αντίδραση της έκρηξης είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με ρυθμό μικρότερο από την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο υλικό της εκρηκτικής ύλης, η οποία είναι συνήθως μικρότερη από 1500m/s. Σε αυτή την περίπτωση η αντίδραση ονομάζεται κατάκαυση (deflagration) και οι εκρηκτικές ύλες ανήκουν στην κατηγορία των βραδυδραστικών (Low Explosives). Στην εξόρυξη των πετρωμάτων η μόνη βραδυδραστική εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιείται είναι η μαύρη πυρίτιδα. Οι βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες διεγείρονται προς έκρηξη με θερμότητα (φλόγα). Στην αντίθετη περίπτωση όπου ο ρυθμός της αντίδρασης είναι μεγαλύτερος από την ταχύτητα του ήχου, τότε προκαλείται η εκρηκτική αντίδραση (detonation) και οι εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας αυτής ονομάζονται διαρρηκτικές (High Explosives).

Η ταχύτητα της έκρηξης των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών κυμαίνεται από 1800-8000m/s. Οι εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας αυτής διακρίνονται σε: α) τις

πρωτογενείς (primary) οι οποίες διεγείρονται προς έκρηξη με θερμότητα (π.χ. το αζίδιο του μολύβδου) και χρησιμοποιούνται στην γόμωση των καψυλλίων και β) τις δευτερογενείς (secondary) οι οποίες διεγείρονται προς έκρηξη με μηχανικό τρόπο (κρουστικό κύμα). Σημειώνεται ότι όλες οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται στην εξόρυξη των πετρωμάτων, με εξαίρεση την μαύρη πυρίτιδα που έχει περιορισμένη χρήση στην εξόρυξη διακοσμητικών λίθων, ανήκουν στην κατηγορία των δευτερογενών διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών (π.χ. δυναμίτιδες, αμμωνίτιδες, ANFO, εκρηκτικά γαλακτώματα κ.ά.).

2.2 Ιστορική αναδρομή

Οι εκρηκτικές ύλες αποτελούν ένα ευρέως διαδεδομένο, αποδοτικό και ασφαλές (υπό προϋποθέσεις) μέσο απόσπασης του πετρώματος. Μέσα στο πέρας των αιώνων οι τεχνικές της εξόρυξης εξελίχθηκαν σε μεγάλο βαθμό καθιστώντας τη διαδικασία ευκολότερη και άμεση. Μέχρι τις αρχές του 17^{ου} αιώνα η εξόρυξη των πετρωμάτων πραγματοποιούνταν αποκλειστικά με την χρήση μηχανικών μέσων, δηλαδή με τη βοήθεια ατομικών εργαλείων (σκαπάνη, σφύρα, κοπίδι κ.α.). Οι εργάτες – εξορύκτες χρησιμοποιώντας την ανθρώπινη μυϊκή ενέργεια αλλά και την ικανότητά τους να διακρίνουν στο μέτωπο της εξόρυξης επιφάνειες μικρής αντοχής (ασυνέχειες), αποσπούσαν το πέτρωμα από την φυσική του θέση με ρυθμό της τάξης των 3-4 ωρών ανά κυβικό μέτρο πετρώματος. Όταν απουσίαζαν οι ασυνέχειες από το μέτωπο, τότε η θέρμανση του μετώπου με φωτιά και η ταχεία ψύξη του στην συνέχεια, με την ρίψη νερού, προκαλούσε την δημιουργία ρωγμών, λόγω ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων, που διευκόλυναν την εξόρυξη.

Η πρώτη χημική εκρηκτική ύλη ήταν η μαύρη πυρίτιδα (black powder), όπου το 1249 ο Άγγλος μοναχός Roger Bacon ήταν ο πρώτος που περιέγραψε τον τρόπο παρασκευής της (7 μέρη νιτρικό κάλιο, 4 μέρη ξυλάνθρακα, 4 μέρη θείο) και ανακαλύφθηκε από τους Κινέζους το 1000 μΧ. Για εκατοντάδες χρόνια χρησιμοποιούταν κυρίως για τη δημιουργία πυροτεχνημάτων. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι Κινέζοι δεν την χρησιμοποιούσαν ως πολεμικό μέσο μέχρι τη στιγμή που στον ευρωπαϊκό χώρο ξεκίνησε η χρήση της για πολεμικό σκοπό. Στην Ευρώπη η γνώση της πυρίτιδας πιθανόν μεταδόθηκε από ταξιδιώτες από τη Μέση ανατολή. Στις αρχές του 14^{ου} αιώνα οι Άγγλοι και οι Γερμανοί κατασκεύασαν την πυρίτιδα και αποτέλεσε τη μόνη εκρηκτική ύλη για 300 χρόνια και στις αρχές του 17^{ου} αιώνα εφαρμόστηκε ως μέσο απόσπασης του πετρώματος και ογκολίθων σε μεταλλεία.

Το 1846 ο Ιταλός χημικός Ascanio Sobrero, ανακάλυψε και παρασκεύασε τη νιτρογλυκερίνη προερχόμενη από γλυκερόλη με μίγμα νιτρικού και θεικού οξέος. Αποτελεί μία υγρή και εξαιρετικά ευαίσθητη στην κρούση εκρηκτική ύλη, απρόβλεπτη και επικίνδυνη κατά τον χειρισμό της. Για αυτούς τους λόγους εγκατέλειψε την περαιτέρω προσπάθεια αξιοποίησης της ανακάλυψής του. Το γεγονός αυτό ενέπνευσε τον Σουηδό εφευρέτη Alfred Nobel το 1826, να επινοήσει έναν ασφαλή τρόπο χειρισμού της. Στα μέσα του 1860, πέτυχε να την αναμίξει με ένα αδρανές απορροφητικό υλικό, το πυριτικό πέτρωμα kieselguhr (μια γη των διατόμων), το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά εύκολα τη νιτρογλυκερίνη, καθιστώντας την λιγότερο ευαίσθητη στην κρούση και περισσότερο ασφαλή στη χρήση της. Ο συνδυασμός της νιτρογλυκερίνης και του πετρώματος αυτού οδήγησε στην κατασκευή της δυναμίτιδας, της οποίας η εκρηκτική ισχύς είναι 20 φορές μεγαλύτερη από αυτή της μαύρης πυρίτιδας.

Η δυναμίτιδα, ως μία ευρέως χρησιμοποιούμενη εκρηκτική ύλη, αντικατέστησε τη μαύρη πυρίτιδα (εκτός της χρήσης της πυρίτιδας για στρατιωτικούς σκοπούς). Ο Alfred Nobel συνέχισε να πειραματίζεται με τις εκρηκτικές ύλες και το 1875, εφεύρε τη ζελατινοδυναμίτιδα, διαλύοντας κολλοδιοβάμβακα (νιτροκυτταρίνη με περιεκτικότητα σε άζωτο 12%) μέσα στη νιτρογλυκερίνη. Η ζελατινοδυναμίτιδα αποτελεί μία εκρηκτική ύλη με ζαλατινώδη υφή και εξαιρετική αντοχή στο νερό. Σε σύγκριση με τη δυναμίτιδα είναι πολύ πιο ισχυρή και πιο ασφαλής.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα κατασκευάστηκαν τα πρώτα ηλεκτρικά καψύλια και το 1922 τα ηλεκτρικά καψύλια με περίοδο επιβράδυνσης ενός δευτερολέπτου. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 παρουσιάστηκαν στην αγορά ηλεκτρικά καψύλια με περίοδο επιβράδυνσης 10-100 χιλιοστά του δευτερολέπτου, η διάδοση των οποίων είχε τεράστια σημασία στην ανάπτυξη των σύγχρονων τεχνικών εξόρυξης των πετρωμάτων με εκρηκτικές ύλες. Το 1973 ο Σουηδός Per-Anders Persson εφεύρε το σύστημα μη-ηλεκτρικής πυροδότησης NONEL, ενώ στα τέλη της δεκαετίας του 1980 παρουσιάζονται τα πρώτα ηλεκτρονικά καψύλια. Τα ηλεκτρονικά καψύλια αποτελούν το πλέον σύγχρονο σύστημα πυροδότησης και σήμερα διατίθενται με προγραμματιζόμενη περίοδο επιβράδυνσης από 1-1000 χιλιοστά του δευτερολέπτου.

Από το 1956 και έπειτα η εξέλιξη των εκρηκτικών υλών προχωράει στην εποχή του ANFO και των συγγενών υλικών. Το ANFO (Ammonium Nitrate & Fuel Oil) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο μεταλλείο της Oliver Mining Division, U.S. Steel Corporation και αποτελείται από 94% κοκκώδες νιτρικό αμμώνιο και 6%

πετρέλαιο (μαζούτ). Το 1958 οι M.A. Cook και H.E. Farnham συνέθεσαν μία νέου τύπου εκρηκτική ύλη με ζελατινώδη ημίρρευστη υφή, η οποία αποτελούνταν από νιτρικό αμμώνιο, σκόνη αλουμινίου, νερό και μία φυτική κόλλα. Αυτό αποτέλεσε την έναρξη χρήσης των εκρηκτικών πολφών (slurry explosives), με κύριο χαρακτηριστικό την εξαιρετική ασφάλεια στη χρήση τους και την ανθεκτικότητά τους στην παρουσία νερού. Μία ακόμη σημαντική εξέλιξη στον τομέα των εκρηκτικών αποτελούν τα εκρηκτικά γαλακτώματα (emulsion explosives).

Τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται μίγματα διαφόρων τύπων εκρηκτικών υλών (ANFO και εκρηκτικά γαλακτώματα, ανάλογα με τις απαιτούμενες ανάγκες), είτε τυποποιημένα εργοστασιακά προϊόντα, είτε με τη χρήση αυτοκινούμενων μονάδων παραγωγής, με την παροχή του υλικού απευθείας στο μέτωπο της εξόρυξης, με σκοπό τη γόμωση των διατρημάτων και δίνοντας τη δυνατότητα να προσαρμόζεται η σύνθεσή τους σε σχέση με τις εκάστοτε απαιτούμενες συνθήκες.

2.3 Επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών στις εκρηκτικές ύλες

Κύρια και εξαιρετικά σημαντική παράμετρος στη χρήση των εκρηκτικών υλών, αποτελεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία τους υπό τις, εκάστοτε, υπάρχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η επιλογή του είδους της εκρηκτικής ύλης για έναν συγκεκριμένο σκοπό σχετίζεται όμως και με τα οικονομικά κριτήρια προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Με άλλα λόγια, πριν την εφαρμογή των εκρηκτικών από τον υπεύθυνο της ανατίναξης, θα πρέπει να παρθεί η κατάλληλη απόφαση ως προς την ορθή χρήση της εκρηκτικής ύλης για την επίτευξη του συγκεκριμένου σκοπού. Τα κύρια χαρακτηριστικά που περιγράφουν τις εκρηκτικές ύλες σε σχέση με τις υπάρχουσες συνθήκες συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η *ευαισθησία (sensitivity)* αποτελεί ένα χαρακτηριστικό της εκρηκτικής ύλης, η οποία προσδιορίζει την ικανότητά της στη διάδοση της έκρηξης σε όλο το μήκος του διατρήματος. Η ευαισθησία ορίζεται προσδιορίζοντας την κρίσιμη διάμετρο (critical diameter). Με τον όρο κρίσιμη διάμετρος προσδιορίζεται η ελάχιστη διάμετρος γόμωσης, στην οποία μπορεί να διαδοθεί η έκρηξη επαρκώς. Ειδικότερα, σε κάποια ελάχιστη διάμετρο γόμωσης, ενώ η εκρηκτική ύλη δεν έχει αντιδράσει πλήρως, εντούτοις, η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι πλέον ικανή για να διατηρήσει την αυτοδιάδοση της έκρηξης. Όλες οι εκρηκτικές ύλες έχουν μία κρίσιμη διάμετρο και είναι χαρακτηριστική για κάθε μία, ανάλογα με την κοκκομετρία και την πυκνότητά της. Η διάμετρος της γομωμένης στήλης θα πρέπει να είναι

μεγαλύτερη από την κρίσιμη διάμετρο του εκρηκτικού που θα χρησιμοποιηθεί. Παραδείγματα κρίσιμης διαμέτρου για διάφορους τύπου εκρηκτικών είναι: η ζελατινοδυναμίτιδα με κρίσιμη διάμετρο μικρότερη από 1 in (1 in=2.54 cm), το χύμα ANFO με κρίσιμη διάμετρο 1-2 in, το βαρύ ANFO μεγαλύτερη από 2 in (National park service handbook 1991).

- Η *ανθεκτικότητα στο νερό* είναι η αντοχή της εκρηκτικής ύλης στην έκθεσή της στο υγρό περιβάλλον, χωρίς να υποστεί επιβλαβείς επιδράσεις στην αποτελεσματικότητά της. Η ανθεκτικότητα στο νερό διαχωρίζεται σε δύο είδη: εσωτερική και εξωτερική. Η εσωτερική αντίσταση αναφέρεται στην αντίσταση της ύλης στο νερό που παρέχεται από την ίδια τη σύνθεση του προϊόντος. Για παράδειγμα κάποια πολτώδη μίγματα (γαλακτώματα) εισάγονται απευθείας στα διατρήματα που περιέχουν νερό. Πιο συγκεκριμένα έχουν την ιδιότητα να μην αφήνουν το νερό να τα διαπεράσει και συνεπώς να μην χάνουν την εκρηκτική τους ικανότητα. Από την άλλη πλευρά, η εξωτερική αντίσταση δεν παρέχεται από το ίδιο το υλικό της ύλης, αλλά από το περίβλημα μέσα στο οποίο θα εισαχθεί το υλικό προκειμένου να προστατευθεί από το νερό. Για παράδειγμα, η χημική ουσία του ANFO δεν έχει καμία ανθεκτικότητα στο υγρό περιβάλλον, παρόλα αυτά εάν τοποθετηθεί σε ένα φυσίγγιο, τότε μπορεί να προστατευθεί και να παραμείνει ξηρό, διατηρώντας την αποτελεσματικότητά του. Η επίδραση του νερού αναφέρεται στη διάλυση των χημικών συστατικών ή είναι δυνατή η μείωση της θερμοκρασίας της αντίδρασης σε τέτοιο βαθμό που δεν είναι εφικτή η πραγματοποίησή της ακόμα και αν χαρακτηρίζεται από επάρκεια οξυγόνου (oxygen balanced). Χαρακτηριστική ένδειξη αποτελεί η εκπομπή αερίων σκούρου, κίτρινου χρώματος, που υποδεικνύει ανεπάρκεια εκρηκτικής ισχύος και συχνά προκαλείται από την επίδραση του νερού στην εκρηκτική ύλη. Αυτή η κατάσταση θα μπορούσε να αποφευχθεί με τη χρήση κατάλληλης εκρηκτικής ύλης με υψηλή ανθεκτικότητα σε αυτό.

Οι κατασκευαστές περιγράφουν την ανθεκτικότητα αποδίδοντάς την με τους όρους ως εξαιρετική, καλή, μέτρια και πτωχή. Στην περίπτωση όπου κατά τη διάνοιξη των διατρημάτων εντοπιστεί νερό, τότε είναι απαραίτητη η επιλογή ενός εκρηκτικού με μέτρια ανθεκτικότητα και η πυροδότησή του είναι αναγκαία να γίνει αμέσως μετά την εφαρμογή του. Στην περίπτωση όμως, που μεσολαβήσει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, τότε θα πρέπει να επιλεγεί η ύλη αυτή που χαρακτηρίζεται το ελάχιστο με καλή ανθεκτικότητα. Οι εκρηκτικές ύλες με φτωχή ανθεκτικότητα δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε υγρά διατρήματα. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2.3.1)

παράτιθενται κάποια είδη εκρηκτικών υλών με την αντίστοιχη αντίστασή τους στο νερό.

Πίνακας 2.3.1. Η ανθεκτικότητα των εκρηκτικών υλών στο νερό (National park service handbook 1999)

Είδος εκρηκτικής ύλης	Ανθεκτικότητα στο νερό
Κοκκώδης δυναμίτης	Φτωχή έως καλή
Ζελατινοδυναμίτιδα	Καλή έως εξαιρετική
Πολτώδη μίγματα σε φυσίγγια	Πολύ καλή
Χύμα πολτώδη μίγματα	Πολύ καλή
Χύμα ANFO	Φτωχή
Συσκευασμένο ANFO	Πολύ καλή
Βαρύ ANFO (ανάμιξη ANFO με γαλάκτωμα)	Φτωχή έως πολύ καλή

• Το *επίπεδο των αερίων* που παράγεται κατά την ανατίναξη είναι ένα μέτρο για τον προσδιορισμό των τοξικών αερίων που εκπέμπονται κατά τη διαδικασία αυτή. Το μονοξείδιο του άνθρακα και τα οξείδια του αζώτου αποτελούν δηλητηριώδη αέρια τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την αξιολόγηση του επιπέδου των αερίων. Οι περισσότεροι εμπορικοί τύποι εκρηκτικών χαρακτηρίζονται από μηδενικό ισοζύγιο οξυγόνου (oxygen balance) προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τα αέρια και να βελτιστοποιήσουν την εκπεμπόμενη ενέργεια. Είναι πολύ σημαντικό οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται στις εξορύξεις να παρουσιάζουν μηδενικό ισοζύγιο οξυγόνου, διότι τότε τα προϊόντα της έκρηξης αποτελούνται μόνο από CO₂, H₂O, N₂ τα οποία δεν είναι τοξικά. Σημειώνεται ότι ακόμα και στις περιπτώσεις όπου υφίσταται το ισοζύγιο του οξυγόνου στην πραγματοποίηση της αντίδρασης, εντούτοις, τα τοξικά αέρια μπορεί να προκληθούν λόγω ανεπάρκειας διαμέτρου των διατηρημάτων, μικρής ανθεκτικότητας στο νερό, μη επαρκούς πυροδότησης, μικρού βαθμού περιορισμού (π.χ. βάρος υπερκείμενης στήλης, τρόπος γόμωσης κ.α.).

Αξίζει να αναφερθεί ότι το Ινστιτούτο Κατασκευαστών Εκρηκτικών (Institute of Makers of Explosives-IME), που εδρεύει στις Η.Π.Α., έχει εφαρμόσει μία μέθοδο για την αξιολόγηση του βαθμού εκπομπής των αερίων. Η μέθοδος διεξήχθη σύμφωνα με τη μέθοδο Bichel Gauge, στην οποία προσδιορίστηκε ο αριθμός των κυβικών ποδιών (ft³, 1 ft=0.32 m) εκπομπής τοξικών αερίων ανά 200 γραμμάρια εκρηκτικής ύλης. Αν

ο αριθμός αυτός ήταν μικρότερος από 0.16 ft^3 τοξικών αερίων, τότε το επίπεδο των αερίων αξιολογούνταν με μονάδα (1). Αν κυμαινόταν από $0.16\text{-}0.33 \text{ ft}^3$, τότε αξιολογούνταν ως 2 και στην περίπτωση που η εκπομπή τοξικών αερίων ήταν μεταξύ 0.33 και 0.67 ft^3 , τότε το επίπεδο κατατασσόταν ως 3 (<https://www.ime.org>).

- Οι *θερμοκρασιακές συνθήκες* έχουν αντίκτυπο στην ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης. Οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και η παρατεταμένη έκθεσή της σε αυτές, σκληραίνουν το υλικό επηρεάζοντας την ισχύ του, προκαλώντας δυσκολίες στη χρήση του. Τα πολτώδη μίγματα, αν εκτεθούν σε ψυχρές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στη διαδικασία έναυσής τους. Η συμπεριφορά των μιγμάτων αυτών είναι διαφορετική σε σχέση με τις υπόλοιπες εκρηκτικές ύλες. Κάποια από αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθούν απευθείας ακόμα και αν έχουν εκτεθεί σε θερμοκρασίες όπως -18°C , σε σύγκριση με άλλα τα οποία αν έχουν αποθηκευτεί στους 4°C δεν αποδίδουν. Θα πρέπει να τονιστεί ότι σε γενικές γραμμές, η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της ευαισθησίας της κάθε εκρηκτικής ύλης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτείται πρόσθετη ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας, για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση στο απαιτούμενο σημείο. Πορώδη εκρηκτικά, όπως το ANFO, σε κανονικές θερμοκρασίες που περιέχουν λίγο ή καθόλου υγρό δεν επηρεάζονται από τις χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτά τα εκρηκτικά περιέχουν πολλά μικρά κενά τα οποία δρουν σαν έντονα θερμά σημεία (hot spots) που χρησιμεύουν σαν κέντρα έναυσης της αντίδρασης όταν το ωστικό κύμα φτάσει σε αυτά. Αντιθέτως, οι νιτρογλυκερινικοί δυναμίτες επηρεάζονται ελάχιστα από τις θερμοκρασιακές διαφορές που συναντώνται στις περισσότερες περιοχές εμπορικών εκρήξεων (International Society of Explosives-ISEE).

2.4 Χαρακτηριστικά της απόδοσης των εκρηκτικών υλών

Εκτός από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, απαραίτητο είναι να είναι πλήρως γνωστά τα χαρακτηριστικά των ίδιων των εκρηκτικών υλών που θα χρησιμοποιηθούν για την εκάστοτε εφαρμογή. Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τη συμπεριφορά των εκρηκτικών υλών:

- Η ευαισθησία ως προς την έναυση (*performance sensitivity*) μιας εκρηκτικής ύλης, καθορίζεται από την ελάχιστη ποσότητα ενέργειας, που απαιτείται για να προκληθεί η εκρηκτική αντίδραση, (Konya & Walter 1990). Αλλιώς κάποιες φορές αναφέρεται ως η ελάχιστη ποσότητα ενίσχυσης (*minimum booster*) ή ελάχιστες απαιτούμενες συνθήκες έναυσης (*minimum priming requirements*). Πολλοί είναι οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ευαισθησία της εκρηκτικής ύλης. Για παράδειγμα είναι δυνατό να μειωθεί λόγω επίδρασης του νερού εντός του διατρήματος, μη επαρκούς διαμέτρου γόμωσης, ακραίων θερμοκρασιακών συνθηκών. Η ευαισθησία του υλικού ορίζει τα απαιτούμενα μέσα εναυσματικής γόμωσης, το μέγεθος της εναυσματικής γόμωσης και την εκλυόμενη ενέργεια. Στην περίπτωση όπου η έκρηξη δεν πραγματοποιηθεί επιτυχώς κατά μήκος της γομωμένης στήλης, τότε η ποσότητα των εκπεμπόμενων αερίων αυξάνεται, οι δονήσεις στο έδαφος είναι μεγαλύτερες και εκτινάσσονται τεμάχια σε μεγαλύτερη απόσταση (*flyrocks*).

Επιπλέον, το μέτρο της ευαισθησίας αποτελεί μία ένδειξη της ικανότητας διάδοσης της έκρηξης μεταξύ των φυσιγγίων (*from cartridge to cartridge*), εκφρασμένη ως τη μέγιστη απόσταση διάδοσής της μεταξύ αυτών. Τονίζεται ότι στην περίπτωση όπου εντός του διατρήματος υπάρχει διάκενο, η έκρηξη του διατρήματος μπορεί να διακοπεί σε μία εκρηκτική ύλη με χαμηλή ευαισθησία έναυσης. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η εκρηκτική ύλη είναι υψηλής ευαισθησίας, μπορεί να εκραγεί εάν προκληθεί έκρηξη πλησίον αυτής. Επίσης, η ευαισθησία ως προς την επικινδυνότητα (*hazard sensitivity*) ορίζεται ως η ανταπόκριση μίας εκρηκτικής ύλης στην περίπτωση μίας τυχαίας προσθήκης ενέργειας σε αυτήν. Στον Πίνακα 2.4.1 παρατίθεται η ταξινόμηση των εκρηκτικών υλών ως προς το μέτρο της ευαισθησίας τους τόσο στην ενεργοποίησή τους στα διατρήματα όσο και σε τυχαία έναυσή τους.

Πίνακας 2.4.1. Κατάταξη των εκρηκτικών υλών σε σχέση με την ευαισθησία τους (Konya & Walter 1990)

Είδος εκρηκτικής ύλης	Ευαισθησία ως προς την επικινδυνότητα (hazard sensitivity)	Ευαισθησία ως προς την έναυση (performance sensitivity)
Κοκκώδης δυναμίτης	Μέτρια έως υψηλή	Εξαιρετική
Ζελατινοδυναμίτιδα	Μέτρια	Εξαιρετική
Πολτώδη μίγματα σε φυσίγγια	Χαμηλή	Καλή έως πολύ καλή
Χύμα πολτώδη μίγματα	Χαμηλή	Καλή έως πολύ καλή
Χύμα ANFO	Χαμηλή	Φτωχή έως καλή
Συσκευασμένο ANFO	Χαμηλή	Καλή έως πολύ καλή
Βαρύ ANFO (ανάμιξη ANFO με slurries)	Χαμηλή	Φτωχή έως καλή

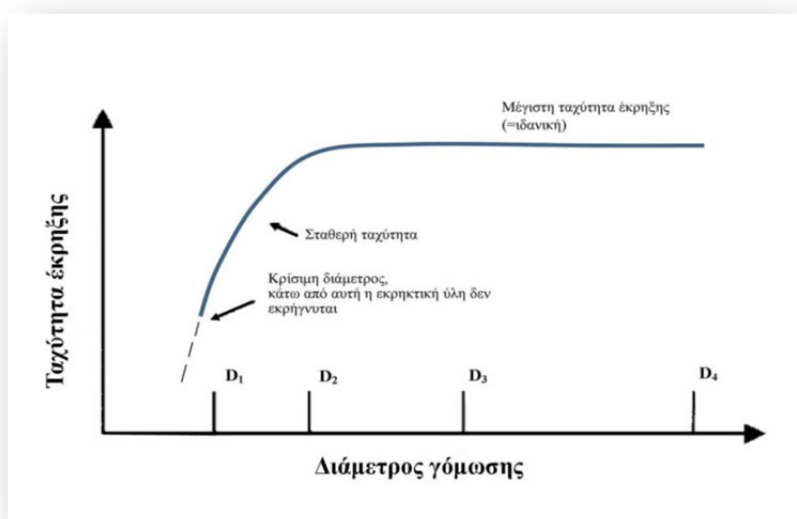
- Η *ταχύτητα (detonation velocity, VOD)* αντίδρασης των εκρηκτικών υλών είναι η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η έκρηξη κατά μήκος του διατρήματος. Η ταχύτητα κυμαίνεται μεταξύ 1525 m/s και 7620 m/s για εμπορικούς τύπους εκρηκτικών. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει τον ρυθμό έκλυσης της χημικής ενέργειας που ορίζεται μέσω της διάδοσης του κρουστικού κύματος κατά μήκος της στήλης. Η ταχύτητα της έκρηξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο για τον προσδιορισμό της επάρκειας και της απόδοσης της έκρηξης στο πεδίο, έπειτα από την ενεργοποίηση της εκρηκτικής ύλης. Για παράδειγμα στην περίπτωση όπου η ταχύτητα της αντίδρασης της εκρηκτικής ύλης είναι μικρότερη από την αναμενόμενη σύμφωνα με τις προδιαγραφές της, τότε αυτό αποτελεί ένδειξη μη ορθής πρακτικής που δεν πληροί τα προσδοκώμενα. Όταν η ταχύτητα της έκρηξης είναι υψηλή, τότε η εκρηκτική ύλη χαρακτηρίζεται από μεγάλη διαρρηκτικότητα και τα κρουστικά φαινόμενα είναι έντονα (ταχύτητα μεγαλύτερη από 5000 m/s), και αυτού του είδους τα εκρηκτικά εφαρμόζονται σε σκληρά πετρώματα.

Από την άλλη πλευρά, όταν η ταχύτητα της έκρηξης είναι χαμηλή τότε τα εκρηκτικά χαρακτηρίζονται από μικρή διαρρηκτικότητα και συνοδεύονται από μία σημαντική ωστική φάση, (ταχύτητα μικρότερη από 2500 m/s). Η διάμετρος του εκρηκτικού ως επί το πλείστον αντιστοιχεί στη διάμετρο του διατρήματος και ανάλογα με το είδος της ύλης η διάμετρος θα επηρεάσει την ταχύτητα έκρηξής του. Στο Σχήμα 2.4.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας της έκρηξης για διάφορους τύπους εκρηκτικών υλών σε σχέση με τη διάμετρο του διατρήματος. Παρατηρείται η σταθερή αύξησή της μέχρι κάποια διάμετρο και στη συνέχεια η περαιτέρω αύξηση του διατρήματος της γομωμένης στήλης δεν επηρεάζει την ταχύτητα της έκρηξής της.

Στον Πίνακα 2.4.2 παρατίθενται οι τύποι εκρηκτικών και η αντίστοιχη ταχύτητα έκρηξής τους για διάφορες διαμέτρους γόμωσης.

Πίνακας 2.4.2. Ταχύτητα έκρηξης για διάφορους τύπους εκρηκτικών σε σχέση με τη διάμετρο γόμωσης (Konya & Walter 1990)

Είδος εκρηκτικής ύλης	Διάμετρος γομωμένης στήλης		
	32 mm	76 mm	229 mm
Κοκκώδης δυναμίτης	2,134-5,791 m/s		
Ζελατινοδυναμίτιδα	3,658-5,791 m/s		
Πολτώδη μίγματα σε φυσίγγια	3,962-5,791 m/s	4,267-5,791 m/s	
Χύμα πολτώδη μίγματα		4,267-5,791 m/s	3,658-5,791 m/s
Χύμα ANFO	1,829-2,134 m/s	3,048-3,353 m/s	4,267-5,572 m/s
Συσκευασμένο ANFO		3,048-3,658 m/s	4,267-5,572 m/s
Βαρύ ANFO (ανάμιξη ANFO με slurries)			3,353-5,791 m/s



Σχήμα 2.4.1. Μεταβολή της ταχύτητας της έκρηξης σε σχέση με την αύξηση της διαμέτρου της γόμωσης (Τσουτρέλης 1997).

- Η *πυκνότητα (density)* της εκρηκτικής ύλης αναφέρεται στην πυκνότητα του μίγματος η οποία ορίζεται από τον κατασκευαστή, καθορίζοντας τη θεωρητική ποσότητά της που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στα διατρήματα. Η πραγματική πυκνότητα (πυκνότητα γόμωσης) ορίζεται με την ποσότητα της ύλης που είναι εφικτό να εισαχθεί εντός συγκεκριμένης διαμέτρου διατρήματος. Η εκτίμηση της καταλληλότητας και αποδοτικότητας του εκρηκτικού πραγματοποιείται σε σχέση με

την πυκνότητα στο διάτρημα, δηλαδή την πυκνότητα γόμωσης. Σε γενικές γραμμές σε πετρώματα υψηλής αντοχής απαιτείται η χρήση εκρηκτικών με μεγάλη πυκνότητα, σε αντίθεση με πετρώματα μικρής αντοχής όπου συνιστάται η χρήση εκρηκτικών με μικρή πυκνότητα. Η πυκνότητα των εκρηκτικών για την εξόρυξη των πετρωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 1.4 g/cm³. Στον Πίνακα 2.4.3 δίνονται οι πυκνότητες για διάφορα είδη εκρηκτικών. Μία εύκολη εμπειρική σχέση εύρεσης της πυκνότητας γόμωσης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (2.4.1) (Konya & Walter 1990).

$$d_e = 0.34 * SG_e * D_e^2 \quad (2.4.1)$$

Όπου,

d_e = πυκνότητα γόμωσης (lb/ft)

SG_e = ειδικό βάρος της εκρηκτικής ύλης

D_e = διάμετρος γομωμένης στήλης (in)

Πίνακας 2.4.3. Η πυκνότητα για τύπους εκρηκτικών υλών
(Konya & Walter 1990)

Είδος εκρηκτικής ύλης	Πυκνότητα (g/cm ³)
Κοκκώδης δυναμίτης	0.8-1.4
Ζελατινοδυναμίτιδα	1.0-1.6
Πολτώδη μίγματα σε φυσίγγια	1.1-1.3
Χύμα πολτώδη μίγματα	1.1-1.6
Χύμα ANFO	0.8-1.0
Συσκευασμένο ANFO	1.1-1.2
Βαρύ ANFO (ανάμιξη ANFO με slurries)	1.1-1.4

- Η *πίεση της έκρηξης (detonation pressure)*, η οποία συνήθως αποδίδεται σε kbar, αποτελεί την ακαριαία, τεράστια πίεση που ασκείται και προέρχεται από τη διάδοση του κρουστικού κύματος (shock wave) μπροστά από τη ζώνη αντίδρασης (reaction zone), κατά μήκος του γομωμένου διατρήματος. Όταν η εκρηκτική ύλη εκρήγνυται απελευθερώνεται αυτή η τεράστια πίεση σε κρουστικό κύμα, το οποίο υφίσταται μόνο για κλάσματα του δευτερολέπτου, προκαλώντας τη σύνθλιψη του πετρώματος. Η κρουστική-θλιπτική αυτή δράση είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των ισχυρών διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών και ονομάζεται θραυστικότητα (brisance).

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η πίεση της έκρηξης μπορεί να συσχετιστεί με την πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του διατρήματος, αλλά χωρίς να είναι

απαραίτητη η ύπαρξη γραμμικής σχέσης μεταξύ τους. Για παράδειγμα, δύο εκρηκτικές ύλες με όμοια πίεση έκρηξης δεν είναι απαραίτητο να αναπτύσσουν ίση πίεση εντός του διατρήματος ή ίση πίεση αερίων. Η πίεση της έκρηξης είναι διαφορετική από την πίεση που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του διατρήματος από τα αέρια, μετά την αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης. Ο βαθμός περιορισμού του εκρηκτικού (π.χ. βάρος υπερκείμενης στήλης) και η θερμοκρασία των εκπεμπόμενων αερίων επηρεάζουν την πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του διατρήματος, (Hartman 1987). Η πίεση της έκρηξης μπορεί να αποδοθεί σε σχέση με την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης, και ως συνάρτηση του τετραγώνου της ταχύτητας της έκρηξης, μέσω της ακόλουθης εξίσωσης (2.4.2) (Bhandari 1997).

$$P = 2.5 * \rho * V^2 * 10^{-6} \quad (2.4.2)$$

Όπου,

P = πίεση έκρηξης (kbars)

ρ = πυκνότητα εκρηκτικής ύλης (g/cm^3)

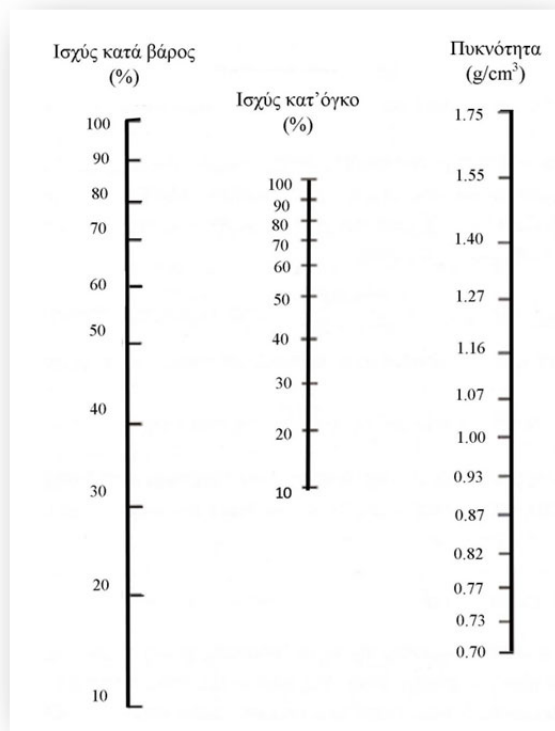
V = ταχύτητα (m/s)

Κατά συνέπεια όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της έκρηξης τόσο μεγαλύτερη είναι η διαρρηκτική ικανότητα της ύλης και για αυτό το λόγο στα σκληρά, συμπαγή πετρώματα χρησιμοποιούνται εκρηκτικά που έχουν υψηλή ταχύτητα έκρηξης (Persson et al. 1994). Στον ακόλουθο πίνακα Πίνακα 2.4.4 δίνονται ενδεικτικά οι τιμές πίεσης της έκρηξης για διάφορους τύπους εκρηκτικών υλών.

Πίνακας 2.4.4. Η πίεση έκρηξης για τύπους εκρηκτικών υλών
(U.S Department of Transportation 1991)

Είδος εκρηκτικής ύλης	Πίεση (kbar)
Κοκκώδης δυναμίτης	20-70
Ζελατινοδυναμίτιδα	70-140
Πολτώδη μίγματα σε φυσίγγια	20-100
Χύμα πολτώδη μίγματα	20-100
Χύμα ANFO	7-45
Συσκευασμένο ANFO	20-60
Βαρύ ANFO (ανάμιξη ANFO με slurries)	20-90

Η *ισχύς (strength)* μίας εκρηκτικής ύλης αφορά την ενέργεια που περιέχει η οποία με τη σειρά της αποτελεί το μέτρο της δύναμης που μπορεί να αναπτύξει και την αποτελεσματικότητάς της κατά τη διαδικασία της έκρηξης. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού της ισχύος όπως η *απόλυτη ισχύς κατά βάρος (absolute weight strength)* που εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που διαθέτει κάθε γραμμάριο εκρηκτικής ύλης ή η *απόλυτη ισχύς κατ'όγκο (absolute bulk strength)*, η οποία εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που διαθέτει κάθε κυβικό εκατοστό της και προκύπτει με πολλαπλασιασμό της απόλυτης ισχύος κατά βάρος με την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης. Επίσης, διακρίνεται η *κατά βάρος σχετική ισχύς (relative weight strength)* και η *κατ'όγκο σχετική ισχύς (relative bulk strength)*. Η κατά βάρος σχετική ισχύς προκύπτει διαιρώντας την απόλυτη ισχύ κατά βάρος της ύλης με την απόλυτη ισχύ κατά βάρος του ANFO και πολλαπλασιάζεται με 100. Ενώ η κατ'όγκο σχετική ισχύς υπολογίζεται διαιρώντας την απόλυτη ισχύ κατ'όγκο με την απόλυτη ισχύ του ANFO και πολλαπλασιάζεται με 100, (U.S Department of Transportation 1991). Το Σχήμα 2.4.2 απεικονίζει το νομόγραμμα απόδοσης της ισχύος είτε κατά βάρος είτε κατ'όγκο σε σχέση με την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.



Σχήμα 2.4.2. Νομόγραμμα μετατροπής της κατά βάρος ισχύος σε κατ'όγκο και αντιστρόφως σε συνάρτηση με τη πυκνότητα (Τσουτρέλης 1997).

Είναι όμως απαραίτητος ο προσδιορισμός όχι μόνο της ενέργειας του ίδιου του εκρηκτικού αλλά και του βαθμού της εκλυόμενης ενέργειας ή θερμότητας, της πίεσης της έκρηξης, της πίεσης των αερίων που παράγονται. Η εύρεση της εκλυόμενης ενέργειας είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω μεθόδους (Persson et al. 1994):

- προσδιορισμός του κρουστικού παλμού και των εκλυόμενων αερίων με τη πραγματοποίηση δοκιμών κάτω από την επιφάνεια του νερού (underwater detonation test)
- προσδιορισμός του κρουστικού παλμού και του τασικού παλμού (strain pulse measurements)
- δοκιμές κρατήρα (crater test)
- θεωρητικός υπολογισμός της ενέργειας (theoretical energy)
- δοκιμές σε υλικά από μόλυβδο (Trauzl lead block test, κ.α.)

Παρόλα αυτά ακόμα και με την εφαρμογή αυτών των μεθόδων δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί η ισχύς της εκρηκτικής ύλης σε όλες της περιπτώσεις εφαρμογής της. Είναι χαρακτηριστικό ότι η ενέργεια που αποδίδεται ποικίλει όχι μόνο μεταξύ των διαφορετικών ειδών εκρηκτικών, αλλά και για το ίδιο εκρηκτικό που εφαρμόζεται σε διαφορετικής διαμέτρου διατρήματα. Για παράδειγμα δυο εκρηκτικές ύλες με τον ίδιο βαθμό ισχύος, δεν αποδίδουν απαραίτητα την ίδια δράση όταν χρησιμοποιηθούν υπό τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.

- Η *συνοχή (cohesiveness)* αποτελεί μία ακόμα χαρακτηριστική ιδιότητα για την εκάστοτε εκρηκτική ύλη και ορίζεται ως η ικανότητά της να διατηρεί την αρχική της μορφή. Σε κάποιες περιπτώσεις η ροή της εκρηκτικής ύλης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπου εντοπίζονται έγκοιλα και ρωγμές στο υπέδαφος, όπου η ροή του της θα πρέπει να είναι περιορισμένη ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική συσσώρευσή της στα συγκεκριμένα σημεία. Αντιθέτως, στα χύδην εκρηκτικά η ροή θα πρέπει να είναι επαρκής για την πλήρη γόμωση του διατρήματος, (Konya & Walter 1990).

2.5 Τύποι εκρηκτικών υλών

Οι εκρηκτικές ύλες διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους: α) στις εμπορικές εκρηκτικές ύλες (commercial explosives), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την απόσπαση πετρωμάτων και β) στις στρατιωτικές

εκρηκτικές ύλες (military explosives), όπως TNT, PETN, RDX, C4, οι οποίες χρησιμοποιούνται για γόμωση εκρηκτικών βλημάτων και στους πυροκροτητές.

Οι εμπορικές εκρηκτικές ύλες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα αντίδρασής τους, τον τρόπο έναυσης και την κύρια εκρηκτική ύλη που περιέχουν. Έτσι λοιπόν, οι δύο κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται είναι οι ακόλουθες, (Bhandari 1997):

1. Οι *βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες* (Low explosives), οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή ταχύτητα έκρηξης, αναπτύσσοντας μικρές πιέσεις και η ενέργειά τους είναι βραδεία και σταδιακή. Η διέγερσή τους πραγματοποιείται με τη θερμότητα προκαλώντας την ανάφλεξή τους. Κατά τη ανάφλεξή τους, η αντίδραση αποσύνθεσης της χημικής ύλης μεταδίδεται από μόριο σε μόριο με ταχύτητα μικρότερη από αυτή του ήχου, συνεχίζοντας με τη γρήγορη καύση της. Η όλη διαδικασία ολοκληρώνεται με την εκρηκτική κατάκαυση (deflagration). Στην κατηγορία αυτή ανήκει η πυρίτιδα, τα προωθητικά πυρομαχικά.

2. Οι *διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες* (High explosives), όπου η αποσύνθεσή της πραγματοποιείται λόγω της εκρηκτικής αντίδρασης, η οποία οφείλεται στη διάδοση του κρουστικού κύματος από καψύλλιο ή εναυσματική γόμωση. Η ταχύτητα στην έκρηξη μετάδοσής τους είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου. Σε αυτή την κατηγορία οι εκρηκτικές ύλες, ανάλογα με τη σύνθεσή τους εκρήγνυνται σε ταχύτητες μεταξύ 1500m/s και 8000m/s, παράγοντας μεγάλες ποσότητες αερίων με, υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Οι διαρρηκτικές ύλες διαχωρίζονται περεταίρω σε δύο ακόμα υποκατηγορίες:

α) *Πρωτεύουσες εκρηκτικές ύλες* (primary explosives). Αποτελούν εκρηκτικά ιδιαίτερα ισχυρά και επικίνδυνα, καθώς εκρήγνυνται με απλή διέγερση (κρούση, τριβή ή φλόγα). Λόγω αυτής της επικινδυνότητάς τους χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως μέσα έναρξης της έκρηξης (πυροκροτητές, θρυαλίδες). Σε αυτή την κατηγορία ανήκει για παράδειγμα ο αζωτούχος μόλυβδος (lead azide), υδράργυρος (mercury fulminate), και άλλες χημικές ουσίες.

β) *Δευτερεύουσες εκρηκτικές ύλες* (secondary explosives). Η έκρηξή τους πραγματοποιείται μόνο υπό την επίδραση του κρουστικού κύματος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν εκρηκτικά για στρατιωτικό σκοπό όπως TNT, RDX, PETN καθώς και συνδυασμοί αυτών και βιομηχανικά εκρηκτικά όπως, νιτρογλυκερίνη, εκρηκτικά γαλακτώματα, πολτώδη μίγματα, ANFO. Η έκρηξή τους πραγματοποιείται με

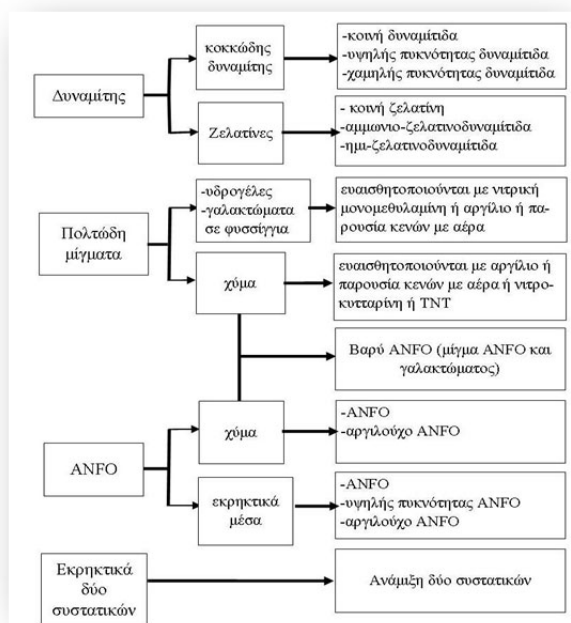
κατάλληλα μέσα έναυσης όπως καψύλια και χρησιμοποιούνται ως κύρια εκρηκτική ύλη που ενεργοποιούνται με την παρουσία κάποιας πρωτεύουσας εκρηκτικής ύλης.

Στον πίνακα που ακολουθεί, Πίνακας 2.5.1 παρουσιάζεται χρονικά η εξέλιξη των εμπορικών εκρηκτικών υλών.

Πίνακας 2.5.1. Η εξέλιξη των εμπορικών εκρηκτικών υλών με την πάροδο των χρόνων (Bhandari 1997)

Έτος	Εξέλιξη των εμπορικών εκρηκτικών υλών
13 ^{ος} αιώνας	Αναφορές για νιτρικό κάλιο και άλλα είδη πυρίτιδας σε Αραβικές και Κινέζικες γραφές
1242	Μαύρη πυρίτιδα από τον Bacon
1846	Νιτρογλυκερίνη από τον Sobrero
1861	Ασφαλής διαχείριση της νιτρογλυκερίνης από τον Alfred Nobel
1866-1875	Κατασκευή εμπορικής δυναμίτιδας και ζελατίνης
δεκαετία του 1880	Έρευνα της δυναμίτιδας
δεκαετία του 1950	Νιτρικό αμμώνιο και άλλες χημικές ουσίες σε στερεή μορφή (ANFO)
1957	Υδρογέλες (νιτρικό αμμώνιο, TNT και αργιλούχο στερεή χημική ουσία)
1964	Γαλακτώματα
1969-1974	Υδρογέλες (νιτρική μονομεθυλαμίνη)
1979-1982	Βαρύ ANFO (ανάμιξη μέχρι 50% γαλακτώμα και ANFO)

Οι εκρηκτικές ύλες οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη γόμωση των διατρημάτων μπορούν να διακριθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες: δυναμίτιδα, γαλακτώματα, ANFO και στο Σχήμα 2.5.1 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση αυτών.



Σχήμα 2.5.1. Ταξινόμηση των εμπορικών εκρηκτικών υλών (U.S Department of Transportation 1991).

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση και η περιγραφή των διαφόρων ειδών εκρηκτικών υλών, που χρησιμοποιούνται στη γόμωση των διατρημάτων για την απόσπαση του πετρώματος (Konya & Walter 1990):

1. Δυναμίτης (Dynamite)

Οι δυναμίτες αποτελούν τις πιο ευαίσθητες εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα και έχουν ως βάση τη νιτρογλυκερίνη. Εξαιτίας της υψηλής ευαισθησίας τους, παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία στη χρήση τους στη γόμωση των διατρημάτων, όπως για παράδειγμα στην παρουσία εγκοίλων ή άλλων παραγόντων, σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη εκρηκτική ύλη. Παρ' όλα αυτά λόγω της ευαισθησίας τους επιδεικνύουν μεγαλύτερη επιρρέπεια σε περίπτωση ατυχήματος και για αυτό το λόγο συνιστάται η απαραίτητη προσοχή στη χρήση της.

Η νιτρογλυκερίνη αποτελεί την πρώτη διαρρηκτική ύλη στον τομέα των εμπορικών εκρηκτικών υλών. Αποτελεί ένα ελαιώδες υγρό με ειδικό βάρος 1.6 και ταχύτητα έκρηξης 7620 m/s. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ευαισθησία στην κρούση, στη τριβή και στη θερμότητα, καθιστώντας την ιδιαίτερα επικίνδυνη. Το 1867 ο Nobel διαπίστωσε ότι η απορρόφηση του υγρού αυτού σε ένα άλλο υλικό, είχε ως αποτέλεσμα την εύκολη διαχείρισή της και τον έλεγχο της ευαισθησίας της στους παραπάνω παράγοντες. Το τελικό αυτό προϊόν αποτέλεσε τη δυναμίτιδα.

Η οικογένεια των δυναμίτιδων χωρίζεται σε δύο κύριες υποκατηγορίες: την κοκκώδη δυναμίτιδα και τις ζελατίνες. Η κοκκώδης δυναμίτιδα αποτελείται από νιτρογλυκερίνη ενώ οι ζελατίνες από ένα μίγμα νιτρογλυκερίνης και νιτροκυτταρίνης, το οποίο το καθιστά ανθεκτικό στο νερό. Η κοκκώδης δυναμίτιδα διαχωρίζεται σε κοινή δυναμίτιδα, υψηλής πυκνότητας δυναμίτιδα και χαμηλής πυκνότητας.

1.α. Κοινή δυναμίτιδα (straight dynamite)

Στην ομάδα της κοκκώδους δυναμίτιδας ανήκει η *κοινή δυναμίτιδα*, με κοκκώδη υφή και παρασκευάζεται από νιτρογλυκερίνη, νιτρικό κάλιο, νιτρικό νάτριο, αντιόξιμες ουσίες και ανθρακούχες ουσίες. Ο όρος κοινή αναφέρεται στο γεγονός ότι η δυναμίτιδα δεν περιέχει νιτρικό αμμώνιο. Η κοινή δυναμίτιδα έχει ομοιότητες με την αρχική που είχε ανακαλύψει ο Alfred Nobel, με τη διαφορά ότι η νιτρογλυκερίνη έχει απορροφηθεί από κυτταρινούχες ουσίες όπως το ροκανίδι αντί της πυριτικής ουσίας “γη των διατόμων”.

1.β. Υψηλής πυκνότητας δυναμίτιδα (high density dynamite)

Η υψηλής πυκνότητας δυναμίτιδα είναι η πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη εκρηκτική ύλη από τη οικογένεια των δυναμίτιδων. Τα χαρακτηριστικά της είναι όμοια με αυτά της κοινής δυναμίτιδας, με τη μόνη διαφορά ότι ένα μέρος της νιτρογλυκερίνης αντικαθίσταται από το νιτρικό αμμώνιο, καθιστώντας την λιγότερο ευαίσθητη στην κρούση και στην τριβή. Επίσης, η ταχύτητα έκρηξης της είναι μικρότερη, εκπέμποντας καλύτερη ποιότητα αερίων. Χρησιμοποιείται ευρέως στα λατομεία, στα υπόγεια ορυχεία, στις κατασκευές και επιδεικνύοντας ικανοποιητική αποτελεσματικότητα σε περιπτώσεις μέτριας αντοχής βράχου και μικρής παρουσίας νερού.

1.γ. Χαμηλής πυκνότητας δυναμίτιδα (low density dynamite)

Η χαμηλής πυκνότητας δυναμίτιδα απεικονίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με την υψηλής πυκνότητας, αλλά μεγαλύτερο τμήμα της νιτρογλυκερίνης αντικαθίσταται από νιτρικό αμμώνιο. Λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς της σε νιτρικό αμμώνιο, η ισχύς της είναι μειωμένη, καθιστώντας την πιο αποτελεσματική σε μικρής αντοχής πετρώματα ή ακόμα και στις περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητός ο περιορισμός της εκλυόμενης ενέργειας στο διάτρημα.

1.1 Ζελατίνες (gelatin dynamite)

Οι ζελατίνες αποτελούν εκρηκτικές ύλες στις οποίες πραγματοποιείται η ζελατινοποίηση της νιτρογλυκερίνης με προσθήκη μικρών ποσοτήτων ειδικής νιτροκυτταρίνης (12.2% άζωτο και είναι ευδιάλυτη στη νιτρογλυκερίνη). Χαρακτηριστικό των ζελατινών είναι η μικρότερη ευαισθησία τους σε σχέση με τις κοκκώδεις δυναμίτιδες και η υψηλότερη ανθεκτικότητα στο νερό. Διαχωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες: την κοινή ζελατίνη, την αμμωνιο-ζελατινοδυναμίτιδα και την ημι-ζελατινοδυναμίτιδα.

1.1.α. Κοινή ζελατίνη (straight gelatin dynamite)

Οι κοινές ζελατίνες περιέχουν νιτρογλυκερίνη και νιτροκυτταρίνη με νιτρικό νάτριο και ανθρακούχες ουσίες. Η ισχύς τους είναι όμοια με αυτή της κοινής δυναμίτιδας και αποτελούν το πιο ισχυρό εκρηκτικό με βάση τη νιτρογλυκερίνη, επιδεικνύοντας υψηλή ανθεκτικότητα σε υγρό περιβάλλον. Χρησιμοποιούνται σε υψηλής αντοχής πετρώματα ή ως κύριο εκρηκτικό στον πυθμένα του διατρήματος.

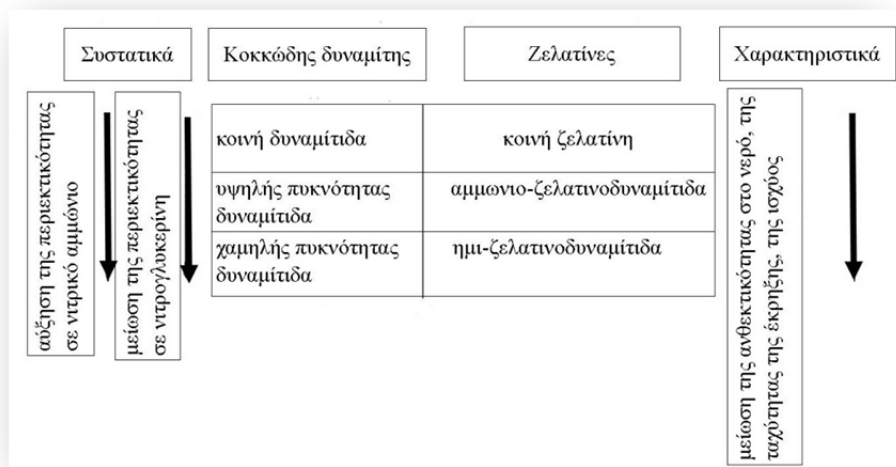
1.1.β. Αμμωνιο-ζελατινοδυναμίτιδα (ammonia gelatin dynamite)

Η αμμωνιο-ζελατινοδυναμίτιδα αποτελεί ένα μίγμα της κοινής ζελατίνης με πρόσθετη ποσότητα νιτρικού αμμωνίου, το οποίο αντικαθιστά μέρος της

νιτρογλυκερίνης. Έτσι λοιπόν, τα κύρια συστατικά της είναι το νιτρικό αμμώνιο, η νιτρογλυκερίνη και το νιτρικό νάτριο. Αποτελεί μία εκρηκτική ύλη με υψηλές τιμές ενέργειας, πυκνότητας και ταχύτητας έκρηξης (6000m/s), με ικανοποιητική αντοχή στο νερό. Η έναυσή της μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν κοινό πυροκροτητή Νο.8. Χρησιμοποιείται ως ένα κατάλληλο εκρηκτικό για την απόσπαση πετρωμάτων με υψηλή αντοχή και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις επιφανειακές και υπόγειες ανατινάξεις είτε ως εναυσματική γόμωση, είτε ως κύριο εκρηκτικό στον πυθμένα του διατρήματος, είτε σε όλο το μήκος του.

1.1.γ. Ημι-ζελατινοδυναμίτιδα (semigelatin dynamite)

Η ημι-ζελατινοδυναμίτιδα σε γενικές γραμμές παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά με αυτά της αμμωνιο-ζελατινοδυναμίτιδας, εκτός από το ότι μεγαλύτερο τμήμα της νιτριγλυκερίνης και της νιτροκυτταρίνης αντικαθίσταται από το νιτρικό αμμώνιο. Σε σύγκριση με τις αμμωνιο-ζελατινοδυναμίτιδες έχουν μικρότερη ανθεκτικότητα στο νερό, αλλά μεγαλύτερη από την κοκκώδη δυναμίτιδα, λόγω της ζελατινοειδούς υφής τους. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα εναυσματικής γόμωσης (primers), (Σχήμα 1.5.2).



Σχήμα 2.5.2. Χαρακτηριστικά των δυναμίτιδων (U.S Department of Transportation 1991).

2. Πολτώδη μίγματα (slurries)

Τα πολτώδη μίγματα αναπτύχθηκαν για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας στο νερό και αποτελούνται από νιτρικό αμμώνιο ή σε συνδυασμό νιτρικό νάτριο ή κάλιο, μία καύσιμη ύλη (sensitizer), η οποία μπορεί να είναι υδρογονάνθρακας ή υδρογονάνθρακας με αργίλιο ή σε άλλες περιπτώσεις ακόμα και TNT ή νιτροκυτταρίνη. Τα slurries μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις

υδρογέλες (slurries/watergels) και τα γαλακτώματα (emulsions). Οι υδρογέλες απαιτούν έναν ευαισθητοποιητή (sensitizer), ενώ τα γαλακτώματα συντίθενται από ένα μίγμα δύο πολύ καλά αναμεμιγμένων ρευστών, τα οποία δεν αντιδρούν μεταξύ τους. Τα γαλακτώματα είναι λίγο διαφορετικά από τις υδρογέλες ως προς τα χαρακτηριστικά τους, αλλά η σύνθεσή τους αποτελείται από τα ίδια συστατικά όπως και η συμπεριφορά τους είναι ίδια εντός του διατρήματος, ενώ σε γενικές γραμμές έχουν υψηλότερη ταχύτητα έκρηξης.

Γενικότερα, τα πολτώδη μίγματα αποτελούνται κατά βάση από μεγάλη ποσότητα νιτρικού αμμωνίου και είναι ανθεκτικά σε υγρό περιβάλλον. Παρόλα αυτά υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μιγμάτων, διαφοροποιούμενα σε σχέση με το είδος του ευαισθητοποιητή που περιέχουν, όπως κόκκους αργιλίου ή TNT και κάθε ένα από αυτό το προϊόν έχει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά ανάλογα με τον σκοπό εφαρμογής του στο πεδίο. Κάποια από αυτά ταξινομούνται ως διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες (high explosives), ενώ άλλα ως εκρηκτικά μέσα (blasting agents) αν δεν εκρήγνυνται με έναν κοινό πυροκροτητή No 8. Συνεπώς, η διαχείριση τους ως προς τη μεταφορά, αποθήκευση και χειρισμό τους είναι διαφορετική. Ένα πλεονέκτημά τους αποτελεί η εύκολη μεταφορά τους ξεχωριστά στο πεδίο εφαρμογής, καθώς δεν εκρήγνυνται μέχρι την ανάμιξή τους με άλλη εκρηκτική ύλη στο διάτρημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη του τομέα των εκρηκτικών, αναβαθμίστηκε η παρασκευή των slurries, σταθεροποιώντας τη δομή τους, επιτυγχάνοντας την καλύτερη σύνδεση των μορίων του μίγματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πραγματοποιείται καλύτερη ισορροπία μεταξύ των συστατικών, και να αυξάνεται η σταθερότητα του πολτού και κατά συνέπεια η ανθεκτικότητά του στο νερό (Κουλαλής 2003). Τα πολτώδη μίγματα διακρίνονται σε αυτά που είναι εντός φυσιγγίων και σε αυτά που είναι χύδην.

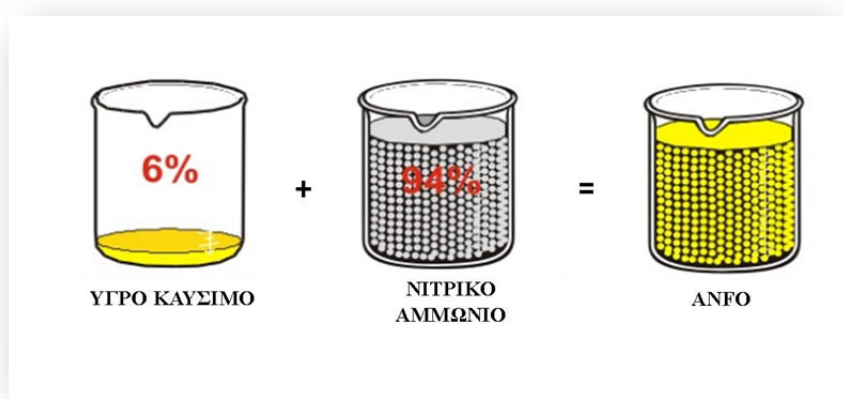
Τα πολτώδη μίγματα σε φυσίγγια ευαισθητοποιούνται με νιτρική μονομεθυλαμίνη ή με την παρουσία κενών με αέρα στα γαλακτώματα. Η παρουσία φυσαλίδων αέρα επιτυγχάνεται με την προσθήκη ευαισθητοποιητών πολύ μικρών διαστάσεων, κενά υάλινα σφαιρίδια (microballoons) ή ορυκτά προϊόντα που περιέχουν φυσαλίδες (vesicular mineral products). Οι τεχνητές αυτές φυσαλίδες λειτουργούν ως θερμά σημεία εντός του μίγματος. Πιο συγκεκριμένα, οι φυσαλίδες συμπιέζονται από τη διέλευση του εκρηκτικού μίγματος, προκαλώντας τη άνοδο της θερμοκρασίας και τελικά την έκρηξη της περιβάλλουσας εκρηκτικής ύλης. Από την άλλη πλευρά, τα χύδην πολτώδη μίγματα ευαισθητοποιούνται με τρεις μεθόδους: με

παρουσία φυσαλίδων, με την προσθήκη κοκκώδους αργιλίου, νιτροκυτταρίνης ή TNT. Τα μίγματα τα οποία περιέχουν αργίλιο και ευαισθητοποιητές υψηλής εκρηκτικής ικανότητας χρησιμοποιούνται για την απόσπαση σκληρών πετρωμάτων.

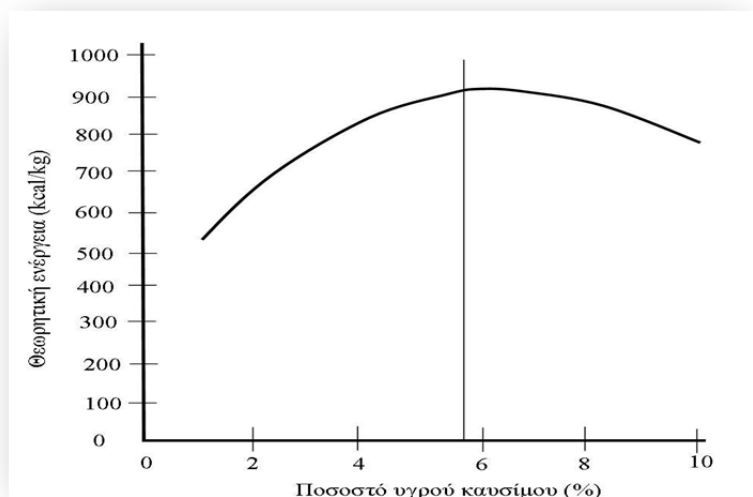
3. ANFO (ammonium nitrate & fuel oil)

Το ANFO αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες εκρηκτικές ύλες και χρησιμοποιείται για τη χύδην γόμωση των διατρημάτων, στα λατομεία και στα ορυχεία. Αποτελεί ένα χαμηλού κόστους εκρηκτικό το οποίο είτε μεταφέρεται στο μέτωπο της ανατίναξης συσκευασμένο σε σακιά είτε με τα ειδικά οχήματα, τις λεγόμενες ανφονιέρες.

Η παρασκευή του για την βέλτιστη, επαρκή ενεργειακή απόδοσή του επιτυγχάνεται με την ανάμιξη 94% πορώδους νιτρικού αμμωνίου (NH_4NO_3) και 6% πετρελαίου diesel (CH_2), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.3. Το διάγραμμα στο Σχήμα 1.5.4 απεικονίζει την επίδραση στη θεωρητική ενέργεια (theoretical energy), (δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της θερμότητας των παραγόμενων προϊόντων της έκρηξης και της θερμότητας των συστατικών του ίδιου του εκρηκτικού), με διαφορετικά ποσοστά υγρού καυσίμου, στο ANFO.



Σχήμα 2.5.3. Παράγοντες σύνθεσης βέλτιστου ANFO (Surface Blasting Handbook 2014).



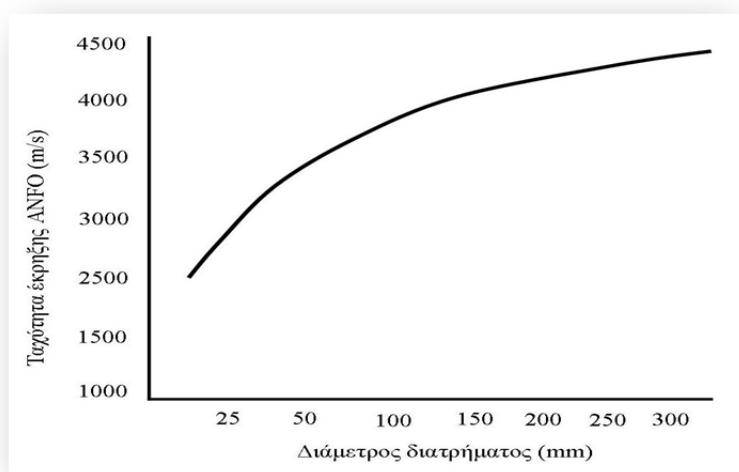
Σχήμα 2.5.4. Διάγραμμα μεταβολής της ενέργειας απόδοσης του ANFO σε σχέση με το περιεχόμενο υγρό καύσιμο (Bhandari 1997) .

Κατά την έκρηξή του παράγονται μεγάλες ποσότητες αερίων, που είναι ικανά να προκαλέσουν τη μετακίνηση του πετρώματος από το μέτωπο. Το υγρό καύσιμο που χρησιμοποιείται έχει αποδειχτεί ότι είναι ιδανικό ως προς την ανάμιξή του με το νιτρικό αμμώνιο, παράγοντας ένα ομοιόμορφο μίγμα που απορροφάται πλήρως από τους κόκκους. Οι κόκκοι είναι τόσο ανθεκτικοί ώστε να μην προκαλείται η θραύση τους στη μεταφορά αλλά και όσο μαλακοί χρειάζεται για την επίτευξη της βέλτιστης πυκνότητας γόμωσης κατά την πλήρωση των διατρημάτων. Επίσης, το σφαιρόμορφο πορώδες νιτρικό αμμώνιο (porous prilled ammonium nitrate), έχει πορώδη υφή, υψηλής απορροφητικότητας, ώστε να συγκρατεί το υγρό καύσιμο στην επιφάνεια του κάθε κόκκου. Η αντίδραση η οποία λαμβάνει χώρα ($94\% \text{NH}_4\text{NO}_3$ και $6\% \text{CH}_2$), με τα αντίστοιχα παραγόμενα προϊόντα, παρουσιάζεται στη χημική αντίδραση που ακολουθεί: $3\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CH}_2 \longrightarrow 7\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 3\text{N}_2$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη βέλτιστη αντίδραση που μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηδενικό ισοζύγιο οξυγόνου (oxygen balanced), καθώς κανένα από τα παραγόμενα προϊόντα δεν είναι δηλητηριώδες. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η χημική αντίδραση χαρακτηρίζεται από έλλειψη οξυγόνου, τότε παράγεται το δηλητηριώδες αέριο του μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Στην περίπτωση όπου στη χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα περίσσεια οξυγόνου, τότε παράγονται νιτρώδη οξείδια τα οποία με την έκθεσή τους στην ατμόσφαιρα σχηματίζουν τα τοξικά αέρια, οξείδια του αζώτου (NO_2). Η παρουσία αερίων πορτοκαλί χρώματος στην ανατίναξη με χρήση ANFO, είναι ενδεικτικό της έλλειψης υγρού καυσίμου στην εκρηκτική ύλη.

Επίσης, αυτού του είδους αέρια αν εμφανιστούν στην περίπτωση ορθής μίξης της εκρηκτικής ύλης, τότε η εκρηκτική ύλη έχει απορροφήσει νερό εντός του διατρήματος (Bhandari 1997).

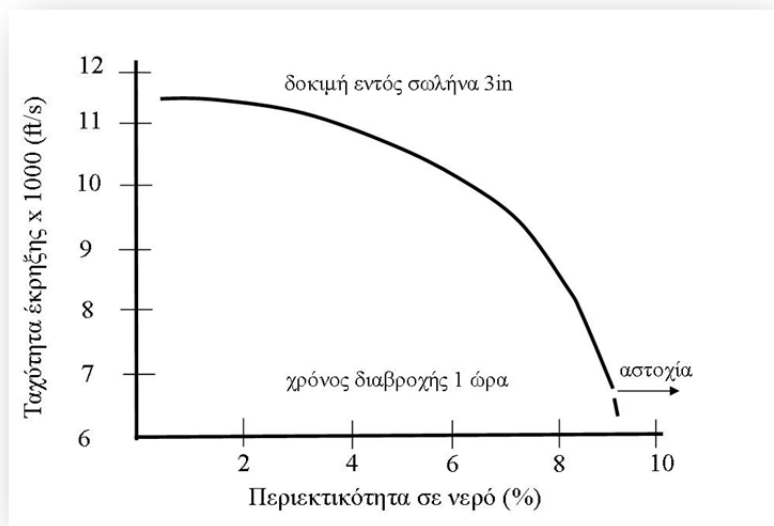
Η διάμετρος του διατρήματος παίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα της έκρηξης του ANFO. Καθώς η διάμετρος αυξάνεται, η ταχύτητα της εκρηκτικής ύλης αυξάνεται, (Σχήμα 2.5.5). Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα η ταχύτητά του κυμαίνεται από 2500 m/s για διάμετρο 20 mm έως 4500 m/s για διάμετρο 300 mm. Επίσης, κατά μήκος της γόμωσης του διατρήματος, ιδιαίτερα στις μικρές διαμέτρους, παρατηρείται σταδιακή μείωση της ταχύτητας της έκρηξης, όσο αυξάνεται η απόσταση από το σημείο έναυσής του (πυθμένας του διατρήματος) (Παναγιώτου 2014). Η κρίσιμη διάμετρος του ANFO είναι στα 50mm, καθώς σε μικρότερη διάμετρο από αυτή η ταχύτητά του μειώνεται, όπως και η αποδοτικότητά του. Η ποιότητά του, που συνήθως εκφράζεται μέσω της τιμής της ταχύτητας της έκρηξης, ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος, το πορώδες και την καθαρότητα των κόκκων του νιτρικού αμμωνίου. Πιο συγκεκριμένα η ταχύτητα έκρηξής του και η ευαισθησία του αυξάνονται καθώς μειώνεται το μέγεθος των κόκκων (Bhandari 1997).



Σχήμα 2.5.5. Η ταχύτητα έκρηξης ANFO έναντι της διαμέτρου του διατρήματος (Bhandari 1997).

Ένα βασικό μειονέκτημα του ANFO αποτελεί η έλλειψη ανθεκτικότητας σε υγρό περιβάλλον, καθώς αυτό διαλύεται στο νερό. Η ισχύς και η ταχύτητα έκρηξής του μειώνονται, και συγκεκριμένα αποτυγχάνει η απόδοσή του με παρουσία νερού μεγαλύτερη από 9%. Όσο μεγαλύτερη είναι η έκθεσή του στο νερό τόσο πιο επιζήμια είναι η επίδραση πάνω σε αυτό. Στο Σχήμα 2.5.6 απεικονίζεται η επίδραση της

περιεκτικότητας του ANFO σε νερό, στην ταχύτητα έκρηξής του. Η επίδραση του νερού με περιεκτικότητα 4% στην εκρηκτική ύλη προκαλεί μικρή μείωση της ταχύτητάς του, ενώ η περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό, μειώνει αισθητά την ταχύτητά του. Είναι εμφανές ότι η επιπρόσθετη έκθεση του ANFO σε υγρό περιβάλλον (μεγαλύτερη από 9%), οδηγεί σε αδρανοποίησή του.

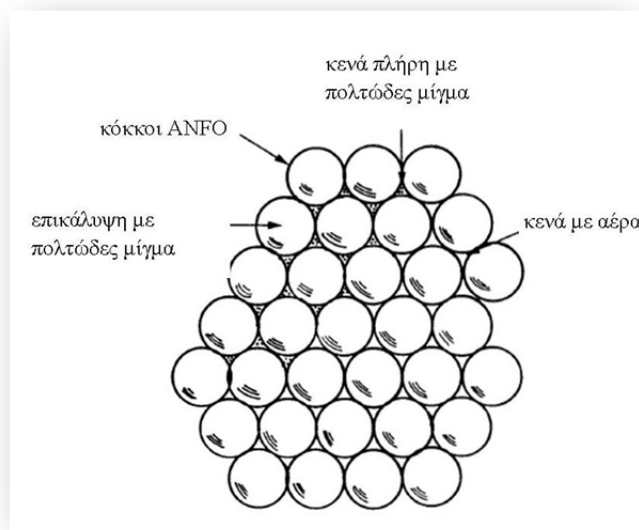


Σχήμα 2.5.6. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας έκρηξης του ANFO σε σχέση με την περιεκτικότητά του σε νερό (Clark 1987).

4. Βαρύ ANFO (Heavy ANFO ή H-ANFO)

Το βαρύ ANFO αποτελεί μίγμα νιτρικού αμμωνίου, υγρού καυσίμου με πολτώδη μίγματα (slurries). Τα βασικό πλεονέκτημα αυτής της εκρηκτικής ύλης είναι ότι εκτός της αύξησης της ισχύος του ANFO, το καθιστά και ανθεκτικό στην παρουσία νερού εντός του διατρήματος. Είναι δυνατή η επί τόπου γρήγορη ανάμιξη των συστατικών του και έπειτα η άμεση γόμωση του διατρήματος. Η μέγιστη και αποτελεσματική απόδοσή του έναντι της ανθεκτικότητας στο υγρό περιβάλλον, επιτυγχάνεται με την προσθήκη τουλάχιστον 50% πολτώδους μίγματος. Από οικονομικής άποψης το πλεονέκτημα είναι η εκμετάλλευση της υψηλής πυκνότητας και της ανθεκτικότητας στο νερό των slurries και παράλληλα το χαμηλό κόστος του ANFO (Poole 1987, Daubney 1988). Εν τούτοις, η τιμή του αυξάνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητά του σε πολτώδη μίγματα. Στο μίγμα νιτρικού αμμωνίου με το υγρό καύσιμο υπάρχει ένα σύνολο κενών με αέρα περίπου 50%, από το οποίο 30% βρίσκεται εντός των κόκκων και 70% μεταξύ των κόκκων. Ο υπάρχων αέρας στους

κόκκων παρέχει την απαραίτητη ευαισθησία στην έναυση αλλά ο αέρας μεταξύ αυτών είναι μη αποδοτικός. Αυτός ο κενός χώρος εάν πληρωθεί με το υψηλής πυκνότητας και ανθεκτικότητας στο νερό πολτώδες μίγμα, τότε θα προκύψει ένα μίγμα καλύπτοντας τις απαραίτητες ανάγκες στη γόμωση των διατρημάτων στο μέτωπο, (Σχήμα 2.5.7).

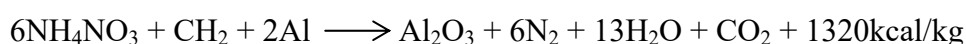


Σχήμα 2.5.7. Δομή του βαρύ ANFO (Bhandari 1997).

Η ισχύς ως προς την ανθεκτικότητα στο νερό και η πυκνότητα του H-ANFO, προσαρμόζεται ανάλογα με το ποσοστό του πολτώδους μίγματος που προστίθεται στο μίγμα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με προσθήκη 10% slurry τότε δεν υπάρχει καμία ανθεκτικότητα του μίγματος στο νερό. Με προσθήκη 30% slurry, τότε η αντίσταση στη διαβροχή του χαρακτηρίζεται ως μέτρια, ενώ με μέγιστη προσθήκη της τάξης του 50% στο μίγμα, τότε παρέχεται μία εξαιρετική αδιαβροχοποίηση του βαρύ ANFO, (Brulia 1985).

5. Αργιλούχο ANFO (Aluminized ANFO ή AL-ANFO)

Η προσθήκη αλουμινίου υπό μορφή σκόνης στο ANFO αυξάνει την ισχύ του καθιστώντας το ικανό να αποσπά πετρώματα υψηλής αντοχής. Η αντίδραση η οποία λαμβάνει χώρα με προσθήκη 9.9% αργιλίου σε μίγμα περιεκτικότητας 87.6% νιτρικό αμμώνιο και 2.5% υγρό καύσιμο είναι η ακόλουθη (Thornely & Aldert 1981):



Η υψηλή εκπεμπόμενη ενέργεια της έκρηξης οφείλεται στην υψηλή θερμότητα αντίδρασης που εκπέμπει ο σχηματισμός του οξειδίου του αργιλίου.

Σημειώνεται, ότι η χαλαρή πυκνότητα του AL-ANFO αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της περιεκτικότητας σε αργίλιο, όπως το ίδιο συμβαίνει και με την αντίστασή του στη διαβροχή. Η ανθεκτικότητά του στο νερό δεν είναι καλύτερη από αυτή του ANFO. Η πιο κοινή περιεκτικότητα σε αργίλιο εντός του μίγματος κυμαίνεται μεταξύ 10 % και 15% (Thornely & Aldert 1981). Τέλος, αναφέρεται ότι το αργίλιο διατίθεται σε κοκκώδη μορφή, σε μορφή πούδρας, σε επικαλυπτόμενους κόκκους και σε φυλλώδη μορφή.

6. Εκρηκτική ύλη δύο συστατικών (two component or binary explosives)

Οι εκρηκτικές ύλες δύο συστατικών αποτελούνται από δύο ξεχωριστά χημικά συστατικά, από τα οποία κανένα δεν αποτελεί από μόνο του εκρηκτικό υλικό. Συνήθως αυτού του είδους εκρηκτικά δεν ταξινομούνται άμεσα στις εκρηκτικές ύλες, (Konya & Walter 1990) και είναι δυνατή η μεταφορά και η αποθήκευσή τους ως μη εκρηκτικές ύλες. Στις εμπορικές ύλες, τα εκρηκτικά δύο συστατικών είναι αποτέλεσμα ανάμιξης κονιορτοποιημένου νιτρικού αμμωνίου και νιτρομεθανίου, τα οποία είναι σε ξηρή μορφή, πράσινου ή κόκκινου χρώματος. Τα συστατικά αυτά μεταφέρονται στο πεδίο και αναμιγνύεται η ποσότητα που είναι απαραίτητη για χρήση. Μετά την ανάμιξή τους αποκτούν ευαισθησία στην έναυση. Οι εκρηκτικές ύλες δύο συστατικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται ο δυναμίτης ή τα πολτώδη μίγματα.

2.6 Η ασφάλεια μεταφοράς και χρήσης των εκρηκτικών υλών

Η μεταφορά των εκρηκτικών υλικών υπόκειται σε αυστηρούς περιορισμούς που αναφέρονται στα μεταφορικά μέσα, τις επιτρεπόμενες διαδρομές και τη διαδικασία προστασίας. Ενδιαφέροντες και λεπτομερείς κανονισμούς για τη μεταφορά εκρηκτικών υλών έχει εκδώσει το Υπ. Μεταφορών των ΗΠΑ, το οποίο και έχει συντάξει κατάλογο ορισμένων πολύ επικίνδυνων εκρηκτικών, των οποίων έχει απαγορευθεί η μεταφορά, όπως ενδεικτικά αναφέρονται η υγρή νιτρογλυκερίνη και ο δυναμίτης (όταν περιέχει πάνω από 60% υγρό εκρηκτικό συστατικό). Η πιο συνηθισμένη αιτία ατυχημάτων κατά την μεταφορά είναι η έναρξη. Οι πυρκαγιές των ελαστικών είναι αρκετά συχνές και αντιπροσωπεύουν ένα κίνδυνο, ο οποίος είναι δύσκολο να ελεγχθεί, γιατί ο οδηγός του αυτοκινήτου συχνά δεν αντιλαμβάνεται την πυρκαγιά, παρά μόνο όταν προχωρήσει αρκετά.

Οι πυροκροτητές δεν συνίστανται να φορτώνονται απευθείας σ' ένα φορτηγό, το οποίο μεταφέρει ισχυρά εκρηκτικά ή μέσα ανατίναξης. Το Ινστιτούτο

Κατασκευαστών Εκρηκτικών των ΗΠΑ (Institute of Makers of Explosives-IME) πραγματοποίησε δοκιμές που έδειξαν, ότι η μεταφορά πυροκροτητών σ' ένα ξεχωριστό διαμέρισμα του φορτηγού μπορεί να γίνει με ανεκτή ασφάλεια. Αναφέρεται επίσης, ότι το ασφαλέστερο μεταφορικό μέσο θεωρείται το τρένο, γιατί μειώνει τους κινδύνους έκρηξης πυρκαγιάς. Το Υπ. Μεταφορών των ΗΠΑ κατατάσσει τα εκρηκτικά υλικά του εμπορίου, σε τρεις κατηγορίες (Α', Β' και Γ) για να καθορίσει τους όρους ασφάλειας κατά τις μεταφορές τους. Η βιομηχανία γενικά έχει αποδεχθεί αυτό το σύστημα κατάταξης, γιατί ανταποκρίνεται περίπου στο βαθμό επικινδυνότητας τους κατά τη διακίνηση, και μεταφορά. Οι κατηγορίες Α', Β' και Γ χαρακτηρίζουν τα εκρηκτικά υλικά αναφέροντας τα κατά σειρά μείωσης της ευαισθησίας τους.

Εκρηκτικά κατηγορίας Α': Τα εκρηκτικά αυτής της κατηγορίας ενέχουν το μέγιστο κίνδυνο εκπυρσοκρότησης. Η κατηγορία Α' περιλαμβάνει το δυναμίτη, μη ευαισθητοποιημένη νιτρογλυκερίνη, μαύρη πυρίτιδα, καψύλια έκρηξης και ορισμένα άκαπνα προωθητικά.

Εκρηκτικά κατηγορίας Β': Τα εκρηκτικά αυτής της κατηγορίας ενέχουν μεγάλο κίνδυνο ανάφλεξης και περιλαμβάνουν τα περισσότερα προωθητικά υλικά. Θεωρούνται όμως λιγότερο επικίνδυνα από τα εκρηκτικά της κατηγορίας Α'.

Εκρηκτικά κατηγορίας Γ: Περιλαμβάνονται βιομηχανοποιημένα αντικείμενα, τα οποία περιέχουν περιορισμένες ποσότητες εκρηκτικών κατηγορίας Α' και Β', σαν ένα από τα συστατικά τους. Η κατηγορία Γ' περιλαμβάνει υλικά, όπως καλώδια πυροδότησης, εκρηκτικούς ήλους κλπ. Τα εκρηκτικά της κατηγορίας Γ' δεν εκπυρσοκροτούν ομαδικά σε συνθήκες πυρκαγιάς.

Τα μέσα ανατίναξης, αν και είναι εκρηκτικά υλικά, δεν περιλαμβάνονται στο παραπάνω σύστημα κατάταξης. Γενικά θεωρούνται ασφαλέστερα από τα εκρηκτικά των κατηγοριών Α', Β' και Γ', αφού ακόμα και αν αναφλέγουν κανονικά λειτουργούν παρόμοια με τα εκρηκτικά κατηγορίας Α'. Γενικά, τα μέσα ανατίναξης καίγονται χωρίς να προκαλούν εκπυρσοκρότηση.

Τα εκρηκτικά που αποτελούνται από δύο ομάδες συστατικών υλικών, έχουν δύο προσυσκευασμένα χημικά είδη, (οξειδωτικές ουσίες ή στερεά), που το κάθε ένα μόνο του δεν κατατάσσεται στα εκρηκτικά. Όταν όμως συνδυαστούν, το μίγμα κατατάσσεται στα εκρηκτικά και επομένως αποθηκεύεται, μεταφέρεται και διακινείται ως εκρηκτικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ

3.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης, εντός των διατρημάτων, λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις, οι οποίες παράγουν μεγάλες ποσότητες αερίων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Το κύριο χαρακτηριστικό της ανατίναξης είναι η παραγωγή μεγάλης ποσότητας ενέργειας στη μονάδα του χρόνου, ασκώντας ισχυρές πιέσεις στα τοιχώματα των διατρημάτων, προκαλώντας τεράστιες παραμορφώσεις.

Ο Γάλλος μηχανικός Marquis Vauban πριν 400 χρόνια περίπου, διαπίστωσε ότι η θραύση του πετρώματος προκύπτει λόγω του τεράστιου όγκου αερίων που παράγονται κατά τη διάρκεια της ανατίναξης. Αργότερα, η άποψη αυτή τροποποιήθηκε μερικώς τη δεκαετία του 1950 από τους Duvail & Atchison 1957 και τον Hino 1959, οι οποίοι διατύπωσαν την άποψη ότι η θραύση του πετρώματος προκύπτει κυρίως από την ανάκλαση του κρουστικού κύματος, το οποίο διαδίδεται σφαιρικά στο γομωμένο διάτρημα.

Παρόλα αυτά, μέσα στα επόμενα χρόνια διαπιστώθηκε ότι ο συνδυασμός της δράσης των μεγάλων πιέσεων και του κρουστικού κύματος, είναι αυτός που επιδρά καταλυτικά στην απόσπαση του πετρώματος από το μέτωπο. Πολλές είναι οι θεωρίες οι οποίες αναπτύχθηκαν για να περιγράψουν το φαινόμενο της θραύσης υπό την επίδραση της έκρηξης. Ωστόσο, η τελική άποψη η οποία επικράτησε ήταν ότι ο μηχανισμός ο οποίος λαμβάνει χώρα προκύπτει από έναν συνδυασμό φαινομένων, τα οποία πραγματοποιούνται περιμετρικά του διατρήματος. Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η συμπεριφορά του πετρώματος υπό τις τάσεις που αναπτύσσονται στην έκρηξη, σχετίζεται με το είδος του πετρώματος καθώς και από το είδος της εκρηκτικής ύλης.

3.2 Ο μηχανισμός της κατάκαυσης και της έκρηξης

Μία πάρα πολύ γρήγορη καύση, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, χαρακτηρίζεται ως έκρηξη. Στην καύση αυτής της μορφής οι χημικές ενώσεις αποσυντίθενται ακαριαία, απελευθερώνοντας θερμότητα, με ταυτόχρονο σχηματισμό μεγάλης ποσότητας αερίων. Η αποσύνθεση αυτή επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: α) με ανάφλεξη ή αλλιώς κατάκαυση, η οποία θεωρείται επιταχυνόμενη καύση της εκρηκτικής ύλης, η οποία προκαλείται από τη θέρμανσή της και β) η έκρηξη, η οποία είναι η γρήγορη αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης και είναι δυνατόν να προκληθεί με απλή μηχανική ενέργεια. Και οι δύο αποτελούν δύο ταχύτατες εξώθερμες χημικές αντιδράσεις, που η διαφορά τους έγκειται στις διαφορετικές ταχύτητες με τις οποίες πραγματοποιούνται. Στην περίπτωση της κατάκαυσης η αντίδραση λαμβάνει χώρα με ταχύτητα μερικών εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο, ενώ στη δεύτερη περίπτωση με ταχύτητα μερικών χιλιάδων μέτρων το δευτερόλεπτο.

Ο μηχανισμός της κατάκαυσης

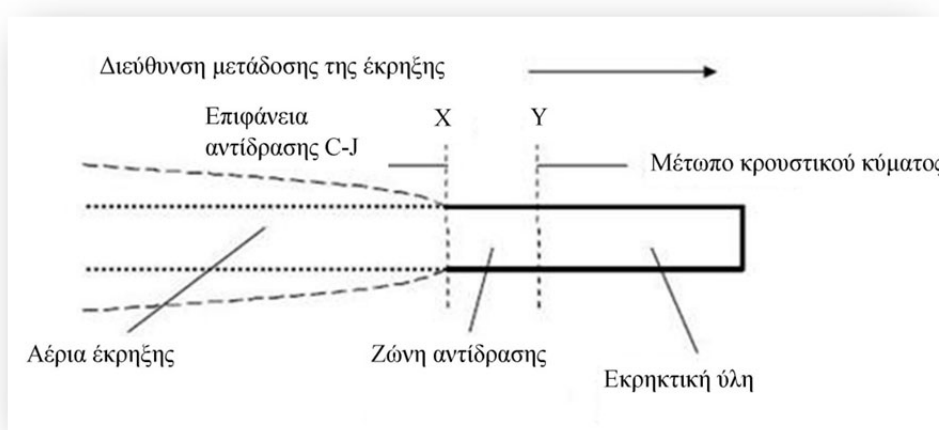
Οι βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες, όπως η μαύρη πυρίτιδα, όταν διεγερθούν με τοπική αύξηση της θερμοκρασίας τους, οδηγούνται σε μία αντίδραση της καύσης η οποία λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια των κόκκων της εκρηκτικής ύλης. Η αντίδραση πραγματοποιείται με σχετικά βραδύ ρυθμό, καθώς απαιτείται αύξηση της θερμοκρασίας της εκρηκτικής ύλης. Μέρος της θερμότητας, μεταφέρεται τόσο προς το εσωτερικό των κόκκων όσο και προς τους γειτονικούς κόκκους και προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας τους, με αποτέλεσμα να συνεχίζεται η κατάκαυση σε νέες επιφάνειες της εκρηκτικής ύλης. Επειδή η κατάκαυση είναι ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια των κόκκων, είναι προφανές ότι η ταχύτητά της εξαρτάται από το μέγεθος της επιφάνειας των κόκκων. Έτσι οι λεπτόκοκκες βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα κατάκαυσης, επειδή έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια κόκκων, σε σύγκριση με τις χονδροκόκκες (Κουλάλης 2003).

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ταχύτητα κατάκαυσης της μαύρης πυρίτιδας χωρίς περιορισμό, στο επίπεδο της θάλασσας, είναι της τάξεως των 0.6 m/s ενώ όταν περιοριστεί σε χαλύβδινο σωλήνα ανέρχεται σε 600 m/s. Την ιδιότητα αυτή αξιοποιούμε στην εξόρυξη των πετρωμάτων. Η γόμωση της μαύρης πυρίτιδας όντας περιορισμένη στα διατρήματα αναπτύσσει μεγάλη ταχύτητα κατάκαυσης και παράγει σε ελάχιστο χρόνο μεγάλες ποσότητες αερίων προϊόντων, τα οποία ευρισκόμενα υπό

πίεση ωθούν το πέτρωμα προς τις ελεύθερες επιφάνειες του μετώπου εξόρυξης και το θραύουν κατά μήκος προϋπαρχόντων στην μάζα του πετρώματος ρωγμών. Για αυτό τον λόγο άλλωστε, η μαύρη πυρίτιδα χρησιμοποιείται στην εξόρυξη των διακοσμητικών λίθων, όπου δεν επιθυμείται η δημιουργία ρωγμών, πέραν των φυσικών, στον εξορυσσόμενο όγκο (Παναγιώτου 2014).

Ο μηχανισμός της έκρηξης

Η έκρηξη (detonation) πραγματοποιείται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα της αντίδρασης της εκρηκτικής ύλης και λαμβάνει χώρα στις διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες. Στην έκρηξη λαμβάνει χώρα η αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης λόγω της διάδοσης του κρουστικού κύματος (shock wave) κατά μήκος της γόμωσης, με ταχύτητα τουλάχιστον ίση με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου, δηλαδή τουλάχιστον 1500m/s. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.1 η γόμωση διεγείρεται με τη βοήθεια ενός κρουστικού κύματος, που είναι δυνατό να προέρχεται από καψύλλιο ή μία εναυσματική γόμωση. Η διέγερση αυτή βασίζεται στη θεωρία της καύσης του κόκκου (Eyring et al. 1949), σύμφωνα με την οποία η αντίδραση ξεκινάει από την επιφάνεια του κόκκου της εκρηκτικής ύλης και προχωράει προς το εσωτερικό της. Η εκρηκτική αντίδραση, λοιπόν, επιτυγχάνεται μέσω των θερμών σημείων (hot spots), τα οποία δημιουργούνται με τη διέλευση του κρουστικού κύματος εντός αυτής. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πολτώδη μίγματα, λόγω της υγρής φύσης του υλικού δεν διαθέτουν κενά, τα οποία όμως δημιουργούνται με τεχνητό τρόπο (προσθήκη φυσαλίδων).



Σχήμα 3.2.1. Το φαινόμενο της μετάδοσης της έκρηξης σε κυλινδρική γόμωση (Sharma 2012).

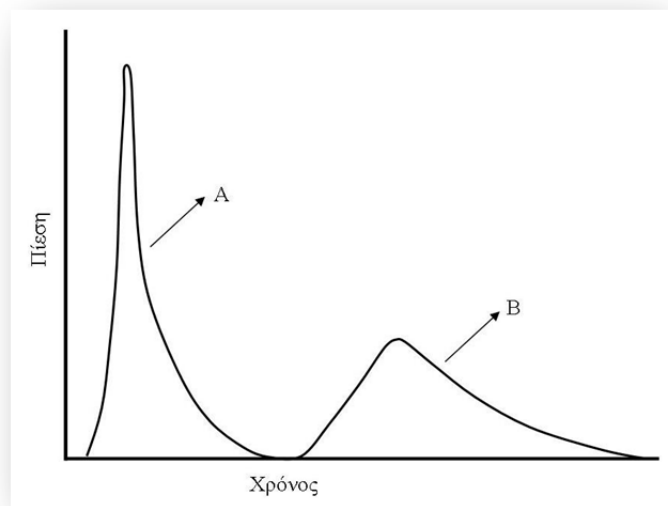
Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.1 κατά τη διαδικασία της έκρηξης, η εκρηκτική ύλη μετατρέπεται σε μία διάπυρη μάζα, υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Η έκρηξη οδεύει μέσω της εκρηκτικής ύλης ως κρουστικό κύμα. Στην πραγματικότητα όμως δεν πρόκειται για ένα κύμα με μία συχνότητα, αλλά για ένα μέτωπο κρούσης, του οποίου η ταχύτητα μετάδοσης εξαρτάται από την ενέργεια διέγερσης. Το κρουστικό κύμα ακολουθείται από μία λεπτή ζώνη αντίδρασης, στην οποία λαμβάνει χώρα μία εξώθερμη χημική αποσύνθεση που επέρχεται μεταξύ των μορίων ενός σώματος (απλές εκρηκτικές ύλες) ή μεταξύ των στοιχείων μίγματος σωμάτων (σύνθετες εκρηκτικές ύλες). Το πάχος αυτής εξαρτάται από το είδος της εκρηκτικής ύλης, από την ταχύτητα της χημικής αντίδρασης και την πυκνότητα γόμωσης. Στο μέτωπο της ζώνης αποσύνθεσης κυριαρχούν συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Η ζώνη αυτή ορίζεται εμπρός από το μέτωπο του κρουστικού κύματος και πίσω από την επιφάνεια αντίδρασης. Με την επίδραση υψηλής πίεσης στην εκρηκτική ύλη, συμπιέζεται ακαριαία το μέτωπο έκρηξης, αυξάνεται η θερμοκρασία και αρχίζει η εξώθερμη χημική αντίδραση που εξελίσσεται με μεγάλη ταχύτητα.

3.3 Η επίδραση της έκρηξης περιμετρικά του διατρήματος

Η επίτευξη της θραύσης του πετρώματος αρχίζει με την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης, η οποία καταλήγει σε μία βίαιη, ραγδαία χημική αντίδραση, με ταχύτητα από 4000m/s έως 6000m/s, παράγοντας αέρια υψηλής θερμοότητας και πίεσης σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Με άλλα λόγια κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης της ανατίναξης, η χημική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης μετατρέπεται σε μηχανική και μεγάλη ποσότητα ενέργειας απελευθερώνεται μέσα σε εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα στη μάζα του πετρώματος. Η αρχική πίεση η οποία αναπτύσσεται στη ζώνη αντίδρασης κυμαίνεται περίπου από 0.5 έως 50GPa και η θερμοκρασία από 2500°C έως 3500°C.

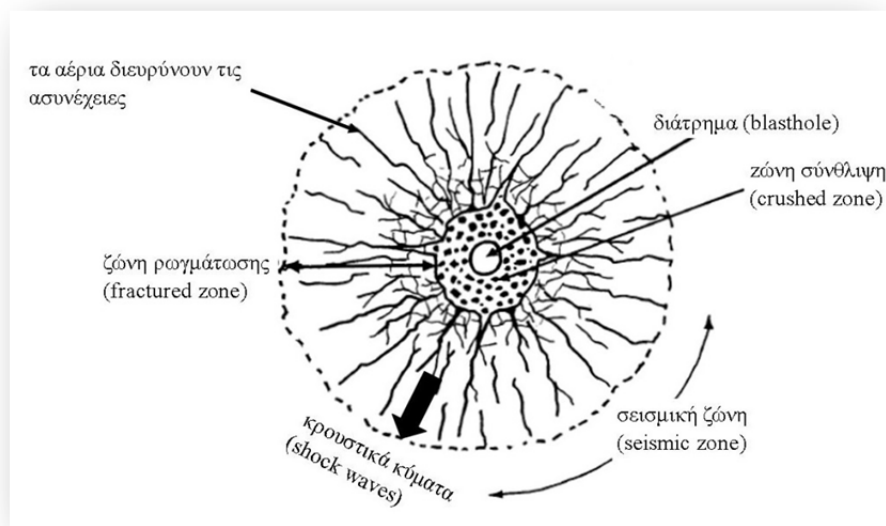
Η πίεση η οποία ασκείται στα τοιχώματα του γομωμένου διατρήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η πυκνότητα και το είδος της εκρηκτικής ύλης, το είδος του πετρώματος (Bhandari 1997). Η πρώτη αλληλεπίδραση μεταξύ των υψηλών πιέσεων και του περιβάλλοντος πετρώματος, πραγματοποιείται τη στιγμή που τα παραγόμενα προϊόντα επιδρούν στο διάτρημα. Το αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης είναι η άσκηση πίεσης στην επιφάνεια του διατρήματος, η οποία φτάνει στη μέγιστη τιμή της σχεδόν στιγμιαία και έπειτα εξασθενεί εξαιτίας της ψύξης των αερίων και της εκτόνωσής τους προς το περιβάλλον (Johanson & Persson 1974), όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα στο Σχήμα 3.3.1.



Σχήμα 3.3.1. Διάγραμμα της διακύμανσης της πίεσης που ασκείται για διαρρηκτική εκρηκτική ύλη (A) και εμπορική εκρηκτική ύλη (B) (Aimone 1992).

Επίσης, όσο περισσότερη είναι η ικανότητα των αερίων να διαστέλλονται πριν έρθουν σε επαφή με το πέτρωμα, τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή τους τη στιγμή της επίδρασης πάνω σε αυτό. Αρχικά, η διάδοση του κύματος της πίεσης σε όλο το διάτρημα είναι σε μορφή υψηλού κρουστικού κύματος και όταν εισέλθει εντός του πετρώματος, τότε η μέγιστη τιμή του μειώνεται, παραμένοντας όμως σε τέτοια επίπεδα που είναι ικανό να ασκήσει πίεση στο πέτρωμα για ένα ικανό χρονικό διάστημα (Mohanty, 1985, Rinehart 1975).

Επιπλέον, η πίεση της έκρηξης υπερβαίνει τη θλιπτική αντοχή του πετρώματος, προκαλώντας τη θραύση του, άμεσα, περιμετρικά του διατρήματος. Καθώς ο ρυθμός εξασθένισης της πίεσης είναι υψηλός, η ζώνη σύνθλιψης περιμετρικά του διατρήματος είναι περιορισμένη και πιθανόν δεν υπερβαίνει 2 με 4 ακτίνες από αυτή του διατρήματος, ενώ η ζώνη ρωγμάτωσης εκτείνεται έως και 50 ακτίνες (Siskind & Fumanti 1974), Σχήμα 2.3.2. Το μέγεθος των πιέσεων που παράγονται από την έκρηξη μειώνεται με την απόσταση από το διάτρημα και το πέτρωμα επιδεικνύει από πλαστική έως ελαστική – ψαθυρή συμπεριφορά. Το μέγεθος των αποσπώμενων τεμαχίων (spalling rocks) αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από τα τοιχώματα του διατρήματος.



Σχήμα 3.3.2. Θραύση του πετρώματος περιμετρικά του διατρήματος (Bhandari 1997).

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.2 στη ζώνη ρωγμάτωσης η αντοχή του πετρώματος είναι σημαντική αλλά η πίεση που ασκείται είναι μεγαλύτερη από αυτή προκαλώντας τη ρωγμάτωσή της, όχι όμως την πρόκληση του απόλυτου θρυμματισμού της, όπως συμβαίνει στη ζώνη σύνθλιψης (crushed zone) (Atchison 1968).

3.4 Η επίδραση της έκρηξης στο πέτρωμα και ο μηχανισμός της θραύσης του

3.4.1 Γενικά

Πολλές είναι οι θεωρίες οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για τον τρόπο θραύσης του πετρώματος κατά την επίδραση της έκρηξης πάνω σε αυτό. Σε γενικές γραμμές μπορούν να αναφερθούν δύο διακριτοί μηχανισμοί οι οποίοι λαμβάνουν χώρα: τα κρουστικά (θλιπτικά) κύματα που δημιουργούνται κατά την έκρηξη και η πίεση από τα παραγόμενα αέρια. Αρχικά προκαλείται μία θλιπτική τάση εντός του πετρώματος που περιβάλλει το γομωμένο διάτρημα. Το κύμα αυτό διαδίδεται στο υλικό περίπου με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου και αφού διαπεράσει το πέτρωμα, έπειτα τα αέρια προϊόντα της έκρηξης ασκούν πιέσεις στο πέτρωμα. Οι θεωρίες που έχουν προταθεί διαφέρουν ως προς τη βαρύτητα που δίνουν στον ρόλο του θλιπτικού κύματος και των αερίων που επιδρούν στο πέτρωμα. Κάποιες θεωρίες καταλήγουν ότι τα θλιπτικά κύματα, η κρουστική ενέργεια, είναι υπεύθυνα για την πλειονότητα της θραύσης του πετρώματος, ενώ η επίδραση των αερίων είναι αμελητέα. Άλλες θεωρίες

υποστηρίζουν ότι η πίεση των αερίων κυριαρχεί στη διαδικασία της θραύσης, με τα θλιπτικά κύματα να προκαλούν αμελητέα επιρροή.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η σύγχυση που επικρατεί ως προς τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη θραύση του πετρώματος, έγκειται στα δύο διαφορετικά είδη ενέργειας που παράγονται. Οι διαφορετικού τύπου ενέργειες έχουν διαφορετικό αποτέλεσμα και εξαρτάται φυσικά από τον τρόπο της εφαρμογής της εκρηκτικής ύλης, τον βαθμό περιορισμού στο διάτρημα κτλ. Έτσι λοιπόν, κατά την έκρηξη, τα εκρηκτικά επηρεάζουν το πέτρωμα με πολλούς, συσχετισμένους τρόπους. Στις αμέσως επόμενες παραγράφους, θα αποδοθούν τα στάδια της θραύσης του πετρώματος και τα φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία αυτή.

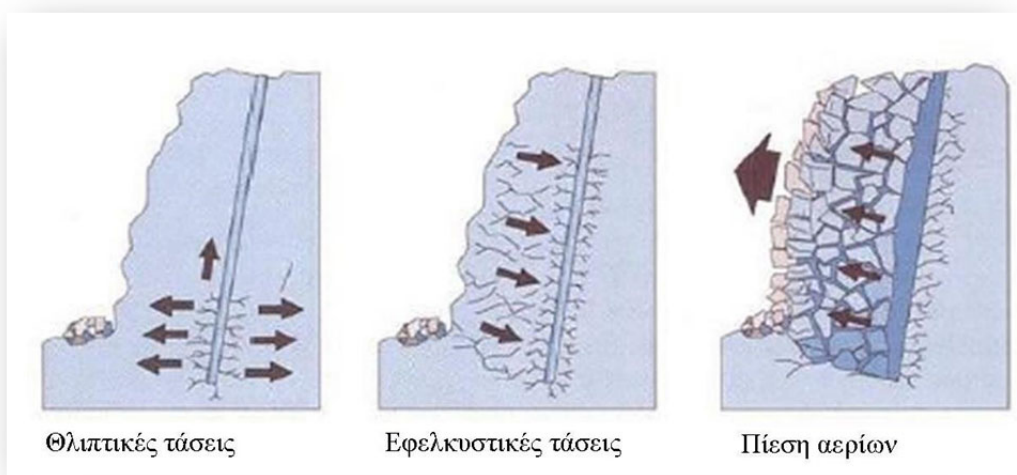
3.4.2 Τα στάδια απόσπασης του πετρώματος από το μέτωπο

Η μηχανική ενέργεια που προέρχεται από την έκρηξη της εκρηκτικής ύλης εντός των διατρημάτων, αρχικά προκαλεί τον κατακερματισμό του πετρώματος, που βρίσκεται μεταξύ της σειράς των διατρημάτων και της ελεύθερης επιφάνειας του μετώπου (πρανές). Έπειτα ακολουθούν τα στάδια που περιγράφονται αμέσως παρακάτω, Σχήμα 3.4.2.1:

1. Τα *θλιπτικά κύματα* (*shock waves*) που δημιουργούνται κατά την έκρηξη, διαδίδονται μέσω του πετρώματος με ταχύτητα 2500 m/s – 6000 m/s, ανάλογα με φυσικά χαρακτηριστικά του πετρώματος και της εκρηκτικής ύλης. Όταν έρθουν σε επαφή με τα τοιχώματα του διατρήματος η θλιπτική αντοχή του πετρώματος ξεπερνιέται δημιουργώντας μικρορωγμές περιμετρικά του διατρήματος. Τα θλιπτικά αυτά κύματα είναι ανεπαρκή όμως για την αποκόλληση των τεμαχίων από το πέτρωμα.
2. Τα θλιπτικά κύματα ανακλώνται στο πρανές του μετώπου αλλά και στις προϋπάρχουσες ασυνέχειες του πετρώματος και επιστρέφουν ως εφελκυστικά προς το διάτρημα, προκαλώντας την αστοχία του πετρώματος σε εφελκυσμό.
3. Μετά το πέρας του κρουστικού κύματος, ο *μεγάλος όγκος αερίων* που παράγεται προκαλεί ισχυρές πιέσεις, τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν ακτινικές ρωγμές στα τοιχώματα του διατρήματος. Με άλλα λόγια, η διαστολή των αερίων προκαλεί τις ακτινικές ρωγμές στο πέτρωμα. Η διεύθυνση των ρωγμών καθορίζεται από την αντίσταση που υπάρχει μπροστά από το διάτρημα. Στην περίπτωση της φυσιολογικής αντίστασης οι ακτινικές ρωγμές συγκεντρώνονται προς το μέτωπο. Ενώ στην περίπτωση της ισχυρής

αντίστασης, προκαλούνται συμμετρικές ρωγμές περιμετρικά του διατρήματος.

4. Μετά τον σχηματισμό των ακτινικών ρωγμών, τα υψηλής πίεσης αέρια εκτονώνονται μέσω των ρωγμών που δημιουργήθηκαν στα προηγούμενα στάδια και των προϋπάρχουσων ρωγμών, προκαλώντας τη διεύρυνσή τους.
5. Τέλος, προκαλείται η απόσπαση του πετρώματος από το μέτωπο και η μετακίνησή τους, αποθέτοντας τα τεμάχια σε σωρό μπροστά από το μέτωπο.



Σχήμα 3.4.2.1. Μηχανισμός απόσπασης του πετρώματος στο μέτωπο (Παναγιώτου 2014).

Παρακάτω ακολουθεί εκτενέστερη ανάλυση του τρόπου διάδοσης της παραγόμενης ενέργειας και συγκεκριμένα της διάδοσης του κρουστικού κύματος και της επίδρασης των παραγόμενων αερίων στο πέτρωμα κατά την ανατίναξη στο μέτωπο της επιφανειακής εξόρυξης.

Ο ρόλος του κρουστικού κύματος

Από την έναρξη της ανατίναξης, η εκρηκτική οξείδωση (explosive oxidation), διαδίδεται σε όλο το μήκος του γομωμένου διατρήματος, με ταχύτητα ανάλογη με την ταχύτητα έκρηξης της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε διαδικασία. Μπροστά από τη ζώνη αντίδρασης, παράγεται το κρουστικό κύμα (shock wave) το οποίο προσπίπτει με σφοδρότητα στο πέτρωμα, το συνθλίβει και το διαρρηγνύει, λόγω της υψηλής πίεσης που αναπτύσσεται (πίεση της έκρηξης). Η θλιπτική αυτή δράση είναι χαρακτηριστική των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών και

είναι γνωστή ως θραυστικότητα (brisance). Στην περίπτωση παρουσίας οποιουδήποτε κενού με αέρα, ανάμεσα στην εκρηκτική ύλη και το πέτρωμα, η ενέργεια αυτή χάνεται, υπό τη μορφή απωλειών, μειώνοντας την επίδρασή της στο πέτρωμα. Έπειτα, ένα μέρος του κρουστικού κύματος διαδίδεται στο υλικό ενώ ένα άλλο μέρος ανακλάται (reflected waves) στην ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς (διεπιφάνεια πετρώματος – αέρα) επιστρέφοντας πίσω στο διάτρημα ως εφελκυστική τάση (Duvall & Atchison 1957). Με άλλα λόγια, όταν ένας θλιπτικός κυματοπαλμός που διαδίδεται μέσω ενός πετρώματος προσπίπτει σε μια ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή την διεπιφάνεια πετρώματος/αέρα, τότε πρακτικά όλη η ενέργειά του επιστρέφει πίσω στο πέτρωμα υπό την μορφή ενός εφελκυστικού τασικού κύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ακουστική εμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι εξαιρετικά μικρή, συγκρινόμενη με εκείνη του πετρώματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό της ενέργειας που διαδίδεται από το ένα υλικό στο άλλο ή που ανακλάται πίσω, εξαρτάται από την ακουστική εμπίεση ή σύνθετη αντίσταση (impedance) του υλικού. Ο όρος ακουστική εμπίεση ορίζεται ως το γινόμενο της πυκνότητας του μέσου διάδοσης και της ακουστικής ταχύτητας (δηλαδή την ταχύτητα με την οποία ο ήχος διαδίδεται φυσιολογικά στο συγκεκριμένο μέσο). Η ακουστική εμπίεση δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (3.4.2.1):

$$Z = \rho * V \quad (3.4.2.1)$$

Όπου,

Z = η ακουστική εμπίεση ($\text{Kg/m}^2\text{sec}$)

ρ = η πυκνότητα του υλικού (kg/m^3)

V = η ταχύτητα ηχητικού κύματος (m/s)

Η εφελκυστική τάση προκαλεί πλευρικές ρωγμές στο πέτρωμα μεταξύ των ακτινικών ρωγμών που έχουν δημιουργηθεί λόγω των θλιπτικών κυμάτων, σχηματίζοντας τη ζώνη ρωγμάτωσης. Είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ του διατρήματος και της ελεύθερης επιφάνειας του πρανούς, τόσο περισσότερη ενέργεια “καταναλώνεται” και τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι ρωγμές που δημιουργούνται. Σημειώνεται ότι οποιαδήποτε ρωγμή δημιουργείται στη μάζα του πετρώματος, λειτουργεί ως ελεύθερη επιφάνεια (US National Park Service).

Η επίδραση των ανακλώμενων κυμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς παρουσιάστηκε και από τους Barker et al. 1978, οι οποίοι υπέδειξαν ότι η διάδοση

του κρουστικού κύματος στη μάζα του πετρώματος προκαλεί την αρχική θραύση του και μάλιστα σε σημαντική απόσταση από το διάτρημα. Επίσης, τα ανακλώμενα κύματα στη συνέχεια, έχουν επαρκή αποδοτικότητα προκαλώντας περεταίρω θραύση στο πέτρωμα από εφελκυσμό.

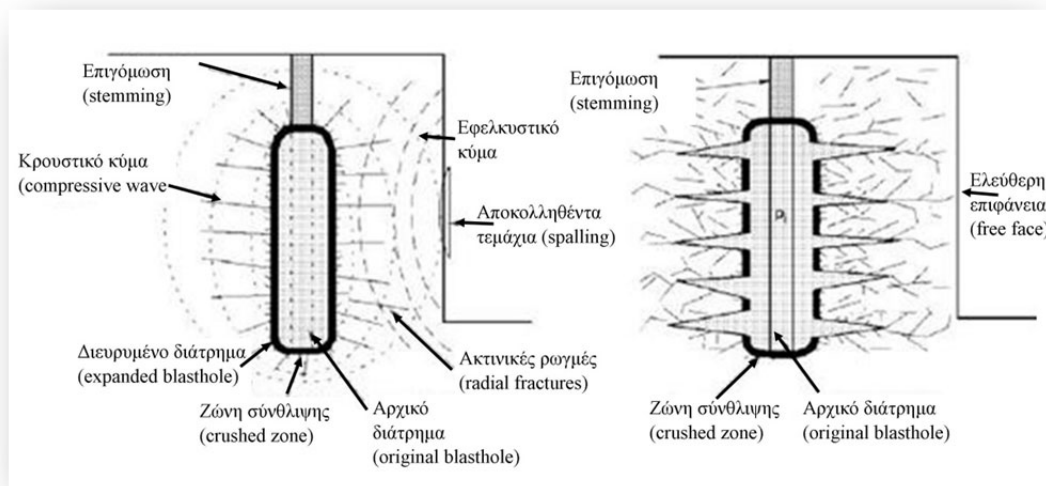
Πολλοί ερευνητές (Bergmann et al. 1973, Harries 1973) θεωρούν ότι η επίδραση των εφελκυστικών τάσεων στο πέτρωμα είναι μικρή για την πρόκληση της θραύσης του. Αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με την εφαρμογή κάμερας υψηλής ταχύτητας και άλλων μεθόδων, υπέδειξαν ότι η περίοδος, μεταξύ της έκρηξης της εκρηκτικής ύλης και της έναρξης της μετακίνησης του μετώπου του πρανούς, είναι μεταξύ τρεις και δέκα φορές που χρειάζεται το κρουστικό κύμα να διαδοθεί από το διάτρημα προς την ελεύθερη επιφάνεια και πίσω, υποδεικνύοντας ότι η θραύση επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες (Turata et al. 1966, Bergmann et al. 1973).

Ο ρόλος της πίεσης των αερίων

Οι Sadwin & Duvall (1965), Cook et al. (1966), Persson et al. (1970), και άλλοι έχουν αποδείξει ότι το κρουστικό κύμα δεν αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα για τη θραύση του πετρώματος, υπό την επίδραση της εκρηκτικής ύλης. Έχουν υποδείξει ότι οι ακτινικές ρωγμώσεις που δημιουργούνται, διαστέλλονται από τις υψηλές πιέσεις των παραγόμενων αερίων μέχρι να προκύψει η διασταύρωσή τους με την ελεύθερη επιφάνεια, προκύπτοντας η τελική θραύση του πετρώματος και η εναπόθεσή του μπροστά από το πρανές, με τη μορφή σωρού.

Πιο συγκεκριμένα, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη του κρουστικού κύματος, η εκρηκτική ύλη μετατρέπεται σε υψηλής θερμότητας αέρια, τα οποία καταλαμβάνουν χώρο 10000 με 20000 φορές του αρχικού όγκου του υλικού, ασκώντας πίεση, η οποία μπορεί να υπερβεί τα 1.5εκατ. psi. Η απουσία των αερίων, δε θα προκαλούσε τη μετακίνηση του πετρώματος. Η μετακίνηση αυτή υπολογίζεται ότι είναι 1ft για κάθε 10milliseconds ή 304.8 m / s, παρόλο που μικρότερα τεμάχια μετακινούνται σαφώς με μεγαλύτερη ταχύτητα ή ακόμα και ως εκτινασσόμενα τεμάχια (flyrocks) (US National Park Service).

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.4.2.2), απεικονίζονται τα δύο στάδια του μηχανισμού της έκρηξης στο πέτρωμα, το κρουστικό κύμα και η πίεση των παταγόμενων αερίων.



Σχήμα 3.4.2.2. Διάδοση του κρουστικού κύματος (αριστερά) και η επίδραση της πίεσης των αερίων (δεξιά) (Sharma 2012).

3.4.3 Διάχυση της εκλυόμενης ενέργειας στον περιβάλλοντα χώρο

Ένα σημαντικό ποσοστό της εκλυόμενης ενέργειας της εκρηκτικής ύλης κατά τη διαδικασία της ανατίναξης, διαχέεται στον περιβάλλοντα χώρο, υπό τη μορφή αέριου ωστικού κύματος (blast wave), δονήσεων (vibrations) και εκτινασσόμενων πετρωμάτων (flyrocks). Η εκλυόμενη αυτή ενέργεια (waste energy), προκαλεί πολλά προβλήματα τόσο για τους εργαζόμενους στο λατομείο όσο και τους κατοίκους περιμετρικά της περιοχής. Οι ανεξέλεγκτες ανατινάξεις οδηγούν σε επιβλαβείς επιδράσεις για τις ίδιες τις ανθρώπινες ζωές αλλά και για τις κτιριακές εγκαταστάσεις, εντός και εκτός του λατομικού χώρου. Αυτές οι επιπτώσεις αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο για τους τομείς κατασκευής των εκρηκτικών υλών, τις κυβερνήσεις, τους ίδιους του εργαζόμενους στους χώρους απόσπασης των πετρωμάτων, τους επιστήμονες.

Αέριο ωστικό κύμα

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί η έννοια του *ωστικού κύματος (blast wave)*, το οποίο αφορά τον σχηματισμό αναπτυσσόμενης ώθησης των αερίων κατά την έκρηξη και διαδίδεται στην ατμόσφαιρα, ακτινικά του χώρου της ανατίναξης

(Oriard 2002). Η δημιουργία του οφείλεται σε παλμούς που μεταδίδονται στον ατμοσφαιρικό αέρα από τους κάτωθι παράγοντες (Παναγιώτου 2014):

- ✓ Τη μετακίνηση του αποσπώμενου πετρώματος από το μέτωπο
- ✓ Τη διαφυγή των αερίων της έκρηξης από ρωγμές που υπάρχουν στο μέτωπο
- ✓ Τη διαφυγή των αερίων της έκρηξης από το στόμιο του διατρήματος λόγω ελλιπούς επιγόμεωσης
- ✓ Τη δόνηση του εδάφους
- ✓ Την ενεργοποίηση των μέσων πυροδότησης που κείτονται στην επιφάνεια του μετώπου εξόρυξης (ακαριαία θρυαλλίδα, καψύλια)

Η συχνότητα, το πλάτος και η διάρκεια του αέριου ωστικού κύματος εξαρτώνται από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης, τον βαθμό περιορισμού της γομωμένης στήλης και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στον περιβάλλοντα χώρο της ανατίναξης. Το αέριο ωστικό κύμα γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο ως «ήχος» εάν περιέχει συχνότητες που εμπίπτουν στην «ακουστική» περιοχή συχνοτήτων του ανθρώπινου αυτιού, δηλαδή μεταξύ 20Hz και 20kHz. Ωστόσο, ένα ποσοστό της ενέργειας του αέριου ωστικού κύματος περιέχει συχνότητες που βρίσκονται στην «υπο-ακουστική» περιοχή (2 Hz και 20 Hz) (ISEE 2011).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα διάδοσης του αέριου ωστικού κύματος στον περιβάλλοντα χώρο δεν είναι σταθερή και όμοια προς όλες τις διευθύνσεις, αλλά εξαρτάται από τις εκάστοτε επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Ο έλεγχος της επίδρασης του αέριου ωστικού κύματος στην ευρύτερη περιοχή λειτουργίας του λατομικού χώρου, αποτελεί μία σημαντική παράμετρος, καθώς το ωστικό κύμα θα πρέπει να ελαχιστοποιείται στο μέτρο του δυνατού. Σε κάθε εξόρυξη με τη χρήση των εκρηκτικών υλών, θα πρέπει να ρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο οι παράμετροι της ανατίναξης (χρόνοι πυροδότησης, ποσότητα εκρηκτικών, διάμετρος διατρήματος κ.α.), ώστε να αποφεύγονται οι σοβαρές οχλήσεις ή οι ζημιές στις γειτονικές κατοικημένες περιοχές (Australian Standard, AS21187.2-2006). Σύμφωνα με τον Κανονισμό Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11, Παράγραφος 88, η πίεση του αέριου ωστικού κύματος στις κατοικημένες περιοχές απαγορεύεται να υπερβαίνει τα 134 DbL. Τέλος, η ύπαρξη φυσικών εμποδίων στην πορεία διάδοσης του αέριου ωστικού κύματος, είναι δυνατόν να λειτουργήσουν ως ηχοπετάσματα συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση της έκτασής του.

Δονήσεις εδάφους

Όταν λαμβάνει χώρα η ανατίναξη εντός των διατρημάτων, σε κάποια απόσταση από αυτά, ένα μέρος της εκλυόμενης χημικής ενέργειας μετατρέπεται σε ελαστική μορφή. Τα ελαστικά αυτά κύματα αποτελούν τα σεισμικά κύματα και διαδίδονται με μεγάλη ταχύτητα μέσω του πετρώματος (Khandelwal 2010). Πιο συγκεκριμένα, η πρόκληση της έκρηξης, όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, προκαλεί τον σχηματισμό μεγάλου όγκου αερίων σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι υψηλές αυτές πιέσεις παράγουν συμπιεστικές τάσεις, οι οποίες αποτελούν την πηγή των εδαφικών δονήσεων. Οι δονήσεις είναι πολύ έντονες πλησίον της πηγής και καθώς η απόσταση αυξάνεται μειώνονται. Έτσι, αποτελεί πολύ σημαντικό να είναι γνωστή η σχέση μεταξύ της έντασης αυτών των δονήσεων ως αποτέλεσμα του μεγέθους της εκρηκτικής ύλης, των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του πετρώματος και της απόστασης από την πηγή πρόκλησης (Singh et al. 1994, Gorgulu et al. 2014,).

Οι δονήσεις του εδάφους προσδιορίζονται σε σχέση με τη μέγιστη ταχύτητα δόνησης των σωματιδίων (Peak Particle Velocity-PPV), αποτελώντας την πλέον χαρακτηριστική παράμετρο για την εκτίμηση της σφοδρότητας μίας δόνησης που προέρχεται από τια ανατινάξεις. Η χρήση της πραγματοποιείται για την εκτίμηση των επιπτώσεων των δονήσεων στις κατασκευές σε σχετικούς κανονισμούς, είτε ως μοναδική παράμετρος όπως στην περίπτωση του Κανονισμού Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών ή σε συνδυασμό με τη συχνότητα της δόνησης σύμφωνα με το Γερμανικό Κανονισμό DIN 4150.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται εμπειρικές μαθηματικές εξισώσεις υπολογισμού της PPV ως συνάρτηση της κλιμακούμενης απόστασης από την πηγή πρόκλησης για συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες, (Duvall & Fogleson 1962, Ambraseys and Hendron 1968, Hendron 1977, Langefors & Kihlstrom 1978, Wiss 1981, Gupta Pal Roy & Singh 1988, Monjezi et al. 2011). Επίσης, έχουν πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές προσπάθειες πρόβλεψης των δονήσεων με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Tang et al. 2007, Mohamed 2009, Monjezi et al. 2011, κ.α.). Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι η μέγιστη ταχύτητα σωματιδίων $V(\text{mm/s})$, που αναμένεται σε ένα σημείο που απέχει απόσταση $D(\text{m})$ από τη θέση της ανατίναξης και η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης που εκρήγνυται $W(\text{kg})$, για ανατινάξεις που λαμβάνουν χώρα στο μέτωπο, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (Παναγιώτου, 2014)

$$V = H \left[\frac{D}{\sqrt{W}} \right]^{-\beta} \quad (3.4.3.1)$$

Όπου,

V = η μέγιστη ταχύτητα σωματιδίων (mm/s)

H και β συντελεστές που εξαρτώνται από τη γεωλογία την τοπογραφία της περιοχής

D = απόσταση (m)

W = ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (kg)

Ο λόγος $\left[\frac{D}{\sqrt{W}} \right]^{-\beta}$ αποτελεί την ανηγμένη απόσταση

Οι δονήσεις στο έδαφος σχετίζονται με την κίνησή του, λόγω της διάδοσης του σεισμικού κύματος, προκαλώντας την κίνηση ή τη μετακίνηση τμημάτων του από την αρχική του θέση. Η συχνότητα είναι μία κρίσιμη παράμετρος για την εκτίμηση των επιπτώσεων των δονήσεων από τις ανατινάξεις στις κατασκευές. Όταν οι τιμές της συχνότητας είναι μικρές, τότε υπάρχει πιθανότητα να ταυτίζονται με τη φυσική συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) της κατασκευής, με αποτέλεσμα αυτή να υφίσταται τη μέγιστη ταλάντωση και παραμόρφωση. Οι δονήσεις που προξενούνται στον περιβάλλοντα χώρο είναι απαραίτητο να ελέγχονται με ειδικά όργανα (δονησιογράφος, γεώφωνο), προκειμένου να προβλέπονται πιθανές επιπτώσεις σε διάφορα κτιριακά οικοδομήματα. Οι ζημιές που είναι πιθανόν να προκληθούν είναι συνάρτηση του επιπέδου και της συχνότητας πρόκλησης των δονήσεων στην περιοχή. Οι δονήσεις αποτελούν έναν ισχυρό προβληματισμό των μηχανικών, των υπευθύνων στα λατομεία και των περιβαλλοντολόγων (Hagan 1973).

Τέλος, οποιεσδήποτε προκλήσεις υψηλού επιπέδου δονήσεων που παράγονται από τις ανατινάξεις σε ένα λατομείο, που μπορούν να προξενήσουν οχλήσεις ή ζημιές σε παρακείμενα κτίσματα, θα πρέπει να αποφεύγονται. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τον Κανονισμό Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11, Παράγραφος 88, η μέγιστη ταχύτητα δονήσεων των σωματιδίων του εδάφους στη θέση του κτίσματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα και ανάλογα με το είδος της κατασκευής δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια που δίνονται από το γερμανικό πρότυπο DIN 4150-3/1999.

Εκτίναξη πετρώματος

Η εκτίναξη του πετρώματος (flyrocks), ορίζεται ως η εκτίναξη του πετρώματος σε αποστάσεις μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες στην περιοχή πρόκλησης της ανατίναξης, υπό την επίδραση της έκρηξης (IME 1997). Στην περίπτωση που τα τεμάχια αυτά ξεπεράσουν την προστατευόμενη περιοχή, τότε αποτελούν κίνδυνο για τις ανθρώπινες ζωές και τις κτιριακές υποδομές. Η εκτίναξη του πετρώματος από τη διαδικασία της ανατίναξης, αποτελεί ένα από τα καίριας σημασίας, πολύπλοκα προβλήματα που έχει να αντιμετωπίσει η βιομηχανία των λατομείων. Η διαχείριση και η πρόβλεψή του παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση των σχετιζόμενων κινδύνων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η έλλειψη ασφάλειας στην περιοχή της ανατίναξης με την πρόκληση εκτινασσόμενων τεμαχίων, αποτελεί παράγοντα ατυχημάτων σε ποσοστό 68.2%, στην Αμερική (Kecojevic & Radomsky 2005). Επίσης, σε σχετική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα λατομεία της Ινδίας, έδειξε ότι πάνω από 40% των θανατηφόρων ατυχημάτων και 20% των σοβαρών ατυχημάτων οφείλονταν στην εκτίναξη πετρωμάτων (Bhandari 1997).

Οι κύριες αιτίες πρόκλησης των εκτινασσόμενων πετρωμάτων είναι το μειωμένο φορτίο (burden), η ανεπάρκεια επιγόμεσης (stemming), οι αδύναμες ζώνες στο άνω τμήμα του πρανούς που παρέμειναν από προηγούμενη ανατίναξη κ.α. (Workman & Calder 1994, Siskind & Kopp 1995, Adhikari 1999, Rehak et al. 2001), τα οποία οδηγούν σε συγκέντρωση και διαφυγή των εκλυόμενων αερίων από αυτά τα τμήματα. Οποιαδήποτε ανισορροπία μεταξύ της διάδοσης της ενέργειας της έκρηξης, των μηχανικών χαρακτηριστικών του πετρώματος και του βαθμού περιορισμού, δημιουργούν πιθανές, επικίνδυνες συνθήκες, πρόκλησης του φαινομένου (Bajrayee et al. 2004).

Τέλος, για την αποφυγή των εκτινασσόμενων τεμαχίων θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ενδεδειγμένη απόσταση των διατρημάτων από την ελεύθερη επιφάνεια (burden) και να ελέγχεται η πιθανή απόκλισή τους, ειδικά σε περιπτώσεις μικρής διαμέτρου και μεγάλου βάθους. Επιπλέον, απαραίτητη είναι η λήψη μέριμνας για την αποφυγή ανομοιογενούς κατανομής του εκρηκτικού εντός του διατρήματος, (π.χ. στην περίπτωση ύπαρξης καρστικών σπηλαιωμάτων) και στην ορθή τοποθέτηση των χρόνων επιβράδυνσης των καψυλλίων. Ακόμα ένας παράγοντας αποτελεί η επιγόμεση, η οποία σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει να είναι μικρότερη από τα 7/10 της απόστασης των διατρημάτων από το μέτωπο, (Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11, Παράγραφος 56).

Συμπερασματικά, η ποσότητα της εκλυόμενης ενέργειας στα διατρήματα, επηρεάζει δραστικά τόσο τη θραύση του πετρώματος όσο και τον περιβάλλοντα χώρο. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι ελέγχουν το εκλυόμενο ποσοστό της ενέργειας. Στην περίπτωση που τα εκλυόμενα επίπεδα ενέργειας είναι χαμηλά, αυτό πιθανόν να οφείλεται σε λανθασμένη χρήση ή ανάμιξη των εκρηκτικών υλών. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι ο σχηματισμός μεγάλων ογκολίθων (boulders), βίαιων εκρήξεων ή δονήσεων (Konya & Walter 1990). Ωστόσο, είναι δυνατή η οποιαδήποτε παρακολούθηση και μέτρηση της εκλυόμενης ενέργειας στο πεδίο για τη λήψη ορθών αποφάσεων για την υλοποίηση των ανατινάξεων. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν την ταχύτητα της έκρηξης και την πίεση που αναπτύσσεται στα διατρήματα, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες οι οποίες μπορούν να συγκριθούν με τα αναμενόμενα αποτελέσματα υπό ιδανικές συνθήκες. Τα εξαγόμενα συμπεράσματα αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον υπεύθυνο των ανατινάξεων, καθώς οποιαδήποτε μη αναμενόμενα αποτελέσματα, θα οδηγήσουν σε τροποποίηση της διαδικασίας και του επί μέρους σχεδιασμού τους.

3.4.4 Επίδραση των γεωλογικών συνθηκών στην απόσπαση του πετρώματος με εκρηκτικές ύλες

Το είδος του πετρώματος ασκεί σημαντική επίδραση στη διάδοση της ενέργειας και των κυμάτων στο εσωτερικό τους. Η επιρροή αυτή είναι δυνατό να ερμηνευθεί διαχωρίζοντας τα πετρώματα σε ελαστικά (π.χ. γρανίτης, χαλαζίτης) και πλαστικά (π.χ. ασβεστόλιθος, ψαμμίτης), ανάλογα με τη συμπεριφορά τους, κατά τη διάρκεια της έκρηξής τους. Στα ελαστικά πετρώματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε θλίψη και υψηλό μέτρο ελαστικότητας Young, η διάδοση των παραγόμενων κυμάτων πραγματοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό προκαλώντας τη ρωγμάτωση και τη θραύση του πετρώματος. Ως αποτέλεσμα οι ρωγματώσεις αυτές διευκολύνουν τη διέλευση των αερίων βελτιώνοντας το αποτέλεσμα της θραύσης. Στην αντίθετη περίπτωση τα πετρώματα με πλαστική συμπεριφορά, απορροφούν την εκλυόμενη ενέργεια με μεγαλύτερο ρυθμό, μη προκαλώντας εκτεταμένες ζώνες ρωγμάτωσης για τη διέλευση των αερίων (Bhandari 1997).

Αξίζει να αναφερθεί ένα παράδειγμα κατά το οποίο διασαφηνίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς στη θραύση, υπό την επίδραση των εκρηκτικών υλών. Στην περίπτωση που στο μέτωπο το οποίο πρόκειται να αποσπαστεί, εντοπίζεται μία μεγάλη φλέβα λεπτόκοκκου, αργιλώδους υλικού, το οποίο τέμνει τα διατρήματα, τότε το

αποτέλεσμα της θραύσης είναι τελείως διαφορετικό σε σχέση με τη μη ύπαρξή της. Η παρουσία της αργιλικής φλέβας και η απουσία ικανής επιγόμωσης, οδηγεί στον σχηματισμό μεγάλων τεμαχών μετά τη θραύση. Παρόλα αυτά, η αργιλική φλέβα δεν επηρεάζει τον σχηματισμό πολύ μικρότερων ρωγμών, οι οποίες είναι αποτέλεσμα του κρουστικού κύματος. Ωστόσο, επιτρέπει την πρόωρη έκλυση των αερίων μειώνοντας δραστικά την ενέργειά τους τόσο για τον σχηματισμό των ακτινικών ρωγμών όσο και τη δύναμη που προκαλεί την κάμψη του μετώπου για την απόσπαση του πετρώματος (Haghighi & Konya 1986).

Περαιτέρω ανάπτυξη της επίδρασης των μηχανικών χαρακτηριστικών του πετρώματος στη συμπεριφορά του σε σχέση με τις εκρηκτικές ύλες που επιδρούν, πραγματοποιείται στο κεφάλαιο 8.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός της επιφανειακής ανατίναξης διέπεται από βασικές πρακτικές που θα πρέπει να εφαρμόζονται για την επίτευξη μίας ιδεατής ανατίναξης, τροποποιώντας τις στις εκάστοτε συνθήκες. Οι διαδικασίες οι οποίες ακολουθούνται για την περάτωση του σχεδιασμού της επιφανειακής ανατίναξης είναι οι ακόλουθες:

- Η διάτρηση των απαραίτητων διατρημάτων στο μέτωπο με σκοπό την τοποθέτηση των εκρηκτικών υλών.
- Η γόμωση των διατρημάτων με τις απαραίτητες εκρηκτικές ύλες.
- Η τοποθέτηση της επιγόμεωσης στα διατρήματα.
- Η πυροδότηση των διατρημάτων σύμφωνα με τους χρόνους επιβράδυνσης των εφαρμοζόμενων καψυλίων, για την επίτευξη της καλύτερης ανταπόκρισης των διατρημάτων.

Σημειώνεται ότι τα πρωταρχικά απαιτούμενα για την εκάστοτε ανατίναξη είναι αυτά τα οποία εξασφαλίζουν τα βέλτιστα αποτελέσματα για τις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες και ακολουθούν μία σχετικά απλή διαδικασία υλοποίησης. Τονίζεται, λοιπόν, ότι το βασικό πλεονέκτημα της ορθής διάταξης των διατρημάτων είναι το όφελος της εκλυόμενης ενέργειας για τη σωστή θραύση του πετρώματος. Παρόλα αυτά οι περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και οι λειτουργικοί παράγοντες σχετικά με το εκάστοτε λατομείο, θα καθορίσουν την επιλογή της κατάλληλης διάταξης των διατρημάτων. Οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την κρίση του μηχανικού για την υλοποίηση της ανατίναξης, μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) τις μη ελεγχόμενες παραμέτρους (γεωλογία, μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, κανονισμοί, απόσταση από παρακείμενες κατασκευές), β) τις ελεγχόμενες παραμέτρους (διάμετρος – βάθος – υποδιάτρηση – γόμωση – επιγόμεωση - απόσταση διατρημάτων κ.α.).

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν οι παράμετροι που ορίζουν τον σχεδιασμό και τη γεωμετρία της επιφανειακής ανατίναξης στο εκάστοτε μέτωπο.

4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφανειακής ανατίναξης

Διαδικασία της διάτρησης

Η θεωρία η οποία διέπει τον χώρο των λατομείων είναι ότι μία επιτυχής ανατίναξη ξεκινάει με μία ορθή διαδικασία διάτρησης, τονίζοντας τη σημασία της διάτρησης, καθώς αυτή αποτελεί την πρώτη πρακτική που υλοποιείται στο μέτωπο της ανατίναξης, (Σχήμα 4.2.1). Η ορθή διάτρηση των διατρημάτων ορίζεται από τη διάταξή τους στο χώρο του μετώπου και διέπεται από κάποιους κανόνες και περιορισμούς, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 4.2.1. Διαδικασία της διάτρησης στο μέτωπο της ανατίναξης.

Ο χειριστής του διατρητικού μηχανήματος, με την εμπειρία του, είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται κατά τη διάρκεια της διάτρησης του πετρώματος, τα γεωτεχνικά του χαρακτηριστικά. Οι πολύτιμες πληροφορίες που εξάγονται, για τον γομωτή, προκύπτουν σε σχέση με τη μεταβολή της ταχύτητας της διάτρησης κατά μήκος του διατρήματος καθώς και με την πτώση της πίεσης του αέρα που απάγει τα τρίμματα

της διάτρησης (Παναγιώτου 2014). Τα διαφορετικά είδη διατρητικών μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

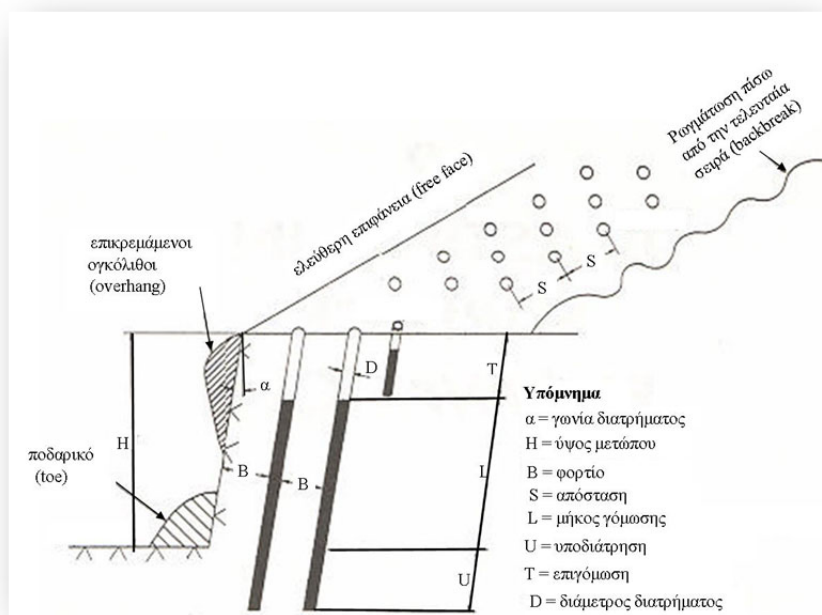
- Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος διάτρησης για διατρήματα 76mm-127mm, πραγματοποιείται με την κρουστική υδραυλική σφύρα, με την κρούση και την περιστροφή να δίνεται από την κεφαλή της διατρητικής στήλης (Top hammer). Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η μεγάλη ταχύτητα διάτρησης, στην περίπτωση καλών συνθηκών διάτρησης στο πέτρωμα.

- Η μέθοδος της ενδοδιατρηματικής σφύρας (Down the hole), στην οποία η κρούση παράγεται στον πυθμένα του διατρήματος και η περιστροφή στην κεφαλή της διατρητικής στήλης. Χρησιμοποιείται για διάνοιξη διατρημάτων με διάμετρο 85mm-165mm, μειώνοντας την πιθανότητα καταπτώσεων των τοιχωμάτων του διατρήματος.

- Η τεχνική της περιστροφικής διάτρησης χρησιμοποιείται για την όρυξη διατρημάτων μεγάλης διαμέτρου (200 mm-440 mm). Το κωπτικό άκρο προωθείται μέσα στο διάτρημα με ταυτόχρονη περιστροφή και ώθηση. Σημειώνεται ότι η περιστροφική διάτρηση παρουσιάζει δυσκολίες στην όρυξη κεκλιμένων διατρημάτων.

Η ακρίβεια στην εκτέλεση της διάτρησης (drilling accuracy) περιλαμβάνει την ορθή διάταξή τους σε σχέση με το φορτίο (*burden*) και την απόστασή τους (*space*), ορίζοντας το σχέδιο της ανατίναξης και προσδιορίζοντας τον κάνναβο διάτρησης (drill pattern), (Σχήμα 5.2.2). Σοβαρά λάθη τα οποία είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε σχέση με αυτές τις παραμέτρους, οδηγούν σε σημαντική απώλεια της παραγόμενης ενέργειας, προκαλώντας μεγάλους ογκολίθους, εκτινασσόμενα τεμάχια, υψηλές δονήσεις. Πιο συγκεκριμένα, το φορτίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σειρών διατρημάτων ή ως η απόσταση μεταξύ της πρώτης σειράς διατρημάτων και της ελεύθερης επιφάνειας. Από την άλλη, η απόσταση μεταξύ των γειτονικών διατρημάτων ορίζεται ως το μήκος που εκτείνεται κάθετα στο φορτίο. Συνήθως, η σχέση που συνδέει την απόσταση με το φορτίο δίνεται από την εξίσωση 4.2.1 (Ash 1968):

$$S = 1 \text{ έως } 1.8B \quad (4.2.1)$$



Σχήμα 4.2.2. Διάταξη των διατρημάτων σε επιφανειακή ανατίναξη (Ash 1968).

Η υποδιάτρηση (subdrill) αποτελεί το πρόσθετο τμήμα της διάτρησης των διατρημάτων κάτω από το επίπεδο του μετώπου, για τη διασφάλιση της θραύσης του πετρώματος στο επιθυμητό επίπεδο και συνεπώς για την αποφυγή της παραμονής άθραυστου πετρώματος (ποδαρικό) στο δάπεδο. Η αποτελεσματικότητα της υποδιάτρησης εξαρτάται από παράγοντες όπως: τη δομή και την πυκνότητα του πετρώματος, το είδος της εκρηκτικής ύλης, τη διάμετρο και την κλίση του διατρήματος. Από την άλλη πλευρά επισημαίνεται ότι η μεγάλη υποδιάτρηση είναι πιθανό να οδηγήσει σε ανώφελη χρήση μεγαλύτερης ποσότητας εκρηκτικής ύλης, αυξάνοντας την πρόκληση επιπλέον εδαφικών δονήσεων καθώς και την πρόκληση μη επιθυμητής θραύσης του δαπέδου (Bhandari 1997).

Υπάρχουν κάποιοι εμπειρικοί κανόνες για τον προσδιορισμό του μήκους της υποδιάτρησης και αυτό συνήθως ορίζεται από 0.2 έως 0.5 φορές του μεγέθους του φορτίου (0.2 έως 0.5B) και συχνά 0.3 φορές το φορτίο αποτελεί μία αποδεκτή τιμή. Επίσης, ένας ακόμη εμπειρικός κανόνας συσχετίζει την υποδιάτρηση με τη διάμετρο του διατρήματος και συγκεκριμένα από 8 έως 12 φορές τη διάμετρο (8 έως 12D) (AEL mining services).

Φορτίο (burden)

Το φορτίο αποτελεί την απόσταση της πρώτης σειράς διατρημάτων από την ελεύθερη επιφάνεια του μετώπου εξόρυξης, της δεύτερης σειράς από την πρώτη κ.ο.κ. Η επιλογή του κατάλληλου φορτίου είναι μία από τις σημαντικότερες αποφάσεις που θα πρέπει να πάρει ο υπεύθυνος της ανατίναξης.

➤ Στην περίπτωση που το φορτίο οριστεί ως πολύ μικρό, τότε είναι πολύ πιθανή η εκτίναξη των τεμαχών σε πολύ μεγάλη απόσταση και η παραγωγή εξαιρετικά λεπτόκοκκου υλικού.

➤ Στην αντίθετη περίπτωση, όπου το φορτίο οριστεί αρκετά μεγάλο, τότε είναι πιθανή η πρόκληση ρωγμάτωσης πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων (backbreak), καθώς και η κατακόρυφη εκτίναξη τεμαχών σε μορφή πίδακα. Η πρόκληση ρωγμάτωσης πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων αποτελεί ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο, καθώς καθιστά το πρανές μη ασφαλές και μη αποτελεσματικό στη διάτρηση της πρώτης σειράς διατρημάτων της επόμενης ανατίναξης, (Σχήμα 4.2.3). Τα μεγάλα φορτία προκαλούν μεγαλύτερο βαθμό περιορισμού στα διατρήματα, τα οποία οδηγούν σε υψηλά επίπεδα δονήσεων και αέριου ωστικού κύματος. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται η παραγωγή μεγάλου μεγέθους τεμαχών εξορυσσόμενου υλικού και η πρόκληση προβλημάτων τύπου “ποδαρικού” (toe problems).



Σχήμα 4.2.3. Η ρωγμάτωση (backbreak) πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων.

Η τιμή του φορτίου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της διαμέτρου του διατρήματος και τη σκληρότητα του πετρώματος. Έτσι λοιπόν, σε γενικές γραμμές το φορτίο κυμαίνεται συνήθως από 25 έως 40 φορές τη διάμετρο του διατρήματος. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του σκληρού πετρώματος από 25 έως 30 φορές τη διάμετρο, για μέσης σκληρότητας πέτρωμα από 30 έως 35 φορές τη διάμετρο και για μαλακά πετρώματα από 35 έως 40 φορές τη διάμετρο.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται εξισώσεις οι οποίες αποδίδουν το φορτίο σε σχέση με άλλες παραμέτρους. Για παράδειγμα, η εξίσωση του Konya 1983, ο οποίος πρότεινε τη φόρμουλα που παρέχει το φορτίο σε συνδυασμό με το ειδικό βάρος της εκρηκτικής ύλης, το ειδικό βάρος του πετρώματος και τη διάμετρο του διατρήματος.

$$B = \left[\left(\frac{2SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) \right] * D_e \quad (4.2.2)$$

Όπου,

- B = φορτίο (ft)
- SG_e = ειδικό βάρος της εκρηκτικής ύλης
- SG_r = ειδικό βάρος του πετρώματος
- D_e = διάμετρος του διατρήματος (in)

Η παραπάνω εξίσωση (5.2.2) χρησιμοποιεί την πυκνότητα του πετρώματος ως έναν δείκτη της αντοχής του πετρώματος. Όσο υψηλότερης πυκνότητας είναι το πέτρωμα τόσο υψηλότερη ενέργεια απαιτείται για την πρόκληση της θραύσης του και της μετακίνησής του. Από την άλλη πλευρά, η ισχύς της εκρηκτικής ύλης ποσοτικοποιείται μέσω του ειδικού βάρους της, καθώς όσο μεγαλύτερη πυκνότητα έχει τόσο υψηλότερη ενέργεια αποδίδει ανά μονάδα όγκου. Ωστόσο, έχει προταθεί εξίσωση, στην οποία υπεισέρχεται ο παράγοντας της κατ'όγκου σχετικής ισχύος (relative volume strength) της εκρηκτικής ύλης. Η σχετική ισχύς είναι το επίπεδο της ενέργειας συγκρινόμενο με μία συγκεκριμένη εκρηκτική ύλη, η οποία ορίζεται ως επί τοις 100 ANFO. Συνεπώς, ακολουθεί η εξίσωση η οποία αποδίδει το φορτίο συμπεριλαμβανομένης της ισχύος αυτής (Konya and Walter 1990).

$$B = 0.67 * D_e * \left(\frac{St_v}{SG_r} \right)^{0.33} \quad (4.2.3)$$

Όπου,

- B = φορτίο (ft)
- St_v = κατ'όγκο ισχύς της εκρηκτικής ύλης (ANFO=100)
- SG_r = ειδικό βάρος του πετρώματος
- D_e = διάμετρος του διατρήματος (in)

Επιγύμωση (stemming)

Η επιγύμωση αποτελεί το υλικό το οποίο τοποθετείται μεταξύ της γομωμένης στήλης και του υπόλοιπου τμήματος του διατρήματος, προκειμένου να πληρώσει τη διατρητική στήλη. Η εφαρμογή της εξασφαλίζει την ορθή απελευθέρωση της εκλύομενης ενέργειας, καθώς και τον έλεγχο του αέριου ωστικού κύματος και των εκτινασσόμενων τεμαχίων.

Η μαθηματική εξίσωση η οποία δίνει τη βέλτιστη επιγύμωση είναι η ακόλουθη (Otuonye et al. 1983):

$$T = \frac{12 \cdot Z}{A} \left(\frac{Q \cdot S}{100} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.2.4)$$

Όπου,

- T = επιγύμωση (m)
- Z = παράγοντας εκτινασσόμενων τεμαχίων (1 για μικρό κίνδυνο, 1.5 για υψηλό κίνδυνο)
- A = παράγοντας πετρώματος (6 για πολύ μαλακά, 14 για σκληρά)
- Q = ποσότητα εκρηκτικής ύλης σε 8 διατρήματα (kg)
- S = κατά βάρος σχετική ισχύς (ANFO = 100)

Το ιδανικό μήκος της επιγύμωσης εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος και γενικότερα ένας εμπειρικός κανόνας, δηλώνει ότι το μήκος της κυμαίνεται από 20 φορές τη διάμετρο του διατρήματος έως 60 φορές αυτήν, υποδηλώνοντας ότι μία επιγύμωση μικρότερη από 20D προκαλεί προβλήματα εκτινασσόμενων βράχων και θραύση του μετώπου πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων. Επιπλέον, προτείνεται ότι η επιγύμωση δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από το φορτίο (Otuonye et al. 1983). Γενικότερα το μήκος της επιγύμωσης εξαρτάται από το μήκος των διατρημάτων, καθώς και από τη διάμετρο αυτών.

Το υλικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιγύμωση είναι άμμος ή λετόκοκκο υλικό. Η επιλογή της κατάλληλης κοκκομετρίας είναι πολύ σημαντική, καθώς το πολύ λεπτόκοκκο υλικό χάνεται εντός του διατρήματος, ενώ το πολύ αδρόκοκκο έχει την τάση να δημιουργεί «γέφυρες» εντός της στήλης προκαλώντας εύκολα την εκτίναξή τους. Αναφέρεται ότι η βέλτιστη κοκκομετρία του υλικού θα πρέπει να είναι 0.05 φορές τη διάμετρο της στήλης (Otuonye et al. 1983). Συνήθως, όμως χρησιμοποιείται το διατρητικό υλικό το οποίο προκύπτει από τη διάτρηση του ίδιου του πετρώματος κατά την ανόρυξη των διατρημάτων, λόγω της ευκολίας στη χρήση του, (Σχήμα 4.2.4).

Επισημαίνεται, ότι η σωστή εκτίμηση της επιγόμεωσης πραγματοποιείται έπειτα από ορθή κρίση και εμπειρία. Παρόλα αυτά οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην ορθή επιλογή της έκτασης της επιγόμεωσης στη διατρητική στήλη, μπορούν να διατυπωθούν επιγραμματικά στα παρακάτω:

- Συνθήκες του πετρώματος
- Διάμετρος διατρητικής στήλης
- Ύψος μετώπου
- Φορτίο
- Ισχύς της εκρηκτικής ύλης
- Μήκος της γομωμένης στήλης
- Έλεγχος των εκτινασσόμενων τεμαχών
- Περιορισμοί για το αέριο ωστικό κύμα



Σχήμα 4.2.4. Το διατρητικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ως υλικό επιγόμεωσης στα διατρήματα.

Μέγεθος του διατρήματος

Η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους διατρήματος πραγματοποιείται με την αξιολόγηση δύο παραγόντων: 1) η επίδραση του μεγέθους του στο μέγεθος των παραγόμενων τεμαχών, στο παραγόμενο αέριο ωστικό κύμα, στα εκτινασσόμενα

τεμάχη και στην πρόκληση εδαφικών δονήσεων και 2) στην οικονομική επίδραση της εκάστοτε επιλογής. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των διατρημάτων τόσο μεγαλύτερα είναι τα πιθανά προβλήματα που θα ανακύψουν όσον αφορά τον πρώτο παράγοντα που αναφέρθηκε πρωτότερα.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ο υπολογισμός του λόγου του ύψους του προς το φορτίο (L/B), είναι δυνατό να αποδώσει τα γενικά, πιθανά, προβλήματα που θα προκύψουν, αποτελώντας μία επιπρόσθετη βοήθεια στον υπεύθυνο σχεδίασης τα ανατίναξης, (Πίνακας 4.2.1).

Πίνακας 4.2.1. Πιθανές επιδράσεις σε σχέση με τον λόγο L/B (Konya and Walter 1990)

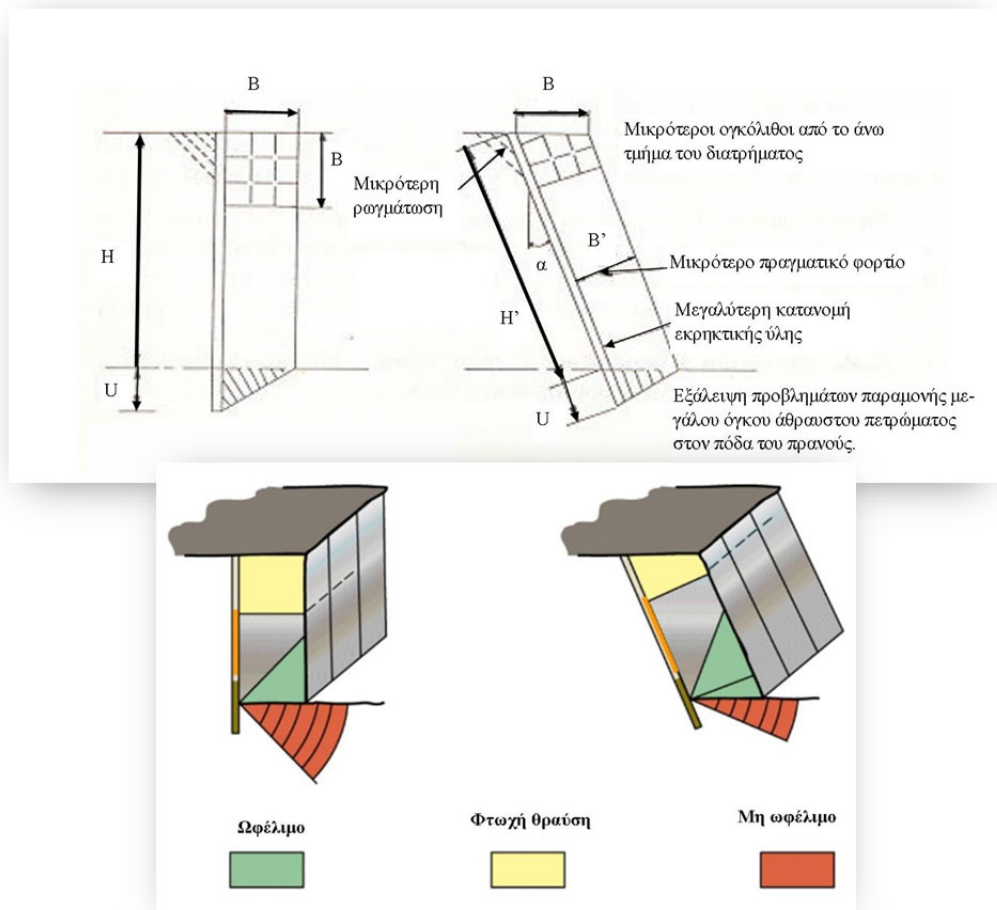
Λόγος (L/B)	Θραύση	Αέριο ωστικό κύμα	Εκτινασσόμενα τεμάχη	Εδαφικές δονήσεις	Σχόλια
1	φτωχή	ισχυρό	ισχυρά	ισχυρές	Σοβαρά προβλήματα, ρωγμάτωση (backbreak), ποδαρικό, απαραίτητος επανασχεδιασμός
2	μέτρια	μέτριο	μέτρια	μέτριες	Προτείνεται επανασχεδιασμός
3	καλή	μικρό	λίγα	λίγες	Καλός έλεγχος της ανατίναξης με καλή θραύση
4	εξαιρετική	ελάχιστο	ελάχιστα	ελάχιστες	Επαρκές όφελος

Γωνία κλίσης του διατρήματος

Οι ανόρυξη διατρημάτων υπό κλίση (angled drilling) προτιμάται συνήθως σε εφαρμογές ελεγχόμενων ανατινάξεων, σε σχέση με τις κάθετες διατρήσεις, (Σχήμα 4.2.5). Τα διατρήματα υπό γωνία παρέχουν πρωτίστως, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, καθώς εξαλείφουν το φαινόμενο παραμονής μεγάλου όγκου συμπαγούς πετρώματος στο δάπεδο. Συνήθως, η γωνία κλίσης των διατρημάτων ποικίλει μεταξύ 0° και 30° από τον κάθετο άξονα,. Χαρακτηριστικά αναφέρονται παρακάτω τα πλεονεκτήματα των υπό γωνία διατρημάτων (Hemphill 1981):

1. Μικρότερη ρωγμάτωση (backbreak) πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων.
2. Επιτρέπουν καλύτερη κατανομή της εκρηκτικής ύλης.

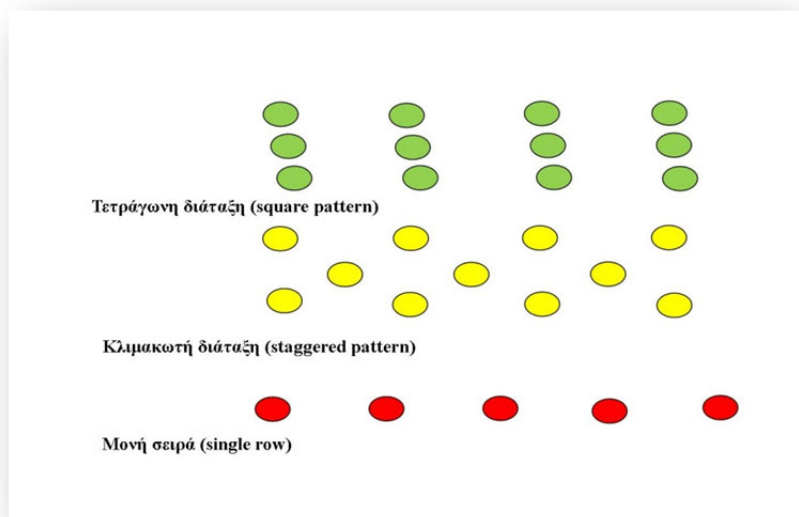
3. Εξαλείφουν προβλήματα παραμονής μεγάλου όγκου άθραυστου πετρώματος στον πόδα του πρανούς.
4. Εξασφάλιση καλύτερης θραύσης του πετρώματος.
5. Προκύπτουν λιγότεροι ογκόλιθοι από το άνω τμήμα του διατρήματος.



Σχήμα 4.2.5. Σύγκριση κατακόρυφου και υπό γωνία διατρήματος (Hemphill 1981).

4.3 Διάταξη των διατρημάτων (blasthole pattern) και χρονικά διαστήματα έναυσης μεταξύ αυτών (delay timing)

Η διάταξη των διατρημάτων αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο για τη λειτουργία της διαδικασίας της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης, και επιπροσθέτως έχει άμεση επίδραση στο αποτέλεσμα αυτής. Οι διατάξεις των διατρημάτων διαχωρίζονται σε κλιμακωτή (staggered pattern) και τετράγωνη (square pattern) στην περίπτωση πολλαπλών σειρών και σε μονή σειρά διατρημάτων (single row), (Σχήμα 4.3.1).



Σχήμα 4.3.1. Διατάξεις των διατρημάτων (<https://www.isee.org>).

Στην περίπτωση της κλιμακωτής διάταξης το αποτέλεσμα της απόσπασης του πετρώματος είναι πιο αποτελεσματικό, καθώς δεν παραμένουν άθραυστα τμήματα μεταξύ των διατρημάτων, λόγω της πλήρους αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των διατρημάτων. Με άλλα λόγια, σε αυτή τη διάταξη η αποτελεσματικότητα της εκρηκτικής ύλης κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος των διατρημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την ίδια ποσότητα εκρηκτικής ύλης, η κατανομή του μεγέθους των τεμαχών θα είναι πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με την τετράγωνη διάταξη. Στην αντίθετη περίπτωση της τετράγωνης διάταξης, αυξάνεται η πιθανότητα της πρόκλησης ρωγμής πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων. Όταν η απόσταση των διατρημάτων είναι μικρή, τότε προτείνεται η τετράγωνη διάταξη για τη διατήρηση ευθείας απόσπασης του τμήματος που θα εξορυχθεί, ενώ η εφαρμογή κλιμακωτής διάταξης απαιτεί τη διάτρηση περισσότερων διατρημάτων και η απόσπαση θα προκαλούσε μη ομοιόμορφη κοπή του μετώπου. Γενικότερα ισχύει ότι προτιμούνται μικρότερου μεγέθους διατρήματα στις τετράγωνες διατάξεις, ενώ όταν είναι απαραίτητη η απόσπαση μεγαλύτερου τμήματος πετρώματος και μεγαλύτερης διαμέτρου διατρήματα χρησιμοποιείται η κλιμακωτή διάταξη.

Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι, ο χρόνος μεταξύ των διαστημάτων πυροδότησης του κάθε διατρήματος (delay timing) αλλά και η κατεύθυνση προς την οποία θα πραγματοποιηθεί η απόσπαση της εξορυσσόμενης μάζας, αποτελούν πρόσθετες σημαντικές παραμέτρους. Στις επιφανειακές εξορύξεις οι

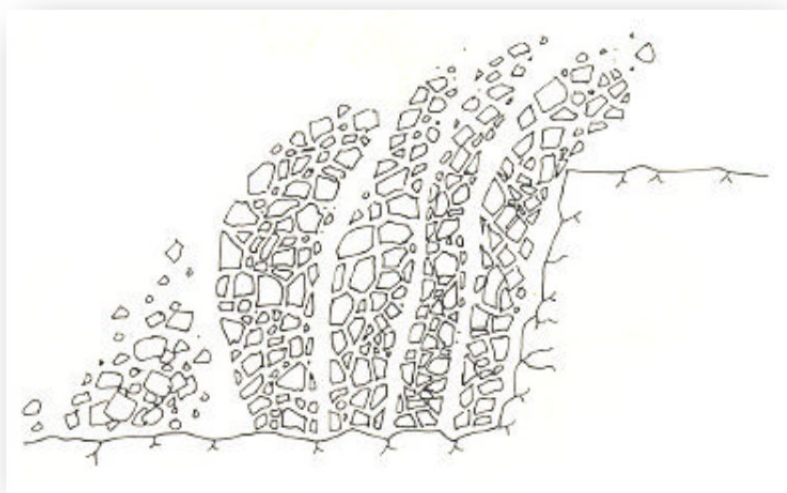
χρονοκαθυστερήσεις μεταξύ των διατρημάτων είναι της τάξης των millisecond και αφορούν μεταξύ των διατρημάτων της κάθε σειράς αλλά και μεταξύ των σειρών. Οι χρόνοι που δίνονται είναι απαραίτητοι, καθώς παρέχεται ο χώρος στο πέτρωμα των αμέσως επόμενων διατρημάτων να αποκολληθεί από το μέτωπο. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερες διάμετροι των διατρημάτων (με μεγάλες τιμές φορτίου και απόστασης) απαιτούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διατρημάτων, για την εξασφάλιση της μετακίνησης του πετρώματος. Τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης των χρονικών διαστημάτων που μεσολαβούν μεταξύ των διαδοχικών έναυσεων στα διατρήματα είναι τα ακόλουθα:

- Βελτίωση της θραύσης του πετρώματος μεταξύ των διατρημάτων.
- Μείωση των δονήσεων του εδάφους και του ωστικού κύματος.
- Παροχή μίας μέσης κατεύθυνσης ως προς την απόθεση της εξορυσσόμενης μάζας μπροστά από το μέτωπο της εξόρυξης.

Η θραύση του πετρώματος λαμβάνει χώρα σε διάστημα από 5 ms έως 15 ms μετά από την πυροδότηση της ανατίναξης. Η πίεση που ασκείται από την εκπομπή των αερίων, προκαλεί τη μετακίνηση του πετρώματος από το μέτωπο με ταχύτητες μεταξύ 15m/s και 30m/s. Η μετακίνηση αυτή κυμαίνεται από 0.15 m έως 0.30 m ανά 10ms, λαμβάνοντας υπόψη ότι η μετακίνηση αυτή πραγματοποιείται σε σχέση με τον εκάστοτε σχεδιασμό της γεωμετρίας της ανατίναξης, οδηγώντας στη βέλτιστη κοκκομετρία του υλικού. Ένας γενικός εμπειρικός κανόνας αναφέρει ότι αντιστοιχούν 2 ms ανά 0.30 m φορτίου, για τον σχεδιασμό των χρονικών διαστημάτων μεσολάβησης για την έναυση των διατρημάτων (Surface Blasting Handbook 2014). Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των σειρών των διατρημάτων, η μικρότερη ταχύτητα που αναπτύσσεται για την μετακίνηση του πετρώματος, προκαλεί δυσκολία στην μετακίνησή του, οδηγώντας στην κατακόρυφη απόσπασή του, δηλαδή στην εκτίναξή του (flyrocks).

Πιο συγκεκριμένα, όταν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διατρημάτων είναι πολύ μικρά, τότε προκαλείται η έναυση των διατρημάτων των πίσω σειρών πριν όμως δοθεί ο απαραίτητος χρόνος για την απομάκρυνση του πετρώματος των μπροστινών σειρών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκτίναξη τεμαχών υπό τη μορφή flyrocks, (Σχήμα 4.3.2). Στην αντίθετη περίπτωση όπου το χρονικό διάστημα έναυσης των διατρημάτων χαρακτηρίζεται ως μεγάλο, τότε δεν παρέχεται η αναγκαία «προστασία»

από το πέτρωμα των προγενέστερων διατρημάτων, προκαλώντας εκτινάξεις, μεγάλους ογκόλιθους και αέριο ωστικό κύμα, (Σχήμα 4.3.3).



Σχήμα 4.3.2. Πολύ μικρά χρονικά διαστήματα έναυσης μεταξύ των διατρημάτων (Surface Blasting Handbook 2014) .

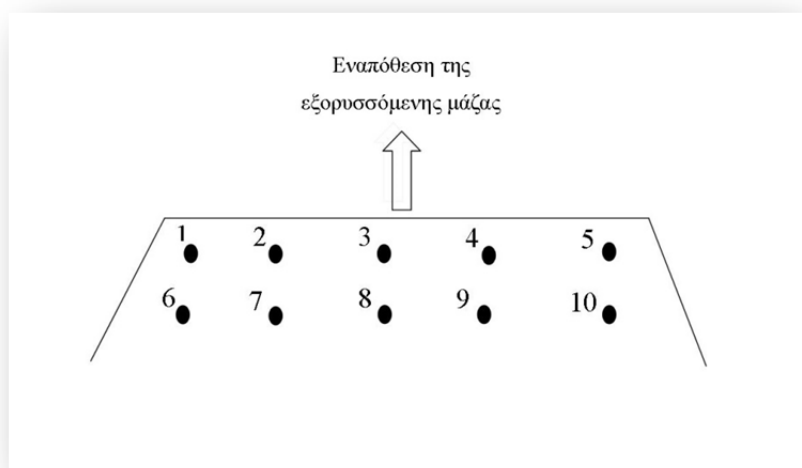


Σχήμα 4.3.3. Πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα έναυσης μεταξύ των διατρημάτων (Surface Blasting Handbook 2014).

Ο έλεγχος της διεύθυνσης κίνησης της εξορυσσόμενης μάζας, του σχήματος και της θραύσης της, πραγματοποιείται μέσω καθορισμού των χρονικών διαστημάτων έναυσης μεταξύ των διατρημάτων. Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικές διατάξεις με την αντίστοιχη αρίθμηση της έναυσης του κάθε διατρήματος (Sharma 2012):

➤ Διάταξη row by row

Στη διάταξη αυτή η έναυση των διατρημάτων πραγματοποιείται κατά σειρά ξεκινώντας από την πρώτη, ακολουθώντας έπειτα οι επόμενες σειρές, (Σχήμα 4.3.4). Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης διάταξης έναυσης, η εξορυσσόμενη σωρός που παράγεται χαρακτηρίζεται από ένα σχετικά μικρό ύψος με μεγάλη όμως έκταση και με κατεύθυνση εναπόθεσής της στο κέντρο μπροστά από το μέτωπο της εξόρυξης. Όσον αφορά την ποιότητα των παραγόμενων τεμαχών, είναι χαλαρά με μεγάλη ικανότητα εκσκαφής και μεταφοράς τους με τα κατάλληλα μέσα. Από την άλλη πλευρά, είναι απαραίτητο να σημειωθεί, ότι απαιτείται υψηλή ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό μέτρο, προκειμένου να επιτευχθεί το κατάλληλο μέγεθος τεμαχών. Επίσης, τα χρονικά διαστήματα που απαιτούνται μεταξύ των σειρών των διατρημάτων είναι μεγάλα, προκειμένου να ολοκληρωθεί η έναυση όλων των διατρημάτων της πρώτης σειράς και να ξεκινήσει η επόμενη.

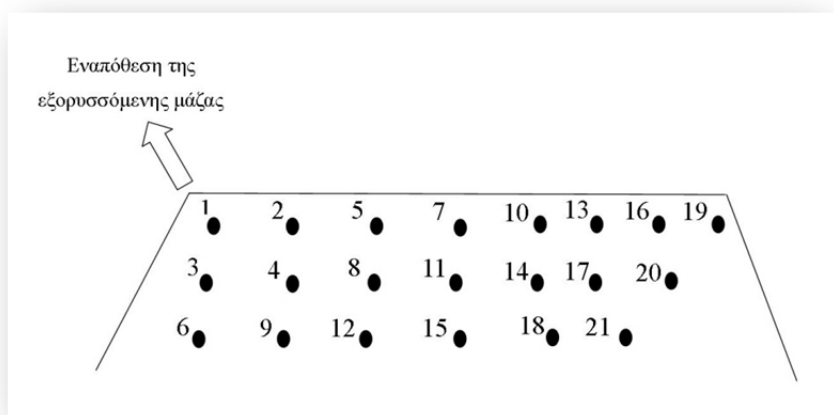


Σχήμα 4.3.4 Η διάταξη row by row και η διεύθυνση εναπόθεσης της εξορυσσόμενης μάζας.

➤ Διάταξη echelon

Η διάταξη αυτή αποτελεί μία κλιμακωτή διάταξη, στην οποία η εκκίνηση της έναυσης πραγματοποιείται από το πρώτο ακραίο διάτρημα της πρώτης σειράς, (Σχήμα 4.3.5). Η παρούσα διάταξη προκαλεί ελεγχόμενες και ελάχιστες επιπτώσεις στο μέτωπο και το ύψος της εξορυσσόμενης μάζας καθορίζεται από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (powder factor).

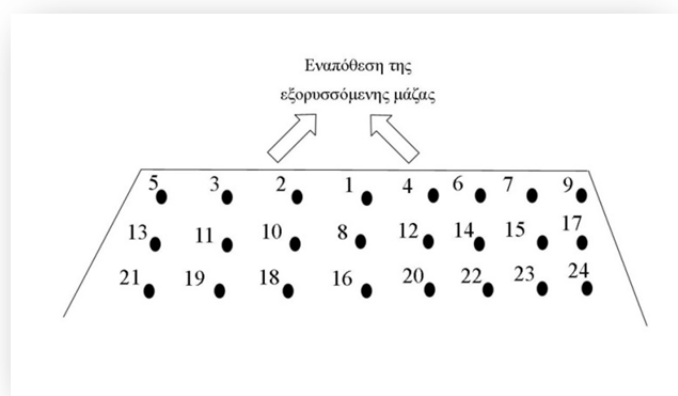
Η παραγόμενη μάζα εναποτίθεται διαγωνίως μπροστά από το μέτωπο εξόρυξης, με την κοκκομετρία των παραγόμενων τεμαχίων να χαρακτηρίζεται ως καλή.



Σχήμα 4.3.5. Η διάταξη echelon και η διεύθυνση εναπόθεσης της εξορυσσόμενης μάζας.

➤ Διάταξη zig-zag

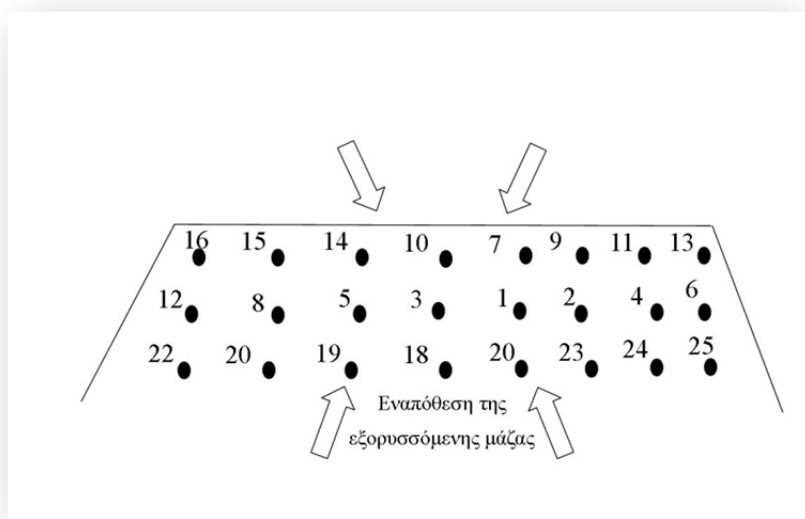
Η εκκίνηση των διαδοχικών εναύσεων υλοποιείται από το μέσο διάτρημα της πρώτης σειράς, ακολουθώντας έπειτα πρώτα τα διατρήματα που βρίσκονται εκατέρωθεν αυτού και στη συνέχεια με όμοιο τρόπο οι επόμενες σειρές, (Σχήμα 4.3.6). Η εξορυσσόμενη σωρός που παράγεται χαρακτηρίζεται από ένα σχετικά κανονικό ύψος και με κατεύθυνση εναπόθεσής της στο κέντρο μπροστά από το μέτωπο της εξόρυξης. Όσον αφορά την ποιότητα των παραγόμενων τεμαχίων, είναι καλή με επαρκή ικανότητα εκσκαφής και μεταφοράς τους με τα κατάλληλα μέσα.



Σχήμα 4.3.6. Η διάταξη zig-zag και η διεύθυνση εναπόθεσης της εξορυσσόμενης μάζας.

➤ Διάταξη diamond

Η εκκίνηση των διαδοχικών εναύσεων πραγματοποιείται από το διάτρημα που βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης. Η παρούσα διάταξη χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια ή δεν απαιτείται η μετακίνηση της εξορυσσόμενης μάζας. Πιο συγκεκριμένα η μάζα που παράγεται μετά την ανατίναξη του μετώπου, χαρακτηρίζεται από μεγάλο ύψος και ελάχιστη μετατόπισή της. Επίσης, η ποιότητα των παραγόμενων τεμαχών είναι καλή, αλλά τονίζεται ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα πρόκλησης εκτινασσόμενων τεμαχών (flyrocks) και για αυτό απαιτείται μεγαλύτερη επιγύμωση από το συνηθισμένο, (Σχήμα 4.3.7).



Σχήμα 4.3.7. Η διάταξη diamond και η διεύθυνση εναπόθεσης της εξορυσσόμενης μάζας.

4.4 Κατηγοριοποίηση μέσων έναυσης

Τα μέσα έναυσης χρησιμοποιούνται για τη διέγερση (initiation) της εναυσματικής γόμωσης, μεταδίδοντας το εναυσματικό σήμα από το ένα διάτρημα στο άλλο σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η επιλογή του κατάλληλου μέσου έναυσης είναι πολύ σημαντική για την επιτυχή πραγματοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο. Το εναυσματικό σύστημα όχι μόνο ελέγχει τη διαδοχικότητα των διατρημάτων, αλλά επηρεάζει και τις δονήσεις που παράγονται, το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχών, τη βιαιότητα της ανατίναξης και το μέγεθος της θραύσης όπισθεν των διατρημάτων. Τα μέσα έναυσης διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- ηλεκτρικά συστήματα
- μη ηλεκτρικά συστήματα (NONEL).

Επίσης, τα συστήματα έναυσης διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο έναυσης:

- τα συστήματα μετάδοσης της φλόγας που χρησιμοποιούνται για την έναυση εκρηκτικών χαμηλής διαρρηκτικότητας
- τα συστήματα μετάδοσης κρουστικού παλμού που χρησιμοποιούνται για την έναυση εκρηκτικών υψηλής διαρρηκτικότητας

Η έναυση των διαρρηκτικών υλών πραγματοποιείται με τη δημιουργία και τη μετάδοση ενός κρουστικού κύματος με τη βοήθεια των κοινών καψυλλίων δυναμίτιδας, ηλεκτρικών καψυλλίων δυναμίτιδας, εκρηκτικής θρυαλλίδας, συστημάτων Nonel.

Τα ηλεκτρικά και μη ηλεκτρικά συστήματα έναυσης συμπληρώνονται από διάφορα παρελκόμενα όπως επιβραδυντές, συσκευές πυροδότησης, κλπ. Τα συστήματα που κυρίως χρησιμοποιούνται σήμερα στην βιομηχανία είναι τα κοινά καψύλια και η θρυαλλίδα ασφαλείας, οι ηλεκτρικοί πυροκροτητές και οι μη ηλεκτρικοί πυροκροτητές (Nonel). Παρακάτω ακολουθεί η κατηγοριοποίηση των μέσων έναυσης:

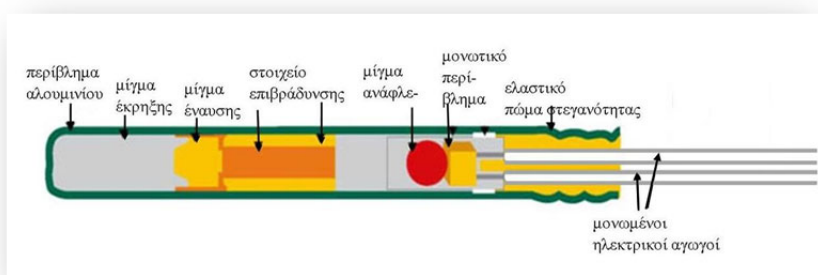
1) Ηλεκτρικά καψύλια των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών

A) Ηλεκτρικά καψύλια με επιβράδυνση

Τα ηλεκτρικά καψύλια με επιβράδυνση είναι τα πλέον διαδεδομένα μέσα, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις ανατινάξεις στα λατομεία. Αποτελούνται από έναν ηλεκτρικό πυροκροτητή (electric blasting caps), ο οποίος αποτελείται από ένα κύαθιο αλουμινίου που περιέχει την εκρηκτική ύλη, το στοιχείο επιβράδυνσης και την κεφαλή έναυσης. Πιο αναλυτικά, το στοιχείο επιβράδυνσης (delay element) περιέχει πυροτεχνική χημική ουσία η οποία καίγεται σε προκαθορισμένο χρόνο. Με τη βοήθεια του στοιχείου αυτού, καθίσταται εύκολη η επίτευξη μιας σειράς διαδοχικών ανατινάξεων στα διατρήματα του μετώπου, με μία μόνο πυροδότηση. Απαραίτητοι είναι οι δύο μονωμένοι αγωγοί (καλώδια) για τη μεταφορά της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την έναυση του πυροκροτητή, (Σχήμα 4.4.1 και Σχήμα 4.4.2).

Χρησιμοποιώντας επιβραδυντική ύλη επιτυγχάνεται η καύση με διαφορετική ταχύτητα, και διαφορετικούς χρόνους επιβράδυνσης στον πυροκροτητή. Η κεφαλή έναυσης περιλαμβάνει δύο μεταλλικά φύλλα επαφής ενωμένα στο ένα τους άκρο με

ένα σύρμα γεφύρωσης (bridge-wire). Τα άλλα δύο άκρα των φύλλων επαφής ενώνονται με τους αγωγούς ρεύματος. Όταν το απαιτούμενο ρεύμα διέλθει μέσα από το σύρμα γεφύρωσης, αυτό πυρακτώνεται και η κεφαλή έναυσης αναφλέγεται. Η προκαλούμενη φλόγα καίει την ύλη επιβράδυνσης και αυτή με τη σειρά της πυροδοτεί την εκρηκτική ύλη. Οι αγωγοί ρεύματος είναι κατασκευασμένοι από χαλκό ή σίδηρο και καλύπτονται εξωτερικά από πλαστικό μονωτικό υλικό. Τα ελεύθερα άκρα τους είναι βραχυκυκλωμένα για προστασία από επαγωγικά ρεύματα. Ο αριθμός επιβράδυνσης κάθε πυροκροτητή αναγράφεται σε αυτοκόλλητη ετικέτα πάνω στον ένα αγωγό.



Σχήμα 4.4.1. Δομή ηλεκτρικού καψυλίου με επιβράδυνση (Extraco SA).



Σχήμα 4.4.2. Ηλεκτρικά καψύλια με επιβράδυνση.

Οι ηλεκτρικοί πυροκροτητές, προσφέρουν μεγάλη ασφάλεια στην διαδικασία έναυσης των εκρηκτικών. Υπάρχει η δυνατότητα της πυροδότησης από καλά προστατευμένο χώρο, ενώ είναι δυνατός και ο έλεγχος των συνδέσεων με κατάλληλα

όργανα μέτρησης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο αφλογιστιών. Επιπλέον, ανάλογα με το βαθμό ευαισθησίας της κεφαλής έναυσης, οι ηλεκτρικοί πυροκροτητές διακρίνονται σε απλής ευαισθησίας I (τύπου A), μέσης ευαισθησίας II (τύπου F) και μειωμένης ευαισθησίας IV (τύπου P). Οι ηλεκτρικοί πυροκροτητές μέσης ευαισθησίας παρέχουν ικανοποιητικό βαθμό προστασίας από στατικό ηλεκτρισμό ή ακούσια έναυση. Ο παλμός έναυσης που απαιτείται για τους πυροκροτητές τύπου F είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν για τους πυροκροτητές τύπου A. Οι πυροκροτητές τύπου P χρησιμοποιούνται σε συνθήκες όπου υπάρχουν εγκαταστάσεις και γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής τάσης, στατικός ηλεκτρισμός ή επαγωγικά ρεύματα.

Οι ηλεκτρικοί πυροκροτητές διακρίνονται σε πυροκροτητές με επιβράδυνση ημίσεως δευτερολέπτου (HS) και χιλιοστού δευτερολέπτου (MS). Διατίθενται σε σειρές με προκαθορισμένο χρόνο επιβράδυνσης μεταξύ των διαδοχικών περιόδων. Οι πυροκροτητές ημίσεως δευτερολέπτου έχουν επιβράδυνση 500ms μεταξύ των διαδοχικών περιόδων. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε υπόγειες ανατινάξεις, όπου απαιτείται αρκετός χρόνος μεταξύ διαδοχικών εκρήξεων για τη μετατόπιση του θρυμματισμένου πετρώματος. Από την άλλη πλευρά, οι πυροκροτητές με επιβράδυνση χιλιοστού δευτερολέπτου, διατίθενται με επιβράδυνση 25ms, 30ms και 50ms μεταξύ των διαδοχικών περιόδων. Η μικρή διαφορά στο χρόνο έκρηξης μεταξύ των διαδοχικών περιόδων, έχει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανατίναξης. Το τμήμα του πετρώματος που έχει ήδη ανατιναχθεί επηρεάζει τη δομή και την αντοχή του υπόλοιπου, βοηθώντας το έργο των διατρημάτων που έπονται στην ακολουθία της ανατίναξης. Με αυτόν τον τρόπο, η έκρηξη είναι περισσότερο ελεγχόμενη, επιτυγχάνεται καλύτερος θρυμματισμός του πετρώματος και μειώνονται σημαντικά οι δονήσεις. Επισημαίνεται ότι οι πυροκροτητές χιλιοστού δευτερολέπτου χρησιμοποιούνται κυρίως σε ανατινάξεις κατά βαθμίδες (επιφανειακές) και διανοίξεις ορυγμάτων.

Η διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα για την ενεργοποίηση των ηλεκτρικών καψυλλίων είναι η ακόλουθη:

Μετά την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, στα άκρα των ηλεκτρικών αγωγών, μεσολαβεί ένα μικρό χρονικό διάστημα (ms) μέχρι να θερμανθεί η ηλεκτρική αντίσταση μέσα στο καψύλλιο και να προκαλέσει τη έναυση του εύφλεκτου μίγματος. Ο χρόνος αυτός αποτελεί τον χρόνο ενεργοποίησης (excitation time). Οι χρόνοι ενεργοποίησης διαφέρουν μεταξύ των καψυλίων λόγω κατασκευαστικών

διαφορών. Μετά την ενεργοποίηση της γόμωσης ενίσχυσης διακόπτεται κατά κανόνα η ηλεκτρική σύνδεση του καψυλλίου με τους κύριους αγωγούς. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος αποκοπής (lag time). Ο χρόνος μεταξύ της αρχικής επιβολής του ρεύματος και της έκρηξης της βασικής γόμωσης του καψυλλίου ονομάζεται χρόνος έκρηξης (bursting time). Επισημαίνεται ότι για την περίπτωση σύνδεσης πολλών καψυλλίων σε σειρά είναι απαραίτητο ο μικρότερος χρόνος αποκοπής να είναι μεγαλύτερος από τον μεγαλύτερο χρόνο ενεργοποίησης. Αυτό εξηγείται με το γεγονός ότι όλα τα καψύλια είναι απαραίτητο να λάβουν την απαιτούμενη ένταση ρεύματος για να ενεργοποιηθούν πριν διακοπεί η συνδεσμολογία, (Αγιουτάντης 1996).

Τα ηλεκτρικά καψύλια τα οποία εφαρμόζονται στα διατρήματα για την απόσπαση του πετρώματος στα λατομεία, τοποθετούνται στην επιφάνεια των διατρημάτων και συνδέονται με την ακαριαία θρυαλλίδα (η οποία τοποθετείται σε όλο το μήκος του διατρήματος) με ειδική μονωτική ταινία, (Σχήμα 4.4.3). Έτσι, λοιπόν, όταν παράγεται το ρεύμα υψηλής τάσης (~2000 ή 4000Volt) από τον δυναμοεκρηκτήρα (Σχήμα 4.4.3), το ρεύμα μεταδίδεται μέσω των δύο καλωδίων των ηλεκτρικών καψυλλίων και με φορά από το πάνω μέρος του διατρήματος προς τα κάτω, η έκρηξη μεταφέρεται μέσω της ακαριαίας θρυαλλίδας στη γομωμένη διατρητική στήλη και έπειτα μεταδίδεται στο ANFO.



Σχήμα 4.4.3. Αριστερά: Συνδεσμολογία ηλεκτρικών καψυλλίων. Δεξιά: Δυναμοεκρηκτήρας παραγωγής ρεύματος.

Β) Ηλεκτρικά καψύλια χωρίς επιβράδυνση

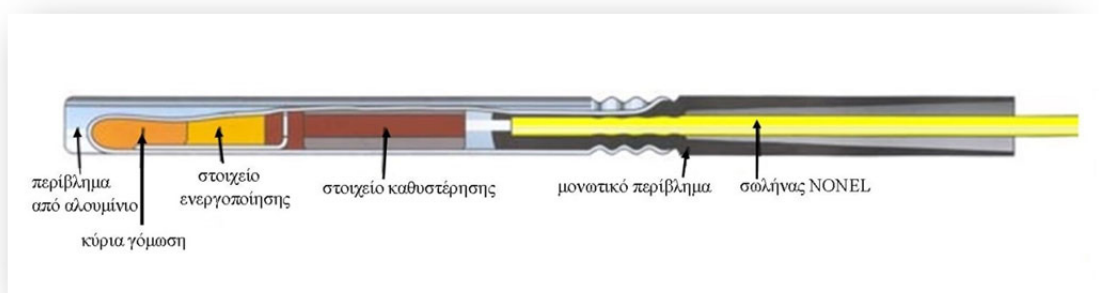
Τα ηλεκτρικά καψύλια ακαριαίας εφαρμογής (instantaneous detonators) αποτελούνται από κάλυκα αλουμινίου εντός του οποίου βρίσκονται διαφορετικές

χημικές ουσίες ή μίγματα ουσιών. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από το μίγμα ανάφλεξης, το εύφλεκτο μίγμα και το μίγμα έναυσης, το οποίο όταν θερμανθεί εκρήγνυται. Σε παλαιότερες πρακτικές ανατινάξεων και χρήσης των καψυλλίων, το μίγμα έναυσης αποτελούνταν από το αζίδιο του μολύβδου. Επιπλέον, στο κατώτερο τμήμα του καψυλλίου εντοπίζεται ποσότητα εκρηκτικής ύλης, η οποία αποτελεί το μίγμα έκρηξης, (Τσουτρέλης 1997).

Η λειτουργία τους βασίζεται στη διοχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ενός νήματος χρωμονικελίνης (bridge wire), προκαλώντας την ανάφλεξη του χημικού μίγματος που το περιβάλλει. Διευκρινίζεται ότι για την επίτευξη της πύρωσης του νήματος, θα πρέπει η αντίσταση να είναι μικρότερη από εκείνη του μίγματος ανάφλεξης, ώστε το διερχόμενο ρεύμα να διέλθει από αυτό και όχι από τη χημική ύλη. Έπειτα, αυτό με τη σειρά του πυροδοτεί το μίγμα έναυσης και το κρουστικό μίγμα που παράγεται προκαλεί την έναυση του μίγματος έκρηξης. Τα ακαριαία ηλεκτρικά καψύλια εφαρμόζονται σε διατρήματα μικρής διαμέτρου όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις δευτερογενούς θραύσης και σαφώς απαγορεύεται η χρήση τους σε συνδυασμό με καψύλια επιβράδυνσης (Heinio 1999).

2) Μη ηλεκτρικά συστήματα (NONEL)

Το σύστημα NONEL είναι σύστημα κρουστικών κυμάτων, όπου οι ηλεκτρικοί αγωγοί αντικαθίστανται από έναν πλαστικό σωλήνα, του οποίου τα εσωτερικά τοιχώματα είναι επενδυμένα με δραστικό υλικό, το οποίο μπορεί να μεταφέρει ένα κρουστικό κύμα μέσω του σωλήνα με ταχύτητα 2.100 m/sec. Το κρουστικό κύμα παράγει στο τέρμα του σωλήνα μια ακίδα φλόγας, που έχει τόση ένταση ώστε να αναφλέξει τον πυροκροτητή. Η εξωτερική διάμετρος του πλαστικού σωλήνα είναι 3 mm και δεν επηρεάζεται από το κρουστικό κύμα, που διαδίδεται εντός του οπότε δεν πυροδοτεί το εκρηκτικό υλικό που υπάρχει μέσα στον σωλήνα, (Σχήμα 4.4.4). Το σύστημα NONEL δεν επηρεάζεται από ηλεκτρική επίδραση, οπότε είναι ιδανικό όταν δεν είναι κατάλληλη ή δεν επιτρέπεται η χρήση ηλεκτρικής πυροδότησης. Η χρήση του NONEL είναι αποτελεσματική πυροδοτώντας τις εκρηκτικές ύλες από τη βάση. Τα εκρηκτικά καψύλια στις περισσότερες περιπτώσεις, πραγματοποιούν την πυροδότηση στην κορυφή του διατρήματος και είναι πιθανή η αδρανοποίησή της, στην παρουσία σχετικά μη ευαίσθητων εκρηκτικών υλών, όπως ANFO και ορισμένων εκρηκτικών γαλακτωμάτων.



Σχήμα 4.4.4. Μη ηλεκτρικό καψύλι (NONEL) (Extraco SA) .

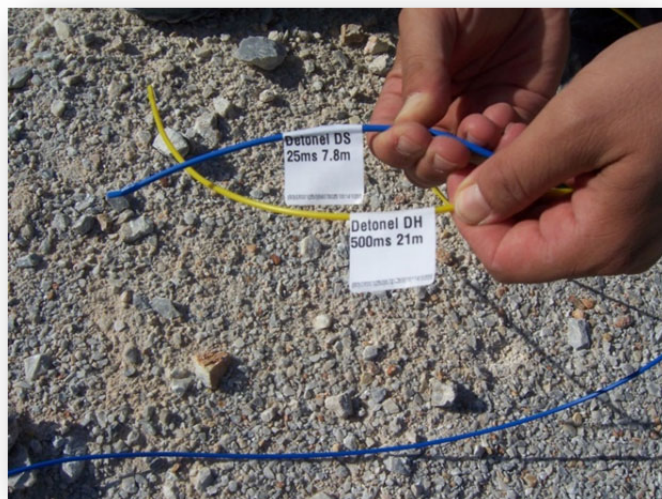
Αναλυτικότερα, στην περίπτωση εφαρμογής μη ηλεκτρικών καψυλίων στις επιφανειακές ανατινάξεις στα λατομεία, η έκρηξη διαδίδεται από τον πυθμένα του διατρήματος προς τα πάνω. Η έκρηξη μεταφέρεται σε όλο το κλειστό κύκλωμα των NONEL και μέσω των διάτρητων σωλήνων του φτάνει στον πυθμένα του κάθε διατρήματος, όπου εκρήγνυται το κάθε καψύλι και κατά σειρά εκρήγνυται το ANFO και ο αμμωνίτης. Διευκρινίζεται, ότι η σύνδεση των μη ηλεκτρικών καψυλίων μεταξύ τους πραγματοποιείται με τους συνδετήρες καψυλίων, (Σχήμα 4.4.5).



Σχήμα 4.4.5. Μη ηλεκτρικό καψύλι NONEL (αριστερά) και σύνδεση NONEL με συνδετήριο καψυλίου (δεξιά).

Η λειτουργία των συνδετήριων είναι να μεταδίδουν το κρουστικό κύμα μέσω των σωλήνων NONEL στα σημεία σύνδεσης, ορίζοντας την χρονική καθυστέρηση που υπάρχει στον μικρό πυροκροτητή που είναι τοποθετημένος στον συνδετήρα. Εκτός,

λοιπόν από τα καψύλια με καθυστέρηση που υπάρχουν στα άκρα του σωλήνα NONEL, υπάρχει η δυνατότητα το κάθε διάτρημα να συνδεθεί με επιφανειακούς συνδέσμους οι οποίοι παρέχουν πρόσθετη καθυστέρηση, (Σχήμα 4.4.6).

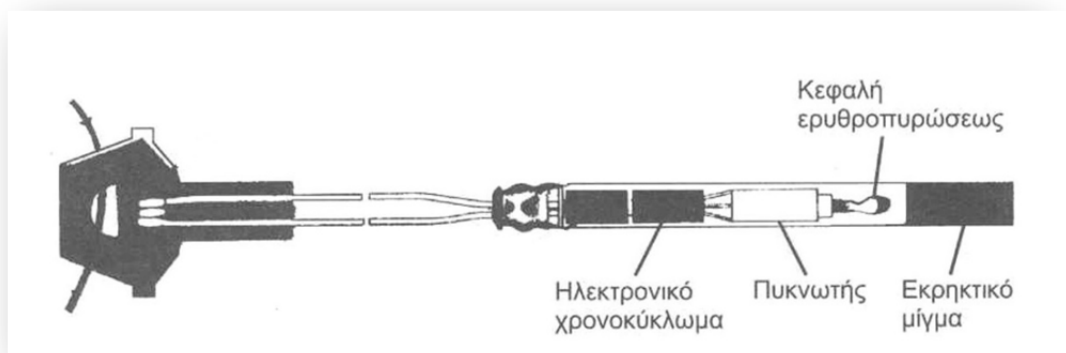


Σχήμα 4.4.6. Καψύλι NONEL (κίτρινο) και το συνδετήριο καψυλίου (μπλε), με τις χρονικές καθυστερήσεις τους, στο λατομείο Δρυμού.

Στα λατομεία, για την ορθή απόσπαση του πετρώματος, χρησιμοποιούνται συστήματα NONEL με χρόνους καθυστέρησης, τέτοιοι ώστε να είναι προσαρμοσμένοι στις συνθήκες που ισχύουν στην εκάστοτε ανατίναξη. Στις ανατινάξεις με πολλές σειρές είναι σημαντικό να δοθεί ο χρόνος στο πέτρωμα της πρώτης σειράς, ώστε να μετακινηθεί προς τα εμπρός πριν αρχίσει να κινείται η δεύτερη σειρά. Αναφέρεται, ότι ο όγκος του πετρώματος αυξάνει κατά 50% περίπου όταν θρυμματίζεται από την έκρηξη. Σε αυτή την αύξηση του όγκου πρέπει να δοθεί χώρος σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

3) Ηλεκτρονικά καψύλια

Τα ηλεκτρονικά καψύλια (electronic detonators) εμφανίστηκαν στη διεθνή αγορά το 1993, αποτελώντας ένα πρωτοποριακό προϊόν, του οποίου η εφαρμογή αποτέλεσε επανάσταση στον τομέα των μέσων έναυσης, (Σχήμα 4.4.7). Η πρωτοπορία τους έγκειται στη βελτίωση της ακρίβειας των χρόνων επιβράδυνσης, δηλαδή στον χρόνο που απαιτείται από την πυροδότηση έως την έναυση των εκρηκτικών υλών (electronic delay detonators).



Σχήμα 4.4.7. Ηλεκτρονικό καψύλι (Τσουτρέλης 1997).

Τα συμβατικά μέσα έναυσης (ηλεκτρικά καψύλια, NONEL), βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας, η οποία περιγράφεται από την επιβράδυνση που επιτυγχάνεται από τη χρήση της εκρηκτικής ύλης η οποία καίγεται με περίπου σταθερή ταχύτητα. Συνεπώς, ο επιθυμητός χρόνος επιβράδυνσης καθορίζεται από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης. Παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο στον τομέα των εκρηκτικών δεν έχει επιτευχθεί η κατασκευή εκρηκτικής ύλης με απόλυτα σταθερή ταχύτητα καύσης, καθώς η ταχύτητα της καύσης επηρεάζεται από τη χημική σύστασή της και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα μη ηλεκτρικά καψύλια NONEL, τα οποία συγκαταλέγονται στα πιο εξελιγμένα μέσα έναυσης, παρουσιάζουν διακύμανση στο χρόνο επιβράδυνσης της τάξης των 5 με 6ms. Αντιθέτως, στα ηλεκτρονικά καψύλια η ακρίβεια του χρόνου επιβράδυνσης είναι της τάξης μόλις του 1ms. Με τη χρήση των ηλεκτρονικών καψυλίων εξασφαλίζεται η αξιοποίηση της ισχύος της εκρηκτικής ύλης στο μέγιστο βαθμό, επιτυγχάνοντας παράλληλα το επιθυμητό μέγεθος των παραγόμενων τεμαχών. Επίσης, μειώνονται οι δονήσεις του εδάφους, αυξάνοντας την ασφάλεια του λατομικού και περιβάλλοντος χώρου.

Ο χρόνος επιβράδυνσης των ηλεκτρονικών καψυλίων καθορίζεται από ένα μικροσκοπικό ηλεκτρονικό μηχανισμό που έχει τη δυνατότητα να μετράει το χρόνο με ακρίβεια χιλιοστού του δευτερολέπτου. Μόλις ολοκληρώσει τη διαδικασία της χρονομέτρησης ο μηχανισμός αυτός «απελευθερώνει» ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια της οποίας διεγείρεται η εκρηκτική ύλη του πυροκροτητή, όπως ακριβώς συμβαίνει στους ηλεκτρικούς πυροκροτητές. Η διαφορά του ηλεκτρονικού καψυλίου από το ηλεκτρικό εντοπίζεται στο ότι το ηλεκτρικό καψύλι απαιτεί μόνο τη διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος από την πηγή (δυναμοεκρηκτήρας). Αντιθέτως, το ηλεκτρονικό καψύλι δεν εκρήγνυται μόνο με τη διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος. Απαιτείται η σύνδεσή του με την ειδική ηλεκτρονική μονάδα προγραμματισμού –

πυροδότησης η οποία και θα στείλει κωδικοποιημένο σήμα στο μικροσκοπικό ηλεκτρονικό κύκλωμα του πυροκροτητή, (www.extraco.gr).

4) Ακαριαία θρυαλλίδα

Η ακαριαία θρυαλλίδα (detonating cord), (Σχήμα 4.4.8) είναι ένα πολύ συνηθισμένο εναυσματικό μέσο, το οποίο μπορεί να ενεργοποιηθεί με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού ή κοινού πυροκροτητή Νο 8. και εκρήγνυται σε όλο το μήκος της με ταχύτητα περίπου 6800 m/s. Η ακαριαία θρυαλλίδα αποτελείται από ένα ευλύγιστο σχοινί μερικών χιλιοστών με πυρήνα ισχυρής εκρηκτικής ύλης PETN (3.6g/m με 70g/m) και εξωτερικά περιβάλλεται από συνθετικά και βαμβακερά υλικά, για την απόκτηση της αναγκαίας ευκαμψίας και της αντοχής σε εφελκυσμό. Επιπλέον, επικαλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα PVC για προστασία από την υγρασία, (US Army corps of Engineers 1972). Σημειώνεται ότι παρόλη τη δύναμη του εκρηκτικού της κύματος, η ακαριαία θρυαλλίδα είναι περιορισμένης ευαισθησίας και παρουσιάζει μεγάλη ασφάλεια έναντι της τριβής και των κρούσεων (US Army corps of engineers 1972).



Σχήμα 4.4.8. Η ακαριαία θρυαλλίδα σε μορφή πηνίου (καρούλι).

Η ακαριαία θρυαλλίδα χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση της μετάδοσης της έκρηξης σε όλο το μήκος του διατρήματος ακόμα και σε δύσκολες κλιματολογικές συνθήκες, όπου δεν επιτρέπεται η εφαρμογή ηλεκτρικού καψυλίου. Επίσης, είναι απαραίτητη στην ταυτόχρονη ανατίναξη πολλών διατρημάτων, αλλά και σε κυκλώματα ανατίναξης για τη μεταφορά του εκρηκτικού κύματος από την επιφάνεια

στα διατρήματα. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση χρήσης μη ηλεκτρικών καψυλίων (NONEL), δύναται να μη χρησιμοποιηθεί ακαριαία θρυαλλίδα, σε αντίθετη περίπτωση είναι απαραίτητη λόγω διακεκομμένης γόμωσης ή παρουσίας εγκοίλων.

Τέλος, η χρήση της είναι ευρεία στις υποθαλάσσιες ανατινάξεις, με απαραίτητη προσοχή στην προστασία των άκρων της από το νερό, καθώς η απορρόφηση νερού θα οδηγήσει στη μείωση της αποτελεσματικότητάς της. Επισημαίνεται ότι είναι απαραίτητη η κάλυψη του εκτός τμήματός της από το διάτρημα με τριάντα εκατοστά εδαφικού υλικού, προκειμένου να αποφευχθεί ο ισχυρός και οξύς κρότος (Παναγιώτου 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Η εξόρυξη των πετρωμάτων αποτελεί ένα σύνολο εργασιών, οι οποίες πραγματοποιούνται με σκοπό την απόσπαση τμημάτων του πετρώματος από τη φυσική του θέση. Η κατάτμηση του πετρώματος υλοποιείται, ώστε να γίνεται με ευχέρεια η φόρτωση, η μεταφορά και η περαιτέρω επεξεργασία του. Τα λατομεία αδρανών υλικών αποτελούν επιφανειακές εκσκαφές, από τις οποίες γίνεται η λήψη των λατομικών ορυκτών. Η μέθοδος της επιφανειακής εκμετάλλευσης με ανοιχτές βαθμίδες, είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος εκμετάλλευσης των αδρανών υλικών στην Ελλάδα. Η μορφή της ανοικτής εκσκαφής αλλά και η εφαρμοζόμενη μέθοδος πρέπει να προσαρμόζονται στις εκάστοτε γεωμορφολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του κοιτάσματος, με γνώμονα την ασφαλή και ορθολογική εκμετάλλευση των εξορυκτικών εργασιών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εκσκαφών (το ύψος του μετώπου, η κλίση της βαθμίδας, κ.α.) καθορίζονται στους Κανονισμούς Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (ΚΜΛΕ).

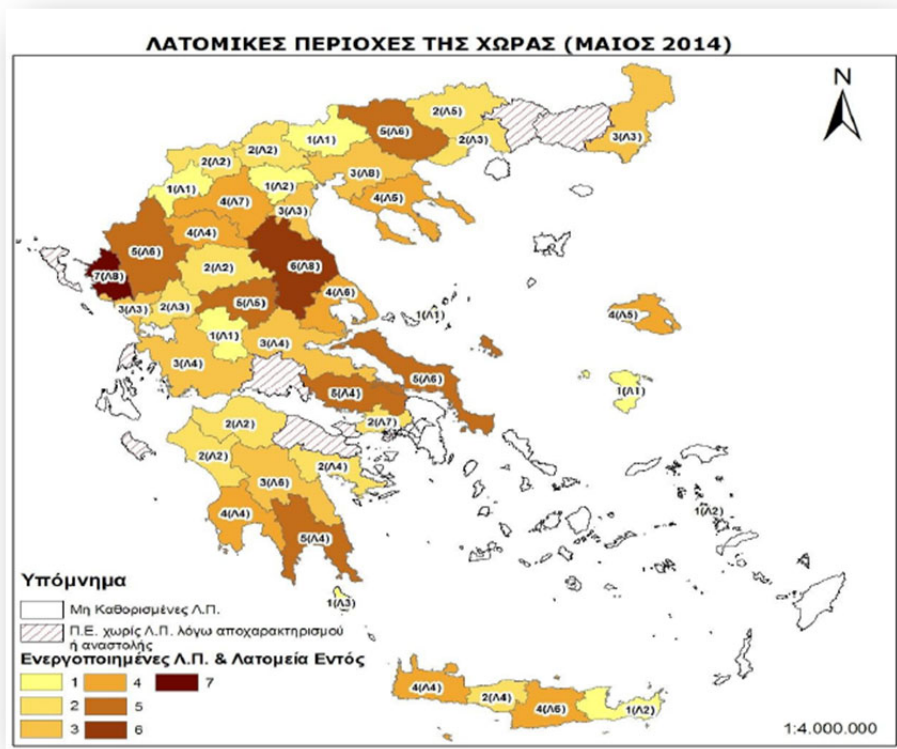
Οι εκμεταλλεύσεις των αδρανών υλικών μπορούν να βρεθούν σχεδόν σε όλες τις περιοχές του Ελλαδικού χώρου και ορίζονται ως χωροθετημένες ειδικές περιοχές εκμετάλλευσης, οι οποίες αποτελούν τις λατομικές περιοχές ή ζώνες. Βασικό χαρακτηριστικό των εκμεταλλεύσεων αδρανών είναι η μηδενική ουσιαστικά αποκάλυψη του κοιτάσματος, καθώς τις περισσότερες φορές η εκσκαφή γίνεται επί του ασβεστολιθικού κοιτάσματος. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα αναλυθεί η χρήση των αδρανών υλικών καθώς και ο τρόπος εκμετάλλευσης των υπαίθριων λατομείων αδρανών υλικών καθώς.

5.2 Η λατομική δραστηριότητα στην Ελλάδα

Η λατομική δραστηριότητα στον ελλαδικό χώρο κατέχει μία εξέχουσα θέση στην οικονομική ζωή της χώρας, καθώς ήδη από την αρχαιότητα τα λατομικά προϊόντα χρησιμοποιούνταν στην καθημερινότητα, εξυπηρετώντας τις ανάγκες της κοινωνίας. Η ιδιομορφία του ανάγλυφου και της φύσεως του εδάφους της χώρας, διευκόλυνε την ανάπτυξη των λατομικών μονάδων σε όλη την έκτασή της, με αποτέλεσμα τα λατομικά προϊόντα να αποτελέσουν σημαντική πηγή κέρδους αλλά και βασική πρώτη η μεταποιητική υλη για κατασκευή απλών χρηστικών κατασκευών όσο και ιδιαίτερων έργων τέχνης με ποιότητα, αντοχή στον χρόνο και ιδιαίτερη πολιτιστική σημασία.

Στην αρχαία Ελλάδα ένα μεγάλο μέρος της ανάπτυξης του πολιτισμού οφειλόταν στην εκμετάλλευση και χρήση του ορυκτού πλούτου της χώρας, η οποία περιέχει πολλές αξιοποιήσιμες πρώτες ύλες. Στο πέρασμα των αιώνων, τα λατομικά προϊόντα στήριξαν και ενίσχυσαν τόσο τις τοπικές κοινωνίες όσο και την ελληνική οικονομία στο σύνολό της, προσφέροντας τις πρώτες ύλες για την υλοποίηση σημαντικών έργων υποδομής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη συμβολή στην ανάπτυξη, βελτιώνοντας το βιοτικό επίπεδο και τις κοινωνικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής.

Η συμβολή της Ελλάδας στην επιχειρηματική κοινότητα είναι εξαιρετικά σημαντική, αναπτύσσοντας ένα ευρύ δίκτυο σύγχρονων, λατομικών μονάδων. Το δίκτυο αυτό βρίσκεται σε όλη την επικράτεια, προωθώντας βασικά προϊόντα, συμβάλλοντας στην οικονομική αειφόρο ανάπτυξη, τόσο των τοπικών κοινωνιών όσο και της ευρύτερης χώρας. Είναι αξιοσημείωτο ότι πολλές λατομικές μονάδες έχουν καταφέρει να εξάγουν σημαντικές ποσότητες ορυκτών, με αποτέλεσμα την οικονομική ανάπτυξη αλλά και την διεθνή αναγνωσιμότητα. Στο Σχήμα 5.2.1 παρουσιάζεται ο χάρτης κατανομής των λατομικών περιοχών στον ελλαδικό χώρο, που συντάχθηκε από τη Διεύθυνση Πολιτικής και Ερευνών του τμήματος ΥΠΕΚΑ, σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα της διετίας 2013-2014. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι ενεργοποιημένες λατομικές περιοχές καθώς και ο αριθμός των λατομείων αδρανών υλικών ανά νομό. Ο συνολικός αριθμός των λατομείων αδρανών ανέρχεται στα 222, από τα οποία τα 188 είναι ενεργά και τα 13 είναι σε αποκατάσταση, (ΙΓΜΕ 2007). Ενώ σύμφωνα με τα στοιχεία του ΥΠΕΚΑ 2009, το σύνολο των λατομείων είναι 195, από τα οποία τα 159 είναι ενεργά και τα 36 σε αποκατάσταση.



Σχήμα 5.2.1. Χάρτης κατανομής των λατομικών περιοχών στον ελλαδικό χώρο (Δ/ση Πολιτικής και Ερευνών ΥΠΑΠΕΝ (τ.ΥΠΕΚΑ), για τη διετία 2013-2014).

Είναι πολύ σημαντική η χωροθέτηση των λατομείων αδρανών υλικών, καθώς οι λατομικές περιοχές (ΛΠ) αποτελούν το θεσμικό εργαλείο της χωροθέτησης και του βιώσιμου σχεδιασμού των αδρανών από πρωτογενείς πρώτες ύλες. Ο καθορισμός των λατομικών περιοχών είναι υψίστης σημασίας για λόγους όχι μόνο χωροταξικούς αλλά και περιβαλλοντικούς, οικονομικούς, ποιότητας υλικών, εποπτείας και ελέγχου. Ο μη καθορισμός λατομικών περιοχών, οδηγεί στην παράνομη εξόρυξη, η οποία πέρα από τις οικονομικές συνέπειες, υποκινεί την αυθαίρετη δόμηση αλλά και την προσβολή του φυσικού περιβάλλοντος, (Διεύθυνση Πολιτικής Ορυκτών Πρώτων Υλών, ΥΠΕΚΑ). Σύμφωνα με την επικαιροποιημένη βάση δεδομένων για τα έτη 2014-2015, από το ΥΠΕΚΑ, το 77.37% των λατομείων αδρανών υλικών λειτουργεί εντός λατομικών περιοχών, ενώ το 22.36% λειτουργεί εκτός λατομικών περιοχών. Σχετικά με το ιδιοκτησιακό καθεστώς λατομείων αδρανών το 54.26% είναι δημόσια, το 28.72% ιδιωτικά και το 17.02% δημοτικά/κοινοτικά.

Σύμφωνα με τα στοιχεία από τα υποβληθέντα δελτία δραστηριότητας, η παραγωγή των πρωτογενών αδρανών υλικών σε εθνικό επίπεδο για το έτος 2014

κυμάνθηκε σε 38 εκατ. τόνους. Ειδικότερα οι ηγέτιδες εταιρείες του κλάδου του τσιμέντου στην Ελλάδα (TITAN, ΑΓΕΤ, ΧΑΛΥΨ) παρήγαγαν πάνω από 18.1 εκατ. τόνους ασβεστολιθικών αδρανών υλικών, με προορισμό την παραγωγή τσιμέντου, την αγορά των δομικών υλικών, τα μεγάλα οδικά και κατασκευαστικά έργα στη χώρα.

5.3 Αδρανή υλικά και η χρήση τους

Τα αδρανή υλικά αποτελούν ένα σύνολο διαβαθμισμένων κατά μέγεθος τεμαχών υλικών ορυκτής σύστασης (σκύρα, χαλίκια, άμμοι), που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με κάποιο συγκολλητικό μέσο (τσιμέντο, ασφαλτος κ.α.) για παραγωγή συνθέσεων όπως σκυροδέματα, ασφαλικά μίγματα και σκυρωτά οδοστρώματα ή και αυτούσια (π.χ. ως έρμα σιδηροδρομικών γραμμών). Ονομάζονται αδρανή γιατί η πλειονότητα τους δεν αντιδρά χημικά με τις διάφορες «συγκολλητικές» ύλες. Με άλλα λόγια, δεν επιφέρουν χημικές μεταβολές στις σύνθετες τεχνητές ύλες των οποίων αποτελούν συστατικά (π.χ. σκυρόδεμα). Η μεγαλύτερη ποσότητα αδρανών υλικών προέρχεται από τη θραύση κατάλληλων εξορυγμένων πετρωμάτων (κυρίως ασβεστολιθικών) ή από περαιτέρω θραύση υλικών φυσικών αποθέσεων (μίγμα κυρίως ασβεστολιθικών, χαλαζιακών και γρανιτικών πετρωμάτων) ποταμών, χειμάρρων, θαλάσσης.

Τα αδρανή υλικά με βάση την προέλευσή τους διακρίνονται σε, (ΙΓΜΕ):

- Φυσικής προέλευσης (θραυστά πετρώματα, ποταμίσιες, λιμναίες, θαλάσσιες αποθέσεις, λατομικά προϊόντα κ.α.)
- Τεχνητά ή βιομηχανικά τα οποία έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (π.χ. τέφρες, σκωρίες, περλίτης, βερμικουλίτης κ.α.).
- Ανακυκλωμένα που προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδαφίσεων σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφαλτικών έργων κ.α.).

Όσον αφορά τον σκοπό της χρήσης τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, (ΙΓΜΕ):

- Συμβατικά αδρανή υλικά για συνήθεις ή συμβατικές χρήσεις όπως για τη παρασκευή σκυροδέματος (κύρια χρήση), για την οδοποιία, για κονιάματα, για υλικά τεχνικών έργων κ.α. Τα υλικά αυτά είναι ανθρακικής σύστασης, διότι αφενός ικανοποιούν τις ποιοτικές απαιτήσεις των έργων συνδυάζοντας το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής και αφετέρου διότι τα ανθρακικά πετρώματα παρουσιάζουν ευρεία εξάπλωση.
- Αδρανή υλικά ειδικών χρήσεων για αντιστοιχιστικούς ασφαλοτάπητες ή υποβάσει σιδηροδρομικών γραμμών και τα οποία συνίστανται κυρίως από ηφαιστειακά πετρώματα ή άλλα κατάλληλης σύστασης πετρώματα. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται επίσης και τα αδρανή για τη παραγωγή τσιμέντου ή ασβέστη, που είναι μεν ασβεστολιθικής σύστασης αλλά ειδικών προδιαγραφών (όρια περιεκτικότητας κύριων στοιχείων, απουσία προσμίξεων κ.α.). Σύμφωνα με το ΙΓΜΕ αυτού του είδους αδρανή υλικά είναι ειδικών προδιαγραφών και δεν μπορούν να εντοπισθούν σε προκαθορισμένες λατομικές περιοχές, οπότε επιτρέπεται η εκμετάλλευσή τους εκτός λατομικών περιοχών ύστερα από ειδική μελέτη καταλληλότητας που συντάσσεται από το ΙΓΜΕ.

Εκτός από τα θραυστά αδρανή, ποσότητες αδρανών υλικών λαμβάνονται και από αμμοληψίες ποταμοχειμάρων αποθέσεων. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν χαμηλό κόστος εξόρυξης επειδή η απόληψή τους δεν απαιτεί εκβραχισμό, αλλά συνήθως επιτυγχάνεται με εκσκαπτικά μηχανήματα. Σε ορισμένες περιοχές, λόγω μη ύπαρξης λατομείων θραυστών υλικών, χρησιμοποιούνται υλικά από ποταμοχειμάρεις αποθέσεις, που όμως στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρούνται ακατάλληλα για το σκυρόδεμα επειδή είναι πολύμικτα με μεταβαλλόμενη πετρογραφική και χημική σύσταση που δεν πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Η κύρια χρήση των αδρανών αφορά στην παραγωγή σκυροδέματος (οπλισμένου ή άοπλου). Οι κόκκοι των αδρανών, λόγω γωνιώδους και ακανόνιστου σχήματος συνδέονται μεταξύ τους και συγκρατούνται στο σκυρόδεμα με τη βοήθεια της τσιμεντόπαστας (μίγμα τσιμέντου + νερού), η οποία έχει «συγκολλητική» δράση. Όμως, επειδή το τσιμέντο έχει πολύ μεγάλη συμμετοχή στο κόστος των πρώτων υλών

του σκυροδέματος, η περιεχόμενη ποσότητά του στο σκυρόδεμα πρέπει να ελαχιστοποιείται υπό την προϋπόθεση βέβαια διατήρησης ικανοποιητικής αντοχής του. Το 70-80% κατά βάρος του σκυροδέματος αποτελείται από αδρανή, γεγονός που συμβάλλει στο να διατηρείται χαμηλό το κόστος του σκυροδέματος (σε €/m³), επειδή τα αδρανή είναι σχετικά φθηνά υλικά, τόσο ως πρώτη ύλη όσο και ως διαδικασία παραγωγής. Τα αδρανή δρουν κατά κύριο λόγο ως «πληρωτικά» στο σκυρόδεμα (Alexander & Mindess 2005).

Τα αδρανή, εκτός των άλλων, προσφέρουν αξιόλογα πλεονεκτήματα και από τεχνικής άποψης στο σκυρόδεμα. Επηρεάζουν θετικά τη στατική συμπεριφορά των κατασκευών από σκυρόδεμα, εξασφαλίζουν μεγάλη “σταθερότητα όγκου” και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κατασκευών σε σχέση με την περίπτωση χρήσης μόνο τσιμεντοκονιάματος. Τα αδρανή του σκυροδέματος πρέπει να είναι καθαρά, χωρίς επιφανειακή σκόνη, άργιλο και οργανικές ύλες (συνήθως πλυμένα), σκληρά, μεγάλης αντοχής και κατάλληλης επιφανειακής υφής και πορώδους. Σημαντικό ρόλο παίζει το σχήμα τους, το οποίο πρέπει να είναι γωνιώδες και τα τεμάχια να έχουν σχετική ομοιογένεια στις τρεις διαστάσεις (www.titan.gr).

Στην οδοποιία, όπου τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων (περίπου το 90% αποτελείται από αδρανή) προέρχονται, κυρίως, από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων ή άλλων υλικών φυσικών αποθέσεων (ποταμών ή χειμάρρων, θαλάσσιων). Καταλληλότερα πετρώματα για αδρανή οδοστρωμάτων είναι οι γρανίτες, γνεύσιοι, αμφιβολίτες, ανδেসίτες, πορφύρες, ψαμμίτες, χαλαζίτες και ορισμένοι σχιστόλιθοι, λόγω της αντοχής τους σε απότριψη (φθορά σε τριβή). Επιπλέον, για την ίδια χρήση μπορεί να χρησιμοποιηθούν και προϊόντα θραύσης σκωριών ή και από επεξεργασία απορριμμάτων ορυχείων (με θραύση και ταξινόμηση), εφόσον όμως πληρούνται οι απαιτούμενες φυσικομηχανικές ιδιότητες (αντοχή, επιφανειακή υφή, πορώδες κ.λπ.). Επιπρόσθετα, στην κατασκευή οδοστρωμάτων, για ορισμένα όμως μόνο στρώματα (βάσεις, υποβάσεις), μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τεχνητά αδρανή ή θραυσμένα υλικά παλαιών οδοστρωμάτων κατασκευασμένων από ασφαλτόμιγμα ή ανακυκλούμενο σκυρόδεμα (www.orykta.gr).

Επιπλέον, στα σιδηροδρομικά έργα, όπου χρησιμοποιούνται πολύ χονδρόκοκκα (50-65 mm) αδρανή στην υπόβαση, η οποία αποτελείται από τις σιδηροτροχιές και τους στρωτήρες, για να εξασφαλίζουν την απαραίτητη κλίση και απόσταση μεταξύ τους. Εδράζεται σε στρώμα σκύρων, γνωστό ως έρμα (ballast), το οποίο έχει αντοχή

σε θραύση και κρούση, δεν αποσαθρώνεται από τους κύκλους ψύξης απόψυξης (χαμηλό επιφανειακό πορώδες) και παρέχουν ελαστικότητα στη γραμμή απορροφώντας την ενέργεια από την κίνηση των συρμών και τα κρουστικά φορτία από τους στρωτήρες (Alexander & Mindess 2005).

Τα αδρανή υλικά έχουν διάφορα μεγέθη με ακανόνιστο σχήμα (Σχήμα 5.3.1) και διακρίνονται σε χονδρόκοκκα $> 4 \text{ mm}$ και λεπτόκοκκα $< 4 \text{ mm}$ έως 0.063 mm , στις παρακάτω κατηγορίες:

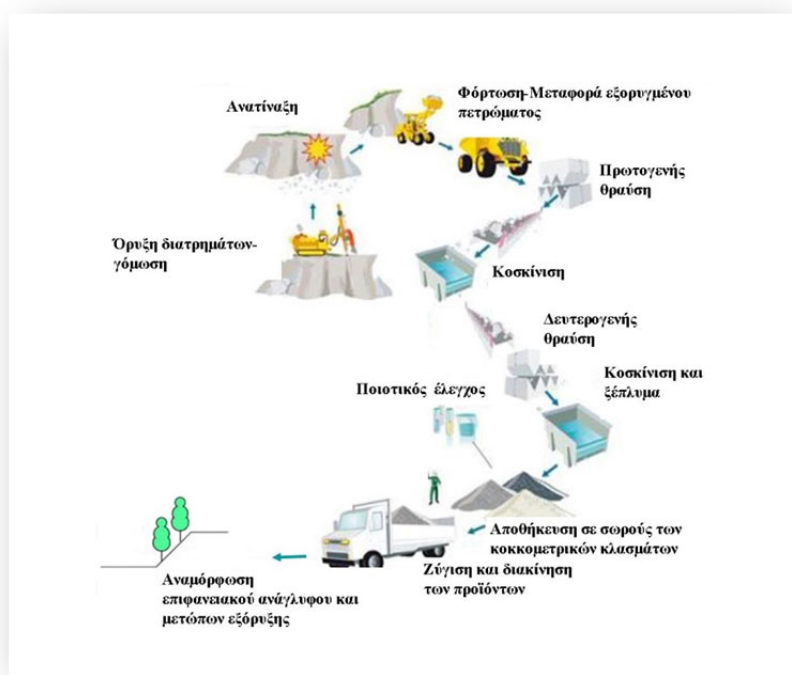
- ✓ Φίλλερ-παιπάλη ($< 0.063 \text{ mm}$)
- ✓ Άμμος ($0-4 \text{ mm}$)
- ✓ Ριζάκι ($4 \text{ mm}-8 \text{ mm}$)
- ✓ Γαρμπίλι ($8 \text{ mm}-16 \text{ mm}$)
- ✓ Χαλίκι ($16 \text{ mm}-28 \text{ mm}$)
- ✓ Σκύρα (για σκυρόδεμα $16 \text{ mm}-31 \text{ mm}$, οδοστρωσία $31 \text{ mm}-80 \text{ mm}$)
- ✓ Άθραυστος ασβεστόλιθος ($56 \text{ mm}-200 \text{ mm}$)



Σχήμα 5.3.1. Κατανομή των αδρανών υλικών ανάλογα με το μέγεθός τους (www.titan.gr).

5.4 Εργασίες παραγωγής αδρανών υλικών σε υπαίθριο λατομείο

Οι εκμεταλλεύσεις των λατομείων αδρανών υλικών είναι υπαίθριες και πραγματοποιούνται με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (κλίση, πλάτος) των ορθών βαθμίδων εκσκαφής του λατομείου αδρανών καθορίζονται με βάση το άρθρο 83 του ΚΜΛΕ. Οι τιμές της κλίσης των βαθμίδων όπως και η συνολική κλίση της εκσκαφής εξαρτώνται από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του πετρώματος που εξορύσσεται και των υπερκειμένων, ενώ οι διαστάσεις (πλάτος) βαθμίδων και οδών μεταφοράς από το μέγεθος του μηχανικού εξοπλισμού (διατηρητικά, φορτηγά μεταφοράς, εξοπλισμός φόρτωσης κλπ.) που θα χρησιμοποιηθεί. Στο λατομείο λαμβάνει χώρα μία ολοκληρωμένη αλληλουχία ενεργειών για την ορθή λειτουργία του, που ξεκινάει από την απομάκρυνση των υπερκειμένων για τη διάνοιξη του έως την παραγωγή αδρανών υλικών όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4.1.



Σχήμα 5.4.1. Αλληλουχία διεργασιών για την παραγωγή αδρανών υλικών σε υπαίθριο λατομείο (LafargeHolcim.com).

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση των επιμέρους διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο λατομείο παραγωγής αδρανών υλικών.

1. Η λειτουργία ενός λατομείου ξεκινάει με την απομάκρυνση των υπερκείμενων (εδαφικό υλικό) (stripping), με τη χρήση εκσκαφών και φορτωτών για τη μεταφορά του, προκειμένου να επιτευχθεί η αποκάλυψη του υλικού προς εξόρυξη, (Σχήμα 5.4.2). Το εδαφικό αυτό υλικό χρησιμοποιείται είτε για την κατασκευή αναχωμάτων, είτε για την προοδευτική ή τελική αποκατάσταση της λατομικής περιοχής. Η απομάκρυνσή του πραγματοποιείται σταδιακά, έτσι ώστε να επιτρέπεται στην υπάρχουσα βλάστηση να παραμένει, ελαχιστοποιώντας τα φαινόμενα διάβρωσης.



Σχήμα 5.4.2. Αποψίλωση της περιοχής στο χώρο επέκτασης του λατομείου Δρυμού.

2. Απαραίτητη είναι η διαμόρφωση των βαθμίδων και των μετώπων εξόρυξης, για την επίτευξη της ασφάλειας των εκσκαφών και τη διέλευση των μηχανημάτων και των εργαζομένων. Κάθε εκσκαφή θα πρέπει να διαιρείται σε βαθμίδες ύψους το πολύ 15m, για την ασφαλή και ορθολογική εκτέλεση των εργασιών. Επίσης, ο καθορισμός του πλάτους της βαθμίδας γίνεται με βάση το κριτήριο της ορθής λειτουργίας του μηχανικού εξοπλισμού που απασχολείται. Ο ορισμός των γεωμετρικών αυτών στοιχείων των βαθμίδων εντός του λατομείου πραγματοποιείται σύμφωνα με τα αντίστοιχα άρθρα που αναπτύσσονται στον ΚΜΛΕ.

3. Η διαδικασία προχωράει με την λεπτομερή διερεύνηση του εκάστοτε μετώπου εξόρυξης, προκειμένου να σχεδιαστεί η διάταξη των διατρημάτων που θα ανορυχθούν για την ανατίναξη που θα λάβει χώρα στο μέτωπο, για την απόσπαση του πετρώματος. Σκοπός είναι να πραγματοποιηθεί επαρκώς και με ασφάλεια. Από τη διερεύνηση του μετώπου διαπιστώνεται η ύπαρξη κενών-εγκοίλων εντός του πετρώματος, τα οποία απαιτούν ειδική μεταχείριση σε σχέση με την πλήρωσή τους με εκρηκτική ύλη και συγκεκριμένα απαιτούν διακεκομμένη πλήρωση με εδαφικό υλικό. Η ανόρυξη των διατρημάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση διατρητικού μηχανήματος. Η διάτρηση πραγματοποιείται από πάνω προς τα κάτω στο μέτωπο και παράλληλα προς την ελεύθερη επιφάνεια, μέχρι ενός συγκεκριμένου βάθους. Μετά την ολοκλήρωση των διατρήσεων γομώνονται με εκρηκτική ύλη περίπου το 60% και το υπόλοιπο με εδαφικό υλικό που προέρχεται ως επί το πλείστο από το διατρητικό υλικό.

4. Ακολουθεί η τοποθέτηση των μέσων έναυσης και η τελική συνδεσμολογία μεταξύ των διατρημάτων. Πριν την πυροδότηση ειδοποιούνται όλοι οι εργαζόμενοι που βρίσκονται σε επικίνδυνη ακτίνα να προφυλαχτούν σε ασφαλείς και προκαθορισμένες θέσεις. Επιπλέον, όλες οι δίοδοι φρουρούνται από τους υπεύθυνους απαγορεύοντας τη διέλευση και εν τέλει υπεύθυνος γομωτής-πυροδότης υλοποιεί την ανατίναξη. Μετά την ανατίναξη ο γομωτής θα πρέπει να εξετάσει το αποτέλεσμα των εκρήξεων και αν όλα τα διατρήματα έχουν πυροδοτηθεί επιτυχώς, αναφέροντας την κατάσταση του μετώπου (άρθρο 57, ΚΜΛΕ). Το εξορυσσόμενο υλικό που προέκυψε εναποτίθεται σε μορφή σωρού μπροστά από το μέτωπο.

5. Τα εξορυσσόμενα τεμάχια παραλαμβάνονται από τον εκσκαφέα (face loader) ο οποίος τα φορτώνει στον φορτωτή (dumper) προκειμένου να μεταφέρει το υλικό στον τροφοδότη, (Σχήμα 5.4.3). Είναι σημαντική η ύπαρξη όσο το δυνατό λιγότερων «νεκρών» χρόνων. Η μεταφορά του υλικού θα πρέπει να είναι συνεχής, χωρίς να υπάρχουν κενά στην τροφοδοσία της μονάδας, αλλά και χωρίς να υπάρχει καθυστέρηση στα μέσα μεταφοράς, αναμονή δηλαδή των φορτηγών μεταφοράς. Η φαινομενικά απλή διαδικασία μεταφοράς, αναδεικνύεται σε σύνθετο πρόβλημα καθώς εξαρτάται από παράγοντες όπως η απόσταση και ο χρόνος κύκλου μεταφοράς για κάθε όχημα, ο αριθμός μετώπων εξόρυξης και το φορτίο του κάθε οχήματος, όσον αφορά την ποσότητα και το είδος. Η πλατεία φόρτωσης του υλικού και ο χρόνος πρόσβασης σε αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση του χρόνου του κύκλου μεταφοράς. Ο χρόνος φόρτωσης και μεταφοράς εξαρτάται από το μέγεθος της πλατείας σε σχέση με τα μηχανήματα, την ταχύτητα του φορτωτή και το μέγεθος του

κάδου του φορτωτή σε σχέση με την καρότσα του φορτηγού μεταφοράς. Σε περίπτωση που τα μέτωπα εξόρυξης βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις ο αριθμός των φορτηγών πρέπει να μεταβάλλεται.



Σχήμα 5.4.3. Ο εκσκαφέας και ο φορτωτής κατά τη διαδικασία φόρτωσης των εξορυσσόμενων τεμαχών στο μέτωπο.

6. Τα εξορυσσόμενα τεμάχια μεταφέρονται με τον φορτωτή στον τροφοδότη της μονάδας επεξεργασίας προκειμένου να προχωρήσει η περεταίρω θραύση του υλικού με τα υπόλοιπα μηχανήματα. Η μονάδα επεξεργασίας αποτελείται από ένα σύνολο σπαστήρων και κοσκίνων, όπου οι μεν προκαλούν τη θραύση του πετρώματος και οι δε διαχωρίζουν τα τεμάχια σε διάφορα κλάσματα ανάλογα με το μέγεθός τους. Αρχικά κατά την τροφοδοσία του εξορυσσόμενου υλικού πραγματοποιείται ο αποχωρισμός του εδαφικού υλικού με κατάλληλη διάταξη με προδιαλογέα. Για τη θραύση του πετρώματος συνήθως χρησιμοποιούνται δύο ή τρεις φάσεις θραύσης ανάλογα με τις προδιαγραφές των αδρανών υλικών.

Η αρχική θραύση του υλικού, κατά την Α θραύση, πραγματοποιείται συνήθως με τον σιαγονοφόρο σπαστήρα (compression jaw crusher), ο οποίος αποτελεί μία χαρακτηριστική μηχανή θραύσης με σύνθλιψη. Αποτελείται συνήθως από μία κινητή σιαγόνα η οποία εκτελεί κίνηση ελλειπτικής μορφής πραγματοποιώντας 150-400 κρούσεις ανά λεπτό και προκαλεί θραύση στο υλικό. Σημειώνεται ότι βασικός στόχος είναι το εξορυσσόμενο υλικό να έχει μέγεθος τεμαχών τέτοιο ώστε να μην καταπονεί τον σπαστήρα της Α' θραύσης. Σε περίπτωση μεγάλων τεμαχών γίνεται χρήση

υδραυλικού σφυριού, επιβαρύνοντας όμως την διαδικασία σε χρόνο και σε κόστος. Το υλικό το οποίο παράγεται από την θραύση Α μεταφέρεται μέσω των ταινιόδρομων και διαχωρίζεται με τη βοήθεια των κοσκίνων, παράγοντας από τη φάση αυτή υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για σιδηροδρομικά έργα κ.α.

Τα υλικά τα οποία μεταφέρονται από τη θραύση Α, τροφοδοτούν έπειτα τη θραύση Β, στην οποία πραγματοποιείται η περεταίρω θραύση του πετρώματος, για την παραγωγή υλικού μικρότερου μεγέθους και οδηγούνται για χρήση. Αμέσως μετά τη θραύση Β υπάρχει η παρουσία κοσκίνων τα οποία διαχωρίζουν τα μικρότερα μεγέθη, ενώ τα μεγαλύτερα τεμάχια προχωρούν στην επόμενη θραύση για την παραγωγή ακόμα μικρότερου κλάσματος (π.χ. άμμου).

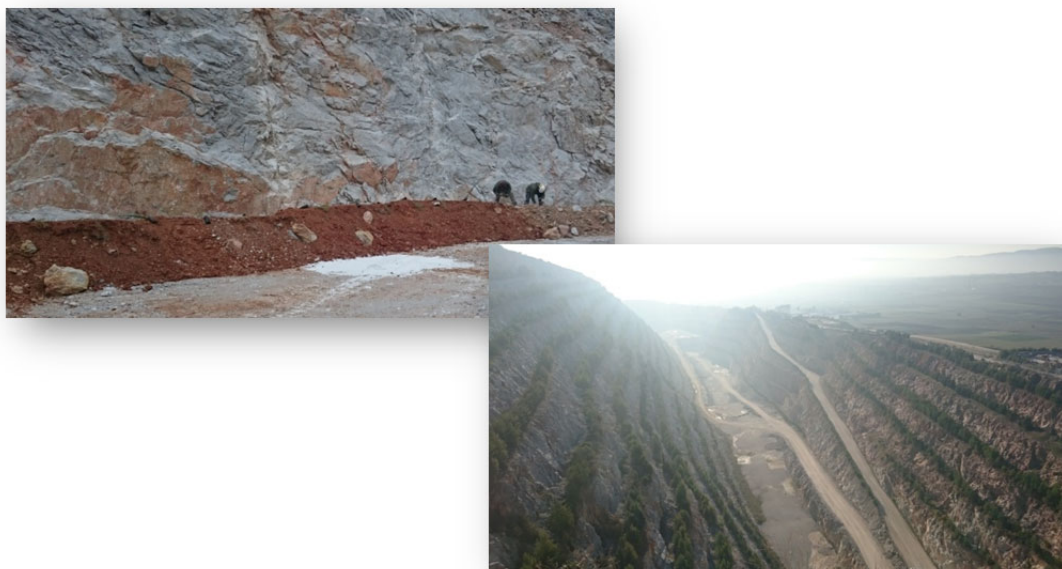
Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι σε κάθε στάδιο αυτής της φάσης παραγωγής του λατομικού προϊόντος και μέσω της διαδικασίας της θραύσης παράγεται μικρότερο μέγεθος υλικού. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού το υλικό αυτό κοσκινίζεται δονούμενο, προκειμένου να διαχωριστούν τα κλάσματα διαφορετικού μεγέθους. Τα κόσκινα λοιπόν είναι μηχανικά μέσα τα οποία συμβάλλουν στην ταξινόμηση των αδρανών υλικών ανάλογα με το μέγεθός τους. Το μέγεθος των κόκκων που παράγεται στο λατομείο καθορίζεται από τις προδιαγραφές λειτουργίας του.

Είναι προφανές ότι η αντιμετώπιση της σκόνης, δηλαδή των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων στον αέρα, που προκύπτει από τις λατομικές εργασίες, αποτελεί ένα μείζονος σημασίας πρόβλημα για τους εργαζόμενους στο χώρο του λατομείου. Στην περίπτωση αυτή ορίζονται οριακές τιμές έκθεσης και ανώτατες οριακές τιμές έκθεσης από το άρθρο 22, ΚΜΛΕ. Για την καταστολή της σκόνης προβλέπονται κατάλληλα συστήματα διαβροχής των οδών προσπέλασης των τροχοφόρων μηχανημάτων καθώς και χρήση καλυμμάτων των υλικών στον θραυστήρα, στα κόσκινα, στις μεταφορικές ταινίες. Επιπλέον, σημαντική είναι και η πρόβλεψη για την αφαίρεση μεγάλων βραχοτεμαχίων, τα οποία είναι δυνατό να σφηνώσουν μέσα στο χώρο θραύσης και να προκαλέσουν τη διακοπή λειτουργίας της μονάδας. Είναι απαραίτητη η ορθή αντιμετώπιση μίας τέτοιας πιθανής κατάστασης, έτσι ώστε σε ελάχιστο χρονικό διάστημα και με τη μέγιστη ασφάλεια να αποκαθίσταται η επανέναρξη της λειτουργίας της μονάδας.

7. Τα επί μέρους κλάσματα του υλικού που προκύπτουν από όλη τη διαδικασία θραύσης και κοσκινίσματος, αποθηκεύονται σε μορφή σωρού σε ελεγχόμενους χώρους υπό στέγαση καθώς και σε σιλό για παροχή χύδην υλικού. Τα μεταφορικά

μέσα φορτώνουν τις απαραίτητες ποσότητες αδρανούς υλικού προκειμένου να τα μεταφέρουν στα αντίστοιχα κέντρα κατανάλωσης και ζυγίζονται σε γεφυροπλάστιγγα πριν εξέλθουν από το χώρο του λατομείου. Η διέλευση των φορτηγών εκτός του λατομικού χώρου πραγματοποιείται με ασφάλεια και με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η όχληση των τοπικών κοινοτήτων από την κυκλοφορία στους δρόμους, διασφαλίζοντας την τοποθέτηση σκέπαστρων στα φορτηγά, διερευνώντας την δυνατότητα αποφυγής ή προσεκτικής διέλευσης μέσα από κατοικημένες περιοχές.

8. Μετά το πέρας της εκμετάλλευσης των επί μέρους βαθμίδων εξόρυξης απαραίτητη είναι η σταδιακή αποκατάστασή τους. Με την περιβαλλοντική αποκατάσταση των ανενεργών επιφανειών του λατομείου στόχος είναι η δημιουργία συνθηκών ανάλογων με αυτών που επικρατούσαν στην περιοχή πριν τη λειτουργία του. Η αποκατάσταση των αναβαθμών θα πρέπει να γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά το πέρας της εξόρυξής τους, έτσι ώστε να επέλθει σταδιακά στα αρχικά περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, (Σχήμα 5.4.4). Οι αποκατάσταση του τοπίου έχει ως στόχο να εξυπηρετήσει παραγωγικούς σκοπούς, τη δημιουργία χώρων αναψυχής ή να έχει αυστηρά προστατευτικό χαρακτήρα.



Σχήμα 5.4.4. Πάνω αριστερά: Δενδροφύτευση στην εξόφληση της βαθμίδας. Κάτω δεξιά: Σταδιακή αποκατάσταση των αναβαθμίδων, (Λατομείο Δρυμού).

Τέλος, η αποκατάσταση διακρίνεται σε δύο βασικά μέρη:

- α) Αφορά τις φυτεύσεις με ενδεικνυόμενη περιβαλλοντική παρέμβαση στις ανενεργές επιφάνειες εξόρυξης, με στόχο τη φύτευση και τη διατήρηση της νέας βλάστησης. Το είδος της νέας βλάστησης εξαρτάται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους.
- β) Την περιβαλλοντική εκμετάλλευση των ανενεργών πλατειών εναπόθεσης των αδρανών με φύτευση ανάλογα με το είδος που ενδείκνυται για την περιοχή. Απώτερος στόχος είναι η σταδιακή αποκατάσταση της περιοχής και η δημιουργία τοπικών δασικών εκτάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

6.1 Εισαγωγή

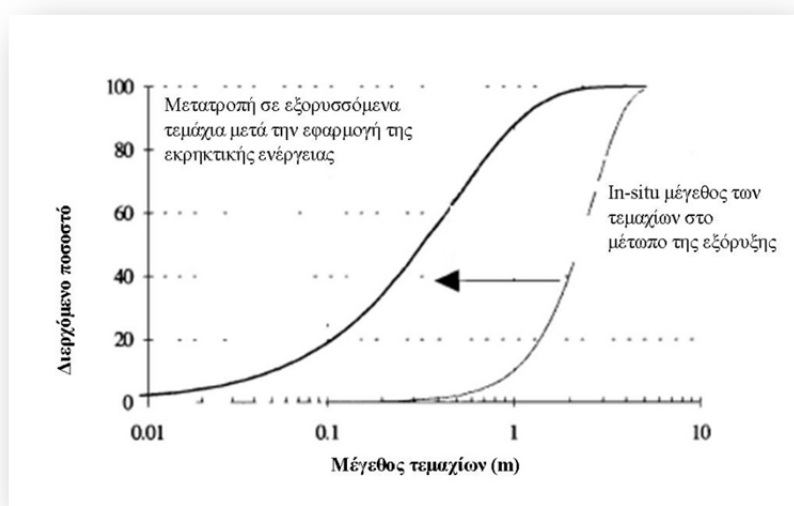
Η διαδικασία των ανατινάξεων αποτελεί την πιο διαδεδομένη πρακτική που εφαρμόζεται στα λατομεία, στις υπόγειες εκσκαφές και στη διάνοιξη οδών, προκειμένου να αποσπαστεί μεγάλος όγκος βράχου. Η μέθοδος αυτή μπορεί πλήρως να περιγραφεί από τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου και της βραχομάζας, από τα χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης, από τη γεωμετρία της ανατίναξης στο εκάστοτε μέτωπο που εφαρμόζεται κ.α. Η επίδραση των ιδιοτήτων του άρρηκτου βράχου καθώς και της βραχομάζας στην ανατίναξη, έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας εδώ και πολλά χρόνια από πολλούς επιστήμονες (Jimeno et al. 1995). Η επιρροή αυτή έχει αποδοθεί με διάφορους τρόπους, όπως συντελεστής Hino (Just 1973), δείκτης βράχου (Kuznetsov 1973) και Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας (Lilly 1986).

Η επιλογή μίας ή περισσότερων παραμέτρων περιγραφής των ιδιοτήτων της εξορυσσόμενης μάζας, οι οποίες αποδίδουν την αντίστασή της στην εκσκαφή με εκρηκτικά, αποτελεί ένα σημαντικό προβληματισμό ως προς την περιγραφή της ευκολίας στη θραύση. Είναι αξιοσημείωτο ότι η δυσκολία αυτή υφίσταται στο γεγονός ότι τόσο οι in-situ ιδιότητες του βράχου, όσο και οι ασυνέχειές του, αλληλεπιδρούν σε τέτοιο βαθμό που είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί και να προσδιοριστεί επαρκώς η επίδραση στην εκρηκτική ικανότητα της μάζας. Από τα ευρήματα διαφόρων ερευνητών (Cunningham 1983, Da Gama 1983, Lilly 1986, JKMRC 1991, Wang 2006, Lu 1997) , εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι in-situ ιδιότητες του βράχου βρίσκονται ανάμεσα στους πιο ανταποδοτικούς παράγοντες στη θραύση και σαφώς ο προσδιορισμός της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας, έχει αποτελέσει έναν κυρίαρχο στόχο για την πρακτική των ανατινάξεων.

6.2 Χαρακτηρισμός της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας

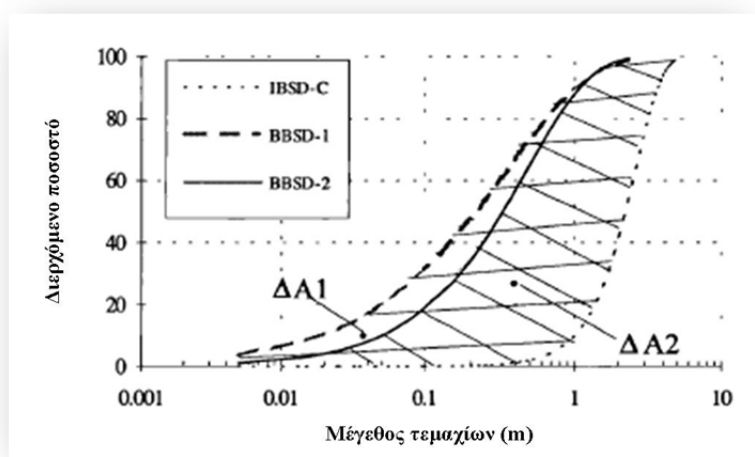
Η ιδιότητα της βραχομάζας που αποκαλείται ως εκρηκτική ικανότητα, προσδιορίζει την επιρρέπεια, δηλαδή την αντίσταση στην εκσκαφή της βραχομάζας με τη χρήση εκρηκτικών, υπό συγκεκριμένο σχεδιασμό της ανατίναξης, χαρακτηριστικών της εκρηκτικής ύλης και καθορισμένου νομοθετικού πλαισίου ανάλογα με τη θέση εξόρυξης (Chatziangelou & Christaras 2013). Είναι χαρακτηριστικό ότι δύο διαφορετικές βραχομάζες, όταν υπόκεινται στα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης και στην ίδια εκλυόμενη ενέργεια από την εκρηκτική ύλη, τότε θα παράγουν διαφορετικό βαθμό θραύσης του πετρώματος. Αυτό αποδίδεται στη διαφορετική εκρηκτική ικανότητα της κάθε βραχομάζας, η οποία αποτελεί μία ενδογενής, μη ελεγχόμενη ιδιότητα της βραχομάζας (Lu 1997).

Το μέγεθος των τεμαχίων της εξορυσσόμενης μάζας αποτελεί ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό της βραχομάζας, εξαρτώμενο από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και από την κατανομή της ενέργειας της εκρηκτικής ύλης που σχετίζεται από τη γεωμετρία της ανατίναξης (Singh et al. 2005). Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2.1, η εκρηκτική ικανότητα μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μετασχηματισμός της βραχομάζας από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται in-situ, στα τεμάχια τα οποία παράγονται μετά την υλοποίηση της ανατίναξης. Αυτή η μετατροπή είναι αποτέλεσμα της ενέργειας που εκλύεται από την εφαρμογή της εκρηκτικής ύλης.



Σχήμα 6.2.1. Μετατροπή της βραχομάζας από in-situ σε εξορυσσόμενα τεμάχια από την εφαρμογή εκρηκτικής ύλης (Lu 1997).

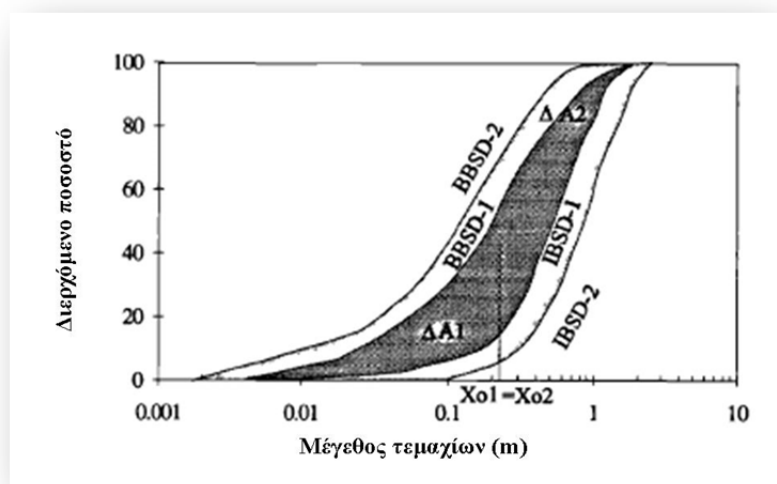
Η διαδικασία της μετατροπής της βραχομάζας όπως παρουσιάζεται από το παραπάνω σχήμα, είναι πολύπλοκη, παρόλα αυτά το αποτέλεσμα της λαμβάνεται και αξιολογείται μέσω της εξορυσσόμενης μάζας. Στο Σχήμα 6.2.2, παρουσιάζεται η εκρηκτική ικανότητα σε δύο διαφορετικές βραχομάζες με την ίδια in-situ κατάσταση IBSD (In-situ Block Size Distribution) και συμβολίζονται ως IBSD-C. Ως BBSD (Blasted Block Size Distribution) χαρακτηρίζεται η κατανομή του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχίων μετά την εφαρμογή ίσης ποσότητας εκρηκτικής ύλης και πιο συγκεκριμένα ως BBSD-1 και BBSD-2 συμβολίζονται οι κατανομές για τις δύο βραχομάζες αντίστοιχα. Οι περιοχές μετατροπής για τις δύο βραχομάζες, που υπόκεινται υπό τον ίδιο σχεδιασμό της ανατίναξης, συμβολίζονται ως ΔΑ1 και ΔΑ2. Όπως, γίνεται αντιληπτό η δεύτερη βραχομάζα υποδεικνύει μεγαλύτερη δυσκολία στη θραύση από ότι η πρώτη, διότι η δεύτερη εξορυσσόμενη μάζα εμπεριέχει πιο μεγάλα τεμάχια, παρόλο που τα IBSD είναι όμοια.



Σχήμα 6.2.2. Διαφορετική εκρηκτική ικανότητα σε δύο βραχομάζες με την ίδια in-situ κατάσταση (Lu 1997).

Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση που δύο διαφορετικές βραχομάζες, υπόκεινται στην ίδια ενέργεια από την εκρηκτική ύλη και στον ίδιο σχεδιασμό της ανατίναξης, τότε το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2.3. Η περιοχή ΔΑ2 αντιπροσωπεύει την αποτελεσματική μετατροπή των σχετικά μεγάλων τεμαχίων in-situ σε εξορυσσόμενη μάζα με μεγάλο ποσοστό μικρών τεμαχίων, ενώ η περιοχή ΔΑ1 την λιγότερη αποτελεσματική μετατροπή για συγκριτικά μικρότερα τεμάχια in-situ σε εξορυσσόμενα τεμάχια με λίγα λεπτόκοκκα. Σημειώνεται ότι και οι δύο μετατροπές έχουν το ίδιο κέντρο του γεωμετρικού σχήματος ΔΑ, το Χο. Από το σχήμα γίνεται

κατανοητό ότι η περιοχή ΔΑ1 είναι μικρότερη από την περιοχή ΔΑ2 και αυτό αποτελεί έναν δείκτη της εκρηκτικής ικανότητας στις δύο βραχομάζες.



Σχήμα 6.2.3. Διαφορετική συμπεριφορά στη θραύση με ίδια ποσότητα εκρηκτικής ενέργειας σε δύο διαφορετικές βραχομάζες (Lu 1997).

Στις παραπάνω παραγράφους, αναλύθηκε η σχέση μεταξύ της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας με την εφαρμοζόμενη ενέργεια, το μέγεθος των in-situ τεμαχών και το μέγεθος αυτών που προκύπτουν στην εξορυσσόμενη μάζα μετά την υλοποίηση της ανατίναξης. Η σχέση αυτών των παραμέτρων έγινε αντικείμενο έρευνας από πολλούς ερευνητές, οι οποίοι χρησιμοποίησαν θεωρητικές και εμπειρικές εξισώσεις, με σκοπό τη συσχέτιση της εφαρμοζόμενης ενέργειας και το μέγεθος των τεμαχών πριν και μετά την ανατίναξη. Παράδειγμα αποτελεί η θεωρία του Bond (Bond's Third Theory), στην οποία ο δείκτης W_i θεωρείται ότι παρέχει μία αντιπροσωπευτική εικόνα της αντίστασης της βραχομάζας στη θραύση από την ανατίναξη (Bond & Whitney 1959).

Μία ακόμη προσέγγιση πραγματοποιήθηκε από τον Schuhmann 1960, ο οποίος παρουσίασε τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης ενέργειας από τη διαδικασία της θραύσης και της κατανομής του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχών από την ακόλουθη σχέση: $E = C \frac{\gamma}{100} x^{-a}$, όπου: E είναι η εφαρμοζόμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου της μάζας, γ είναι το αθροιστικό ποσοστό μικρότερο από μία τιμή διαμέτρου x , x είναι το μέγεθος του τεμαχίου, a εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους και C είναι μία σταθερά. Η εξίσωση αυτή υποδεικνύει ότι η ενέργεια είναι ευθέως ανάλογη στο αθροιστικό ποσοστό λεπτότερο από οποιαδήποτε τιμή μεγέθους

χ. Επίσης, η εξίσωση παρέχει το μέτρο ($1/C$), το οποίο ορίζεται ως ο όγκος του υλικού μικρότερο της μονάδας μεγέθους που παράγεται ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνεται, (Schuhmann 1960). Επιπλέον, η εξίσωση Kuznetsov 1973 συσχετίζει το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων, με την ενέργεια που εφαρμόζεται και τις ιδιότητες της βραχομάζας.

6.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά επίδρασης στην εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας

Με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές (Just 1973, Kuznetsov 1973, Hagan & Just 1974, Da Gama 1983, Rustan et al. 1983, Lilly 1986, Bellairs 1986, Cunningham 1987, JKMRC 1991, Wang et al., Stagg et al. 1992, Scott et al. 1993, Lizotte & Scobe 1994, Matheson 1995, Franklin et al. 1996), γίνεται σαφές ότι πολλοί είναι οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, όπως είναι η αντοχή, η ελαστικότητα, το ειδικό βάρος, αλλά και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών όπως είναι ο προσανατολισμός και η απόστασή τους, που ορίζουν το μέγεθος των τεμαχίων (blocks) in-situ της βραχομάζας. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραγόντων καθιστά ακόμα πιο πολύπλοκη την ερμηνεία της εκρηκτικής ικανότητας, υποδεικνύοντας ότι εμπεριέχει αρκετές μεταβλητές που περιγράφουν την εγγενή ιδιότητα της βραχομάζας. Για αυτό το λόγο δεν μπορεί να απομονωθεί μία παράμετρος για τον προσδιορισμό της, αλλά το σύνολο αυτών μπορούν να περιγράψουν την εκρηκτική ικανότητα όσο το δυνατόν πληρέστερα. Για παράδειγμα, η αντοχή του άρρηκτου βράχου διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι οι υπόλοιπες παράμετροι όπως οι ασυνέχειες του μετώπου εξόρυξης θα πρέπει να μη λαμβάνονται υπόψη.

Η αντοχή του πετρώματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή τόσο του τύπου της εκρηκτικής ύλης αλλά και της ποσότητάς της. Τη στιγμή της έκρηξης, απελευθερώνεται η τεράστια πίεση σε κρουστικό κύμα, το οποίο υπερβαίνει την αντοχή σε θλίψη, προκαλώντας τη σύνθλιψη του πετρώματος στη ζώνη σύνθλιψης πλησίον του διατρήματος. Τα πετρώματα τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή θλιπτική αντοχή, καταναλώνουν περισσότερη εκρηκτική ενέργεια για τη διεύρυνση των ρωγμών, καθώς η σύνθλιψη του πετρώματος στα τοιχώματα των διατρημάτων είναι ελάχιστη.

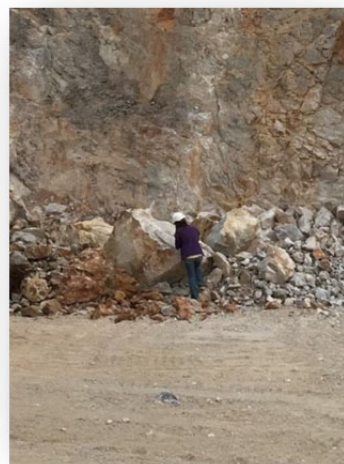
Σε αυτό το σημείο μπορεί να αναφερθεί ότι ο προσδιορισμός της ταχύτητας των κυμάτων υπερήχων (V_p σε m/s) στον άρρηκτο βράχο, αποτελεί μία μη καταστροφική μέθοδο (Non Destructive Technique), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αντοχής του. Η ταχύτητα των υπερήχων επηρεάζεται άμεσα από την ορυκτολογική σύνθεση του πετρώματος, από την πυκνότητα, το πορώδες και την ποιότητά του. Επιπλέον, αποτελεί έναν κατάλληλο δείκτη ταξινόμησης της ποιότητας του πετρώματος και της υπάρχουσας αποσάθρωσής του. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο δείγματα μικρών διαστάσεων είναι απαραίτητα, είτε επί τόπου είτε στο εργαστήριο, για την υλοποίηση των μετρήσεων με τη βοήθεια της συσκευής υπερήχων.

Στην παρούσα έρευνα προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες των κυμάτων υπερήχων σε ασβεστολιθικά δείγματα από τα δύο λατομεία έρευνας, με αφορμή τη συμβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, για τον προσδιορισμό του Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (BI). Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις των κλιμάκων σκληρότητας (Mohs, Rosiwal, Knoop) με τις ταχύτητες V_p , όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο, όπου σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, υπάρχει μία εκθετική συσχέτιση μεταξύ τους, (Dimitraki et al. 2016). Επίσης, συλλέχθηκαν όλα τα δεδομένα από προηγούμενες εργασίες (Christaras et al. 1989,1994,1996,1998), οι οποίες αφορούν τη σχέση μεταξύ της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) και της ταχύτητας υπερήχων, σε ασβεστολιθικά δείγματα από Βόρεια και Νότια Ελλάδα (Ελευσίνα, Κρήτη, Ροδόπη), με πολύ σημαντικό συντελεστή συσχέτισης, (Dimitraki et al. 2016). Η ταχύτητα των υπερήχων προτείνεται ως μία πρόσθετη, εύκολα διαχειρίσιμη παράμετρος. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συσχέτιση των V_p με τις τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη που προέκυψαν με τη χρήση της σφύρας Schmidt σε ασβεστολιθικά τεμάχια.

Η σκληρότητα ενός άρρηκτου πετρώματος εξαρτάται από το είδος και την αναλογία των ορυκτών που εμπεριέχει, αλλά και από την αντοχή των δεσμών μεταξύ των ορυκτών, καθώς και από την συγκολλητική ουσία μεταξύ αυτών. Στην εξίσωση του Lilly (1986), με την οποία προσδιορίζεται ο Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη αποδίδεται στην παρούσα έρευνα μέσω της σφύρας Schmidt, επί τόπου, σε ασβεστολιθικούς ογκόλιθους. Η χρήση της σφύρας Schmidt αποτελεί μία άμεση, γρήγορη και απλή μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Η μέθοδος Schmidt αρχικά αναπτύχθηκε για την εύρεση της αντοχής του σκυροδέματος, (Guney et al. 2005). Αλλά αργότερα, εξελίχθηκε η χρήση

της σε άρρηκτους βράχους, (Xu et al. 1990), και πλέον έχει αποτελέσει μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδο προσδιορισμού της επιφανειακής αντοχής τους.

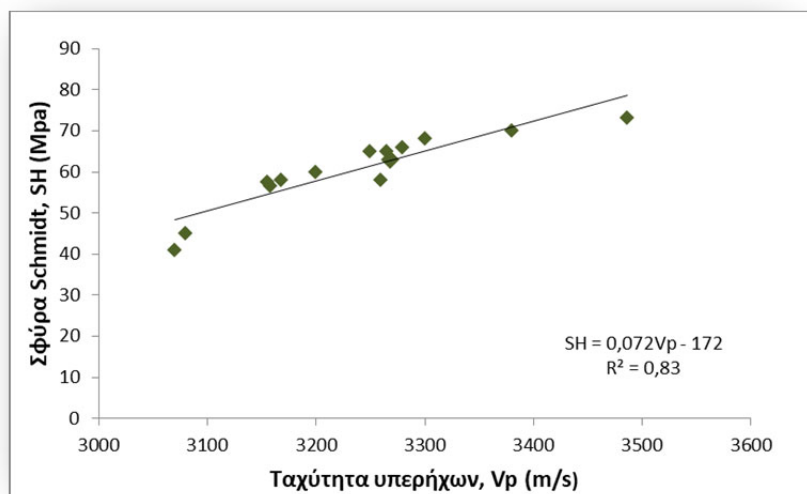
Τόσο η σφύρα Schmidt όσο και η ταχύτητα των υπερήχων, αποτελούν δύο μη καταστροφικές μεθόδους, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε δείγματα στο εργαστήριο όσο και επί τόπου, με τη χρήση εξειδικευμένης συσκευής υπερήχων. Στην παρούσα έρευνα ένα σύνολο δεκαπέντε ασβεστολιθικών δειγμάτων συλλέχθηκε από τα δύο λατομεία έρευνας (Δρυμού και Ταγαράδων), προκειμένου να προσδιοριστεί η ταχύτητα υπερήχων. Τα δείγματα αυτά είχαν ακανόνιστο σχήμα με μέσο μήκος περίπου στα 6cm. Για τη διευκόλυνση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν κωνικοί ακροδέκτες, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη επαφή αυτών με την επιφάνεια του πετρώματος, (Σχήμα 6.2.1). Παράλληλα, μετρήθηκε η αντοχή με τη χρήση της σφύρας Schmidt, (ASTM 2000), επί τόπου στο λατομείο σε ασβεστολιθικά τεμάχια. Η τιμές της αντοχής ποικίλουν σε σχέση με το εύρος τιμών των ταχυτήτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα δείγματα που έχουν μεγαλύτερες τιμές αντοχής με τη σφύρα Schmidt, έχουν υψηλές τιμές ταχυτήτων. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα ασβεστολιθικά δείγματα με μεγαλύτερη σκληρότητα έχουν μικρότερο πορώδες, άρα ο χρόνος διάδοσης της ταχύτητας είναι μικρότερος το οποίο οδηγεί σε υψηλότερες ταχύτητες.



Σχήμα 6.2.1. Αριστερά: Μετρήσεις με τη συσκευή υπερήχων, Δεξιά: Μετρήσεις με τη σφύρα Schmidt επί τόπου στο λατομείο.

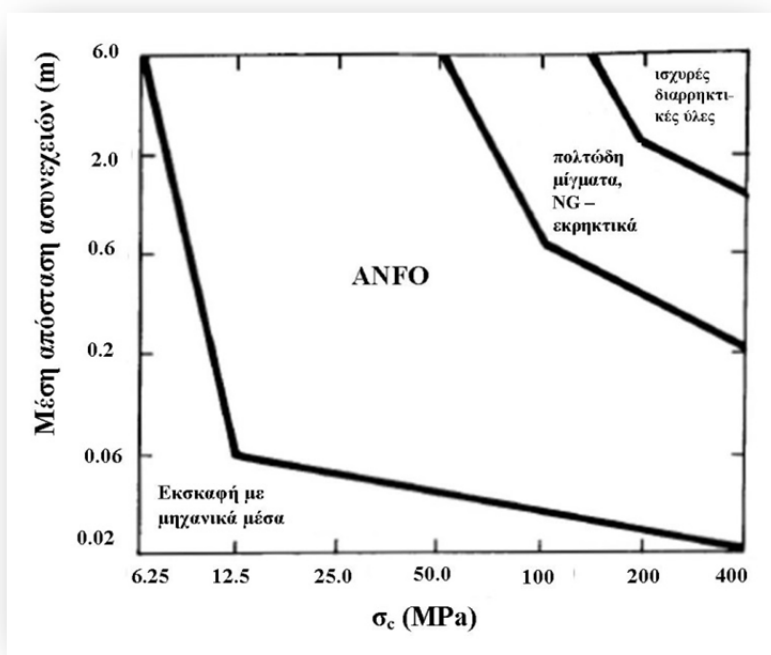
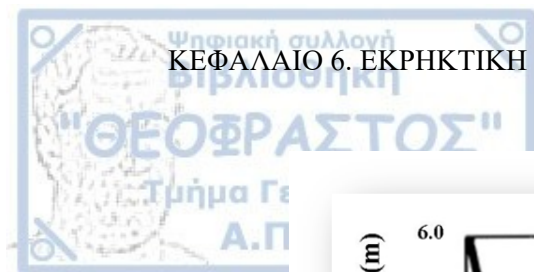
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 6.2.2) και περιγράφονται από μία γραμμική εξίσωση. Η ταχύτητα των υπερήχων στα ασβεστολιθικά δείγματα αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την αντοχή που αποδίδεται μέσω της σφύρας Schmidt, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2=83\%$. Η

γραμμική αυτή εξίσωση μπορεί να αναφερθεί στην αντοχή των δειγμάτων αλλά και στον βαθμό αποσάθρωσής τους. Όσο μικρότερος είναι ο βαθμός αποσάθρωσης, τόσο υψηλότερες είναι οι τιμές της σφύρας Schmidt και οι ταχύτητες των υπερήχων. Το αντίθετο προκύπτει όταν ο βαθμός αποσάθρωσης είναι υψηλότερος.



Σχήμα 6.2.2. Συσχέτιση της αντοχής με τη σφύρα Schmidt έναντι της ταχύτητας υπερήχων σε ασβεστολιθικά δείγματα.

Οι Sassa και Ito (1974), διατύπωσαν την άποψη ότι η εκρηκτική ικανότητα επηρεάζεται από την αντοχή και από τον δείκτη θραύσης του πετρώματος. Ο δείκτης θραύσης (brittle index), είναι ο λόγος της αντοχής στη μονοαξονική θλίψη (σ_c) προς την αντοχή σε εφελκυσμό (σ_t) και κυμαίνεται μεταξύ 10 και 100. Πετρώματα με υψηλό δείκτη θραύσης χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ευκολία στη θραύση. Επίσης, οι Brady και Brown (1985) πρότειναν ότι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μπορεί να αντιπροσωπεύσει την ευκολία με την οποία είναι δυνατή η δημιουργία ρωγμών στο πέτρωμα. Μία εμπειρική σχέση μεταξύ της σ_c και του τύπου της εκρηκτικής ύλης δίνεται στο Σχήμα 7.3.1. Μία παρατήρηση που μπορεί να εξαχθεί από το διάγραμμα είναι ότι το ANFO αποτελεί έναν κατάλληλο τύπο εκρηκτικής ύλης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών που επικρατούν στην εκάστοτε βραχομάζα. Ενώ, οι ισχυρές διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες (high brisance slurries) εφαρμόζονται σε πολύ υψηλής αντοχής πετρώματα, μεγαλύτερη από 200 MPa.



Σχήμα 6.3.1. Εμπειρική σχέση μεταξύ τύπου εκρηκτικών υλών και ιδιότητες βραχομάζας (Brady & Brown 1985).

Οι Rzhevsky και Novik (1971), πρότειναν μία ταξινόμηση των πετρωμάτων με βάση την κατανάλωση εκρηκτικής ύλης (με βάση το νιτρικό αμμώνιο) ανά κυβικό μέτρο εξόρυξης πετρώματος, με βάση την εκρηκτικότητά τους, (Πίνακας 7.3.1). Η χαμηλότερη κατηγορία αντιστοιχεί στη μικρότερη αντοχή πετρωμάτων και απαιτούν μικρότερη ποσότητα εκρηκτικής ύλης.

Πίνακας 6.3.1. Κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων με βάση την εκρηκτικότητά τους, (Rzhevsky και Novik 1971)

Πέτρωμα	Κατηγορία	Κατανάλωση εκρηκτικής ύλης (kg/m ³)
Εδαφοποιημένο πέτρωμα, παχιά άργιλος	III-IV	0.3-0.5
Μάργα, άνθρακας, γύψος, διατομίτης	V-VI	0.35-0.55
Αργιλώδης ψαμμίτης, σκληρός αργιλικός σχιστόλιθος, μαργαϊκός ασβεστόλιθος, ανυδρίτης, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος	VII-VIII	0.45-0.6

Γρανίτης, γνεύσιος, ασβεστόλιθος, ψαμμίτης, μαγνησίτης, δολομίτης, μάρμαρο	IX-X	0.6-0.7
Σερπεντινίτης, βασάλτης, αποσαθρωμένος γνεύσιος	XI-XII	0.7-0.75
Σκληρός γνεύσιος, διαβάσης, γρανιτογνεύσιος, διορίτης, χαλαζίας	XIII-XIV	0.85
Ανδεσίτης, βασάλτης, γάββρος	XV-XVI	0.9

Από την άλλη πλευρά, ο σχηματισμός των ακτινικών ρωγμών περιμετρικά του διατρήματος πραγματοποιείται όταν η ενέργεια η οποία εκλύεται από την εκρηκτική ύλη υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, με τελικό αποτέλεσμα την απόσπαση των τεμαχίων (spalling). Η πίεση που ασκείται από την παρουσία των εκλυόμενων αερίων στο διάτρημα, υποβάλλει το πέτρωμα σε μία έντονη ακτινική συμπίεση και παραμόρφωση. Αν αυτές οι παραμορφώσεις υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, τότε προκαλούνται ακτινικές ρωγμές πέρα από τη ζώνη σύνθλιψης.

Ακόμα μία ιδιότητα του πετρώματος που παίζει ρόλο στη συμπεριφορά του κατά τη θραύση του είναι η ελαστικότητα η οποία εκφράζεται από το μέτρο του Young, ως ο λόγος της τάσης που εφαρμόζεται προς την παραμόρφωση που υπόκειται. Το μέτρο ελαστικότητας χαρακτηρίζει την ακαμψία του πετρώματος και την ικανότητά του να αντισταθεί στις εξωτερικές επιρροές. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, μπορεί να αναφερθεί ότι τα ελαστικά πετρώματα είναι αυτά τα οποία έχουν υψηλότερη αντοχή στη θλίψη, ενώ τα πετρώματα τα οποία συμπεριφέρονται πλαστικά έχουν μικρότερη θλιπτική αντοχή. Η ενέργεια που εκλύεται από την έκρηξη είναι πιο αποτελεσματική στα ελαστικά πετρώματα, ενώ απορροφάται από εκείνα που συμπεριφέρονται πλαστικά. Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου υπάρχει ένα γρανιτικός σχηματισμός μέσα σε μία μάζα ενός υλικού που έχει πλαστική συμπεριφορά, τα τασικά κύματα χάνονται λόγω της απορρόφησής τους από το υλικό αυτό και μειώνεται η ανάκλασή τους στην επιφάνεια αυτή, με αποτέλεσμα τμήματα του γρανίτη να υπόκεινται σε φτωχή θραύση. Σύμφωνα με τον De Graaf (2011) και το Imperial Chemical Industries (ICI) τα πετρώματα με μικρό μέτρο ελαστικότητας παραμορφώνονται περισσότερο πριν τη θραύση τους, απορροφώντας περισσότερη

ενέργεια σε σύγκριση με τα ψαθυρά πετρώματα, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο ανταποδοτικά στην έκρηξη. Επίσης, μεγαλύτερη δυσκολία αντιμετωπίζουν τα εκλύόμενα αέρια να προκαλέσουν συμπίεση και εφελκυσμό στο υλικό, στην περίπτωση που το μέτρο του Young είναι υψηλό. Έχει διαπιστωθεί ότι η πίεση των αερίων θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5% του μέτρο του Young για αποτελεσματική εκτίναξη (Anon 1980), ενώ στην περίπτωση που αυτό δεν ισχύει τότε η ζώνη σύνθλιψης αυξάνεται και η εκρηκτική ενέργεια χάνεται.

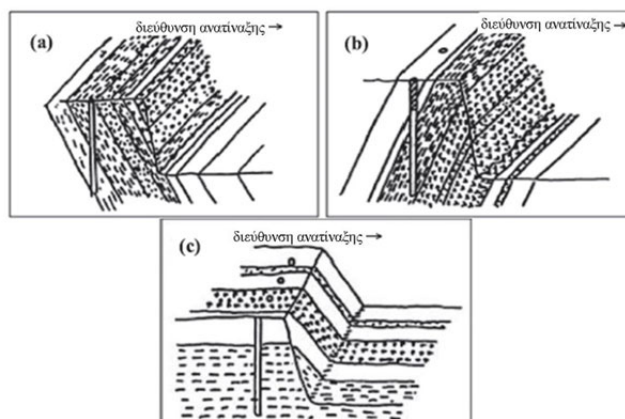
Επιπρόσθετα, η ευκολία ή η δυσκολία με την οποία προκαλείται η θραύση του πετρώματος καθορίζεται από την πυκνότητά του, υποδεικνύοντας την ενέργεια που απαιτείται για την απόσπασή του και επηρεάζοντας τη διάδοση της ενέργειας στο εσωτερικό του. Τα πετρώματα με υψηλή πυκνότητα απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα εκρηκτικής ύλης από ότι εκείνα με μικρότερη πυκνότητα, με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης κοκκομετρίας, (ICI). Όπως αναφέρθηκε λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο 2 η εμπέδηση (impedance) του μέσου που είναι αποτέλεσμα της πυκνότητας και της ακουστικής ταχύτητας και υποδεικνύει το ποσοστό της ενέργειας που διαδίδεται εντός αυτού. Όσον αφορά τον ρόλο του πορώδους του πετρώματος, αυτό επιδρά με τέτοιο τρόπο που οδηγεί στη μείωση της πίεσης που ασκεί το αέριο σε αυτό, καθώς εισέρχεται στους πόρους του. Η διάδοση και ανάπτυξη των ρωγμών παρεμποδίζεται από την παρουσία των κενών του πετρώματος, (ICI).

Ο Singh (2003) επισήμανε ότι οι ετερογενείς βραχομάζες και η ανισοτροπική συμπεριφορά τους, αποτελούν πολύ σημαντικούς παράγοντες επίδρασης στην εξόρυξη με εκρηκτικά, παρόλο που στην πράξη δεν λαμβάνονται υπόψη από τους υπεύθυνους της ανατίναξης κατά τη διαδικασία υλοποίησής της. Γίνεται αντιληπτό ότι παρόλο που τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος συμβάλλουν στην ικανότητα της εκσκαφής, οι ασυνέχειες της βραχομάζας έχουν κυρίαρχη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα (Chiappeta 1991, Rorke 2003). Όλα τα είδη των ασυνεχειών που είναι δυνατόν να εμφανίζει μία βραχομάζα (όπως η σχιστότητα, η στρώση, επίπεδα θραύσης, ρήγμα), επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά της και σαφώς τη θραύση της από τη χρήση εκρηκτικών υλών. Η αντοχή της βραχομάζας, δηλαδή η ανάπτυξη των τάσεων στο εσωτερικό της και η παραμόρφωσή της, εξαρτάται από τις ιδιότητες, τον προσανατολισμό και τη θέση των ασυνεχειών. Στην περίπτωση που η διάδοση των παραγόμενων κυμάτων κατά την ανατίναξη, αντιμετωπίσει ασυνέχειες ευνοϊκές προς αυτήν, τότε η αποδοτικότητά τους αυξάνεται, ενώ στην αντίθετη περίπτωση δυσχεραίνουν τη διάχυσή τους. Όπως θα γίνει σαφές και παρακάτω η

ανάπτυξη των ασυνεχειών στο πέτρωμα επηρεάζει τη θραύση του, την παραγωγή μεγάλων ογκολίθων, τη δημιουργία backbreaks και τη σταθερότητα του ίδιου του μετώπου.

Πολλοί είναι οι επιστήμονες (Ash 1973, Bhandari 1996, Larson & Pugliese 1974), οι οποίοι έχουν ασχοληθεί με την επίδραση των ασυνεχειών στην εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας. Κάποιοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ασυνέχειες έχουν μεγαλύτερη επιρροή από τις ιδιότητες της εκρηκτικής ύλης και τη γεωμετρία της ανατίναξης. Ο Bhandari (1975), έπειτα από δοκιμές σε μικρής κλίμακας ανατινάξεις, διατύπωσε την άποψη ότι οι κύριες ασυνέχειες που αναπτύσσονται στη βραχομάζα επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών, εν αντιθέσει με την άρρηκτη βραχομάζα. Επιπλέον, οι Belland 1966, Bhandari 1974, Singh & Sarma 1983, Singh & Sastry 1986, Badal & Bhandari 1992, διερεύνησαν τη σχέση μεταξύ του προσανατολισμού των ασυνεχειών και των παραμέτρων που διέπουν την ανατίναξη. Οι βραχομάζες με κύριες οριζόντιες ασυνέχειες προκαλούν ανώμαλη κοπή του μετώπου πλευρικά αλλά και την πρόκληση ρωγμών πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων (backbreak). Σημειώνεται ότι η θραύση στο άνω τμήμα του πρηνούς ορίζεται από την απόσταση μεταξύ των οριζόντιων ασυνεχειών (Bhandari 1997). Από την άλλη πλευρά, όταν στο μέτωπο της εξόρυξης κυριαρχούν οι ασυνέχειες οι οποίες αναπτύσσονται παράλληλα ως προς το μέτωπο της εξόρυξης, δηλαδή με διεύθυνση κλίσης προς τη διεύθυνση πραγματοποίησης της ανατίναξης (Σχήμα 6.3.2), τότε αυξάνεται η πιθανότητα πρόκλησης ρωγμής πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων, μειώνεται το πρόβλημα του “ποδαρικού” με τον σχηματισμό ομαλού δαπέδου, ενώ η σωρός των παραγόμενων τεμαχών έχει χαμηλό ύψος (Singh et al. 2016). Όταν η διεύθυνση της ανατίναξης είναι αντίθετη με τη βύθιση των κύριων ασυνεχειών (Σχήμα 6.3.2), τότε είναι μικρότερη η πιθανότητα πρόκλησης ρωγμής πίσω από την τελευταία σειρά διατρημάτων, περισσότερα προβλήματα “ποδαρικού” με μη ομοιόμορφη κοπή του δαπέδου, σχηματίζοντας μεγάλο ύψος σωρού (Singh et al. 2016). Επιπλέον, στην περίπτωση της παρουσίας κύριων κάθετων ασυνεχειών ως προς το μέτωπο και με πραγματοποίηση της ανατίναξης παράλληλα στη διεύθυνση των ασυνεχειών (Σχήμα 7.3.2), η απαιτούμενη ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (kg/m^3) είναι μικρότερη με ακανόνιστη εμφάνιση της ρωγμής στο πίσω μέρος (Bhandari 1997). Ο προσανατολισμός, λοιπόν, των κύριων ασυνεχειών είναι σημαντικός για τον καθορισμό του αποτελέσματος της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης. Σαφώς, γίνεται κατανοητό, ότι η μόνη επιλογή που δίνεται

στον υπεύθυνο μηχανικό για να παρέμβει στο τελικό αποτέλεσμα είναι στη διάταξη των διατρημάτων και στη σειρά έναυσής τους.



Σχήμα 6.3.2. Απεικόνιση των κύριων ασυνεχειών σε σχέση με τη διεύθυνση της ανατίναξης (Burkle 1979).

Είναι αξιοσημείωτο ότι η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών αποτελεί μία ακόμα καθοριστική παράμετρο επίδρασης στη θραύση του πετρώματος, με η χρήση εκρηκτικής ύλης. Σύμφωνα με τον Da Gama (1983), η αντίσταση ενός πετρώματος στην εκρηκτική ικανότητα αυξάνεται, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, δηλαδή αυξάνεται το μέγεθος των τεμαχών στο μέτωπο (block size). Για παράδειγμα, μία βραχομάζα η οποία χαρακτηρίζεται από ένα πολύ πυκνό δίκτυο ασυνεχειών, είναι δυνατή η απλή μετακίνησή της για τη διατήρηση μίας ικανοποιητικής θραύσης της. Αντιθέτως, η παραγωγή των ογκολίθων είναι πιο συχνό φαινόμενο σε βραχομάζες με αραιό δίκτυο ασυνεχειών. Ο Coates (1981) πρότείνει τη χρήση μικρότερης διαμέτρου διατρήματα, με μικρό φορτίο και μικρή απόσταση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η βέλτιστη θραύση του πετρώματος.

Τέλος, είναι απαραίτητο να αναφερθεί η πιθανή παρουσία εγκοίλων στο πέτρωμα, ως αποτέλεσμα της διάλυσης της δομής τους. Η παρουσία τους τείνει να προκαλέσει τη μείωση της αποδοτικότητας της ανατίναξης, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα, ιδιαιτέρως όταν χρησιμοποιείται χύμα ANFO για τη γόμωση των διατρημάτων. Πιο συγκεκριμένα διακόπτεται πρόωρα η ανάπτυξη των ρωγμών, στα τοιχώματα του εγκοίλου, που είναι αποτέλεσμα των θλιπτικών κυμάτων, καθώς επίσης μειώνεται η πίεση στο εσωτερικό του διατρήματος από τη διέλευση των αερίων εντός

του εγκοίλου. Τα έγκοιλα μπορούν να οδηγήσουν στην υπέρογκη συγκέντρωση εκρηκτικής ύλης στο συγκεκριμένο τμήμα και στην ανάλογη απώλεια ενέργειας στο άνω τμήμα του διατρήματος. Η συγκέντρωση αυτή της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης εντός του εγκοίλου, έχει ως συνέπεια την πρόκληση φαινομένων εκτίναξης τεμαχών (flyrocks) και μη ομαλή αποκοπή του εξορυσσόμενου υλικού από το μέτωπο.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η δυσκολία της προσέγγισης της εκρηκτικής ικανότητας και για αυτό το λόγο έχουν γίνει πολλές προσπάθειες προσδιορισμού της μέσα στο πέρασμα των χρόνων, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

6.4 Προσεγγίσεις εκτίμησης της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας

Κάθε είδος βραχομάζας συνίσταται από διαφορετικούς τύπους πετρώματος και επηρεάζεται σε διαφορετικό βαθμό η θραύση της, υπό διαφορετικές συνθήκες τάσεων που ασκούνται σε αυτή κάθε φορά. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλά συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας, για γεωτεχνικούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα RQD (Deere 1963), Q-index (Barton et al. 1974), RMR (Bieniawski 1974), GSI (Marinos et al. 2005) κ.α. Στο πλαίσιο της διαδικασίας της διάτρησης και της ανατίναξης των πετρωμάτων σε ένα μέτωπο εξόρυξης, τα παραπάνω συστήματα είναι χρήσιμα κυρίως για την εκτίμηση της διατρητικής δραστηριότητας, αλλά όχι τόσο στον προσδιορισμό της εκρηκτικής ικανότητας του πετρώματος. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές προσπάθειες προσέγγισης για την εκτίμηση της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας. Κάποιοι από τους ερευνητές προσπάθησαν να τη συσχετίσουν με διαθέσιμα εργαστηριακά δεδομένα και δοκιμές πεδίου, ενώ άλλοι συσχέτισαν την εκρηκτική ικανότητα με παραμέτρους του πετρώματος και του σχεδιασμού της ανατίναξης. Ενώ, μερικοί την εκτίμησαν μέσω του ρυθμού διάτρησης του πετρώματος και/ή την συμπεριφορά του πετρώματος μέσω ανατινάξεων στο πεδίο. Επιπρόσθετα, τα τελευταία χρόνια γίνονται σημαντικές απόπειρες προσδιορισμού της εκρηκτικής ικανότητας μέσω της ανάπτυξης αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης. Στις παραγράφους που ακολουθούν αναφέρονται ενδεικτικά οι σημαντικές προσπάθειες ανά δεκαετία, από το 1950 έως το 2000, που πραγματοποιήθηκαν από ερευνητές, για την απόδοση της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας.

Hino (1959)

Ο Hino ονόμασε την εκρηκτική ικανότητα ως συντελεστή εκρηκτικότητας BC (Blasting Coefficient) και την όρισε ως τον λόγο της αντοχής σε θλίψη (CS) προς την αντοχή σε εφελκυσμό (TS) της βραχομάζας: $\frac{CS}{TS}$.

Στην περίπτωση της παρουσίας ελεύθερου μετώπου στην ανατίναξη, τα κύματα που ασκούν θλιπτικές τάσεις διαδίδονται από τα διατρήματα μέσω του ελεύθερου μετώπου και ανακλώνται πίσω ως εφελκυστικές τάσεις. Όταν οι εφελκυστικές τάσεις που ασκούνται υπερβαίνουν την αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος, τότε προκαλείται η θραύση του πετρώματος. Η έκταση των παραγόμενων εφελκυστικών ρωγμών και του αριθμού των τεμαχών εξαρτώνται από την αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος (σ_t), του πλάτους (σ_a) και μήκους (L) του παραγόμενου κύματος. Βρέθηκε από τον Hino ότι ο αριθμός των παραγόμενων τεμαχών (n) που προκύπτουν από τις εφελκυστικές τάσεις εξαιτίας του ανακλώμενου κρουστικού κύματος, μπορεί να αποδοθεί από την ακόλουθη ανισότητα: $n \leq \frac{\sigma_a}{\sigma_t}$ ή $n \leq \frac{L}{2t}$, όπου t είναι το πάχος του τεμαχίου που είναι αποτέλεσμα της εφελκυστικής τάσης. Επιπλέον, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μεταξύ της αντοχής σε θλίψη (σ_c) και του πλάτους των θλιπτικών κυμάτων (σ_a), υπάρχει μία γραμμική συσχέτιση.

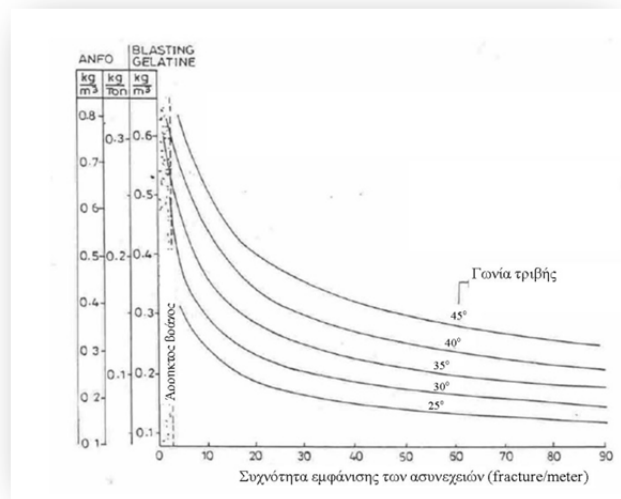
Hansen (1968)

Ο Hansen έλαβε υπόψη το φορτίο και το ύψος του πρανούς, ως παραμέτρους που επηρεάζουν την εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας και ουσιαστικά τη συσχετίζει με την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε ανατίναξη. Η εξίσωση που πρότεινε για την εκτίμηση της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης είναι η ακόλουθη: $Q = B^2 \left\{ 0.0236 * \left(\frac{h}{B} + 1.5 \right) + 0.1984 * C \left(\frac{h}{B} + 1.5 \right) \right\}$, όπου Q είναι η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (kg) σε ένα διάτρημα, B το φορτίο (m), H το ύψος του πρανούς (m) και C μία σταθερά της βραχομάζας η οποία εκτιμάται από την πραγματοποίηση της ανατίναξης. Έπειτα, η παράμετρος Q διορθώνεται με βάση την επίδραση της απόκλισης του διατρήματος, της ισχύος της εκρηκτικής ύλης, της διάταξης των διατρημάτων. Η διορθωμένη τιμή δίνεται από την εξίσωση:

$Total\ charge = \frac{F}{E} * \frac{S}{B} * 0.80$, όπου F (fixation factor) κυμαίνεται από 1.0 (για κάθετα διατρήματα) έως 0.75 (επικλινή διατρήματα), E (explosive factor) κυμαίνεται από 0.9 (για 30% περιεκτικότητα δυναμίτη) έως 1.3 (για 60% περιεκτικότητα δυναμίτη), S η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων και B το φορτίο.

Ashby (1977)

Ο Ashby ανέπτυξε μία εμπειρική σχέση για την περιγραφή της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης που απαιτείται για την υλοποίηση της ανατίναξης, με βάση την πυκνότητα των ασυνεχειών και τη γωνία τριβής της βραχομάζας. Σύμφωνα με τον Ashby η εκρηκτική ύλη τύπου ANFO μπορεί να προσδιοριστεί είτε από την καμπύλη του Σχήματος 7.4.1 είτε από την ακόλουθη εξίσωση: $Powder Factor = \frac{0.56 * \tan(\phi + i)}{\sqrt[3]{fracture/meter}} (kg/m^3)$, όπου ϕ είναι η γωνία τριβής της βραχομάζας και i είναι η τραχύτητα, (ο λόγος fracture/meter αντιπροσωπεύει τη συχνότητα εμφάνισης των ασυνεχειών στη βραχομάζα).



Σχήμα 6.4.1. Εμπειρική σχέση περιγραφής της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης, (Ashby 1977).

Lilly (1986)

Ο Lilly πρότεινε μία προσέγγιση για την εκτίμηση της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας, η οποία αποτελεί μία διαδικασία ανάπτυξης ενός συστήματος ταξινόμησής της. Ανέπτυξε έναν εμπειρικό Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας βασισμένο στην περιγραφή της βραχομάζας, στην πυκνότητα και στον προσανατολισμό των ασυνεχειών, στο ειδικό βάρος και τη σκληρότητα του βράχου. Αποτελεί ένα γρήγορο, ποσοτικοποιημένο τρόπο εκτίμησης της εκρηκτικότητας της βραχομάζας, βασισμένο σε διαθέσιμα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του μετώπου. Ο δείκτης αυτός μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με το powder factor, δηλαδή την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης. Η εξίσωση η οποία προσδιορίζει την εκρηκτική ικανότητα είναι η παρακάτω:

$$BI = 0.5 * (RMD + JPS + JPO + SGI + S) \quad (6.4.1)$$

Όπου,

RMD (Rockmass Description)	= 10	, αποδομημένη βραχομάζα
	= 20	, τεμαχώδης βραχομάζα
	= 50	, άρρηκτη βραχομάζα
JPS (Joint Plan Spacing)	= 10	, <0.1m απόσταση
	= 20	, 0.1-1.0m απόσταση
	= 50	, >1.0m απόσταση
JPO (Joint Plane Orientation)	= 10	, οριζόντιες ασυνέχειες
	= 20	, ομόρροπες του πρανούς
	= 30	, άλλο προσανατολισμό
	= 40	, αντίρροπες του πρανούς
SGI (Specific Gravity Influence)	= 25*SGI(t/m ³)-50	
S	= 0.05(UCS) ή προσδιορισμός της σκληρότητας με βάση την κλίμακα Mohs	, UCS αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου

Η συμμετοχή των ασυνεχειών στην εκτίμηση της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας, αφορά τα επίπεδα “αδυναμίας” της βραχομάζας τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη θραύση της κατά την απόσπασή της με τη χρήση εκρηκτικής ύλης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η βραχομάζα είναι πολύ τεμαχώδης, τότε η θραύση σε πολύ μεγάλο βαθμό ελέγχεται από τις προϋπάρχουσες ασυνέχειες και λιγότερο από την χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης και το αντίθετο ισχύει για τον άρρηκτο βράχο. Η ποιοτική αυτή εκτίμηση της βραχομάζας αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό για την επιτυχία της θραύσης της.

Πιο συγκεκριμένα, η απόσταση των ασυνεχειών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών, καθώς η βραχομάζα η οποία περιγράφεται από ένα πυκνό δίκτυο ασυνεχειών απαιτεί μικρότερη ποσότητα εκρηκτικής ύλης για τη βέλτιστη θραύση της, σε αντίθεση με την άρρηκτη βραχομάζα. Επίσης, η διεύθυνση των κύριων ασυνεχειών του μετώπου είναι σημαντική, όχι μόνο όσον αφορά το μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών, αλλά και την εκδήλωση ποδαρικού, καθώς και την κοπή του μετώπου. Από την άλλη πλευρά, η πυκνότητα του πετρώματος έχει εν μέρει μικρότερη επιρροή στην εκρηκτικότητά του,

αλλά σε γενικές γραμμές όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα εκρηκτικής ύλης απαιτείται για τη θραύση του. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παράμετρος της αντοχής με προσδιορισμό της μέσω της αντοχής σε μοναξονική θλίψη, αποτελεί έναν πιο εύκολο τρόπο εκτίμησης, σε σχέση με την σκληρότητα από την κλίμακα Mohs η οποία χρησιμοποιούνταν στην αρχική εξίσωση (Lilly 1986).

Gupta R.N. et al (1990)

Οι Gupta et al. βασισμένοι σε ένα σύνολο δεδομένων, πρότεινε την ακόλουθη εξίσωση για την εκτίμηση του παράγοντα φόρτισης (kg/m^3) για διαφορετικές αντοχές του πετρώματος:

$$\text{Charge factor} = 0.287 * B^{-0.407} * F^{0.62} \quad (6.4.2)$$

Όπου, B είναι το φορτίο (m) και $F = \frac{C^2}{1.06 * E}$, όπου C είναι η αντοχή σε μοναξονική θλίψη (kg/cm^2) και E το μέτρο ελαστικότητας (kg/cm^2).

JKMRC (1996)

Το μοντέλο JKMRC ταξινομεί τη βραχομάζα σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοσή της στη διαδικασία της ανατίναξης, βασισμένο σε δεδομένα που συλλέχθηκαν από ορυχείο εξόρυξης άνθρακα με τη χρήση ANFO. Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη είναι η αντοχή, η πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) της βραχομάζας, η δομή της in situ βραχομάζας καθώς και η σχεδίαση της ανατίναξης συμπεριλαμβανομένης της βέλτιστης επιθυμητής κοκκομετρίας, του όγκου της εξορυσσόμενης μάζας και η παρουσία νερού. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τους δείκτες προσδιορισμού της δυσκολίας ή της δυσκολίας στην εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας Young και η αντοχή σε μοναξονική θλίψη, προσδιορίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Η εκτίμηση της δομής της βραχομάζας πραγματοποιείται από την εμφάνιση του υλικού in situ και βαθμολογείται ως προς την πρόκληση δυσμενών ή ευμενών συνθηκών για την εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας. Το σχήμα της εξορυσσόμενης μάζας (εκτεταμένη ή συμπαγής), που προκύπτει μετά την ανατίναξη στο μέτωπο, λαμβάνεται υπόψη ως μία παράμετρος η οποία βασίζεται στον εξοπλισμό εκσκαφής που χρησιμοποιείται για την ανάσυσή της. Τέλος, ακόμα μία παράμετρος που υπεισέρχεται στο μοντέλο αυτό είναι αν το μέτωπο εξόρυξης είναι ελεύθερο ή όχι.

Jiang Han et al. (2000)

Οι Jiang Han et al. χρησιμοποίησαν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν ένα εξελιγμένο υπολογιστικό σύστημα επεξεργασίας πληροφοριών και αυτοματοποίησης των μαθηματικών μοντέλων. Ανέπτυξαν ένα νευρωνικό δίκτυο με χρήση του αλγορίθμου οπισθοδιάδοσης (back propagation), με έξι παραμέτρους εισόδου (το μήκος των ασυνεχειών, η μέση απόσταση των ασυνεχειών, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας, μέσο μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων, ποσοστό των ογκολίθων) και μία εξόδου (η εκρηκτική ικανότητα). Στο κρυφό επίπεδο χρησιμοποίησαν πέντε κρυφούς νευρώνες. Ο απώτερος σκοπός ήταν να δημιουργήσουν ένα “έξυπνο” υπολογιστικό σύστημα προσδιορισμού της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας. Το σύνολο των δεδομένων ανερχόταν σε 88 διαφορετικές συνθήκες ανατίναξης, από τα οποία τα 44 χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου, 22 για την επικύρωσή του και 22 για τον έλεγχο. Η ακρίβεια υπολογισμού της εκρηκτικής ικανότητας με χρήση του μοντέλου αυτού ανέρχεται στο 10%.

Χατζηαγγέλου & Χρηστάρας (2013)

Οι Χατζηαγγέλου & Χρηστάρας (2013) είναι σε συμφωνία με τον Lilly (1986), ότι οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας σε πολύ μεγάλο βαθμό είναι τόσο η δομή της βραχομάζας, όσο και η πυκνότητα και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών που αναπτύσσονται στο μέτωπο της εξόρυξης. Ανέπτυξαν ένα νέο σύστημα ταξινόμησης της εκρηκτικής ικανότητας, ως αποτέλεσμα υπολογισμού 90,000 διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων προσδιορισμού της βραχομάζας από την εξίσωση Lilly και συγχρόνως περιγράφοντας τη δομή της βραχομάζας σύμφωνα με τον Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (Geological Strength Index, Hoek & Marinos 2000). Το νέο αυτό σύστημα ονομάζεται BQS (Blasting Quality System) χρησιμοποιώντας τον δείκτη εκρηκτικής ικανότητας BI κατά Lilly, καθώς και την ταξινόμηση σύμφωνα με τα ήδη γνωστά συστήματα ταξινόμησης RMR και GSI. Το νέο αυτό σύστημα δίνει τη δυνατότητα, στην επί τόπου γρήγορη και εύκολη αξιολόγηση της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητά της, (Σχήμα 6.4.2). Το BQS σύστημα εφαρμόστηκε στις υπόγειες εκσκαφές για την εκτίμηση της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας και συγκεκριμένα στην εκσκαφή των υπόγειων σηράγγων στα τμήματα της Εγνατίας,

Σχήμα 6.4.2. Σύστημα ταξινόμησης της εκρηκτικής ικανότητας (BQS), (Χατζηαγγέλου & Χρηστάρας 2013).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

7.1 Εισαγωγή

Η συλλογή του συνόλου των δεδομένων για την πραγματοποίηση της παρούσας έρευνας πραγματοποιήθηκε από δύο λατομεία αδρανών υλικών της Ιντερμπετόν Δομικά Υλικά Α.Ε., που ανήκει στον όμιλο εταιριών TITAN. Συγκεκριμένα, τα δύο αυτά λατομεία είναι το λατομείο Δρυμού, στην περιοχή της Μυγδονίας, στον Δήμο Ωραιοκάστρου, στην περιοχή Ντεβέ Κοράν και το λατομείο Ταγαράδων, στον Δήμο Θέρμης, στον Νομό Θεσσαλονίκης. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί ο λατομικός χώρος στο οποίο αναπτύσσεται, η λατομική δραστηριότητα αυτών αλλά και τα γεωλογικά στοιχεία των περιοχών όπου ανήκουν οι δύο περιοχές.

7.2 Περιγραφή της λατομικής περιοχής των δύο λατομείων έρευνας

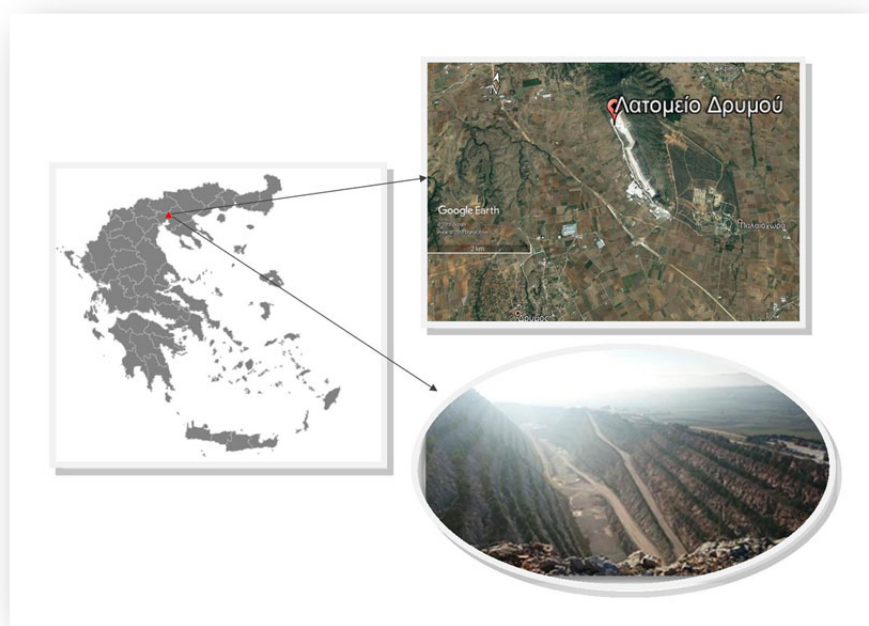
Λατομείο Δρυμού

Το λατομείο Δρυμού εκμεταλλεύεται χώρο ασβεστολιθικής έκτασης, εντός λατομικής περιοχής, της εταιρίας Τσιμέντων TITAN Α.Ε., που βρίσκεται στη θέση Ντεβέ Κοράν, περίπου 3km βόρεια της δημοτικής κοινότητας Δρυμού, του Δήμου Ωραιοκάστρου (με το πρόγραμμα Καποδίστριας ανήκε στον Δήμο Μυγδονίας), της Περιφερειακής Ενότητας Θεσσαλονίκης, ($40^{\circ}48'49''\text{N}$, $22^{\circ}58'13''\text{E}$). Άλλοι πλησιέστεροι οικισμοί είναι η Κριθιά, η Νέα Σάντα, η Άσσηρος σε απόσταση άνω των 3km. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.2.1, το λατομείο αναπτύσσεται στην νοτιοδυτική πλευρά του λόφου Καμήλα, καλύπτοντας μία μεγάλη, επιμήκης έκταση, με μέγιστο μήκος στα 2km (Σχήμα 7.2.2). Πιο συγκεκριμένα βρίσκεται στη θέση Ντεβέ Κοράν, 20km βόρεια της Θεσσαλονίκης και 20km νότια της πόλης του Κιλκίς.

Η πρώτη άδεια εκμετάλλευσης του λατομικού χώρου χορηγήθηκε το 1978 για λατομείο έκτασης $123,000\text{m}^2$ (TITAN I), με αποκλειστική χρήση την τροφοδότηση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

του εργοστασίου τσιμέντου στην Ευκαρπία. Το 2000 έγινε εκμίσθωση του λατομικού χώρου (TITAN II) έκτασης 258,715m², εντός των ορίων της καθορισμένης λατομικής περιοχής Δρυμού. Σε όμορη θέση του υφιστάμενου λατομείου TITAN II, λειτουργεί λατομείο παραγωγής αδρανών υλικών για την κάλυψη της τοπικής αγοράς αδρανών υλικών, το οποίο εκμεταλλεύεται η Ιντερμπετόν Δομικά Υλικά Α.Ε. Το σύνολο της περιοχής της λατομικής εκμετάλλευσης, αθροιστικά με τις επεκτάσεις που εγκρίθηκαν με την υπ'αρ. Απόφαση Μ.Ε.9/20-01-2016 για 43,970m² και 41,478 m², ανέρχεται περίπου στα 467,163 m². Οι επεκτάσεις κρίθηκαν απαραίτητες, λόγω των αυξανόμενων αναγκών τροφοδοσίας του εργοστασίου παραγωγής σκυροδέματος της Ευκαρπίας, εξαιτίας της αύξησης των εξαγωγών τσιμέντου. Η έγκριση των περιβαλλοντικών όρων για την εγκατάσταση και λειτουργία του λατομείου στη θέση Ντεβέ Κοράν, έγινε με την υπ'αρ. Α.Π. Α.Π.124287/13.02.02 Κοινή Υπουργική Απόφαση των Υπουργείων ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. και Ανάπτυξης. Οι περιβαλλοντικοί όροι ανανεώθηκαν με την υπ' αρ. 55451/1521/07.10.13 Απόφαση του Υπουργείου ΠΕ.Κ.Α.



Σχήμα 7.2.1. Γεωγραφική θέση του λατομείου Δρυμού.



Σχήμα 7.2.2. Πανοραμική απεικόνιση του λατομείου Δρυμού.

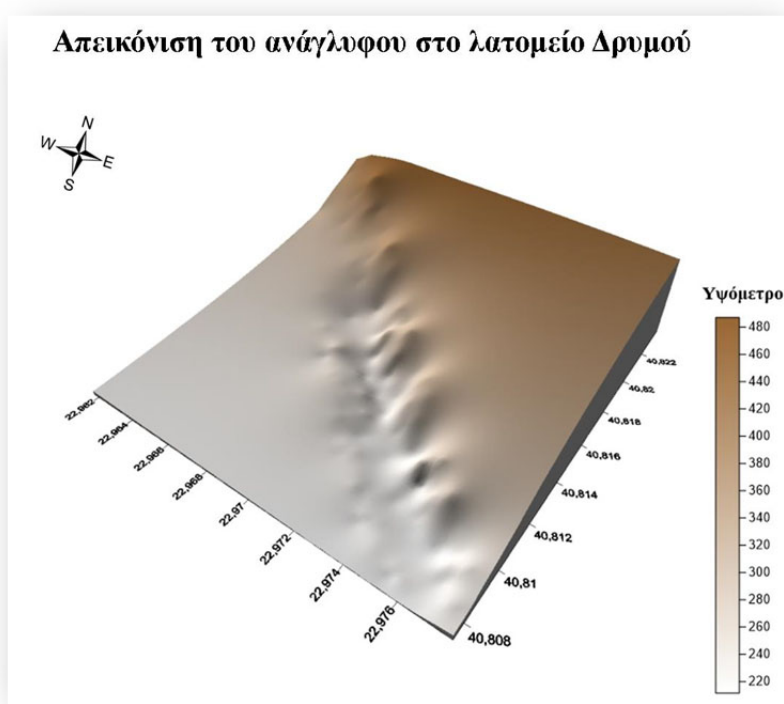
Η υφιστάμενη δραστηριότητα βρίσκεται στα όρια της Περιφερειακής Ζώνης Γ΄ του Εθνικού Πάρκου Κορώνειας-Βόλβης, (ΚΥΑ 6919/2004). Το σύνολο της λεκάνης Μυγδονίας αποτελεί Εθνικό Πάρκο και περιλαμβάνει την περιοχή που προστατεύεται από τη σύμβαση Ramsar, έκτασης 163.800 στρεμμάτων. Επίσης, στην ευρύτερη περιοχή βρίσκονται οι προστατευμένες περιοχές από το δίκτυο Natura 2000 (λίμνες Κορώνειας-Βόλβης, Στενά Ρεντίνας, λίμνη Πικρολίμνη-Ξηλοκερατέα), που χαρακτηρίζονται από την πλούσια και σπάνια ορνιθοπανίδα.

Στη νοτιανατολική πλευρά της μίσθωσης ΔΡΥΜΟΣ Ι, υπάρχουν τρία συγκροτήματα σπαστηροτριβείων. Πλησίον της δραστηριότητας υπάρχει συγκρότημα θραύσης που τροφοδοτείται από το λατομείο, για την παραγωγή κοκκομετρικά διαβαθμισμένων αδρανών υλικών, από όπου πραγματοποιείται η φόρτωση, ζύγιση και μεταφορά των υλικών. Τα προσφερόμενα λατομικά προϊόντα τα οποία προέρχονται από το λατομείο του Δρυμού είναι τα ακόλουθα:

- Άθραυστος ασβεστόλιθος
- Άμμος θραυστή
- Ρυζάκι
- Γαρμπίλι θραυστό
- Χαλίκι θραυστό
- Σκύρα θραυστά
- Πρόσπασμα
- Υλικό ανάμεικτο

- Υλικό επιχωμάτωσης
- Υλικό πλήρους διαβάθμισης
- Παιπάλη
- Πέτρα ασβεστοποιίας

Η εκμετάλλευση των λατομικών χώρων της περιοχής του Δρυμού, γίνεται με τη δημιουργία και ανάπτυξη τελικών βαθμίδων εξόρυξης στα ίδια υψόμετρα, όπου αυτό είναι δυνατόν. Η εξόρυξη του ασβεστολίθου υλοποιείται με τη χρήση εκρηκτικών υλών και υποβοηθητικά χρησιμοποιούνται προωθητικά μηχανήματα και εκσκαφείς. Ως μέθοδος εκμετάλλευσης εφαρμόζεται η επιφανειακή εκσκαφή, με διαδοχικές βαθμίδες και με σειρά ανάπτυξης και προχώρησης από πάνω προς τα κάτω, με βαθμίδες ανοιχτού τύπου. Επιπλέον, η βαθμιδωτή μορφή του χώρου στο τέλος της εκμετάλλευσης διευκολύνει τις εργασίες αποκατάστασης. Οι βαθμίδες εξόρυξης έχουν ύψος 12m με γωνία κλίσης περίπου 75°. Στο Σχήμα 7.2.3 απεικονίζεται η μεταβολή του ανάγλυφου εντός του λατομικού χώρου.



Σχήμα 7.2.3. Διακύμανση του ανάγλυφου στον λατομικό χώρο του Δρυμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ο ασβεστόλιθος από το μέτωπο της εξόρυξης φορτώνεται με λαστιχοφόρους φορτωτές σε φορτηγά αυτοκίνητα και μεταφέρεται στον σπαστήρα για θραύση. Ακολούθως με φορτηγά μεταφέρεται στο εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου στην Ευκαρπία για περαιτέρω επεξεργασία. Κατά την παραγωγική διαδικασία της εκμετάλλευσης του λατομείου, δεν παράγονται απόβλητα εξόρυξης πέραν των ποσοτήτων χώματος και φυτικής γης που δεν είναι κατάλληλη για την τροφοδοσία του εργοστασίου. Η εκμετάλλευση της λατομικής περιοχής πραγματοποιείται με απόλυτη τήρηση των περιβαλλοντικών όρων και οποιαδήποτε “οπτική ρύπανση” και τροποποίηση της μορφολογικής εικόνας, σταδιακά αποκαθίσταται στο τμήμα των εξοφλημένων βαθμίδων. Από τα πρώτα έτη της εκμετάλλευσης, η αποκατάσταση υλοποιείται με επαναφορά της βλάστησης στην αρχική της μορφή, με φύτευση διαφόρων δενδρωδών και θαμνωδών ειδών. Το επιφανειακό εδαφικό υλικό (φυτική γη), που εξορύσσεται συγκεντρώνεται σε προκαθορισμένο χώρο, εντός της λατομικής έκτασης, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τις φυτεύσεις.

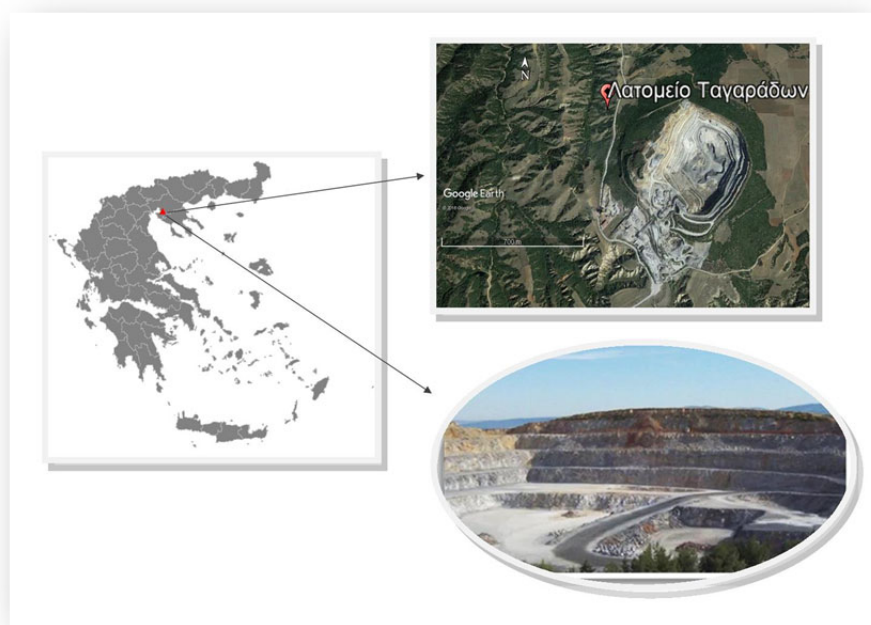
Στο Σχήμα 7.2.4 απεικονίζεται η χρονολογική εξέλιξη του λατομείου Δρυμού σε βάθος δεκαέξι ετών, από το 2002 έως ο 2018. Από την παρατήρηση των εικόνων γίνεται αντιληπτή η επέκταση της λατομικής περιοχής νοτιοδυτικά κατά μήκους του όρους Καμήλα, με τη χορήγηση των νόμιμων αδειών, αλλά και η σταδιακή αποκατάσταση - εξυγίανση του λατομικού τοπίου, των παλαιότερων εξοφλημένων βαθμίδων, με στόχο την εναρμόνισή του με το περιβάλλον.



Σχήμα 7.2.4. Χρονολογική εξέλιξη του λατομείου Δρυμού από 2002 έως 2018.

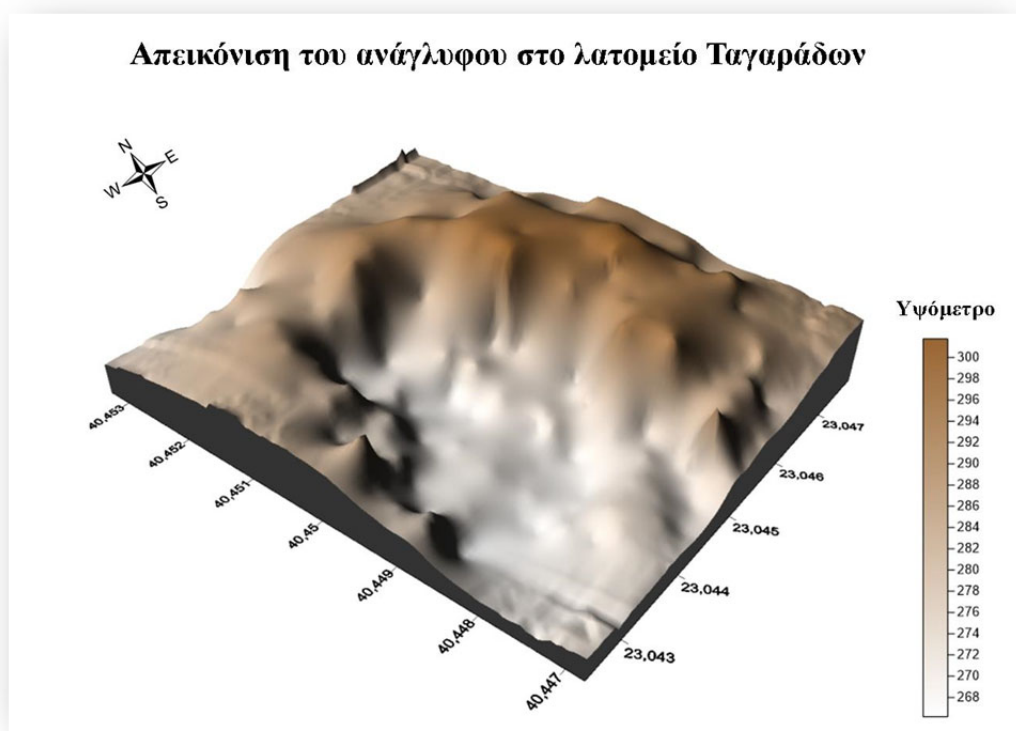
Λατομείο Ταγαράδων

Το λατομείο Ταγαράδων εκτείνεται νότια του Νομού Θεσσαλονίκης ($40^{\circ}26'56''\text{N}$, $23^{\circ}02'42''\text{E}$), 2km βορειοανατολικά του χωριού Κάτω Σχολάρι, στον Δήμο Θέρμης, (Σχήμα 7.2.5). Άλλοι πλησιέστεροι οικισμοί οι οποίοι απέχουν απόσταση μεγαλύτερη των 3km είναι ο Αγ. Αντώνιος, η Σουρωτή, η Αγ. Παρασκευή, οι Ταγαράδες. Το λατομείο εκμεταλλεύεται χώρο ασβεστολιθικής έκτασης, εντός λατομικής περιοχής, στη θέση “Κορυφή ή Μύτη-Σεμσελή”. Η εκμετάλλευση πραγματοποιείται σε περιοχή έκτασης $369,827.12\text{m}^2$ και στην ουσία πρόκειται για συνεκμετάλλευση λατομικών χώρων από τα Λατομεία Κοινότητας Ταγαράδων Α.Ε. και Ιντερμπετόν Δομικά Υλικά Α.Ε. Πιο συγκεκριμένα έκταση 100 στρεμμάτων παραχωρήθηκε με συμβόλαιο μίσθωσης με αρ. 36.118/19.12.1980 από την τότε Κοινότητα Ταγαράδων στον τότε ιδιοκτήτη. Στη συνέχεια, η ατομική αυτή επιχείρηση μετατράπηκε σε εταιρία με την επωνυμία Λατομεία Ταγαράδων Ερμής ΑΒΕΕ, η οποία απορροφήθηκε από την εταιρία Εργομπετόν Α.Ε. και η οποία με τη σειρά της συγχωνεύτηκε με την εταιρία Ιντερμπετόν Ανώνυμη Βιομηχανική Εμπορική Εταιρία Δομικών Υλικών, Λατομικών και Μεταφορικών εργασιών με τον διακριτικό τίτλο Ιντερμπετόν Δομικά Υλικά Α.Ε.



Σχήμα 7.2.5. Γεωγραφική θέση του λατομείου Ταγαράδων.

Η προσπέλαση στον χώρο του λατομείου εξασφαλίζεται από την επαρχιακή οδό που συνδέει τον οικισμό του Κάτω Σχολαρίου με την εθνική οδό Θεσσαλονίκης-Μουδανιών και στη συνέχεια με τον υφιστάμενο λατομικό δρόμο, ο οποίος χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση του λατομείου. Επισημαίνεται ότι η διέλευση των φορτηγών που εφοδιάζονται με αδρανή υλικά από το λατομείο, δεν διέρχονται μέσω του οικισμού, αλλά μέσω του παρακείμενου λατομικού δρόμου, προκειμένου να αποφεύγεται η όχληση. Η εκμετάλλευση των λατομικών χώρων της περιοχής των Ταγαράδων πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή και με βάση του Κανονισμού Μεταλλευτικών & Λατομικών Εργασιών (2011), όπου η εκσκαφή του υλικού υλοποιείται με ασφαλή και ορθολογική εκτέλεση των εργασιών. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.2.6 η εξόρυξη εκτείνεται σε μία κυκλική ανάπτυξη, με δημιουργία βαθμίδων στα ίδια υψόμετρα, όπου αυτό είναι δυνατό.



Σχήμα 7.2.6. Διακύμανση του ανάγλυφου στον λατομικό χώρο των Ταγαράδων.

Στο λατομείο υπάρχει σύγχρονος διατρητικός και εξορυκτικός εξοπλισμός για την ορθολογική διαχείριση του κοιτάσματος, καθώς και ανάλογα μέσα μεταφοράς και φόρτωσης. Η εξόρυξη του ασβεστολίθου υλοποιείται με τη χρήση εκρηκτικών υλών και υποβοηθητικά χρησιμοποιούνται προωθητικά μηχανήματα και εκσκαφείς. Σε

όλες τις θέσεις, η σειρά ανάπτυξης και προχώρησης των βαθμίδων πραγματοποιείται από πάνω προς τα κάτω. Επιπλέον, η βαθμιδωτή μορφή του χώρου στο τέλος της εκμετάλλευσης διευκολύνει τις εργασίες αποκατάστασης. Οι βαθμίδες εξόρυξης έχουν ύψος 12m με γωνία κλίσης περίπου 75° . Σημειώνεται ότι τα δάπεδα των βαθμίδων διατηρούν μία μικρή κλίση προς τα νότια και ανατολικά για την απομάκρυνση των όμβριων υδάτων. Εν συνεχεία, ο ασβεστόλιθος από το μέτωπο της εξόρυξης φορτώνεται με λαστιχοφόρους φορτωτές σε φορτηγά αυτοκίνητα και μεταφέρεται μέσω των οδών εσωτερικής μεταφοράς στον σπαστήρα για θραύση. Ακολούθως με φορτηγά μεταφέρεται για την κάλυψη των τοπικών αναγκών σε αδρανή υλικά.

Το υπό μελέτη λατομείο χαρακτηρίζεται από απουσία υπερκείμενων στείρων υλικών άλλου σχηματισμού, παρά μόνο υπάρχει η παρουσία εδαφικού υλικού, που καλύπτει κατά θέσεις τον ασβεστολιθικό σχηματισμό. Έτσι, λοιπόν, ως εργασίες προπαρασκευής μπορούν να θεωρηθούν η διάνοιξη των προσπελάσεων, της κορυφής του λατομικού χώρου και η ανάπτυξη των βαθμίδων εκμετάλλευσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εργασίες ανάπτυξης και προπαρασκευής, αν και απαιτούν μια πρόσθετη καθυστέρηση και φροντίδα, παρ' όλα αυτά μπορούν να θεωρηθούν παραγωγικές, αφού κατά την διαμόρφωση και τη προπαρασκευή των βαθμίδων, κατ' ανάγκη παράγονται και αξιοποιήσιμα αδρανή υλικά.

Στο νότιο τμήμα του λατομείου υπάρχει το συγκρότημα σπαστηροτριβείων, το οποίο τροφοδοτείται από το λατομείο για την παραγωγή κοκκομετρικά διαβαθμισμένων αδρανών υλικών, από όπου πραγματοποιείται η φόρτωση, ζύγιση και μεταφορά των υλικών. Τα προσφερόμενα λατομικά προϊόντα τα οποία προέρχονται από το λατομείο των Ταγαράδων είναι τα ακόλουθα:

- Άμμος θραυστή
- Ρυζάκι
- Γαρμπίλι θραυστό
- Χαλίκι θραυστό
- Σκύρα θραυστά
- Πρόσπασμα
- Υλικό ανάμεικτο
- Ακατέργαστος ασβεστόλιθος
- Υλικό επιχωμάτωσης κατηγορίας Β'
- Υλικό πλήρους διαβάθμισης

Οι λατομικές εργασίες στο λατομείο των Ταγαράδων εκτελούνται με ορθολογικό τρόπο σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, ώστε να αποφεύγεται η υποβάθμιση του περιβάλλοντος, πέρα από το αναγκαίο μέτρο. Έτσι, λοιπόν, η εξόρυξη του ασβεστολιθικού πετρώματος πραγματοποιείται με απόλυτη τήρηση των περιβαλλοντικών όρων, Ν.1650/1986 (ΦΕΚ160Α΄) και Ν.3010/2002 (ΦΕΚ91Α΄) λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα για την πρόληψη ή μείωση παντός είδους δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η οποιαδήποτε “οπτική ρύπανση” και τροποποίηση της μορφολογικής εικόνας, σταδιακά αποκαθίσταται στο τμήμα των εξοφλημένων βαθμίδων. Από τα πρώτα έτη της εκμετάλλευσης, η αποκατάσταση υλοποιείται με επαναφορά της βλάστησης στην αρχική της μορφή, με φύτευση διαφόρων δενδρωδών και θαμνωδών ειδών. Το επιφανειακό εδαφικό υλικό (φυτική γη), που εξορύσσεται συγκεντρώνεται σε προκαθορισμένο χώρο, εντός της λατομικής έκτασης, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τις φυτεύσεις. Στο Σχήμα 7.2.7 απεικονίζεται η εξέλιξη του λατομείου Ταγαράδων σε διάστημα έξι ετών (2012 έως 2018), όπου γίνεται φανερή η κατά βάθος εκμετάλλευση του ασβεστολίθου, με την ανάπτυξη βαθμίδων εξόρυξης.



Σχήμα 7.2.7. Χρονολογική εξέλιξη του λατομείου Ταγαράδων από 2012 έως 2018.

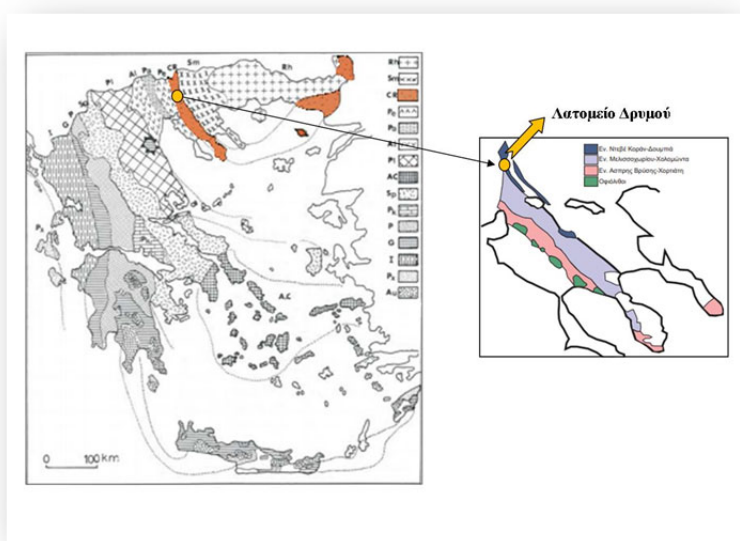
7.3 Γεωλογία των λατομικών χώρων και της ευρύτερης περιοχής μελέτης

Λατομείο Δρυμού

Οι σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής του λατομείου Δρυμού ανήκουν γεωτεκτονικά στην Περιοδοπική Ζώνη, η οποία καθιερώθηκε στη γεωτεκτονική διαίρεση της Ελλάδας από τους Kauffman et al. (1976), ως η πιο εσωτερική ζώνη των Ελληνίδων, (Σχήμα 7.3.1). Η Περιοδοπική Ζώνη εκτείνεται με πλάτος 10-20km, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ στη δυτική πλευρά της Σερβομακεδονικής. Πιο συγκεκριμένα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

εκτείνεται από τα Ελληνο-γιουγκοσλαβικά σύνορα προς τα ΝΑ στη λίμνη Λαγκαδά, τον κορμό της Χαλκιδικής και τη χερσόνησο της Σιθωνίας, όπου κάμπτεται προς ΒΑ και με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ περνάει από την άκρη της χερσονήσου του Άθω και προεκτείνεται υποθαλάσσια προς το νησί της Σαμοθράκης και την περιοχή της Αλεξανδρούπολης – Έβρου. Η κύρια παλαιογεωγραφική και γεωτεκτονική σημασία της Περιοδοπικής ζώνης είναι ότι αποτέλεσε στη διάρκεια του Ιουρασικού την ηπειρωτική κατωφέρεια της ηπειρωτικής Ελληνικής ενδοχώρας προς τον ωκεανό της Τηθύος. Η κατωφέρεια αυτή κατέληγε σε μία βαθιά αύλακα περιφερειακή της ηπειρωτικής μάζας. Ως προς την τεκτονική δομή της ζώνης αναγνωρίζονται δύο φάσεις πτυχώσεων. Η πρώτη φάση έλαβε χώρα κατά το Άνω Ιουρασικό – Κ.Κρητιδικό με παράλληλη μεταμόρφωση, ενώ η δεύτερη κατά το Ηώκαινο με Ολιγόκαινο. Η Ζώνη αυτή διακρίνεται από ανατολικά προς τα δυτικά σε τρεις βασικές ενότητες: η ενότητα Ντεβέ Κοράν – Δουμπιά, η ενότητα Μελισσοχωρίου – Χολομώντα και η ενότητα Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη (Μουντράκης 2010).

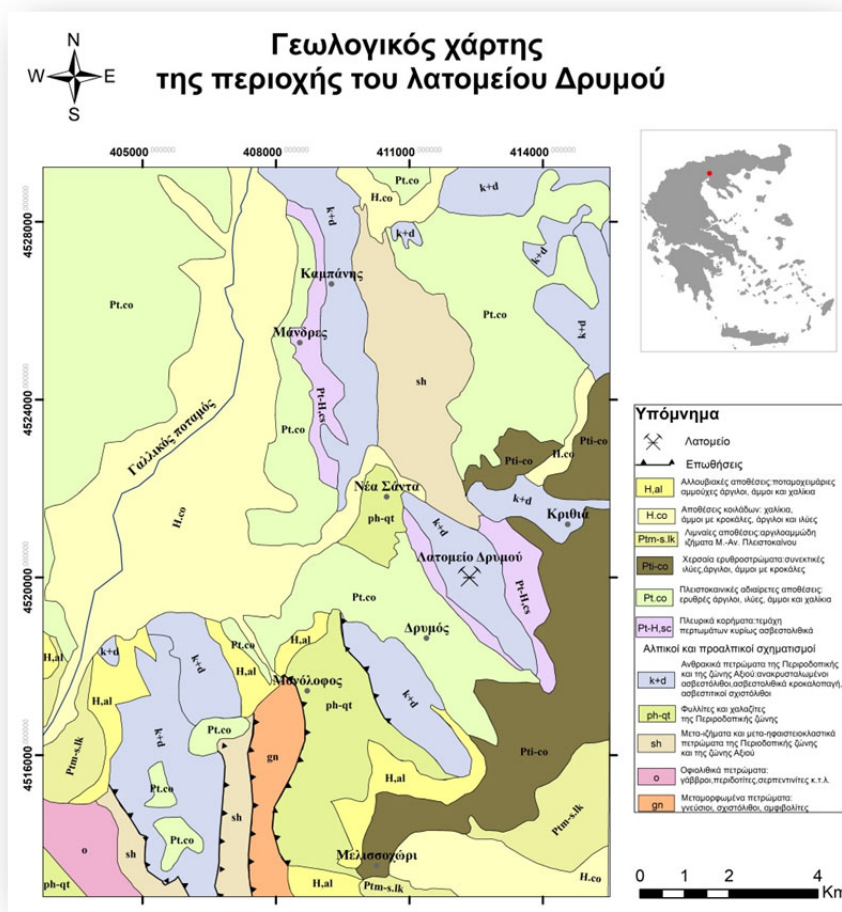


Σχήμα 7.3.1. Θέση του λατομείου Δρυμού στη γεωτεκτονική διαίρεση της Ελλάδας, (Μουντράκης 2010).

Το λατομείο Δρυμού εντοπίζεται εντός των ασβεστολιθικών σχηματισμών της ενότητας Ντεβέ Κοράν - Δουμπιά της Περιοδοπικής Ζώνης, στο όρος Καμήλα, που εκτείνεται από ΒΒΔ προς ΝΝΑ, (Σχήμα 7.3.2). Το βορειοανατολικό τμήμα βρίσκεται σε επαφή με τον σχηματισμό του Πυργωτού, όπου αναπτύσσεται η ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά, η οποία αποτελείται από ηφαιστειακά και ιζηματογενή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

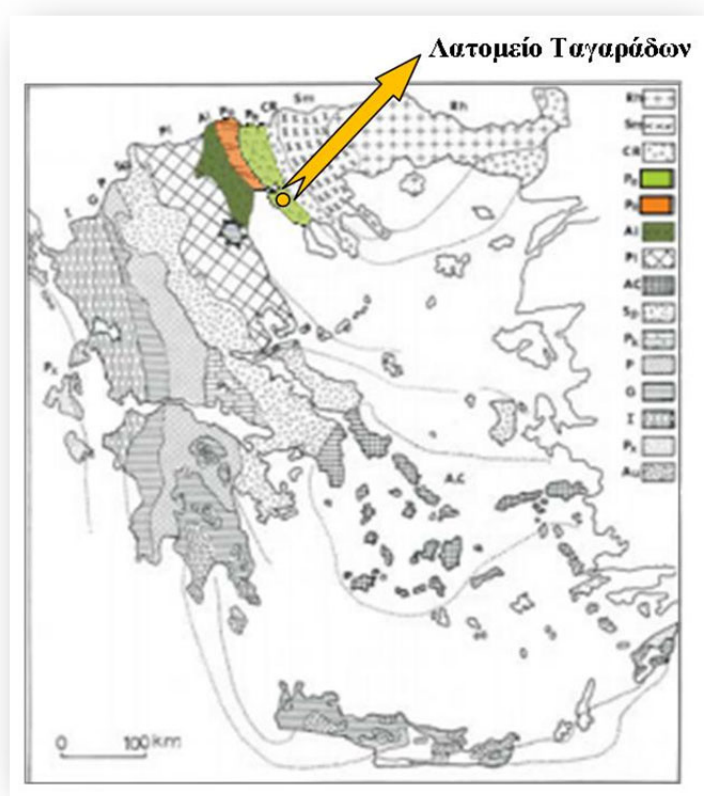
υλικά ημιμεταμορφωμένα (σχιστοποιημένους ρυόλιθους, πυροκλαστικά υλικά) ηλικίας Παλαιozoϊκού – Κ.Τριαδικού. Το κύριο τμήμα του όρους αποτελείται από λευκούς έως τεφρούς στρωματώδεις, έως άστρωτους λευκούς ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους. Επιπλέον, στον σχηματισμό του όρους Καμήλα, αναπτύσσεται ο κονδυλώδης ασβεστόλιθος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από ένα ελαφρύ κόκκινο χρώμα, που οφείλεται στην παρουσία τρισθενούς σιδήρου και μαγγανίου. Το σύνολο του όρους περιβάλλεται από πλευρικά κορήματα (τεμάχη πετρωμάτων κυρίως ασβεστολιθικών) και από πλειοκαινικές αποθέσεις (ερυθρές αργίλους, ιλύες, άμμοι, χαλίκια).



Σχήμα 7.3.2. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του λατομείου Δρυμού (ΙΓΜΕ Φύλλο Χάρτη Θεσσαλονίκης, ανασχεδιασμένος από τη συγγραφέα).

Λατομείο Ταγαράδων

Οι σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής του λατομείου Ταγαράδων ανήκουν γεωτεκτονικά στην Παιονία ζώνη, η οποία αποτελεί την ανατολική εσωτερική ζώνη, όπου μαζί με τις ζώνες Πάικου και Αλμωπίας συνθέτουν τη ζώνη Αξιού, (Σχήμα 7.3.3). Αρχικά καθορίστηκε από τον Kossmat (1924), ως μία ζώνη με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ και πλάτος 30-70km, που παρεμβάλλεται μεταξύ της μάζας της Ροδόπης (προς ανατολικά) και της Πελαγονικής (προς δυτικά). Η ζώνη Αξιού αρχίζει από την περιοχή της FYROM, επεκτείνεται μέχρι τον Θερμαϊκό κόλπο και το Αιγαίο, όπου περιλαμβάνει ορισμένα από τα νησιά των βόρειων Σποράδων και κάμπτεται στη συνέχεια κατά διεύθυνση Δ-Α προς τη Μικρά Ασία. Βασικό της χαρακτηριστικό είναι οι μεγάλες οφιολιθικές μάζες που έχουν εξάπλωση σε όλο το χώρο της και συνιστούν στο σύνολό τους την «εσωτερική οφιολιθική λωρίδα» της Ελλάδας, καθορίζοντας τη γεωτεκτονική της θέση, ως τον παλιό ωκεάνιο χώρο της Τηθύος.



Σχήμα 7.3.3. Θέση του λατομείου Ταγαράδων στη γεωτεκτονική διαίρεση της Ελλάδας (Μουντράκης 2010).

Στη ζώνη του Αξιού υπάρχουν αρκετές εμφανίσεις μεταμορφωμένων πετρωμάτων συχνά συμπτυχωμένων με αλπικά ιζήματα, η τεκτονική θέση των οποίων δείχνει, πολλές φορές με βεβαιότητα, ότι αντιπροσωπεύουν Παλαιοζωϊκά (προαλπικά) πετρώματα. Τα πετρώματα αυτά είναι γνεύσιοι, μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, χαλαζιακοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι καθώς και μικρογρανιτικές και πηγματιτικές παρεμβολές. Η ηλικία εμφάνισης αυτών θεωρείται Παλαιοζωϊκή (Μουντράκης 2010). Το 1966 ο Mercier διαίρεσε τη ζώνη Αξιού σε τρεις ζώνες: την αύλακα Παιονίας, το ύβωμα Πάικου και την αύλακα Αλμωπίας. Το βασικό κριτήριο με το οποίο έγινε η διαίρεση είναι το ότι στην μεν ζώνη Πάικου παρατηρείται μια παχιά νηριτική ασβεστολιθική σειρά ηλικίας Ιουρασικού, η οποία δείχνει ότι η περιοχή του Πάικου ήταν υποθαλάσσια ράχη (ύβωμα) με ρηχή θάλασσα, ενώ στις ζώνες Παιονίας και Αλμωπίας τα αντίστοιχα ιζήματα Ιουρασικού είναι βαθιάς θάλασσας αργιλικά και κερατολιθικά. Επίσης, κύριο τεκτονικό χαρακτηριστικό της Παιονίας ζώνης είναι η λεπιοειδής τεκτονική, που σχηματίστηκαν από τις Τριτογενείς φάσεις πτυχώσεων (Μουντράκης 2010).

Ο λατομικός χώρος των Ταγαράδων αποτελείται από ασβεστολίθους του Ανώτερου Ιουρασικού και εντοπίζονται ως συμπαγείς, χωρίς ξένες – στείρες παρεμβολές ή γαιώδη υλικά σε όλο το ορατό πάχος του σχηματισμού. Χαρακτηρίζονται από τεφροί έως πολύ τεφροί παχυστρωματώδεις. Σημειώνεται ότι υπερκείμενοι σχηματισμοί δεν απαντώνται στην περιοχή μελέτης, εκτός από το εδαφικό κάλυμμα, το οποίο είναι προϊόν της επιφανειακής αποσάθρωσης του μητρικού πετρώματος. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.3.4 η περιοχή του λατομείου βρίσκεται εντός Μειο-Πλειοκαινικών χερσαίων, λιμναίων αποθέσεων. Το ασβεστολιθικό κοίτασμα χαρακτηρίζεται από καθαρότητα σε όλο το εύρος της εξάπλωσής του, θεωρώντας το ως πλήρως απολήψιμο (Μπαρκονίκος 2015).



Σχήμα 7.3.4. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του λατομείου Ταγαράδων, (ΙΓΜΕ Φύλλο Χάρτη Θεσσαλονίκης, ανασχεδιασμένος από τη συγγραφέα)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΗ ΜΑΖΑ

8.1 Εισαγωγή

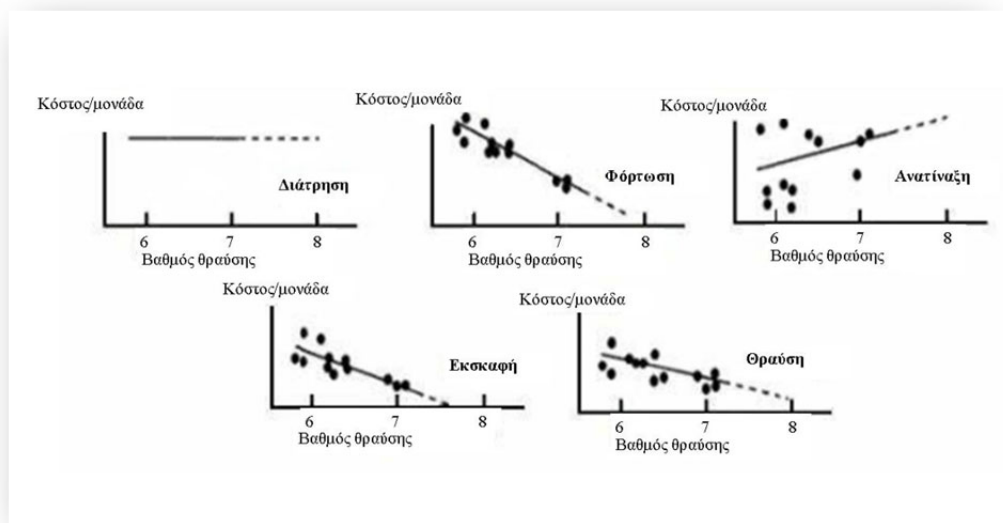
Απώτερος σκοπός της υλοποίησης της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης είναι η επίτευξη της ορθής θραύσης του πετρώματος. Ο βαθμός θραύσης του πετρώματος και το μέγεθος των τεμαχίων της εξορυσσόμενης σωρού είναι εξέχουσας σημασίας, καθώς όχι μόνο επηρεάζουν την εκσκαφή και φόρτωση του πετρώματος από το μέτωπο αλλά και τη διαδικασία της πρωτογενούς θραύσης, καθορίζοντας το κόστος λειτουργίας. Το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων (blast fragmentation) καθορίζονται από συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, τις ιδιότητες της εκρηκτικής ύλης, τη διάταξη των διατρημάτων και τη γεωμετρία του πρσανούς.

Πιο συγκεκριμένα η πρόβλεψη και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των τεμαχίων που προκύπτουν μετά την υλοποίηση της ανατίναξης καθώς και της μορφής της εξορυσσόμενης σωρού, αποτελούν βασικές παραμέτρους επίδρασης των επιφανειακών διεργασιών στα λατομεία αδρανών υλικών. Σημειώνεται ότι στις περισσότερες ανατινάξεις ο προσδιορισμός της μέσης θραύσης του πετρώματος αποτελεί μία πρώτη εκτίμηση της ποιότητας του αποτελέσματος της ανατίναξης. Αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν πολλές συμβατικές και εξελιγμένες μέθοδοι πρόβλεψης του μέσου μεγέθους. Η πρόβλεψη της κατανομής του μεγέθους των τεμαχίων αποδίδεται μέσω εμπειρικών μοντέλων τα οποία βασίζονται στη διάταξη των διατρημάτων (φορτίο, απόσταση, διάμετρος και βάθος διατρημάτων), στο ύψος του πρσανούς και στην κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης. Από την άλλη πλευρά έχουν αναπτυχθεί καινοτόμες, αξιόπιστες τεχνικές όπως η ψηφιακή ανάλυση εικόνων για την κατανομή του μεγέθους των τεμαχίων καθώς και η πρόβλεψη με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (βλέπε κεφάλαιο 10).

8.2 Βέλτιστο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών

Η παραγωγή των εξορυσσόμενων τεμαχών στο μέτωπο από τη διαδικασία της ανατίναξης, έχει ως απώτερο στόχο την επίτευξη της βέλτιστης θραύσης των αδρανών υλικών. Το μέγεθος αυτών αποτελεί ένα κομβικό σημείο για την περεταίρω θραύση τους στη μονάδα επεξεργασίας. Σε πολλές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί (Sastry & Chandar 2004, Ryu et al. 2009, Clerici & Mancini et al. 1974) έχει παρατηρηθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας από τα μηχανήματα φόρτωσης και θραύσης στο μέτωπο καθώς και από την πρωτογενή θραύση στη μονάδα, εξαρτάται από τη θραύση του πετρώματος που προκύπτει από την ανατίναξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν οι λειτουργίες αυξάνονται στον τομέα της διαδικασίας της ανατίναξης και της διάτρησης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η δευτερογενής θραύση, τότε το κόστος αυξάνεται (Ryu et al 2009).

Μία πολύ διαδεδομένη κλασσική ανάλυση του κόστους σε σχέση με το σύνολο των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα λατομείο, όπως διάτρηση, ανατίναξη, εκσκαφή, κ.α., αποτελεί η έρευνα Mc Kenzie 1967, (Σχήμα 8.2.1). Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το κόστος της εκσκαφής, της φόρτωσης και της θραύσης μειώνονται με την αύξηση της θραύσης του πετρώματος. Αντίθετα, το κόστος της διάτρησης και της ανατίναξης αυξάνεται με την αύξηση της θραύσης του υλικού.



Σχήμα 8.2.1. Επίδραση του βαθμού θραύσης στο κόστος λειτουργίας (Mc Kenzie 1967).

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι είναι απαραίτητος ο συνδυασμός της αποτελεσματικότητας με το κόστος για την ορθή διαχείριση των επί μέρους εργασιών στην υπαίθρια εκμετάλλευση. Είναι λοιπόν αναγκαία η εύρεση του κατάλληλου μοντέλου για τον σχεδιασμό της ανατίναξης, λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγικότητα της θραύσης.

Η βέλτιστη θραύση (optimum fragmentation) η οποία αποτελεί τον απώτερο σκοπό στο μέτωπο της εξόρυξης, ορίζεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά, (Mohanty 1996):

- 1) Ελαχιστοποίηση των μεγάλων ογκολίθων (“καβαλάκια” στη λατομική ορολογία), για την αποφυγή της δευτερογενούς θραύσης.
- 2) Ελαχιστοποίηση των εξαιρετικά λεπτόκοκκων τεμαχών, (μικρότερα από 10mm).
- 3) Μεγιστοποίηση του όγκου του εξορυσσόμενου υλικού.
- 4) Επαρκής η θραύση του για την αποτελεσματική εκσκαφή και φόρτωση στα ειδικά τροχοφόρα μηχανήματα, με σκοπό την απόθεσή τους στον τροφοδότη της μονάδας επεξεργασίας.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητη η αναφορά στη δευτερογενή θραύση (secondary breaking) η οποία εφαρμόζεται στους μεγάλους ογκολίθους (oversized boulders), που παράγονται πολλές φορές στην εξορυσσόμενη μάζα. Οι ογκολίθοι είναι αποτέλεσμα μη επαρκούς θραύσης του πετρώματος κατά την υλοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο. Οι μέθοδοι οι οποίες εφαρμόζονται για τη δευτερογενή θραύση είναι: η χρήση εκρηκτική ύλης εντός του ογκολίθου (pop shooting, plaster shooting) και η χρήση υδραυλικού σφυριού (hydraulic hammer). Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πραγματοποιείται με γνώμονα τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο του λατομείου. Για τη διευθέτηση των ογκολίθων και την περαιτέρω θραύση τους, συνήθως απομακρύνονται από το μέτωπο και συγκεντρώνονται σε ξεχωριστά σημεία από το υπόλοιπο εξορυσσόμενο υλικό.

Στις περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτή η χρήση εκρηκτική ύλης στους ογκολίθους, προτιμάται η θραύση με τη χρήση υδραυλικού σφυριού, (Σχήμα 8.2.2). Η μέθοδος αυτή είναι πιο οικονομική, γρήγορη, ασφαλής και αποτελεσματική για τη διαχείριση των ογκολίθων, χωρίς να προκαλεί δυσχέρεια στην πραγματοποίηση των υπόλοιπων λατομικών εργασιών στον υπαίθριο χώρο. Αρχικά το υδραυλικό σφυρί προκαλεί τη θραύση των μεγάλων τεμαχών που είναι ορατά και βρίσκονται στο άνω

τμήμα της εξορυσσόμενης σωρού. Ύστερα από τη μετακίνηση της μεγάλης μάζας του υλικού από τη σωρό με τη βοήθεια του εκσκαφέα, αποκαλύπτονται πιθανά μεγάλα τεμάχια τα οποία τα αναλαμβάνει το υδραυλικό σφυρί. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που οι μεγάλοι ογκόλιθοι είναι μικροί στον αριθμό από μία ανατίναξη, τότε συγκεντρώνονται σε ένα σημείο με του ογκόλιθους που θα προκύψουν από άλλες ανατινάξεις, προκειμένου να τα αναλάβει το υδραυλικό σφυρί στο σύνολό τους. Αυτό γίνεται με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου στην αλλαγή του κάδου με το σφυρί στο εξειδικευμένο μηχάνημα.



Σχήμα 8.2.2. Οι ογκόλιθοι και το υδραυλικό σφυρί θραύσης τους.

8.3 Παράγοντες επίδρασης στο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχίων

Η θραύση του πετρώματος, που προκύπτει από την εφαρμογή της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης, επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων, όπου ένα μέρος από αυτούς ανήκουν στην κατηγορία των ελεγχόμενων παραγόντων και οι υπόλοιποι στους μη ελεγχόμενους. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στο πλαίσιο της γεωμετρίας του πρηνούς και της διάτρησης, της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης, του συστήματος πυροδότησης και των χαρακτηριστικών του

πετρώματος, (Lu & Latham 1998, Thornton et al. 2002, Chakraborty et al. 2004),
(Πίνακας 8.3.1).

Πίνακας 8.3.1. Ταξινόμηση των παραμέτρων επίδρασης στη θραύση του πετρώματος
(Seccatore et al. 2011)

Γεωμετρία	Εκρηκτική ύλη	Σύστημα πυροδότησης	Πέτρωμα
Διάμετρος διατρήματος	Είδος	Είδος	Είδος
Αριθμός διατρημάτων	Πυκνότητα	Αριθμός πυροκροτητών	Χαρακτηριστικά
Αριθμός σειρών	Ποσότητα	Χρονοκαθυστέρηση πυροδότησης μεταξύ διατρημάτων	
Ύψος πρानούς Φορτίο x Απόσταση Βάθος διατρήματος Υποδιάτρηση Επιγόμωση Κλίση	$\theta_{\text{διατρήματος}} / \theta_{\text{φουσιγγίου}}$		

Σύμφωνα με τους Lu & Latham 1998, η θραύση του πετρώματος αποτελεί μία διαδικασία μετάβασης από την επί τόπου μορφή του στο μέτωπο σε τεμάχια που προκύπτουν από την εφαρμογή της εκρηκτικής ενέργειας. Πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην πρόβλεψη του μεγέθους των τεμαχίων σε σχέση με τη δομή του βράχου στο μέτωπο, τις ασυνέχειες κ.α, (Grenon et al., 1998, Lu & Latham, 1998, Chakraborty et al. 2004). Επίσης, ο βαθμός θραύσης του πετρώματος λόγω της επίδρασης της εκρηκτικής ύλης σε αυτό, επηρεάζεται άμεσα από την ενέργεια που εκλύεται ανά κυβικό μέτρο εξορυσσόμενης μάζας (MJ/m^3), (Berta 1985, Moser 2008). Σε άλλες έρευνες (Clerici & Mancini 1974, Moser 2008), έχει αποδειχτεί ότι το αποτέλεσμα της θραύσης εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (kg/m^3). Επιπλέον, ο λόγος $\theta_{\text{διατρήματος}} / \theta_{\text{φουσιγγίου}}$, αποτελεί μία αντιπροσωπευτική παράμετρο επίδρασης στο αποτέλεσμα της ανατίναξης (Berta 1985).

Οι Seccatore et al. 2011 μελέτησαν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ όλων των παραπάνω παραμέτρων μέσω του χρηστικού εργαλείου Complexity Analysis, το οποίο δίνει τη δυνατότητα διαχείρισης του συνόλου των παραμέτρων. Η εξίσωση 9.3.1 περιγράφει τους παράγοντες επίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα και τη συμβολή των επί μέρους παραμέτρων στη θραύση του πετρώματος, ακολουθώντας τον γενικό

κανόνα: $Complexity * Uncertainty = Fragility$, όπου $Fragility$ είναι η απροσδόκητη συμπεριφορά με μη επιθυμητά αποτελέσματα. Σε κάθε έναν από αυτούς τους παράγοντες εισάγονται οι παράμετροι που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της ανατίναξης:

$$C_{design} * (U_{manufacturing} + U_{environment}) = F_{product} \quad (8.3.1)$$

Όπου,

C_{design} = διάταξη των διατηρημάτων (ελεγχόμενη παράμετρος)

$U_{manufacturing}$ = διάτρηση και γόμωση (εν μέρει ελεγχόμενες παράμετροι)

$U_{environment}$ = Γεωλογικές συνθήκες (μη ελεγχόμενες παράμετροι)

$F_{product}$ = Θραύση του πετρώματος

Γίνεται κατανοητό ότι από τις παραπάνω παραμέτρους που υπεισέρχονται και καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα της θραύσης του υλικού, η διαχείριση των C_{design} και $U_{manufacturing}$ είναι εφικτή με την ανθρώπινη παρέμβαση, όμως η αβεβαιότητα που προκύπτει από τις συνθήκες του γεωλογικού περιβάλλοντος (μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, ασυνέχειες κ.α.), δεν είναι δυνατό να αποφευχθεί.

Παρακάτω ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των επί μέρους παραμέτρων που επιδρούν στη διαμόρφωση του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχίων στο μέτωπο της εξόρυξης.

1. Χαρακτηριστικά του πετρώματος

Τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος καθώς και η δομή του παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, μη ελεγχόμενο, στη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια της ανατίναξής του. Σε κάθε πρακτική εξόρυξης, ως επί το πλείστον τα μέτωπα της εξόρυξης χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο ασυνεχειών, παρουσία φλεβών πληρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό, οι οποίες έχουν πολύ σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του πετρώματος. Οι ασυνέχειες αυτές χαρακτηρίζονται ως επίπεδα αδυναμίας μέσα από τα οποία το πέτρωμα θα μετακινηθεί. Ακόμα η διάδοση των τασικών κυμάτων της ανατίναξης εξαρτάται από το εύρος του ανοίγματος των ασυνεχειών εντός αυτού. Για παράδειγμα, οι ασυνέχειες με μικρό εύρος ανοίγματος δεν επιδρούν στη διάδοση του κύματος, σε αντίθεση με τις ανοιχτές ή πληρωμένες με υλικό ασυνέχειες όπου η ακουστική εμπέδηση του υλικού ευνοείται

και ανακλά την παραγόμενη ενέργεια. Στην περίπτωση που το ανακλώμενο κύμα είναι επαρκές, τότε προκαλείται η αποκόλληση των τεμαχίων του πετρώματος.

Πολλοί είναι οι ερευνητές οι οποίοι έχουν μελετήσει την επίδραση των ασυνεχειών στη θραύση του πετρώματος. Οι Fournery et al. (1983), αναφέρουν ότι το αποτέλεσμα της θραύσης σε ένα πέτρωμα το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο ασυνεχειών, είναι η παραγωγή κατά 1.5 φορές μικρότερων τεμαχίων, από ότι σε ένα ομογενές υλικό. Ο De Gama (1983), κατέληξε ότι η ενέργεια που χρειάζεται ένα πέτρωμα με ασυνέχειες είναι μικρότερη σε σχέση με ένα ομογενές πέτρωμα. Επίσης, ο Ash 1973, αναφέρει ότι πραγματοποιείται καλύτερη θραύση όταν η ανόρυξη των διατρημάτων υλοποιείται κάθετα στις κύριες ασυνέχειες του πετρώματος, ενώ μεγαλύτερα τεμάχια παράγονται όταν τα διατρήματα βρίσκονται παράλληλα με αυτές.

Αναφορικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του βράχου αναφέρεται από τον Cunningham (1973) ότι τα βραχώδη πετρώματα με τιμές μονοαξονικής αντοχής >15 MPa που ορίζονται από τη δοκιμή Brazilian, έχουν την ιδιότητα να παράγουν μεγαλύτερο μέγεθος τεμαχίων, σε σύγκριση με πετρώματα μικρότερης αντοχής, όπως <6 MPa. Επίσης, αναφέρεται ότι στην περίπτωση που το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) είναι μικρότερο τότε αναμένονται μεγαλύτερα τεμάχια μετά την ανατίναξη στο μέτωπο, σε αντίθεση με πετρώματα μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερη σημασία έχει η πυκνότητα καθώς και η διάδοση των P-κυμάτων εντός του πετρώματος για την κατανομή του μεγέθους της εξορυσσόμενης μάζας.

2. Διάτρηση και γόμωση

Ο έλεγχος της θραύσης του πετρώματος μέσω του σχεδιασμού της ανατίναξης καθώς και η προσδοκώμενη αποτελεσματικότητά της, αποτελεί μία πρόκληση για τον υπεύθυνο της ανατίναξης. Το κόστος των λειτουργιών μπορεί να μειωθεί, με τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του σχεδιασμού της για την επίτευξη της ιδανικής θραύσης του πετρώματος. Οι Singh et al. (2015) προσδιορίζει τις σημαντικές παραμέτρους οι οποίες καθορίζουν το βαθμό θραύσης του πετρώματος κατά την ανατίναξη: ο λόγος του φορτίου προς τη διάμετρο των διατρημάτων, ο λόγος της απόστασης προς το φορτίο, το μήκος της επιγόμεωσης κ.α.. Ένας γενικός κανόνας ο οποίος επικρατεί αφορά το πλήθος των διατρημάτων και την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης, όπου από πρακτικές έχει διαπιστωθεί ότι όσο αυτοί οι παράγοντες αυξάνονται, το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων είναι μικρότερο. Επίσης, το ίδιο έχει διαπιστωθεί και από την εφαρμογή εξισώσεων υπολογισμού του μέσου μεγέθους

των τεμαχών, όπως με την εξίσωση Kuznetsov (1973). Επιπλέον, υπάρχουν εμπειρικοί κανόνες σύμφωνα με τους οποίους είναι δυνατή η μέση εκτίμηση του μεγέθους των τεμαχών, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του πρσανούς και τη διάμετρο των διατρημάτων ή το φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, ισχύει ότι όταν ο λόγος ύψος μετώπου / διάμετρο διατρημάτων είναι μικρότερος από 60, τότε αυξάνεται το μέσο μέγεθος των τεμαχών στην εξορυσσόμενη σωρό. Από την άλλη πλευρά όταν ο λόγος ύψος μετώπου / φορτίο προσεγγίζει το 4, τότε βελτιστοποιείται το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχών, (AEL mining services).

3. Κάνναβος διάταξης και πυροδότησης των διατρημάτων

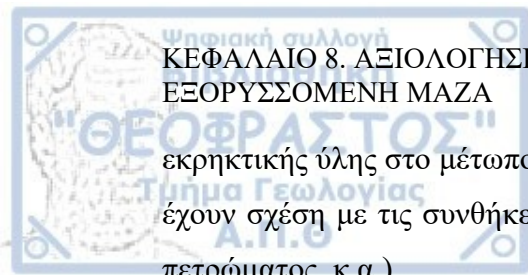
Η διάταξη των διατρημάτων και η σειρά έναυσης αυτών αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για τον καθορισμό του αποτελέσματος της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης, καθώς άμεση είναι η αλληλεπίδραση της θέσης των διατρημάτων με τη δομή του πετρώματος. Πιο συγκεκριμένα άμεση είναι η επίδραση του φορτίου επί της απόστασης αλλά και του τρόπου της διάταξης των διατρημάτων των επόμενων σειρών σε σχέση με την πρώτη σειρά. Από αναφορές προκύπτει ότι καλύτερη κατανομή της θραύσης του πετρώματος επιτυγχάνεται με εφαρμογή της κλιμακωτής διάταξης (staggered pattern), σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διατάξεις.

4. Χρονικές καθυστερήσεις έναυσης μεταξύ των διατρημάτων

Η επιλογή των κατάλληλων χρόνων έναυσης μεταξύ των διατρημάτων στο μέτωπο της εξόρυξης ασκεί μεγάλη επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα του εξορυσσόμενου υλικού. Οι χρονικές αυτές καθυστερήσεις δίνουν το απαραίτητο χρονικό διάστημα μεσολάβησης μεταξύ των έναυσεων, καθορίζοντας τη διαδικασία γένεσης των ρωγμών που αναπτύσσονται στο πέτρωμα, αλλά και την αποφυγή προβλημάτων στις πίσω σειρές των διατρημάτων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπάρχουν εμπειρικοί κανόνες ως προς τον καθορισμό των χρονικών καθυστερήσεων και έχουν σχέση με τον κάνναβο των διατρημάτων, (Dick et al. 1983). Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι η καθυστέρηση μεταξύ των σειρών των διατρημάτων είναι της τάξης των 3-5ms/m φορτίου. Η καθυστέρηση μεταξύ των διατρημάτων σε μία σειρά είναι της τάξης των 3-15ms/m φορτίου.

5. Τύπος της εκρηκτικής ύλης

Τα χαρακτηριστικά της εκρηκτικής ύλης ασκούν σημαντική επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα της ανατίναξης του πετρώματος. Οι παράγοντες της εκρηκτικής ύλης που επιδρούν στη θραύση του πετρώματος είναι η εκλυόμενη ενέργεια, τα παραγόμενα αέρια, η ταχύτητα πυροδότησης και η πυκνότητα. Η επιλογή της κατάλληλης



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΗ ΜΑΖΑ

εκρηκτικής ύλης στο μέτωπο της εξόρυξης, εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, που έχουν σχέση με τις συνθήκες εφαρμογής της (διάμετρος διατρημάτων, ιδιότητες του πετρώματος, κ.α.).

9.4 Ποσοτικοποίηση του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχίων

Η θραύση του πετρώματος που προκύπτει από την πραγματοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης, εξαρτάται σε ένα μεγάλο ποσοστό από τις ιδιότητες του πετρώματος. Τα περισσότερα εμπειρικά μοντέλα, βασίζονται σε παράγοντες που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, για να περιγράψουν την επιρροή του στο αποτέλεσμα της ανατίναξης. Οι Scott και Onederra 2015, διατύπωσαν την άποψη ότι ένα κατάλληλο μοντέλο για την εκτίμηση της θραύσης του πετρώματος χρησιμοποιεί τις ιδιότητες του πετρώματος, της εκρηκτικής ύλης και τον σχεδιασμό της ανατίναξης, τα οποία έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Οι περισσότεροι γεωτεχνικοί μηχανικοί περιγράφουν την αντοχή του πετρώματος με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa και πολλά είναι τα μοντέλα που περιγράφουν τη διαδικασία της ανατίναξης χρησιμοποιώντας ως κύρια παράμετρο αντοχής τη UCS.

Στη διεθνή βιομηχανία χρήσης της εκρηκτικής ύλης για την απόσπαση του πετρώματος υπάρχουν πολλά μοντέλα εκτίμησης της θραύσης του. Μερικά μοντέλα (π.χ. Kuz-Ram model) χρησιμοποιούν παραμέτρους οι οποίες περιγράφουν την αντοχή, την πυκνότητα και τη δομή του υλικού. Οι παράμετροι αυτές αποτελούν έναν αποτελεσματικό τρόπο προσδιορισμού της επίδρασης των επί μέρους παραγόντων στην κάθε πρακτική της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης. Εμπειρικά μοντέλα εκτίμησης της θραύσης χρησιμοποιούνται ευρέως και βασίζονται στην εξίσωση της κατανομής του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχίων Rosin-Rammler. Τα μοντέλα αυτά είναι ευρέως διαδεδομένα στις επιφανειακές ανατινάξεις και χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές για πάνω από 30 χρόνια (Onederra και Riihioja 2006). Η εφαρμογή αυτών των μοντέλων έγκειται στο γεγονός ότι σχετίζονται με την εκτίμηση του μέσου μεγέθους των τεμαχίων (X_{50}) και την περιγραφή της ομοιομορφίας μέσω του δείκτη ομοιομορφίας (n). Και οι δύο αυτές παράμετροι έχουν οδηγήσει σε εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες θεωρούνται ως οι κύριοι δείκτες περιγραφής του αποτελέσματος μίας ανατίναξης. Σύμφωνα με τον Silva 2006, ένα μοντέλο εκτίμησης της θραύσης μπορεί να περιγραφεί μέσω μαθηματικών σχέσεων από επιστημονικούς συλλογισμούς ή μέσω εμπειρικών αναλύσεων. Δεδομένης της πολυπλοκότητας των

μεταβλητών που καθορίζουν το αποτέλεσμα της θραύσης του πετρώματος, καθώς και της γνώσης της γεωλογικής δομής των συνθηκών που επικρατούν, είναι ενδεδειγμένη η χρήση των εμπειρικών μοντέλων.

Ένα κρίσιμο στοιχείο στην ποσοτικοποίηση της θραύσης είναι η ανάπτυξη πρακτικών μεθόδων προσδιορισμού του βαθμού θραύσης. Με τον όρο βαθμό θραύσης προσδιορίζεται το μέσο μέγεθος των παραγόμενων τεμαχών και έχουν αναπτυχθεί άμεσες και έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού του. Οι άμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό με κόσκινα, μέτρηση των ογκολίθων ή των τεμαχών απευθείας. Η πιο ακριβής άμεση μέθοδος είναι η χρήση των κοσκίνων στην εξορυσσόμενη σωρό. Όμως, αυτή η μέθοδος απαιτεί πολύ χρόνο, κόστος και μικρά τεμάχια, καθώς η μεταφορά μεγάλων τεμαχών για τη χρήση των κοσκίνων είναι δύσκολη και μη πρακτική. Επιπλέον, μία ακόμη άμεση μέθοδος είναι ο προσδιορισμός των ογκολίθων, οι οποίοι εκφράζονται με το ποσοστό των τεμαχών που υπερβαίνουν ένα αποδεκτό μέγεθος. Από την άλλη πλευρά υπάρχουν δύο κατηγορίες έμμεσων μεθόδων προσδιορισμού του μεγέθους (Roy et al. 2017):

- α) Ο προσδιορισμός των παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με τον βαθμό θραύσης.
- β) Οι ψηφιακές φωτογραφικές μέθοδοι.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά μοντέλα πρόβλεψης και εκτίμησης του μέσου μεγέθους των τεμαχών που προκύπτουν από τη διαδικασία της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης (π.χ. Kuz-Ram model, Svedefo's equation, CK model, BRW model, JKMRC model). Συνήθως, τα μοντέλα προβλέπουν το μέσο μέγεθος καθώς και την κατανομή του μεγέθους, σε σχέση με τους διάφορους παράγοντες που έχουν άμεση επίπτωση και επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ανατίναξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι εξισώσεις οι οποίες υπάρχουν στη βιβλιογραφία περιέχουν τους ίδιους τρεις παράγοντες (αν και εκφράζονται με διαφορετικό τρόπο), που περιγράφουν το πέτρωμα, τη γεωμετρία της ανατίναξης και την εκρηκτική ύλη.

Ο Rustan (1981), έκανε μία περιεκτική ανασκόπηση των μοντέλων αναφέροντας τους παράγοντες που επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα της θραύσης του πετρώματος αναφέροντας τα παρακάτω:

1. Είναι απαραίτητη η γνώση της ακρίβειας πρόβλεψης του μέσου μεγέθους των τεμαχών. Συγκεκριμένα αναφέρει ότι η ακρίβεια προσδιορισμού του μέσου μεγέθους από την εξίσωση του Kuznetsov είναι $\pm 15\%$.
2. Η θραύση του πετρώματος θα πρέπει να περιγράφεται από δύο παραμέτρους, εναλλακτικά το χ_{20} και χ_{90} ή το μέγεθος των ογκολίθων και τη μορφή της

καμπύλης κατανομής της κοκκομετρίας. Σημειώνεται ότι μία παράμετρος η οποία σχετίζεται με το σχήμα της καμπύλης είναι ο συντελεστής ομοιομορφίας (n), ο οποίος δίνεται από το Kuz-Ram μοντέλο.

3. Είναι σημαντικός ο προσδιορισμός της εκρηκτικής ικανότητας του πετρώματος, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής του υλικού εξόρυξης. Επίσης, σημαντική είναι η αναφορά της κατανομής της εκρηκτική ύλης όπως και το είδος αυτής.

8.5 Μοντέλα πρόβλεψης της θραύσης του πετρώματος

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύονται κάποια ευρέως διαδομένα εμπειρικά μοντέλα εκτίμησης της κατανομή του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχών, με τη χρήση των παραμέτρων που διέπουν τη διαδικασία της ανατίναξης.

Μοντέλο Kuz-Ram

Το μοντέλο Kuz-Ram αποτελεί το πιο διαδεδομένο και εύχρηστο μοντέλο για την πρόβλεψη του μέσου μεγέθους των τεμαχών που προκύπτουν από την πραγματοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης. Το μοντέλο αυτό είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού της εξίσωσης Kuznetsov (1973) και Rosin-Rammler (1933). Η αρχική μορφή της εξίσωσης που αποδόθηκε από τον Kuznetsov (1973), είναι η ακόλουθη:

$$X_m = A * q^{-0.8} * Q^{\frac{1}{6}} \quad (8.5.1)$$

Όπου,

X_m = μέσο μέγεθος των τεμαχών (cm)

A = δείκτης αντοχής του πετρώματος κυμαίνεται από 7 έως 13

q = ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό εξορυσσόμενη μάζα (kg/m^3)

Q = ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα ($\text{kg}/\text{διάτρημα}$)

Οι τρεις παράγοντες που αναφέρονται παραπάνω στην εξίσωση συμβαδίζουν με την αναμενόμενη συμπεριφορά του πετρώματος στη θραύση από την εφαρμογή της ανατίναξης σε αυτό. Συμπερασματικά, η εξίσωση του Kuznetsov συνοψίζει τα ακόλουθα: 1) όσο πιο σκληρό το πέτρωμα, τόσο πιο μεγάλα τεμάχια προκύπτουν, 2) όσο πιο μεγάλη ποσότητα της εκρηκτικής ύλης χρησιμοποιείται, τόσο πιο μικρά τεμάχια προκύπτουν, 3) όσο πιο μεγάλη είναι η κλίμακα της διάταξης των διατρημάτων, τόσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος των τεμαχών. Στην αρχική αυτή

αυθεντική εξίσωση, η παράμετρος της εκρηκτικής ύλης αντιπροσωπεύει την εκρηκτική ύλη τύπου TNT. Το ισοδύναμο της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιείται με την σχετική ισχύ του TNT. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη αυτή την παράμετρο η εξίσωση διατυπώνεται ως εξής, (Kuznetsov 1973):

$$X_m = A * q^{-0.8} * Q^{\frac{1}{6}} * \theta^{-\frac{19}{30}} \quad (8.5.2)$$

Όπου,

X_m = μέσο μέγεθος των τεμαχίων (cm)

A = δείκτης αντοχής του πετρώματος κυμαίνεται από 7 έως 13

q = ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό εξορυσσόμενη μάζας (kg/m^3)

Q = ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα ($\text{kg}/\text{διάτρημα}$)

θ = σχετική ισχύς σε σχέση με την εκρηκτική ύλη τύπου TNT

Αργότερα η εξίσωση τροποποιήθηκε από τον Lilly 1986 και τον Cunningham 1987, με εισαγωγή του Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας σε αντικατάσταση του δείκτη αντοχής του πετρώματος, καθώς και τη σχετική ισχύ της εκρηκτικής ύλης σε σχέση με την εκρηκτική ύλη τύπου ANFO. Η εξίσωση δίνεται όπως παρακάτω:

$$X_m = A * k^{0.8} * Q_e^{\frac{1}{6}} * \left(\frac{115}{E}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (8.5.3)$$

Όπου,

X_m = μέσο μέγεθος των τεμαχίων (cm)

k = ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό εξορυσσόμενη μάζας (kg/m^3)

A = $0.06 * \text{Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας}$

Q_e = ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα ($\text{kg}/\text{διάτρημα}$)

E = κατά βάρος σχετική ισχύς της εκρηκτικής ύλης (ANFO=100)

Επιπλέον, η εξίσωση Rosin-Rammler (Rosin και Rammler 1933), εφαρμόζεται συχνά για την πρόβλεψη της κατανομής του μεγέθους της εξορυσσόμενης σωρού, αποδίδοντας την περιγραφή της θραύσης του πετρώματος, όπως παρουσιάζεται από την αμέσως επόμενη εξίσωση:

$$R_m = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n} \quad (8.5.4)$$

Όπου,
 R_m = αθροιστικό ποσοστό διερχόμενο με συγκεκριμένη διάμετρο

x = η συγκεκριμένη διάμετρος (cm)

x_c = χαρακτηριστικό μέγεθος (cm), (αντιπροσωπεύοντας το 63.2% του διερχόμενου ποσοστού)

n = συντελεστής ομοιομορφίας

Ο συντελεστής ομοιομορφίας (n) υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση, η οποία λαμβάνει υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανατίναξης, (Cunningham 1987):

$$n = \left[2.2 - \frac{14B}{D} \right] * \left(1 + \frac{S/B}{2} \right)^{0.5} * \left[1 - \frac{z}{B} \right] * \left[0.1 + \frac{(L_b - L_t)}{L} \right]^{0.1} * \left(\frac{L}{H} \right) * P \quad (8.5.5)$$

Όπου,

B = το φορτίο (m)

D = η διάμετρος των διατρημάτων (mm)

S = η απόσταση (m)

z = η απόκλιση της ακρίβειας στη διάτρηση (m)

L_b = η γόμωση στον πυθμένα του διατρήματος (m)

L_t = η γόμωση στο άνω τμήμα του διατρήματος (m)

L = η ολική γομωμένη στήλη (m)

H = το ύψος του μετώπου (m)

P = η διάταξη των διατρημάτων ($P=1.0$ για τετράγωνη, $P=1.1$ για κλιμακωτή)

Συνήθως, οι τιμές του συντελεστή ομοιομορφίας κυμαίνονται μεταξύ 0.8 και 1.5. Υψηλός συντελεστής ομοιομορφίας αντιπροσωπεύει μεγάλη ομοιομορφία στην εξορυσσόμενη μάζα, ενώ χαμηλές τιμές του συντελεστή υποδεικνύουν μικρή ομοιομορφία, με μεγάλη αναλογία λεπτόκοκκων και ογκολίθων. Συνεπώς, υψηλές τιμές του συντελεστή και κλιμακωτή διάταξη προτιμώνται για την επίτευξη μίας πιο ομοιόμορφης κατανομής των τεμαχών. Γίνεται κατανοητό ότι η επίδραση του χαρακτηριστικού μεγέθους στην κοκκομετρία ορίζει το συγκεκριμένο μέγεθος στην καμπύλη κατανομής, ενώ ο συντελεστής ομοιομορφίας προσδιορίζει το σχήμα της καμπύλης (Spathis 2004).

Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στο μοντέλο του Kuz-Ram. Σύμφωνα με τον Cunningham (2005), το μοντέλο Kuz-Ram αποτελεί ένα εργαλείο ελέγχου της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στο αποτέλεσμα της ανατίναξης και όχι μία ποσοτικοποιημένη πρόβλεψη του αποτελέσματος. Επιπρόσθετα, οι περιορισμοί που θέτει το μοντέλο αυτό είναι οι ακόλουθοι: ο λόγος S/B δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το δύο, η πυροδότηση και τα χρονικά διαστήματα θα πρέπει να εφαρμόζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται οι αστοχίες, η κατά βάρος σχετική ισχύς της εκρηκτικής ύλης θα πρέπει να αποδίδει την απαραίτητη προσδοκώμενη ενέργεια για την απόσπαση του πετρώματος, και οι ασυνέχειες του μετώπου θα πρέπει να αποδίδονται με προσοχή. Το μοντέλο Kuz-Ram εστιάζει στην πρόβλεψη του μέσου μεγέθους των τεμαχίων που προκύπτουν μετά την υλοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης. Παρόλα αυτά οι υπεύθυνοι των ανατινάξεων επιθυμούν να γνωρίζουν την κατάλληλη διάταξη της ανατίναξης για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος σε οποιοδήποτε μέτωπο και οποιαδήποτε κατάσταση (Kwangmin 2006).

Μοντέλο Larsson

Το 1973 ο Larsson πρότεινε ένα μοντέλο πρόβλεψης του μεγέθους των τεμαχίων εντός της εξορυσσόμενης μάζας, που αντιπροσωπεύει το 50% του διερχόμενου μεγέθους. Η εξίσωση είναι η ακόλουθη:

$$K_{50} = S' * e^{[0.58 \cdot \ln B - 0.145 \cdot \ln(\frac{S}{B}) - 1.18 \cdot \ln(\frac{CE}{c}) - 0.82]} \quad (8.5.6)$$

Όπου,

B = το φορτίο (m)

S = η απόσταση (m)

CE = η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (kg/m³)

C = σταθερά περιγραφής του πετρώματος (περίπου ίδιο με το powder factor, από 0.3 έως 0.5 kg/m³)

S' = σταθερά περιγραφής της δομής του πετρώματος (0.60 για πολύ τεμαχώδες πέτρωμα, 0.50 για κανονικό πέτρωμα με λίγες ασυνέχειες, 0.45 σχετικά ομοιογενές πέτρωμα, 0.40 για συμπαγές πέτρωμα)

Μοντέλο SVEDEFO (Swedish Detonic Research Foudation)

Το μοντέλο SVEDEFO βασίζεται σε προηγούμενες έρευνες των Langefors και Kihlström (1963), Holmberg (1974) και Larsson (1974), λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ύψους του μετώπου και του μήκους της επιγόμωσης, αποδίδοντας την εκτίμηση της θραύσης του πετρώματος από την ακόλουθη εξίσωση:

$$K_{50} = S' * \left[1 + 4.67 \left(\frac{T}{L} \right)^{2.5} \right] * e^{0.29 \ln B^2 \sqrt{\frac{S}{1.25}} - 1.18 \ln \left[\frac{CE}{c} \right]^{-0.82}} \quad (8.5.7)$$

Όπου,

B = το φορτίο (m)

S = η απόσταση (m)

CE = η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (kg/m³)

C = σταθερά περιγραφής του πετρώματος (περίπου ίδιο με το powder factor, από 0.3 έως 0.5 kg/m³, Persson et al. 1994)

S' = σταθερά περιγραφής της δομής του πετρώματος (0.60 για πολύ τεμαχώδες πέτρωμα, 0.50 για κανονικό πέτρωμα με λίγες ασυνέχειες, 0.45 σχετικά ομοιογενές πέτρωμα, 0.40 για συμπαγές πέτρωμα)

T = το μήκος της επιγόμωσης (m)

L = το μήκος του διατρήματος (m)

Από την παραπάνω εξίσωση γίνεται κατανοητό ότι το K_{50} μειώνεται: i) με την αύξηση της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης, ii) με την αύξηση της δυναμικής της εκρηκτικής ύλης και iii) με την αύξηση του λόγου απόστασης/φορτίου. Από την άλλη πλευρά, το K_{50} αυξάνεται i) με την αύξηση του φορτίου των διατρημάτων, ii) με την αύξηση της σταθεράς περιγραφής του πετρώματος και iii) με την αύξηση του λόγου T/L.

8.6 Ψηφιακή ανάλυση του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών

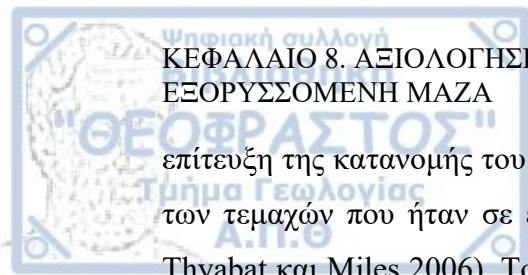
Μία ακόμη έμμεση μέθοδος προσδιορισμού του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών αποτελεί η τεχνική της ψηφιακής ανάλυσης εικόνων (image analysis techniques), μέσω της χρήσης εξειδικευμένων υπολογιστικών προγραμμάτων. Η ανάπτυξη αυτών των μεθόδων αποτελεί μία καινοτόμο διαδικασία, προσφέροντας έναν γρήγορο, πρακτικό και απλό τρόπο, ποσοτικοποίησης του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχών, που προκύπτουν από την ανατίναξη στο εκάστοτε μέτωπο.

Απαραίτητη είναι η ορθή λήψη εικόνων της εξορυσσόμενης μάζας από την εκάστοτε διαδικασία της ανατίναξης, χωρίς να παρεμποδίζεται η διαδικασία της παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, σημειώνεται ότι οι ψηφιακές αυτές μέθοδοι εμπεριέχουν περιορισμούς, οι οποίοι επηρεάζουν την ακρίβεια του αποτελέσματος. Αυτό προέρχεται από το γεγονός ότι κάποια από τα προβλήματα ξεκινούν από τη διαδικασία της ανάλυσης της εικόνας και ακόμα περισσότερα είναι αποτέλεσμα της λανθασμένης αναγνώρισης των τεμαχών.

Όλα τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την ανάλυση των εικόνων, όπως το μέγεθος των τεμαχών, το σχήμα και η ομοιομορφία της εξορυσσόμενης μάζας, βασίζονται στην ποιότητα του διαχωρισμού τους από το πρόγραμμα (Weixing 2008). Ο βαθμός της επιτυχίας αυτής εξαρτάται από τους αλγορίθμους, οι οποίοι ορίζουν την ακρίβεια του εκτιμώμενου μεγέθους (Zelin et al. 2012). Η διαφορετικότητα της απεικόνισης των τεμαχών ποικίλει από τη μία εικόνα στην άλλη και για αυτό το λόγο δεν είναι δυνατή η σχεδίαση και η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για όλα τα είδη των εικόνων. Στις αμέσως επόμενες παραγράφους αναφέρονται οι προσπάθειες ερευνητών για τη δημιουργία αλγορίθμων επεξεργασίας των εικόνων για τον διαχωρισμό των τεμαχών και τον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους τους.

Η προσπάθεια αυτή ξεκινάει κάποια χρόνια πριν, όπου οι Noren και Porter (1974), χρησιμοποίησαν μία φωτογραφική μέθοδο για την εκτίμηση του αποτελέσματος της ανατίναξης σε λατομεία. Έπειτα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 ακολούθησαν και άλλοι ερευνητές (Carlsson & Nyberg 1983, Van Aswegen & Cunningham 1986, Nie & Rustan 1987, Franklin & Maerz 1988), οι οποίοι πρότειναν και ανέπτυξαν φωτογραφικές τεχνικές για την ανάλυση του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών. Το 1991 οι Cheung & Ord ανέπτυξαν ένα εξελιγμένο on line σύστημα καταγραφής του μεγέθους των τεμαχών, με τη χρήση laser, ενός συστήματος καταγραφής με κάμερα και ενός υπολογιστή. Ο προσδιορισμός των τεμαχών πραγματοποιούνταν από τη λήψη δειγμάτων πάνω στην ταινία μεταφοράς τους. Η τεχνική αυτή έχει σημαντική ανταπόκριση στη βιομηχανία των λατομείων, αλλά ο περιορισμός της έγκειται στον ειδικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη διαδικασία αυτή. Εντός των επόμενων ετών ακολούθησαν και άλλοι ερευνητές με την ανάπτυξη τεχνικών ψηφιακής ανάλυσης, όπως οι Farmer et al. (1991), Singh et al. (1991), Wang (1991).

Το 2006 οι Al-Thyabat και Miles χρησιμοποίησαν εικόνες με χωρισμένα τεμάχια για την αξιολόγηση της επάρκειας μέτρησής τους σε δύο διαστάσεις, με σκοπό την



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΗ ΜΑΖΑ

επίτευξη της κατανομής του μεγέθους τους. Προκειμένου να πετύχουν το διαχωρισμό των τεμαχών που ήταν σε επαφή, χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο Watershed, (Al-Thyabat και Miles 2006). Το 2011 ο Thurley επινόησε μία διαδικασία σχεδίασης των ορίων σε εικόνες ασβεστολιθικών τεμαχών κατά τη μεταφορά τους από τους ειδικούς ταινιόδρομους, με τη χρήση τρισδιάστατων δεδομένων, (Thurley 2011). Το 2012 οι Zelin et al. εφάρμοσαν μία σειρά βημάτων κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας των εικόνων, με τη χρήση ειδικού λογισμικού, με σκοπό την επίλυση του προβλήματος της επικάλυψης των τεμαχών. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε εξορυσσόμενα τεμάχια άνθρακα, και η λήψη των εικόνων έγινε κατά τη μεταφορά τους πάνω σε ταινιόδρομους. Κατά τα στάδια αυτά οι εικόνες μετατράπηκαν στην κλίμακα του γκρι, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά φίλτρα για τη βελτίωση της εικόνας των δειγμάτων και προσδιορίστηκαν με συγκεκριμένη υπολογιστική διαδικασία τα όρια των τεμαχών, (Zelin et al. 2012). Το ίδιο έτος οι Jemwa και Aldrich (Jemwa & Aldrich 2012), πρότειναν μία προσεγγιστική μηχανή προσδιορισμού της υφής των εξορυσσόμενων ανθρακικών υλικών, με απώτερο σκοπό την ποσοτικοποίηση του μεγέθους τους, λαμβάνοντας όμως υπόψη τα λεπτόκοκκα υλικά.

Το 2014 οι Chimi et al. χρησιμοποίησαν μία μέθοδο βασισμένη στον γνωστό αλγόριθμο διαχωρισμού του μεγέθους των τεμαχών (watershed segmentation method). Ενώ την ίδια χρονιά οι Al-Thyabat et al. εστίασαν στις δυσκολίες της ανάλυσης των εικόνων με εξορυσσόμενο άνθρακα πάνω στον κινούμενο ταινιόδρομο, όπως είναι η τοποθέτηση της κάμερας λήψης, η ταχύτητα του ταινιόδρομου, η παραγωγή σκόνης κ.α. Μετά την επεξεργασία των εικόνων και με τη χρήση ειδικών φίλτρων για τη βελτίωσή τους, προσδιόρισαν τα όρια των τεμαχών χειροκίνητα (AL-Thyabat et al. 2006). Αξίζει να σημειωθεί ότι στα έτη 2013 και 2014 έγιναν ακόμα κάποιες προσπάθειες για την εξέλιξη της διαδικασίας της ψηφιακής ανάλυσης των εικόνων για την εκτίμηση της κατανομής του μεγέθους των τεμαχών, όπου τα όρια των τεμαχών προσδιορίστηκαν χειροκίνητα.

Παρόλο που οι μέθοδοι προσδιορισμού των τεμαχών έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλά συστήματα αναγνώρισης αντικειμένων, η χρήση τους στην κοκκομετρική κατανομή των υλικών αποτελεί ακόμα μία πρόκληση, εξαιτίας παρουσίας προβλημάτων, τα οποία συνοψίζονται στα εξής: 1) η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος από το γενικότερο σύνολο της εξορυσσόμενης μάζας, 2) ο προσδιορισμός του σχήματος των τεμαχών συμπεριλαμβανομένης της επικάλυψης αυτών από τα γειτονικά τεμάχια, 3) η διόρθωση των εικόνων (σκιές

μεταξύ των τεμαχών, πολύ-χρωματισμός κ.α.) (Thurley 2011, Jemwa et al. 2012, Al-Thyabat et al.2007).

8.7. Περιορισμοί στη χρήση των ψηφιακών αναλύσεων εικόνων

Η χρήση των ειδικών λογισμικών προγραμμάτων ψηφιακής ανάλυσης εικόνων για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής της εξορυσσόμενης μάζας, απαιτεί μία προσεκτική προσέγγιση των ακόλουθων διαδικασιών: του σημείου λήψης των εικόνων, της λήψης των εικόνων και της ανάλυσης αυτών. Η πρώτη διαδικασία αφορά το αντιπροσωπευτικό δείγμα της εξορυσσόμενης μάζας που θα απεικονιστεί, ενώ στη δεύτερη δίνεται βάση στην ποιότητα λήψης των φωτογραφιών για την καλύτερη περεταίρω ανάλυσή τους και τον βέλτιστο προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των τεμαχών. Η φιλοσοφία στην οποία στηρίζεται η όλη διαδικασία είναι ότι όσο καλύτερες είναι οι εικόνες που λαμβάνονται κάθε φορά, τόσο πιο έγκυρα θα είναι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

Οι εικόνες οι οποίες έχουν ληφθεί εισάγονται μέσα στο εξειδικευμένο λογισμικό και αναγνωρίζονται ως μία σειρά από pixels διαφορετικής φωτεινότητας το κάθε ένα. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία διαδικασία ανάλυσης της εικόνας με χρήση αλγορίθμων, με σκοπό την αναγνώριση των ορίων του κάθε τεμαχίου. Τα αποτελέσματα μετατρέπονται από δύο διαστάσεων σε τριών με τη χρήση εμπειρικών ή στερεογραφικών τεχνικών. Η ανάλυση της εκάστοτε εικόνας πραγματοποιείται με την ποσοτικοποίηση του μεγέθους των τεμαχών εντός καθορισμένου εύρους από το ελάχιστο διακριτό μέγεθος μέχρι και το μέγιστο ορατό μέγεθος. Τονίζεται ότι στα μεγάλα τεμάχια, λόγω της υφής τους, είναι δυνατό να εντοπιστούν τμήματά τους, τα οποία να δίνουν λανθασμένα μικρότερα τεμάχια τα οποία στην πραγματικότητα όμως δεν υπάρχουν. Το εσφαλμένο αυτό αποτέλεσμα εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αντίθεση των χρωμάτων μεταξύ των τεμαχών όπως αποτυπώνονται στην εικόνα. Στην περίπτωση όπου η αντίθεση είναι πολύ υψηλή, τότε η υφή των επιφανειών τους στις περιοχές με σκίαση εκλαμβάνονται ως επί μέρους μικρά τεμάχια. Αντίθετα, όταν η αντίθεση είναι πολύ χαμηλή, οι σκιάσεις μεταξύ των τεμαχών απουσιάζουν και καταλήγει σε λάθος ερμηνεία των μικρότερων τεμαχών ως μεγαλύτερα μεμονωμένα τεμάχια, (WipFrag tutorial). Σαφώς, γίνεται κατανοητό ότι όσο μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων εικόνων λαμβάνεται, τόσο πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα, (Sharma 2010).

Σύμφωνα με τους Liu και Tran (1996), είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί με απόλυτη ακρίβεια η κατανομή του μεγέθους των τεμαχών της εξορυσσόμενης μάζας και αναφέρουν τα κύρια αίτια για την πρόκληση σφαλμάτων, μερικά από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

1. Η ψηφιακή ανάλυση των εικόνων έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει το μέγεθος των τεμαχών που είναι μόνο απολύτως ορατά στο άνω τμήμα της εξορυσσόμενης μάζας και όχι αυτών που επικαλύπτονται από αυτά. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να γίνεται με σωστή στρατηγική η λήψη των εικόνων.

2. Τα μεγάλα τεμάχια είναι δυνατό λανθασμένα να διαχωριστούν σε μικρότερα τμήματα και τα μικρότερα τεμάχια να ομαδοποιηθούν σε μεγαλύτερα τεμάχια. Οι σκιάσεις που δημιουργούνται μεταξύ των τεμαχών, ή ακόμα και η πολυχρωμία τους προκαλούν σύγχυση στο διαχωρισμό τους, καταλήγοντας σε εσφαλμένο αποτέλεσμα. Αυτό αποτελεί ένα κοινό πρόβλημα στην ανάλυση μέσω αυτών των προγραμμάτων και για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η παρατήρηση, η αξιολόγηση και η χειροκίνητη διαδικασία προσδιορισμού των ορίων των τεμαχών όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο.

3. Είναι δυνατή η υποεκτίμηση των λεπτόκοκκων υλικών.

Για τον περιορισμό όλων των παραπάνω σφαλμάτων δεν υπάρχει μία σαφής απάντηση, παρά μόνο η πραγματοποίηση της όλης διαδικασίας με ορθή και προσεκτική στρατηγική καθώς και ευελιξία στη ρύθμιση των επί μέρους παραμέτρων. Είναι αξιοσημείωτο ότι στην περίπτωση που ο συντελεστής ομοιομορφίας της εξορυσσόμενης μάζας είναι υψηλός και το πάχος της είναι μικρό, τότε τα αποτελέσματα του προγράμματος είναι πληρέστερα. Ωστόσο, μεγαλύτερη προσοχή απαιτείται όταν η ομοιομορφία είναι μικρή και το πάχος σημαντικό, (Cunningham 1996).

8.8 Λογισμικά προγράμματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνων

Υπάρχει πληθώρα λογισμικών προγραμμάτων με σκοπό την ανάλυση της εικόνας για τον προσδιορισμό του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών. Παρακάτω, αναφέρονται τα πιο διαδεδομένα και συχνά χρησιμοποιούμενα λογισμικά προγράμματα.

WipFrag

Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιείται χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού για την απόδοση του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών κάθε μάζας, που

προκύπτει μετά την ανατίναξη στο εκάστοτε μέτωπο (βλέπε Παράρτημα). Με την ανάλυση ψηφιακής εικόνας και με χρήση του συστήματος κοκκομέτρησης, αποδίδεται η κατανομή του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχών από το λογισμικό WipFrag. Οι φωτογραφίες που έχουν ληφθεί από την εξορυσσόμενη μάζα, εισάγονται στο πρόγραμμα, αφού έχουν μετατραπεί σε ασπρόμαυρη κλίμακα. Με σκοπό να ξεπεραστούν οι περιορισμοί και τα σφάλματα που προκύπτουν από την ανάλυση μίας εικόνας, δίνεται η δυνατότητα συγχώνευσης των αποτελεσμάτων πολλαπλών εικόνων που έχουν ληφθεί από μία εξορυσσόμενη μάζα. Συνεπώς, η συνδυασμένη ανάλυση οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα με τη λήψη μίας τελικής κοκκομετρικής καμπύλης και ακόμα όπου κρίνεται αναγκαίο πραγματοποιείται χειροκίνητος προσδιορισμός των ορίων των τεμαχών.

FragScan

Το συγκεκριμένο λογισμικό προσδιορίζει την κατανομή του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχών που καταγράφονται στον φορτωτή ή στον ταινιόδρομο μεταφοράς. Ο εξοπλισμός ο οποίος είναι απαραίτητος για τη συγκεκριμένη καταγραφή είναι μία κάμερα λήψης εικόνων, μία κάρτα ελέγχου δεδομένων, ένας υπολογιστής και μία εστία εκπομπής φωτός. Η μετατροπή από δύο σε τριών διαστάσεων πραγματοποιείται αυτόματα, μέσω ειδικών αλγορίθμων από το λειτουργικό σύστημα του προγράμματος. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα και χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της βιομηχανίας.

Split Desktop

Το λογισμικό Split διαχωρίζεται σε δύο προγράμματα: το ένα χρησιμοποιείται στον ταινιόδρομο μεταφοράς και είναι ένα αυτόματο, συνεχόμενο πρόγραμμα. Το δεύτερο πρόγραμμα χρησιμοποιεί εικόνες που έχουν ληφθεί από την εξορυσσόμενη μάζα και χειροκίνητα προσδιορίζονται τα όρια των τεμαχών. Παρόλα αυτά ο ίδιος αλγόριθμος χρησιμοποιείται και για τα δύο προγράμματα (Ozdemir et al. 2003).

8.9 Ψηφιακή ανάλυση εικόνων στα δύο λατομεία έρευνας

Στην παρούσα έρευνα ποσοτικοποιήθηκε και αξιολογήθηκε το μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών, από την κάθε ανατίναξη που καταγράφηκε στα δύο λατομεία αδρανών υλικών, Δρυμού και Ταγαράδων. Για αυτόν τον σκοπό, συλλέχθηκαν 100 δείγματα φωτογραφιών (50 για κάθε λατομείο) απεικόνισης της εξορυσσόμενης μάζας, με τη χρήση συμβατικής φωτογραφικής κάμερας. Παράλληλα, για κάθε ένα αποτέλεσμα υπολογίστηκε το μέσο μέγεθος τεμαχίου, μέσω της

τροποποιημένης εξίσωσης από τον Lilly (1986) και τον Cunningham (1987), σε σχέση με τον Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας, της αντοχής και της ισχύος της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO. Έπειτα, ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προκειμένου να συσχετιστούν και να προσδιοριστεί η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της ψηφιακής και της συμβατικής μεθόδου.

Οι φωτογραφίες αναλύθηκαν μέσω εφαρμογής του λογισμικού WipFrag[®], με χρήση μεμονωμένων και πολλαπλών φωτογραφιών για κάθε εξορυσσόμενη σωρό. Για τη βέλτιστη αξιολόγηση κάθε ανατίναξης και την αποφυγή των περιορισμών και των σφαλμάτων, που είναι πιθανόν να υπάρξουν κατά την ανάλυση της εικόνας, χρησιμοποιήθηκαν από 10 μέχρι 15 φωτογραφίες, με σκοπό τη συγχώνευση των αποτελεσμάτων και τη λήψη μίας τελικής καμπύλης κατανομής του μεγέθους των τεμαχών. Η χρήση πολλαπλών φωτογραφιών για κάθε εξορυσσόμενη σωρό, έχει ως στόχο την αύξηση της ικανότητας προσδιορισμού των λεπτόκοκκων τεμαχών, καθώς αυτό εμπεριέχει τη χρήση εικόνων με μεγαλύτερη μεγέθυνση, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε συνοψίζεται στα παρακάτω στάδια:

1. Επιλέχθηκαν κατάλληλες γωνίες λήψης των φωτογραφιών μπροστά από την επιφάνεια της σωρού για την ορθή απεικόνιση της κάθε εξορυσσόμενης μάζας, προκειμένου αυτές να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικές. Επίσης, απαραίτητη προσοχή δόθηκε στην ευκρίνεια λήψης τους, ως προς τη φωτεινότητα και την παρουσία αιωρούμενης σκόνης, η οποία οδηγεί στη μείωση της ευκρίνειας. Απαραίτητη είναι η χρήση μίας συγκεκριμένης κλίμακας, ως σημείο αναφοράς και ορισμού ενός γνωστού μεγέθους.

2. Οι φωτογραφίες στη συνέχεια μετατράπηκαν σε ασπρόμαυρη κλίμακα προκειμένου να εισαχθούν στο λογισμικό WipFrag. Το λογισμικό στηρίζεται στην ερμηνεία της διάταξης από δύο διαστάσεις σε τρεις, σύμφωνα με τις αρχές της στερεολογίας και της γεωμετρίας (Maerz 1996).

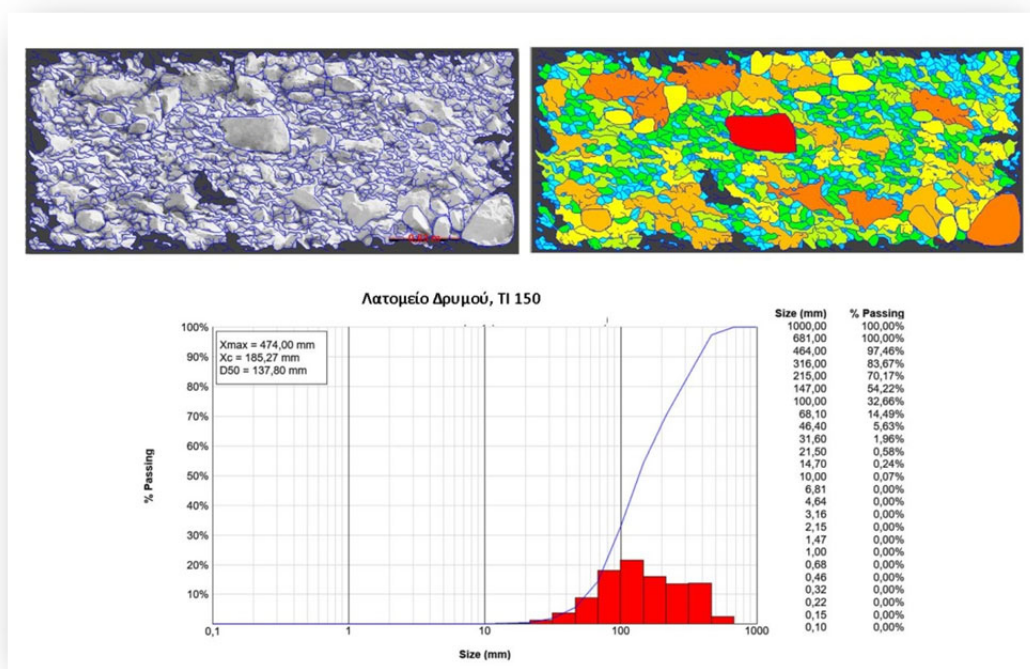
3. Έπειτα, ακολούθησε η δημιουργία ενός πλέγματος (δικτύου) σε σχέση με τα περιγράμματα των τεμαχών. Γίνεται σαφές ότι τα περιγράμματα τα οποία ορίζουν τα τεμάχια, αποτελούν για το πρόγραμμα οδηγό για τον ορισμό του πλέγματος και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό του μεγέθους του κάθε τεμαχίου. Έτσι, λοιπόν, πραγματοποιήθηκε η αυτόματη ανίχνευση των άκρων, μέσω της λειτουργίας του προγράμματος και του αλγορίθμου που εφαρμόζεται, προκειμένου να παράγει ένα πλέγμα από γραμμές, οι οποίες αντιστοιχούν στα στενά όρια των τεμαχών. Η

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΗ ΜΑΖΑ

διαδικασία αυτή τυπικά διαρκεί κάποια δευτερόλεπτα (3-5''). Το δίκτυο αυτό απεικονίζεται ως ένα επικάλυμμα πάνω στα τεμάχια και κατά συνέπεια ο χρήστης είναι σε θέση να αξιολογήσει την ακρίβεια του αποτελέσματος. Για την αύξηση της αξιοπιστίας δίνεται η δυνατότητα της χειροκίνητης επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, μετά την αυτόματη δημιουργία του πλέγματος, παρέχεται η δυνατότητα, μέσω κατάλληλης επιλογής, να οριστούν χειροκίνητα εκείνα τα όρια τα οποία δεν ορίστηκαν ορθά.

4. Τέλος, λήφθηκε η καμπύλη κατανομής του μεγέθους των τεμαχών, με τις αντίστοιχες παραμέτρους περιγραφής του αποτελέσματος, όπως το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος, τη μέση τιμή, τον συντελεστή ομοιομορφίας κ.α. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για κάθε φωτογραφία που λήφθηκε. Ακολούθως, το σύνολο των μεμονωμένων δειγμάτων φωτογραφιών για κάθε ανατίναξη συγχωνεύθηκε, μέσω συγκεκριμένης επιλογής στο πρόγραμμα, προκειμένου να προκύψει μία μέση πιο αξιόπιστη καμπύλη κατανομής.

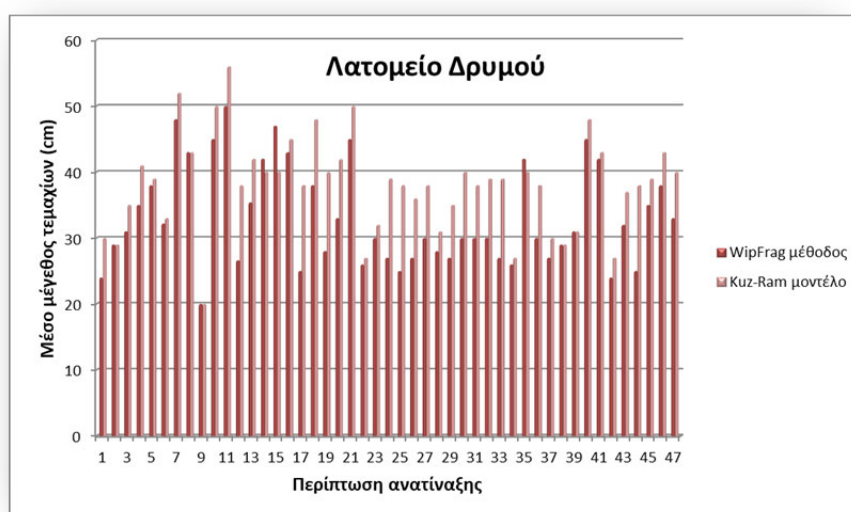
Στο Σχήμα 8.9.1 που ακολουθεί απεικονίζεται ενδεικτικά για μία ανατίναξη η παραπάνω διαδικασία, που περιλαμβάνει τη δημιουργία του πλέγματος, τον ορισμό του μεγέθους των τεμαχών καθώς και την τελική καμπύλη κατανομής με το ιστόγραμμα.



Σχήμα 8.9.1. Τα στάδια εκτίμησης του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών με χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού WipFrag®.

Εν συνεχεία, υπολογίστηκε το μέσο μέγεθος των τεμαχών, για κάθε περίπτωση ανατίναξης, με εφαρμογή της τροποποιημένης εξίσωσης από τον Lilly (1986) και τον Cunningham (1987) και για τα δύο λατομεία έρευνας. Ο υπολογισμός του D_{50} πραγματοποιήθηκε με βάση την εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας που παρέχεται από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που αναπτύσσονται στην βραχομάζα και την αντοχή της, καθώς και τον τύπο της εκρηκτικής ύλης, που στην προκείμενη περίπτωση είναι το ANFO. Στους πίνακες, Πίνακας 9.9.1 και Πίνακας 9.9.2 που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την εκτίμηση του μέσου μεγέθους από τη μέθοδο WipFrag και το μοντέλο Kuz-Ram και η ποσοστιαία διαφορά τους. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα στον Πίνακα 8.9.1 για το λατομείο του Δρυμού, σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ του μεγέθους D_{50} που προσδιορίζεται από την ψηφιακή ανάλυση από το λογισμικό WipFrag σε σχέση με τον υπολογισμό από το μοντέλο Kuz-Ram. Η μέση ποσοστιαία διαφορά ανέρχεται στο 14%, ενώ η μέση τιμή του μέσου μεγέθους των τεμαχών όπως προκύπτει από το WipFrag είναι στα 31 cm, έναντι 38 cm από το μοντέλο Kuz-Ram. Επιπλέον, το D_{50} κυμαίνεται από 18 cm έως 45 cm σύμφωνα με την ψηφιακή ανάλυση, ενώ από το μοντέλο Kuz-Ram προκύπτει η ίδια μέση ελάχιστη τιμή, με τη μέση μέγιστη να είναι λίγο μεγαλύτερη στα 56cm.

Στο Σχήμα 8.9.2 που ακολουθεί απεικονίζεται άμεσα η σύγκριση των τιμών όπως προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, για κάθε περίπτωση ανατίναξης για το λατομείο του Δρυμού.

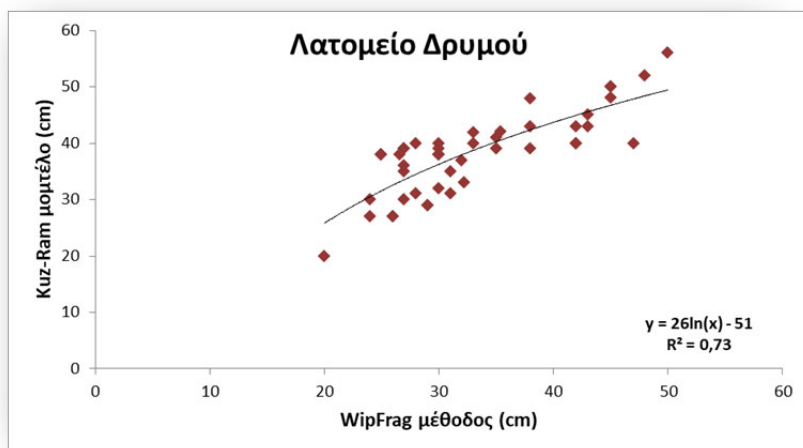


Σχήμα 8.9.2. Παράθεση των τιμών της μεθόδου WipFrag έναντι του μοντέλου Kuz-Ram.

Πίνακας 8.9.1. Μέσο μέγεθος τεμαχών σύμφωνα με τη μέθοδο WipFrag και το μοντέλο Kuz-Ram, για το λατομείο Δρυμού

Λατομείο Δρυμού			
Μέσο μέγεθος τεμαχών, D_{50}			
Αρ. περίπτωσης	WipFrag μέθοδος(cm)	Kuz-Ram μοντέλο(cm)	Διαφορά (%)
1	24	30	20
2	29	29	0
3	31	35	11
4	35	41	15
5	38	39	3
6	32	33	2
7	48	52	8
8	43	43	0
9	18	18	0
10	45	50	10
11	45	56	19
12	27	38	30
13	35	42	16
14	42	40	5
15	47	40	18
16	43	45	4
17	25	38	34
18	38	48	21
19	28	40	30
20	33	42	21
21	45	50	10
22	26	27	4
23	30	32	6
24	27	39	31
25	25	38	34
26	27	36	25
27	30	38	21
28	28	31	10
29	27	35	23
30	30	40	25
31	30	38	21
32	30	39	23
33	27	39	31
34	26	27	4
35	42	40	5
36	30	38	21
37	27	30	10
38	29	29	0
39	31	31	0
40	45	48	6
41	42	43	2
42	24	27	11
43	32	37	14
44	25	38	34
45	35	39	10
46	38	43	12
47	33	40	18

Στο Σχήμα 8.9.3 παρουσιάζεται η συσχέτιση των τιμών που προσδιορίζονται από την εφαρμογή των δύο μεθόδων και όπως προκύπτει περιγράφεται από έναν ικανοποιητικό συντελεστή προσδιορισμού της τάξης του 73%.



Σχήμα 8.9.3. Σύγκριση των τιμών μεταξύ της μεθόδου WipFrag και του μοντέλου Kuz-Ram.

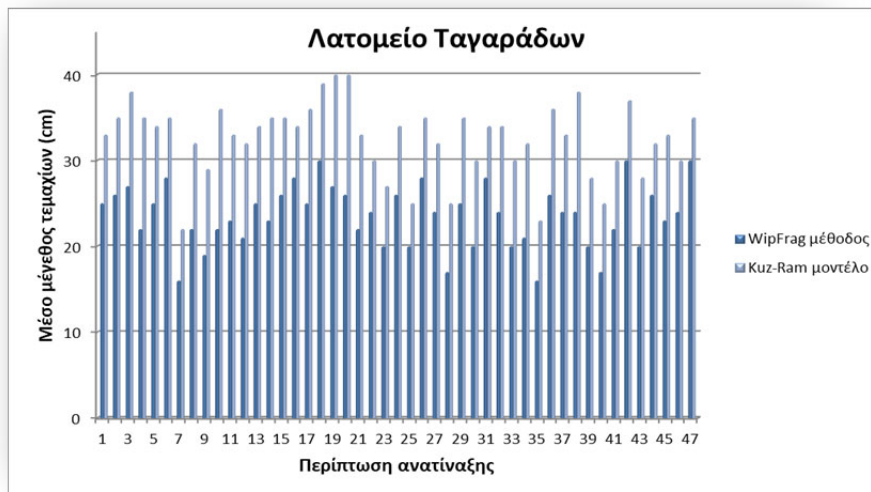
Στον αμέσως επόμενο πίνακα ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων εκτίμησης του μεγέθους D_{50} , που προσδιορίστηκε μέσω της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας και της εφαρμογής της εξίσωσης Kuz-Ram, για το λατομείο των Ταγαράδων. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα για το λατομείο των Ταγαράδων στον Πίνακα 8.9.2, σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ του μεγέθους D_{50} που προσδιορίζεται από την ψηφιακή ανάλυση μέσω του λογισμικού WipFrag σε σχέση με τον υπολογισμό με εφαρμογή της εξίσωσης Kuz-Ram. Η μέση ποσοστιαία διαφορά ανέρχεται στο 25%. Η μέση τιμή του μέσου μεγέθους των τεμαχών όπως προκύπτει από το WipFrag είναι στα 25 cm, έναντι 33 cm από το μοντέλο Kuz-Ram. Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι το μέσο μέγεθος των τεμαχών κυμαίνεται σε μικρότερες τιμές για το λατομείο των Ταγαράδων σε σχέση με το λατομείο του Δρυμού. Πιο συγκεκριμένα, για το λατομείο των Ταγαράδων η μέση ελάχιστη τιμή είναι στα 17cm και η μέση μέγιστη στα 38 cm, σύμφωνα με τη μέθοδο WipFrag, ενώ 22 cm και 40 cm αντίστοιχα σύμφωνα με το μοντέλο Kuz-Ram.

Πίνακας 8.9.2. Μέσο μέγεθος τεμαχών σύμφωνα με τη μέθοδο WipFrag και το μοντέλο Kuz-Ram, για το λατομείο Ταγαράδων

Αρ. περίπτωσης	Λατομείο Ταγαράδων		
	Μέσο μέγεθος τεμαχών, D_{50}		
	WipFrag μέθοδος	Kuz-Ram μοντέλο	Διαφορά (%)
1	25	33	24
2	26	35	26
3	27	38	29
4	22	35	37
5	25	34	26
6	28	35	20
7	17	22	27
8	22	32	31
9	19	29	34
10	22	36	39
11	23	33	30
12	21	32	34
13	25	34	26
14	23	35	34
15	26	35	26
16	28	34	18
17	25	36	31
18	30	39	23
19	27	40	33
20	26	40	35
21	22	33	33
22	24	30	20
23	20	27	26
24	26	34	24
25	20	25	20
26	28	35	20
27	24	32	25
28	17	25	32
29	25	35	29
30	20	30	33
31	28	34	18
32	24	34	29
33	20	30	33
34	21	32	34
35	17	23	30
36	26	36	28
37	24	33	27
38	24	38	37
39	20	28	29
40	17	25	32
41	22	30	27
42	38	40	5
43	20	28	29
44	26	32	19
45	23	33	30
46	24	30	20
47	30	35	14

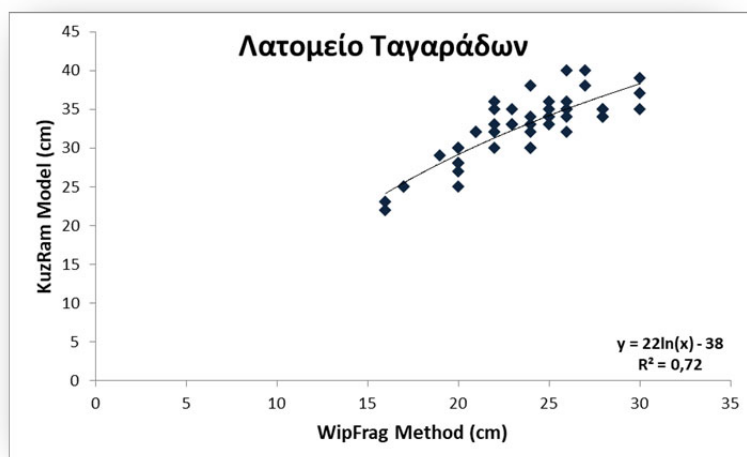
Ψηφιακή συλλογή
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ
ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΗ ΜΑΖΑ
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Στο Σχήμα 8.9.4 που ακολουθεί απεικονίζεται άμεσα η σύγκριση των τιμών όπως προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, για κάθε περίπτωση ανατίναξης στο λατομείο των Ταγαράδων.



Σχήμα 8.9.4. Παράθεση των τιμών της μεθόδου WipFrag έναντι του μοντέλου Kuz-Ram.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους. Στο Σχήμα 8.9.5 παρουσιάζεται η συσχέτιση των τιμών που προσδιορίζονται από την εφαρμογή των δύο μεθόδων και όπως προκύπτει περιγράφεται από έναν ικανοποιητικό συντελεστή προσδιορισμού της τάξης του 72%.



Σχήμα 8.9.5. Σύγκριση των τιμών μεταξύ της μεθόδου WipFrag και του μοντέλου Kuz-Ram.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

9.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η σχέση της τεχνικογεωλογικής δομής της βραχομάζας των ασβεστολίθων, δηλαδή η εκρηκτική ικανότητα, η ποιότητα, η δομή, η αντοχή σε μοναξονική θλίψη, στο εκάστοτε μέτωπο εξόρυξης στα λατομεία παραγωγής αδρανών υλικών, με την κοκκομετρία του υλικού που προκύπτει μετά την ανατίναξη, συνυπολογίζοντας την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO που εφαρμόζεται. Ο τελικός σκοπός, λοιπόν, της έρευνας είναι η κατασκευή χρηστικών συστημάτων – νομογραμμάτων που να συσχετίζουν την ποιότητα του ασβεστολίθου, μέσω της χρήσης του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI), την εκρηκτική ικανότητα της (Blastability Index), την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (Ammonium Nitrate Fuel Oil), τον αριθμό των διατρημάτων και την τελική κοκκομετρία του εξορυσσόμενου υλικού. Απώτερος στόχος είναι τα συστήματα αυτά να αποτελούν καινοτόμο, εύκολο και γρήγορο τρόπο προσδιορισμού όλων των παραμέτρων που διέπουν τη διαδικασία της ανατίναξης, για τον υπολογισμό του τελικού αποτελέσματος της ανατίναξης (κοκκομετρία αδρανών υλικών, ποσότητες εκρηκτικών που απαιτούνται κάθε φορά), πριν υλοποιηθεί η ανατίναξη στο μέτωπο της εξόρυξης.

Η εφαρμογή των επί μέρους νομογραμμάτων αναμένεται να οδηγήσει σε επιπρόσθετη διασφάλιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος και αύξηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας, καθιστώντας δυνατές εύστοχες πρόδρομες επιλογές κατά την φάση παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, θα αναφερθούν με λεπτομέρεια τα στάδια των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν σε διάστημα τριών ετών (από 2014 έως 2017), προκειμένου να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα από τα δύο λατομεία έρευνας (Δρυμού και Ταγαράδων), με σκοπό να αξιολογηθούν και να υλοποιηθούν τα τελικά νομογράμματα.

9.2 Ανάλυση των σταδίων έρευνας και αποτελεσμάτων

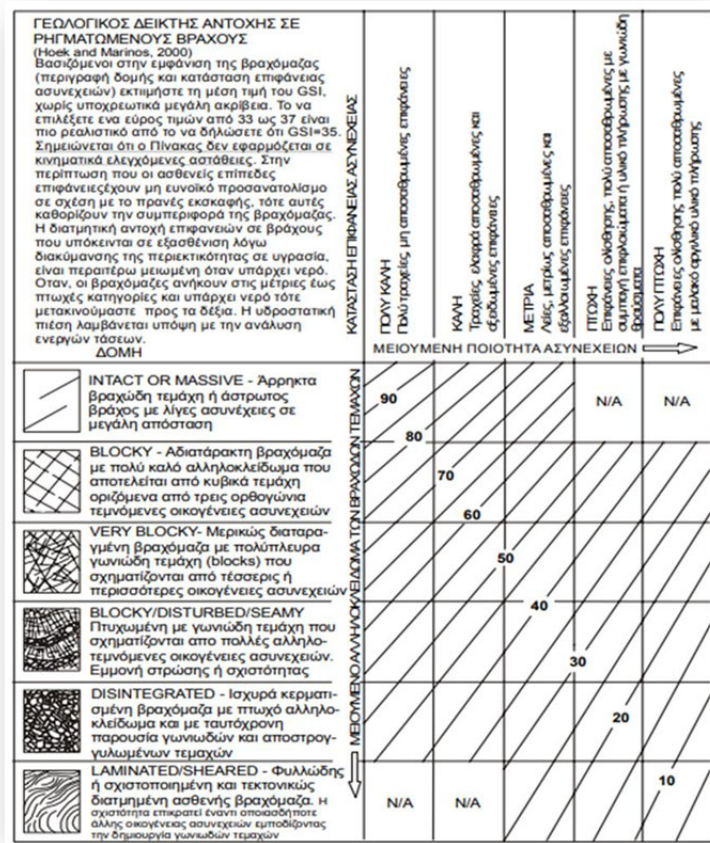
1^ο στάδιο εργασιών

Σε αυτό το στάδιο των εργασιών πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των μετώπων εξόρυξης καθώς και η παρακολούθηση των διαδικασιών υλοποίησης των ανατινάξεων στα δύο λατομεία εξόρυξης αδρανών υλικών Δρυμού και Ταγαράδων, της εταιρίας Ιντερμπετόν του ομίλου Τιτάν. Από τις καταγραφές που υλοποιήθηκαν μέσα σε διάστημα τριών ετών (από 2014 έως 2017), συλλέχθηκε ένας μεγάλος αριθμός καταγραφών των ανατινάξεων, ο οποίος ανέρχεται στις εκατό καταγραφές, (από πενήντα καταγραφές σε κάθε λατομείο). Οι εργασίες οι οποίες υλοποιήθηκαν κατά το στάδιο αυτό με τα αντίστοιχα αποτελέσματα, περιγράφονται αναλυτικά αμέσως παρακάτω.

Α) Αρχικά έλαβε χώρα η επί τόπου ποιοτική ταξινόμηση της βραχομάζας του ασβεστολίθου στο εκάστοτε μέτωπο (πριν την ανατίναξη), που επρόκειτο να αποσπαστεί, σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης κατά GSI. Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής αποτελεί ένα διεθνώς αναγνωρισμένο σύστημα χαρακτηρισμού της βραχομάζας, αποδίδοντας αριθμητικά την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της. Οι Hoek, Wood και Shah (1992), εισάγουν το GSI για να εκτιμήσουν την αντοχή των βραχωδών πετρωμάτων από παρατηρήσεις πεδίου για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες και έπειτα επεκτάθηκε για τις ασθενείς βραχομάζες από τους Hoek, Μαρίνος και Benissi (1998), καθώς και για τον φλύσχη από Μαρίνος (2007). Ο δείκτης αυτός πέραν της γεωτεχνικής ταξινόμησης, εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών του πετρώματος ανάλογα με τη ρωγμάτωσή του. Το GSI βασίζεται στην αξιολόγηση της δομής της βραχομάζας και της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών και εκτιμάται από την οπτική παρατήρηση των εμφανίσεων της βραχομάζας στα μέτωπα της εξόρυξης (στην παρούσα έρευνα), Σχήμα 9.2.1. Τα μέτωπα στα οποία προσδιορίζεται ο δείκτης αυτός, αποτελούν τις πιο αξιόπιστες πηγές προκειμένου να παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τη δομή της υπό έρευνα βραχομάζας. Πιο συγκεκριμένα, η ευχέρεια και η αξιοπιστία της χρήσης του GSI έγκειται στον συνδυασμό των δύο θεμελιωδών παραμέτρων που αφορούν τόσο την ταξινόμηση της δομής της σε σχέση με τους όγκους που

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

αποχωρίζονται εξαιτίας των διακλάσεων της όσο και την ποιότητα των ασυνεχειών (Marinos et al. 2005).



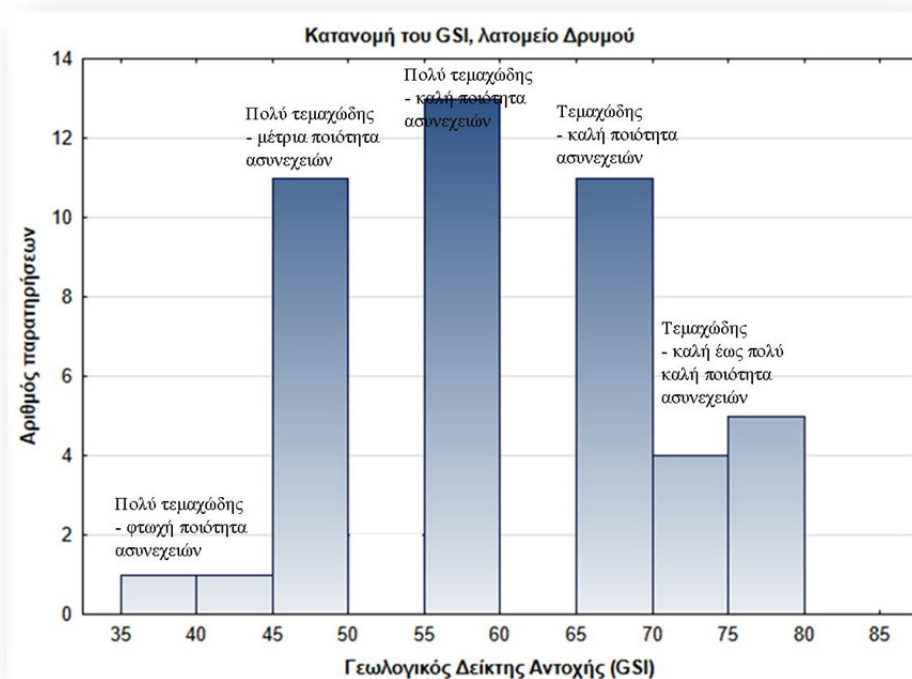
Σχήμα 9.2.1. Το διάγραμμα προσδιορισμού του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (Hoek & Marinos 2000).

Το σύστημα ταξινόμησης GSI βασίζεται στην υπόθεση ότι η βραχομάζα αποτελείται από έναν επαρκή αριθμό ασυνεχειών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένη απόσταση και προσανατολισμό και κατά συνέπεια συμπεριφέρεται ως ένα ισότροπο μέσο. Σημειώνεται ότι το GSI δεν εφαρμόζεται σε βραχομάζες στις οποίες δεσπόζει ξεκάθαρα κυρίαρχη ασυνέχεια με συγκεκριμένες γεωμετρικές ιδιότητες, όπου σε αυτή την περίπτωση λειτουργεί ως ένα ανισότροπο μέσο και η οποιαδήποτε αστοχία εξαρτάται από τη διατηρητική αντοχή αυτής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένας μη διαταραγμένος σχιστόλιθος, στον οποίο η μηχανική συμπεριφορά εξαρτάται από τη σχιστότητά του και κατά συνέπεια χαρακτηρίζεται ως ανισότροπη. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατή η ταξινόμησή της σύμφωνα με τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής, καθώς η συμπεριφορά της βραχομάζας δεν καθορίζεται από το σύνολο αυτής (Marinos et al. 2005).

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

Συγκεκριμένα, λοιπόν, αποδόθηκε το GSI για κάθε ένα μέτωπο εξόρυξης, πριν λάβει χώρα η ανατίναξη, στα δύο λατομεία έρευνας. Ο προσδιορισμός του δείκτη πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τη δομή του ασβεστολίθου, όπως παρατηρήθηκε στο εκάστοτε πρυνές, με τον διαχωρισμό των πρισματικών τεμαχών, σε σχέση με την κατάσταση των ασυνεχειών του. Στο Σχήμα 9.2.2 και Σχήμα 9.2.3 απεικονίζεται η κατανομή των παρατηρήσεων ως προς την ταξινόμηση του ασβεστολίθου κατά GSI, στα δύο λατομεία. Παρατηρείται ότι στο λατομείο του Δρυμού ο μεγαλύτερος αριθμός των παρατηρήσεων (27%) αντιστοιχεί σε GSI 55-60 (πολύ τεμαχώδης – καλή ποιότητα των ασυνεχειών), ενώ με λίγη μικρότερη συχνότητα (από 23%) εμφανίζεται ο ασβεστόλιθος με δείκτη GSI 45-50 (πολύ τεμαχώδης – μέτρια ποιότητα ασυνεχειών) και 65-70 (τεμαχώδης – καλή ποιότητα των ασυνεχειών). Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι το 19% των παρατηρήσεων αναλογεί σε καλύτερης ποιότητας ασβεστόλιθο με τεμαχώδη δομή και καλή με πολύ καλή ποιότητα των ασυνεχειών. Στις χαμηλότερες τιμές του GSI οι οποίες αντιστοιχούν σε πολύ τεμαχώδη βραχομάζα με φτωχή ποιότητα των ασυνεχειών, καταγράφηκε ένας αμελητέος αριθμός παρατηρήσεων, γύρω στο 2% και αντιστοιχούν σε χαμηλά πρυνή (γύρω στα 7m), τα οποία ήταν απαραίτητο να εξορυχτούν για τη διάνοιξη οδών προσπέλασης εντός του λατομείου.

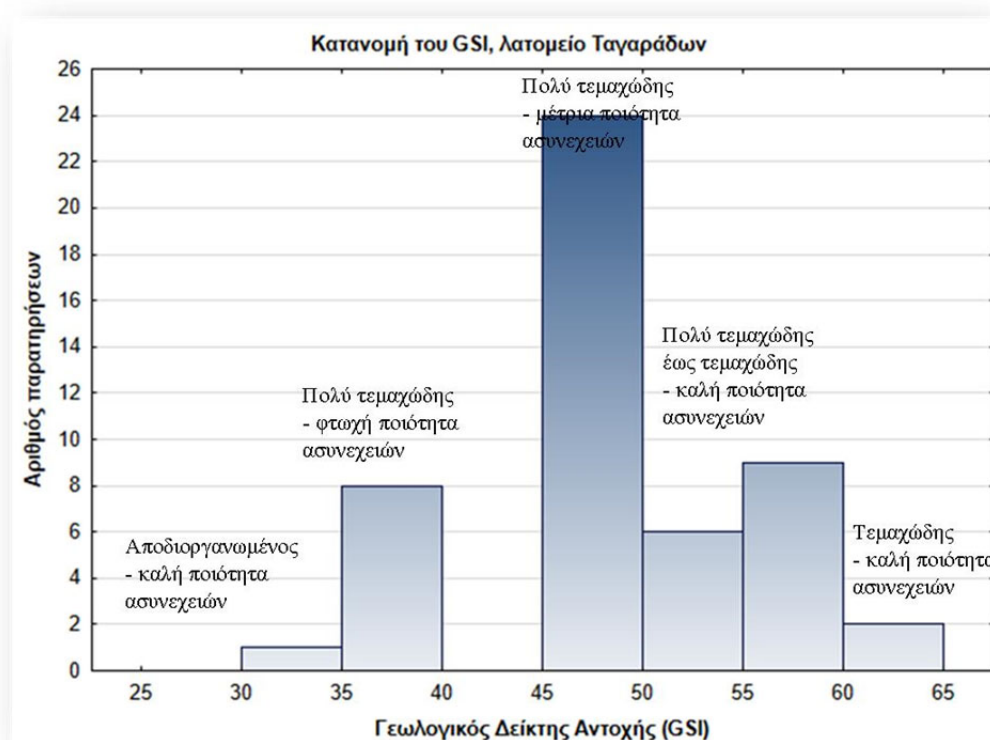


Σχήμα 9.2.2. Κατανομή των παρατηρήσεων προσδιορισμού του GSI στα μέτωπα εξόρυξης, στο λατομείο Δρυμού.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

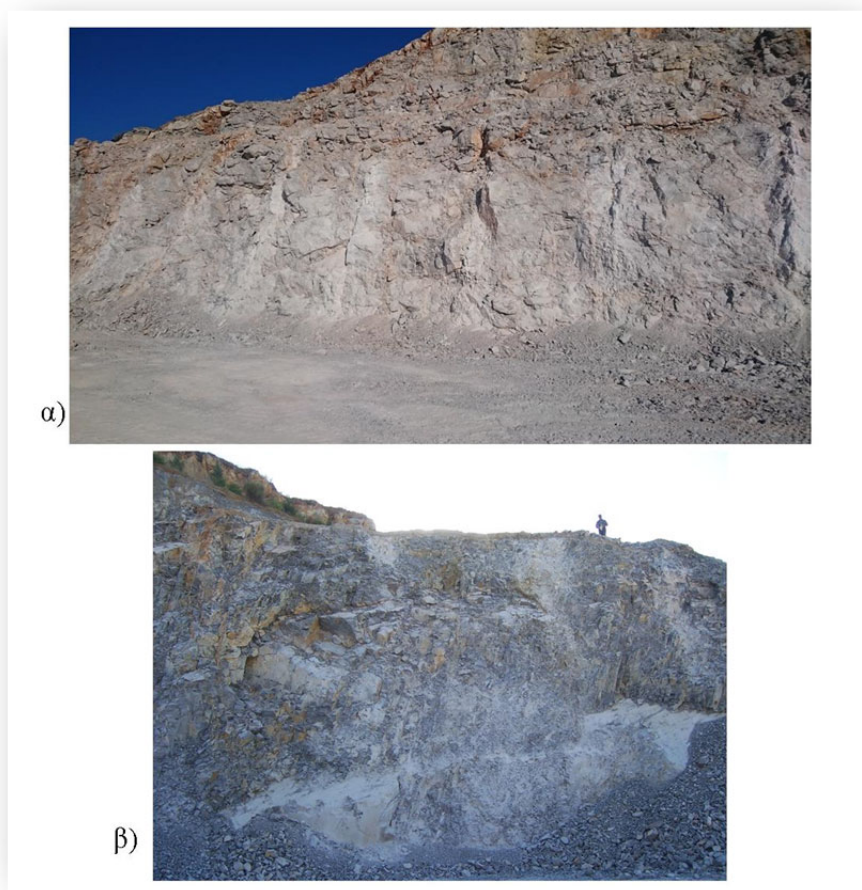
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

Από την άλλη πλευρά, το ιστόγραμμα κατανομής των καταγραφών προσδιορισμού του δείκτη GSI για το λατομείο των Ταγαράδων απεικονίζεται αμέσως παρακάτω, Σχήμα 9.2.3. Από το σύνολο των πενήντα καταγραφών προκύπτει ότι το 48% αντιστοιχεί σε GSI 45-50 (πολύ τεμαχώδης – μέτρια ποιότητα των ασυνεχειών), ενώ με μικρότερη συχνότητα (30%), εμφανίζεται ο ασβεστόλιθος με δείκτη GSI από 50 έως 60, που αναλογεί σε καλύτερης ποιότητας ασβεστόλιθο από πολύ τεμαχώδης έως τεμαχώδης με καλή ποιότητα των ασυνεχειών. Το 16% των καταγραφών αντιστοιχεί σε πολύ τεμαχώδη δομή με φτωχή ποιότητα ασυνεχειών, ενώ καλύτερη τεμαχώδη δομή και καλή ποιότητα των ασυνεχειών, αναλογεί σε ποσοστό 4%. Ακόμη, καταγράφηκε ένας πολύ μικρός αριθμός παρατηρήσεων (2%), σε πιο αποδιοργανωμένο ασβεστόλιθο, στους οποίους πραγματοποιήθηκε εκσκαφή με εκρηκτικές ύλες και αντιστοιχούν σε χαμηλά πρηνή (γύρω στα 8m) στα οποία διανοίχτηκαν οδοί για την προσπέλαση των τροχοφόρων μηχανημάτων του λατομείου.



Σχήμα 9.2.3. Κατανομή των παρατηρήσεων προσδιορισμού του GSI στα μέτωπα εξόρυξης, στο λατομείο Ταγαράδων.

Παρακάτω ακολουθούν αντιπροσωπευτικές εικόνες από τα μέτωπα εξόρυξης των δύο λατομείων έρευνας, τα οποία χαρακτηρίζονται από πολύ τεμαχώδη δομή του ασβεστολίθου με καλή έως μέτρια ποιότητα των ασυνεχειών τους, Σχήμα 9.2.4.

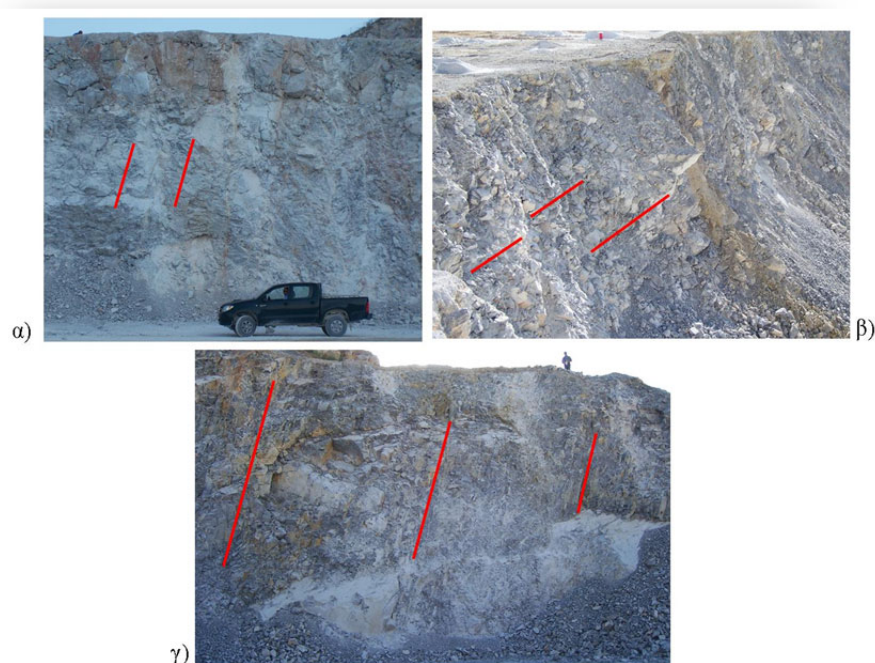


Σχήμα 9.2.4. Αντιπροσωπευτικές εικόνες μετώπων εξόρυξης για τον προσδιορισμό του δείκτη GSI με πολύ τεμαχώδη δομή και μέτρια ποιότητα των ασυνεχειών, (α) στο λατομείο του Δρυμού και (β) στο λατομείο των Ταγαράδων.

Παράλληλα με την απόδοση του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας, προσδιορίστηκε η απόσταση των κύριων ασυνεχειών (JPS), με βάση την εξίσωση 9.4.1, ορισμού του Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας κατά Lilly (1986). Οι πολύ τεμαχώδεις ασβεστολιθικές βραχομάζες, με ένα πυκνό δίκτυο ασυνεχειών με απόσταση μικρότερη από 0.1m, ορίστηκαν με μία σταθερή τιμή 10, όπως προβλέπεται από τον Lilly. Ενώ οι βραχομάζες με τεμαχώδη δομή και απόσταση ασυνεχειών μεταξύ 0.1m και 1.0m ορίστηκαν με μία σταθερά 20. Σημειώνεται ότι στα δύο λατομεία έρευνας η παρουσία ασβεστολιθικής βραχομάζας με άρρηκτη δομή, δηλαδή με πολύ αραιές ασυνέχειες με απόσταση μεγαλύτερη του 1.0m δεν

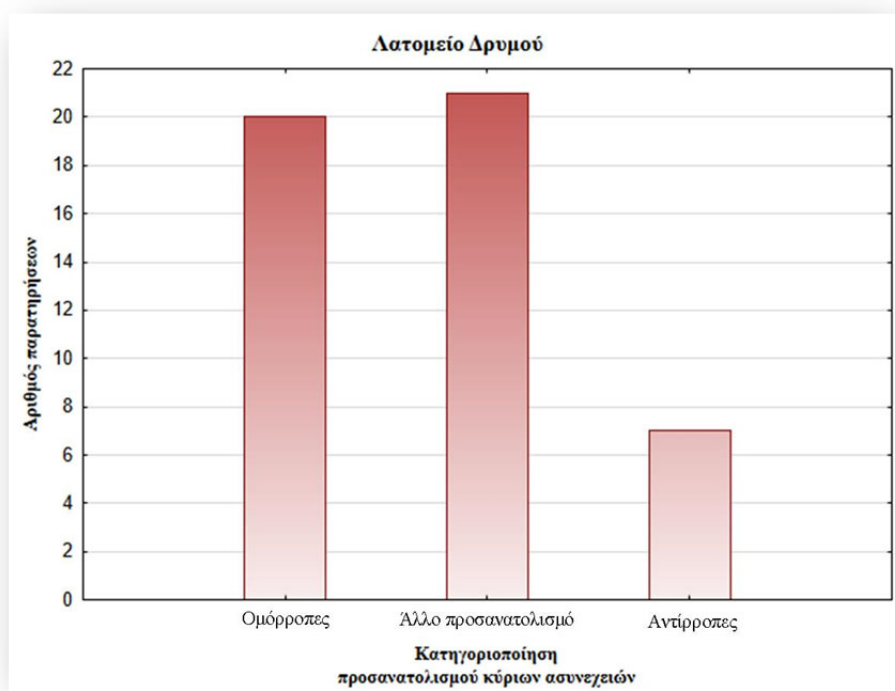
εντοπίστηκαν. Έτσι, στο διάγραμμα GSI οι καταγραφές περιορίζονται στο τμήμα εκείνο που περιγράφουν την τεμαχώδη και την πολύ τεμαχώδη δομή (αποκλείοντας επιπλέον και τα κατώτερα τμήματά του). Θα πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση αυτή του πυκνού δικτύου ασυνεχειών, η θραύση του ασβεστολίθου καθορίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από αυτές τις προϋπάρχουσες ασυνέχειες, από ότι από τη γένεση των κυμάτων παραμόρφωσης από την δυναμική της εκρηκτικής ύλης. Το αντίθετο θα συνέβαινε, αν επρόκειτο για μία άρρηκτη βραχομάζα, στην οποία η κατανομή του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχών θα εξαρτιόταν από τις ρωγμώσεις που θα προέκυπταν λόγω της ενεργητικότητας της εκρηκτικής ύλης. Από τα προαναφερόμενα, προκύπτει η σημασία του ποιοτικού προσδιορισμού της βραχομάζας στο μέτωπο της εξόρυξης πριν την υλοποίηση της ανατίναξης.

Επίσης, σε αυτό το στάδιο των εργασιών αποδόθηκε ο προσανατολισμός του κύριου συστήματος ασυνεχειών που επικρατεί στο εκάστοτε μέτωπο της εξόρυξης και κατηγοριοποιήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση κατά Lilly (1986). Η κατηγοριοποίηση αφορά τον προσανατολισμό τους σε σχέση με το μέτωπο της εξόρυξης, αποδίδοντας τη σταθερά 20 για ασυνέχειες ομόρροπες ως προς το πρανές, με 40 χαρακτηρίζονται αυτές που είναι αντίρροπες του πρανούς και με τη σταθερά 30 για ασυνέχειες με άλλο προσανατολισμό (Σχήμα 9.2.5).



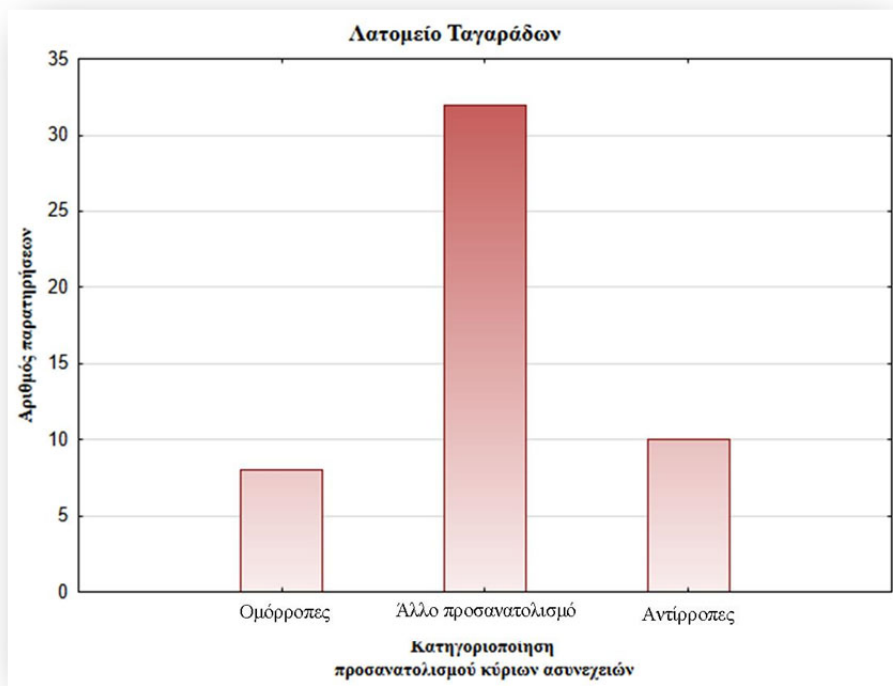
Σχήμα 9.2.5. Αντιπροσωπευτικές εικόνες προσανατολισμού των ασυνεχειών στα λατομεία έρευνας, με κύριο συστήματα ασυνεχειών (α) ομόρροπο ως προς το πρανές, β) αντίρροπο ως προς το πρανές, γ) με άλλο προσανατολισμό.

Από τις καταγραφές και έπειτα από τη στατιστική επεξεργασία τους προέκυψαν τα ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης των παρατηρήσεων ως προς την παραπάνω κατηγοριοποίηση των ασυνεχειών για τα δύο λατομεία έρευνας. Ο προσανατολισμός των κύριων ασυνεχειών αποτελεί και αυτός έναν σημαντικό παράγοντα, για τον τρόπο κοπής του δαπέδου που θα προκύψει ή και την πιθανότητα της παραμονής άθραυστου πετρώματος στο δάπεδο (Lilly 1986). Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.2.6 το μεγαλύτερο πλήθος (44% των παρατηρήσεων) αντιστοιχεί σε κύριες ασυνέχειες που κατηγοριοποιούνται με τη σταθερά 30 και 20 (42% των παρατηρήσεων), δηλαδή είτε αναπτύσσονται με κλίση ομόρροπη του πρανούς είτε έχουν άλλο προσανατολισμό. Σε πολύ μικρότερο ποσοστό (14%) απαντώνται ασυνέχειες με κλίση αντίρροπη του πρανούς.



Σχήμα 9.2.6. Κατανομή των παρατηρήσεων κατηγοριοποίησης προσανατολισμού των κύριων ασυνεχειών, στο λατομείο Δρυμού.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν από την ανάλυση των καταγραφών για το λατομείο των Ταγαράδων, όπου το 64% των καταγραφών χαρακτηρίζεται από κύριο σύστημα ασυνεχειών το οποίο αναπτύσσεται με άλλο προσανατολισμό. Ενώ σε πολύ μικρότερα ποσοστά εμφανίζονται να βρίσκονται σε αντίρροπη ή ομόρροπη διεύθυνση ως προς το μέτωπο, (Σχήμα 9.2.7).



Σχήμα 9.2.7. Κατανομή των παρατηρήσεων κατηγοριοποίησης προσανατολισμού των κύριων ασυνεχειών, στο λατομείο Ταγαράδων.

Ακόμα ένας παράγοντας που προσδιορίστηκε κατά τις επί τόπου παρατηρήσεις στα δύο λατομεία είναι η εκτίμηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη, με τη χρήση της σφύρας Schmidt. Η χρήση της σφύρας Schmidt αποτελεί μία άμεση, γρήγορη και απλή μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, επί τόπου, σε άρρηκτο βράχο και εν προκειμένω σε τεμάχια ασβεστολίθου. Στο λατομείο του Δρυμού η μέση αντοχή εκτιμάται στα 65 MPa, με την ελάχιστη τιμή να προσδιορίζεται στα 60 MPa και τη μέγιστη στα 75 MPa. Το μεγαλύτερο μέρος των καταγραφών (60%), που αφορά τη λήψη των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε κατά την εξόρυξη στον τομέα ΤΠ του λατομείου και συγκεκριμένα στη βαθμίδα ΤΠ 344 (μέχρι την εξόφλησή της), όπου ο μέσος όρος της αντοχής εκτιμήθηκε στα 62 MPa. Από την άλλη πλευρά, στο λατομείο των Ταγαράδων ο μέσος όρος της αντοχής του ασβεστολίθου ανήλθε στα 60 MPa. Η ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε ήταν στα 50 MPa και η μέγιστη στα 68 MPa. Όπως γίνεται φανερό από την εξίσωση 8.4.1, ο Lilly υποδεικνύει ότι παρόλο που ο ρόλος της αντοχής αποτελεί έναν παράγοντα επιρροής στον Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας, ωστόσο δεν ασκεί τόσο μεγάλη

επίδραση όσο οι υπόλοιποι. Παρόλα αυτά, ισχύει ότι τα σκληρότερα πετρώματα απαιτούν εκρηκτικά με υψηλότερη δυναμική από ότι τα πιο χαμηλής αντοχής.

Β) Παραμένοντας στο ίδιο στάδιο της έρευνας με τις επί τόπου παρατηρήσεις, ακολούθησε η καταγραφή της διαδικασίας της κάθε ανατίναξης, που έλαβε χώρα στο κάθε μέτωπο εξόρυξης. Η καταγραφή αυτή περιελάμβανε τη διάταξη, το βάθος και το πλήθος των διατρημάτων, το ύψος του μετώπου, την ποσότητα των εκρηκτικών υλών. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η παρακολούθηση της κάθε ανατίναξης και η καταγραφή της με φωτογράφιση και βιντεοσκόπηση. Όσον αφορά τη διάταξη των διατρημάτων στο κάθε λατομείο έρευνας, αυτή παρέμεινε περίπου η ίδια, με το φορτίο και την απόσταση να είναι σταθερά (εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων) και η διάταξή τους κλιμακωτή (Σχήμα 9.2.8). Τα διατρήματα διανοίγονταν σε δύο με τρεις σειρές, και το πλήθος αυτών κυμαινόταν κατά μέσο όρο στα 36 για τον Δρυμό και στα 13 για τους Ταγαράδες. Επιπλέον, η εκκίνηση των διαδοχικών εναύσεων των διατρημάτων υλοποιούνταν από το μέσο διάτρημα της πρώτης σειράς, ακολουθώντας έπειτα πρώτα τα διατρήματα που βρίσκονταν εκατέρωθεν αυτού και στη συνέχεια με όμοιο τρόπο οι επόμενες σειρές. Στον Πίνακα 9.2.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι της διαδικασίας της ανατίναξης για το κάθε λατομείο.



Σχήμα 9.2.8. Η κλιμακωτή διάταξη των διατρημάτων.

Πίνακας 9.2.1. Παράμετροι ανατίναξης για τα δύο λατομεία έρευνας

Παράμετροι	Λατομείο Δρυμού	Λατομείο Ταγαράδων
Ύψος μετώπου εξόρυξης	12 m	12 m
Διάμετρος διατρημάτων	11.43 cm	16.51 cm
Φορτίο	4.5 m	5.0 m
Απόσταση	5.0 m	5.0 m
Διάταξη διατρημάτων	Κλιμακωτή	Κλιμακωτή
Βάθος διατρημάτων	13.5 m	13.5 m
Υποδιάτρηση	~1.5 m	~1.5 m
Μέσα έναυσης	Μη ηλεκτρικά	Ηλεκτρικά μέσης ευαισθησίας

Ειδικότερα, τα μέτωπα της εξόρυξης ασβεστολιθικού πετρώματος και στα δύο λατομεία έρευνας αφορούν ύψος 12m, με γωνία κλίσης 75° , ακολουθώντας τις διατάξεις που ορίζονται από τις αντίστοιχες παραγράφους του Κ.Μ.Λ.Ε. Όπως γίνεται φανερό από την σκαριφηματική απεικόνιση (Σχήμα 9.2.9), η διάτρηση ακολουθεί την κλίση του πρανούς και συνεχίζει κάτω από το δάπεδο περίπου ακόμα 1.5m, προκειμένου να επιτευχθεί η ορθή κοπή του μετώπου, αποφεύγοντας την παραμονή άθραυστου υλικού στη βάση του πρανούς. Μπροστά από το μέτωπο σχηματίζεται η σωρός με τα εξορυσσόμενα ασβεστολιθικά τεμάχια.



Σχήμα 9.2.9. Σκαρίφημα απεικόνισης της γεωμετρίας του μετώπου και του διατρήματος.

Ψηφιακή συλλογή
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ
ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Από το συνολικό μήκος των 13.5m (μαζί με την υποδιάτρηση) του διατρήματος, το 70% (9.5m) γομώνεται με εκρηκτική ύλη τύπου ANFO και το υπόλοιπο 30% (4.0m) άνω τμήμα πληρώνεται με διατρητικό υλικό (επιγόμωση). Στο λατομείο του Δρυμού η μεταφορά του ANFO πραγματοποιείται σε σακιά των 25kg το κάθε ένα και το κάθε διάτρημα γομώνεται με 112.5kg ANFO, δηλαδή με 11.8kg ανά γομωμένο μέτρο, (Σχήμα 9.2.10). Από το σύνολο των πενήντα καταγραφών που αφορούν αυτό το λατομείο εκτιμάται ότι ο μέσος όρος του Powder Factor (ANFO kg/m^3) που αφορά την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ανά μονάδα εξορυσσόμενου υλικού, κυμαίνεται στα 0.38kg/m^3 . Η μέση ποσότητα εξορυσσόμενου ασβεστολίθου που προκύπτει από τον «κυβισμό» των διατρημάτων, με την ακόλουθη εξίσωση: $(\text{φορτίο} * \text{απόσταση} * \text{ύψος μετώπου} * \text{πλήθος διατρημάτων} * 2.65)$, υπολογίζεται ότι είναι 25,141τόνοι και η μέση ποσότητα εκρηκτικής ύλης στα 3,512kg.

Από την άλλη πλευρά στο λατομείο των Ταγαράδων ακολουθείται η ίδια πρακτική ως προς τα ποσοστά γόμωσης και επιγόμωσης των διατρημάτων. Όμως, η μεταφορά της εκρηκτικής ύλης πραγματοποιείται με ειδικό τροχοφόρο μέσο (ανφονιέρα), από όπου γίνεται άμεσα η χύδην διαδικασία πλήρωσης των διατρημάτων από αυτό, (Σχήμα 9.2.10). Λόγω της λίγο μεγαλύτερης διαμέτρου των διατρημάτων, σε σχέση με αυτά του Δρυμού, το κάθε διάτρημα γομώνεται με 16 kg ανά γομωμένο. Εκτιμάται ότι το Powder Factor κυμαίνεται στα 0.35kg/m^3 κατά μέσο όρο και η ποσότητα εξορυσσόμενου υλικού στους 13,148τόνους (μικρότερη από ότι στο λατομείο του Δρυμού) με μέση ποσότητα εκρηκτικής ύλης στα 1,740kg ANFO. Παράλληλα, και στα δύο λατομεία χρησιμοποιείται αμμωνίτης (κονιώδες εκρηκτικό με κύρια συστατικά το νιτρικό αμμώνιο και το τρινιτροτολουόλιο) σε μορφή φυσιγγίου (με μήκος 50 cm και διάμετρο 6.5 cm) για την ενίσχυση της γόμωσης στον πυθμένα, ο οποίος δένεται με την ακαριαία θρυαλλίδα και τοποθετείται στο κατώτερο σημείο εντός του διατρήματος, (Σχήμα 9.2.10).



Σχήμα 9.2.10. Το συσκευασμένο ANFO σε σακιά και η ανφονιέρα, στα μέτωπα εξόρυξης.



Σχήμα 9.2.11. Το φυσίγγιο αμμωνίτη με την ακαριαία θρυαλλίδα.

Γ) Έπειτα από κάθε καταγραφή του πρανούς καθώς και της γεωμετρίας της ανατίναξης, ακολούθησε η παρακολούθησή της και η καταγραφή με φωτογράφιση και βιντεοσκόπηση. Επίσης, πραγματοποιήθηκε η επί τόπου αξιολόγηση του αποτελέσματος της ανατίναξης (Σχήμα 9.2.12), δηλαδή του αποσπώμενου υλικού, με προσεκτική φωτογραφική αποτύπωση και εισαγωγή των εικόνων στο εξειδικευμένο λογισμικό ψηφιακής ανάλυσης εικόνας WipFrag[®], με σκοπό τον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των παραγόμενων τεμαχίων



Σχήμα 9.2.12. αριστερά: η ανατίναξη του μετώπου εξόρυξης, δεξιά: η εξορυσσόμενη σωρός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ
ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

Δ) Το σύνολο των δεδομένων που συλλέχθηκε από τα δύο λατομεία, κατά τη διάρκεια των τριών ετών έρευνας, οργανώθηκε και δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων για κάθε ένα λατομείο ξεχωριστά. Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται οι εκατό καταγραφές για τα δύο λατομεία έρευνας, (Πίνακας 9.2.2 και Πίνακας 9.2.3).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ



Πίνακας 9.2.2. Το σύνολο των καταγραφών στο λατομείο του Δρυμού

Καταγραφή	Ύψος Μετόπου (m)	Πλήθος Διατρημάτων	Βάθος Διατρημάτων (με υποδιόρθωση) (m)	Σειρές	Φορτίο (m)	Απόσταση (m)	Γώμωση (m)	Επιγώμωση (m)	GSI	Σφύρα Schmidt (MPa)	JPS (Joint Plane Spacing)	JPO (Joint Plane Orientation)	ANFO (kg)	Κυβισμός Διατρημάτων (t)	Αμμονίτης (kg)	Γαλακτώματα (kg)
1	12	41	13.5	3	4.5	5	9.5	4	50-58 (τεμαχώδης-μέτρια)	62	20	30	4,596	29,335	125	100
2	12	39	13.5	3	4.5	5	8.4	5.6	47-52 (τεμαχώδης- μέτρια)	58	20	30	4,100	27,904	75	150
3	12	43	13.5	3	4.5	5	9.5	4	40-48 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	60	20	20	4,600	30,766	100	50
4	10	48	11	2	4.5	5	7	4	65-72 (τεμαχώδης-καλή)	59	20	30	4,200	28,620	100	50
5	10	50	11	4	4.5	4.5	7.5	3.5	65-72 (τεμαχώδης-καλή)	69	20	30	4,850	23,850	100	100
6	12	49	13.5	2	4.5	5	9.5	4	65-72 (τεμαχώδης-καλή)	58	20	20	4,700	35,059	100	50
7	12	66	13.5	2	4.5	5	9.5	4	72-77 (τεμαχώδης-καλή)	60	20	20	7,398	47,223	100	75
8	12	35	13.5	3	4.5	5	8.5	5	50-55 (τεμαχώδης- μέτρια)	66	20	30	3,250	25,042	75	50
9	12	27	13.5	2	4.5	5	9	4	68-72 (τεμαχώδης- καλή)	60	50	20	2,700	19,318	50	50
10	12	33	13.5	3	4.5	5	9.5	4	72-76 (τεμαχώδης- καλή)	64	20	30	2,750	23,612	75	50
11	12	38	13.5	3	4.5	5	9	4.5	68-72 (τεμαχώδης- καλή)	75	50	20	3,500	27,189	75	50
12	12	68	13.5	3	4.5	5	9	4.5	73-78 (τεμαχώδης- καλή)	65	50	40	7,221	48,654	150	50
13	12	15	13.5	3	4.5	5	9	4.5	75-80 (τεμαχώδης- πολύ καλή)	65	20	30	1,600	7,942	75	0
14	7	46	8.5	5	4.5	4	5.1	3.4	75-80 (τεμαχώδης- πολύ καλή)	65	20	30	3,200	8,533	75	0
15	12	48	13.5	3	4.5	5	9.5	4	72-80 (τεμαχώδης- πολύ καλή)	54	50	20	4,150	34,344	100	50
16	12	49	13.5	3	4.5	5	9.5	4	65-70 (τεμαχώδης- καλή)	53	20	30	4,800	35,059	150	25
17	12	23	13.5	3	4.5	5	9.5	4	55-60 (πολύ τεμαχώδης- καλή)	60	20	20	2,700	16,457	75	25
18	12	31	13.5	2	4.5	5	9.5	4	75-80 (τεμαχώδης-πολύ καλή)	70	20	30	2,850	22,180	75	50
19	12	35	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (τεμαχώδης-μέτρια)	65	20	30	3,300	25,042	100	25
20	12	37	13.5	2	4.5	5	9.5	4	70-75 (τεμαχώδης-καλή)	55	20	40	3,400	26,473	100	50
21	12	38	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (τεμαχώδης-μέτρια)	77	20	20	3,600	27,189	100	50
22	12	33	13.5	2	4.5	5	9.5	4	70-75 (τεμαχώδης- καλή)	65	20	20	3,300	23,611	100	50
23	12	39	13.5	2	4.5	5	9.5	4	65-70 (τεμαχώδης-καλή)	80	20	20	3,700	27,904	100	50
24	12	17	13.5	2	4.5	5	9.5	4	65-70 (τεμαχώδης-καλή)	64	20	20	1,600	12,163	25	25
25	12	33	13.5	2	4.5	5	9.5	4	48-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	59	10	30	3,050	23,611	100	50
26	12	35	13.5	2	4.5	5	9.5	4	70-75 (τεμαχώδης-καλή)	52	20	20	3,600	25,042	100	25
27	12	42	13.5	2	4.5	5	9.5	4	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	51	10	30	4,000	30,051	100	50
28	12	41	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	60	10	30	4,000	29,335	100	100
29	12	39	13.5	2	4.5	5	9.5	4	68-72 (τεμαχώδης-καλή)	65	20	40	3,750	27,904	100	100
30	3	66	13.5	7	4.5	4	1.8	1.2	20-25 (αποδιοργανωμένη-φτωχή)	60	10	30	1,150	6,296	88	0
31	12	17	13.5	3	4.5	5	9.5	4	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	60	10	40	1,150	10,812	88	0
32	12	41	13.5	3	4.5	5	9.5	4	45-50 (τεμαχώδης-μέτρια)	57	20	20	3,950	29,335	125	100
33	12	36	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	55	10	20	3,650	25,758	125	50
34	12	13	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (τεμαχώδης-μέτρια)	62	20	20	1,200	9,301	50	25
35	12	18	13.5	2	4.5	5	9.5	4	65-70 (τεμαχώδης-καλή)	62	20	40	1,450	12,879	50	25
36	21	21	21	2	4.5	5	16	5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	60	10	40	3,475	26,294	50	75
37	12	35	13.5	2	4.5	5	9.5	4	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	56	10	20	3,400	25,042	125	50
38	12	24	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	65	10	30	4,000	17,172	125	75
39	12	41	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	68	10	40	3,800	29,335	100	25
40	21	22	13.5	2	4.5	5	16	5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	62	10	20	3,600	27,546	100	50
41	12	18	13.5	2	4.5	5	9.5	4	48-52 (τεμαχώδης- μέτρια)	65	20	30	1,700	12,879	50	25
42	12	40	13.5	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	69	10	30	3,800	28,620	125	50
43	12	39	13.5	2	4.5	5	9.5	4	36-42 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	68	10	20	3,850	27,904	125	50
44	21	21	22.5	2	4.5	5	16	5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	65	10	30	3,450	26,294	50	100
45	12	37	13.5	2	4.5	5	9.5	4	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	58	10	30	3,600	26,473	100	50
46	9	34	10.5	2	4.5	5	6.5	4	40-45 (τεμαχώδης-φτωχή)	68	20	30	2,000	18,245	75	0
47	20	20	21	2	4.5	5	15	6	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	68	10	30	3,350	23,850	100	50
48	12	45	13	2	4.5	5	9.5	4	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	63	10	20	4,100	32,197	125	50
49	12	47	13	2	4.5	5	9.5	4	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	66	10	20	4,250	33,628	150	50
50	12	48	13	2	4.5	5	9.5	4	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	66	10	20	4,200	37,778	150	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ



Πίνακας 9.2.3. Το σύνολο των καταγραφών στο λατομείο των Ταγαράδων

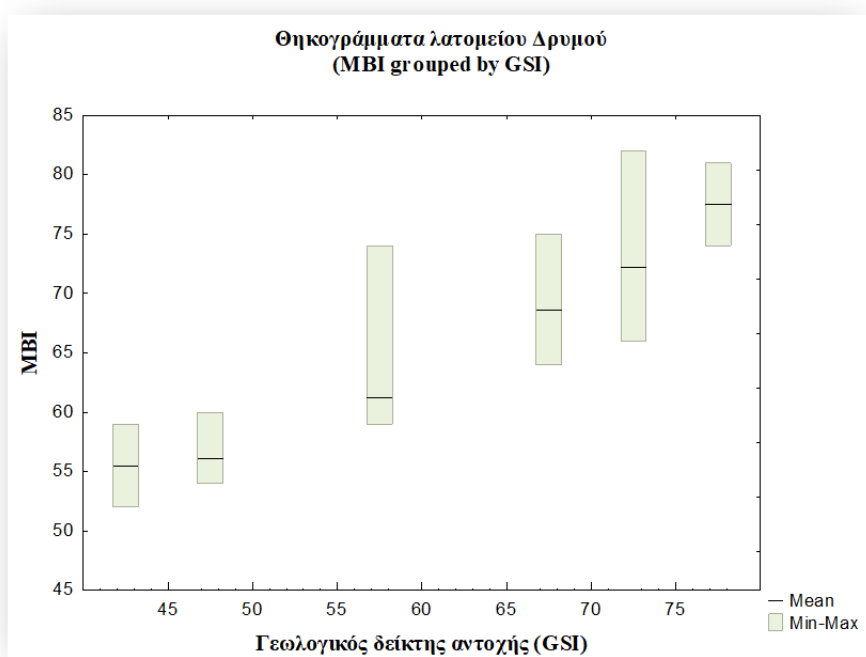
Καταγραφή	Ύψος Μετώπου (m)	Πλήθος Διατρημάτων	Βάθος Διατρημάτων (με υποδιάτρηση) (m)	Σειρές	Φορτίο (m)	Απόσταση (m)	Γόμωση (m)	Επιγόμευση (m)	GSI	Σφύρα Schmidt (MPa)	JPS (Joint Plane Spacing)	JPO (Joint Plane Orientation)	ANFO (kg)	Κυβισμός Διατρημάτων (t)	Αμμονίτης (kg)
1	8	21	9.5	3	5	5	7	2.5	35-40 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	50	10	30	1.814	14,691	50
2	13	15	15	3	5	5	9	6	30-35 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	60	10	40	2.16	13,927	25
3	8	14	9.5	2	5	5	7	2.5	35-42 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	60	10	30	1.344	9,794	25
4	13	17	15	3	5	5	9	6	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	53	10	20	2.448	10,541	25
5	13	17	15	2	5	5	9	6	48-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	65	20	40	2.448	19,224	30
6	11	11	12	2	5	5	7	5	35-40 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	60	10	40	1.232	10,669	20
7	12	11	14	2	5	5	9	5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	61	10	30	1.584	11,639	20
8	14	20	16	2	5	5	10	6	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	62	20	40	3.200	22,260	30
9	12	16	14	2	5	5	9	5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	60	10	30	2.304	15,264	25
10	12	20	14	2	5	5	9	5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	60	10	40	2.88	22,896	25
11	16	12	18	1	5	5	12	6	42-48 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	58	10	30	2.304	18,316	25
12	6.5	10	8	2	5	5	6	2	35-40 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	53	10	30	640	4,306	25
13	12	15	14	2	5	5	9.5	4.5	35-40 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	55	10	30	2.28	14,310	25
14	12	12	14	2	5	5	8	6	45-50 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	57	10	20	1.536	11,448	25
15	8	10	9	2	5	5	4.5	4.5	45-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	60	10	30	720	5,300	25
16	12	18	14	2	5	5	8	6	50-55 (τεμαχώδης-μέτρια)	64	20	40	2.304	17,172	25
17	12	7	14	1	5	5	8	6	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	57	10	30	896	8,013	25
18	16	10	18	2	5	5	10	8	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	68	10	30	896	5,300	25
19	12	19	14	2	5	5	8	6	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	62	10	40	2.432	18,126	25
20	12	4	13	1	5	5	8	5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	62	10	20	512	5,724	25
21	12	12	13.5	2	5	5	8	6	50-55 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	65	10	30	1.536	10,494	25
22	16	10	18	2	5	5	12	6	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	61	10	30	1.920	12,720	25
23	16	8	18	2	5	5	10	8	45-50 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	60	10	20	1.280	9,328	13
24	12	14	14	2	5	5	8	6	58-62 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	54	10	40	1.792	12,243	25
25	12	7	14	1	5	5	8	6	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	61	10	30	896	8,013	12.6
26	12	12	14	2	5	5	8	6	50-55 (τεμαχώδης-μέτρια)	53	20	30	1.536	10,494	21.6
27	12	13	14	2	5	5	8	6	48-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	65	10	30	1.664	13,547	23.4
28	8	10	9	2	5	5	4.5	4.5	48-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	55	10	30	720	5,300	18
29	12	12	13.5	2	5	5	9	4.5	58-63 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	63	10	30	1.728	12,592	21.6
30	12	9	13.5	2	5	5	9	4.5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	65	10	30	1.296	12,592	11.4
31	12	13	13.5	2	5	5	9	4.5	35-40 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	58	10	40	1.872	13,738	23.4
32	12	10	13.5	2	5	5	9	4.5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	65	10	30	1.440	15,264	18
33	12	14	13.5	2	5	5	9	4.5	46-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	60	10	40	2.016	14,692	24
34	12	13	13.5	2	5	5	9	4.5	46-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	57	10	20	1.872	13,547	18
35	12	10	13.5	2	5	5	9	4.5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	65	10	30	1.440	12,243	18
36	12	13	13.5	2	5	5	9	4.5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	65	10	30	1.872	15,264	23.4
37	12	13	13.5	2	5	5	9	4.5	50-55 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	65	10	30	1.872	15,264	23.4
38	12	12	13.5	2	5	5	9	4.5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	55	10	30	1.728	13,847	21.6
39	12	20	13.5	2	5	5	9	4.5	35-42 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	56	10	20	2.880	22,896	36
40	12	14	13.5	2	5	5	9	4.5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	58	10	30	2.016	13,356	25.2
41	12	12	13.5	2	5	5	9	4.5	58-63 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	64	10	30	1.728	13,847	21.6
42	12	13	13.5	2	5	5	9	4.5	55-60 (τεμαχώδης-μέτρια)	60	20	20	1.872	15,264	23.4
43	12	15	13.5	2	5	5	9	4.5	50-55 (τεμαχώδης-μέτρια)	58	20	20	2.160	14,692	27
44	12	10	13.5	2	5	5	9	4.5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	56	10	30	1.440	12,243	18
45	12	10	13.5	2	5	5	9	4.5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	55	10	30	1.440	12,243	18
46	12	12	13.5	2	5	5	9	4.5	45-52 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	52	10	30	1.728	13,847	21.6
47	12	15	13.5	2	5	5	9	4.5	50-55 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	65	10	30	2.160	18,316	27
48	12	12	13.5	2	5	5	9	4.5	35-42 (πολύ τεμαχώδης-φτωχή)	60	10	30	1.728	13,900	21.6
49	12	13	13.5	2	5	5	9	4.5	45-50 (πολύ τεμαχώδης-μέτρια)	57	10	30	1.872	15,264	23.4
50	12	11	13.5	2	5	5	9	4.5	55-60 (πολύ τεμαχώδης-καλή)	57	10	30	1.584	11,448	19.8

2^ο στάδιο εργασιών

Αφού αξιολογήθηκαν τα επί μέρους μέτωπα εξόρυξης πριν την υλοποίηση της εκάστοτε ανατίναξης και συγχρόνως συλλέχθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα όσον αφορά την πρακτική της, στη συνέχεια υπολογίστηκε ο Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας του ασβεστολίθου. Η εξίσωση κατά Lilly (1986), χρησιμοποιεί τρεις επί μέρους διαχωρισμούς για τον ορισμό της ποιότητας της βραχομάζας (αποδομημένη, τεμαχώδης και άρρηκτη), οι οποίοι στην παρούσα έρευνα αντικαταστάθηκαν με τις τιμές που προέκυψαν από την αξιολόγηση του ασβεστολίθου σύμφωνα με τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (Hoek & Marinos 2000). Η αντικατάσταση αυτή πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια η ποιότητα του ασβεστολιθικού σχηματισμού, με απώτερο στόχο να προκύψει ένας λεπτομερέστερος δείκτης εκρηκτικής ικανότητας ο οποίος θα αποκαλείται στο εξής ως τροποποιημένος Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας (Modified Blastability Index ή MBI). Όπως, αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 8 έχει προηγηθεί ήδη από Χατζηαγγέλου & Χρηστάρας (2015), η ανάπτυξη ενός συστήματος ταξινόμησης (BQS) της εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας σε σχέση με την ποιότητά της αποδίδοντάς την μέσω του GSI, έπειτα από έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων προσδιορισμού της βραχομάζας. Έτσι, λοιπόν, στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση κατά Lilly και σε συνδυασμό με το σύστημα BQS, προσδιορίστηκε ο τροποποιημένος Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας (MBI).

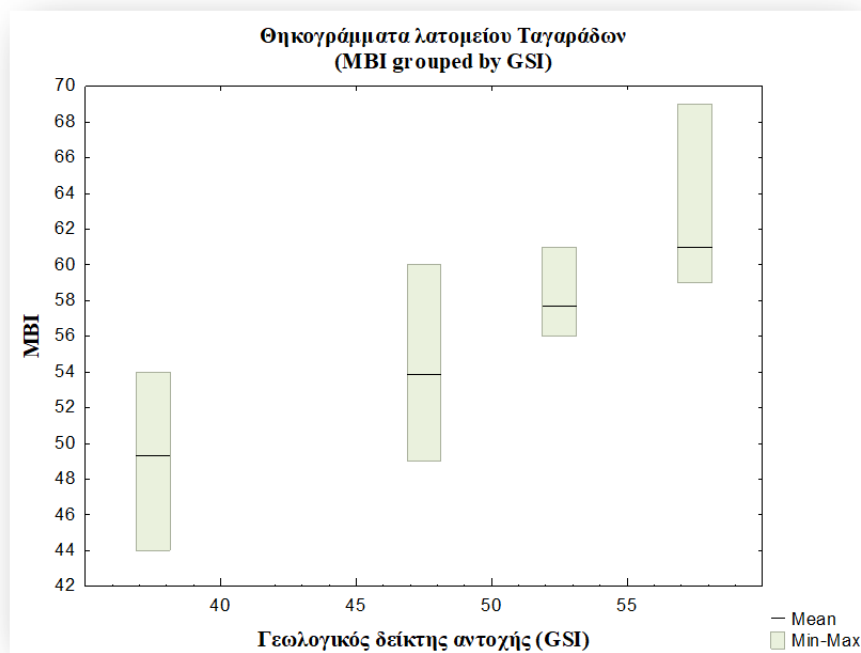
Από τα δεδομένα και ύστερα από τη στατιστική επεξεργασία τους προέκυψαν τα θηκογράμματα (boxplots), τα οποία αποδίδουν για κάθε παρατήρηση GSI το εύρος της τιμής του δείκτη εκρηκτικής ικανότητας. Τα θηκογράμματα παρουσιάζουν με εύστοχο τρόπο τόσο το κέντρο (μέση τιμή, διάμεσος) των παρατηρήσεων όσο και τον σκεδασμός τους (δηλαδή το μέτρο της μεταβλητότητας του συνόλου των δεδομένων) μέσω του ορθογώνιου πλαισίου από το οποίο αποτελούνται (Verzani 2014). Πιο συγκεκριμένα, τα παρόντα θηκογράμματα κατασκευάστηκαν προκειμένου να παρουσιάσουν την κατανομή του τροποποιημένου δείκτη εκρηκτικής ικανότητας, αφού ομαδοποιήθηκαν με βάση το GSI και στα οποία το κάτω και το άνω άκρο τους ορίζουν την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή αντίστοιχα, ενώ το εσωτερικό ευθύγραμμο τμήμα τους τη μέση τιμή. Στο Σχήμα 9.2.13 απεικονίζεται η ομαδοποίηση για το λατομείο του Δρυμού, όπου παρατηρείται ότι το MBI αυξάνεται με την αύξηση του

γεωλογικού δείκτη. Η ελάχιστη τιμή του MBI κυμαίνεται από 52 για χειρότερης ποιότητας βραχομάζα και μέχρι 74 για καλύτερης ποιότητας ασβεστολίθου. Από την άλλη πλευρά η μέγιστη τιμή εκρηκτικής ικανότητας για τεμαχώδη ασβεστόλιθο με καλή ποιότητα ασυνεχειών μπορεί να φτάσει μέχρι και 81. Ενώ, η χειρότερη ποιότητα που χαρακτηρίζεται ως πολύ τεμαχώδης με φτωχή ποιότητα ασυνεχειών, το MBI μπορεί να προσδιοριστεί μέχρι και 58. Επιπλέον, η μέση τιμή του τροποποιημένου δείκτη εκρηκτικής ικανότητας παρουσιάζει αυξητική τάση και κυμαίνεται από 56 έως 78.



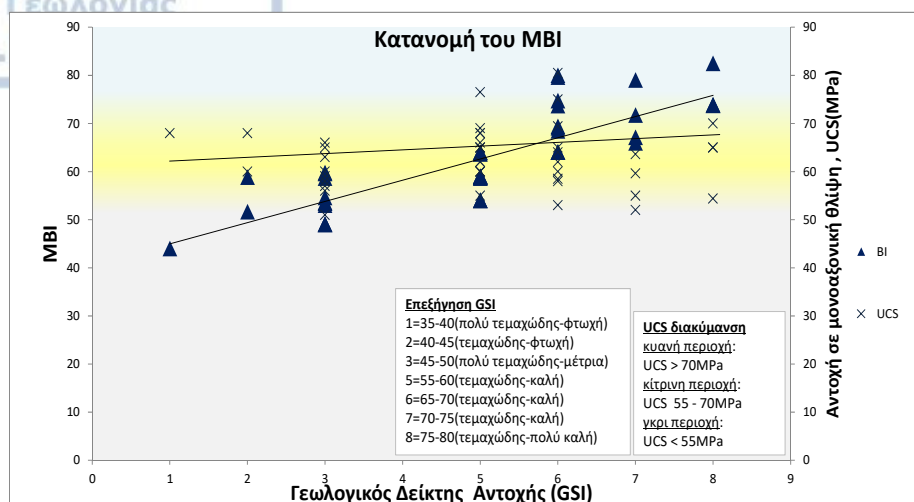
Σχήμα 9.2.13. Θηκογράμματα κατανομής του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI) σε σχέση με τον Γεωλογικό δείκτη αντοχής, για το λατομείο Δρυμού.

Από την άλλη πλευρά, τα αντίστοιχα θηκογράμματα για το λατομείο των Ταγαράδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.2.14. Η μέση τιμή του MBI κυμαίνεται σε μικρότερα επίπεδα συγκριτικά με το λατομείο του Δρυμού, δηλαδή από 49 έως 61, καθώς και οι τιμές του GSI κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα. Ειδικότερα, το MBI κυμαίνεται μεταξύ 59 και 69 για ποιότητα ασβεστολίθου μεταξύ 60-65 (τεμαχώδης-καλή ποιότητα ασυνεχειών). Ενώ στην περίπτωση που η βραχομάζα χαρακτηρίζεται με χειρότερη ποιότητα, η ελάχιστη τιμή του MBI είναι 44 και η μέγιστη 54.



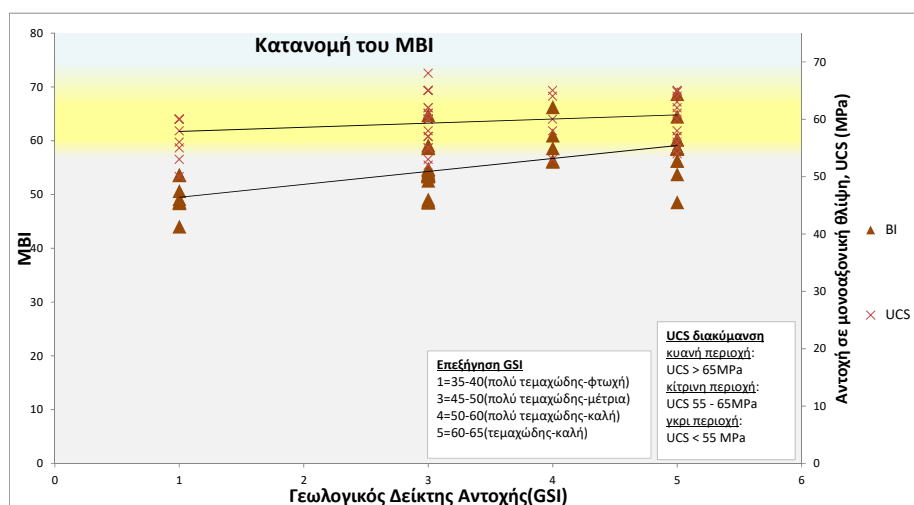
Σχήμα 9.2.14. Θηκογράμματα κατανομής του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI) σε σχέση με τον Γεωλογικό δείκτη αντοχής, για το λατομείο Ταγαράδων.

Έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο ότι η σκληρότητα του πετρώματος αποτελεί έναν παράγοντα επιρροής στον τροποποιημένο Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας, ωστόσο δεν ασκεί τόσο μεγάλη επίδραση όσο οι υπόλοιποι. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις στα δύο λατομεία έρευνας και η κατανομή τους σε σχέση με τη δομή του ασβεστολιθικού πετρώματος, την εκρηκτικότητά του και την σκληρότητα. Στο Σχήμα 9.2.15 απεικονίζεται η διακύμανση του MBI, στο λατομείο του Δρυμού, συναρτήσει της ποιότητας της βραχομάζας, όπου είναι εμφανής η αυξητική τάση του, λαμβάνοντας υπόψη και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η οποία παρουσιάζει μία ελαφριά ανοδική τάση. Παρατηρώντας το σχήμα, γίνεται αντιληπτό ότι στην περιοχή του διαγράμματος όπου το GSI κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα, με τιμές αντοχής από 55 MPa έως 70 MPa, το σύνολο των τιμών του MBI έχει εύρος μεταξύ 40 και 65. Χαρακτηριστικό είναι το δεξί τμήμα του διαγράμματος (με πολύ καλύτερη δομή του ασβεστολίθου), στο οποίο ενώ οι τιμές της αντοχής είναι μικρές, μεταξύ 52 MPa και 60 MPa, οι τιμές του MBI κινούνται σε υψηλά επίπεδα (60 έως 80). Από αυτό γίνεται κατανοητό το γεγονός της σημαντικής επίδρασης που ασκεί η ποιότητα της βραχομάζας στην εκρηκτική ικανότητα, έναντι της αντοχής της.



Σχήμα 9.2.15. Διακύμανση του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI) συναρτήσει του GSI και της μονοαξονικής αντοχής, για το λατομείο Δρυμού.

Αντίστοιχα αποτελέσματα απεικονίζονται στο παρακάτω Σχήμα 9.2.16 για το λατομείο Ταγαράδων. Στο παρόν λατομείο οι τιμές της εκρηκτικής ικανότητας είναι μικρότερες, καθώς και το GSI κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα, όπως και οι τιμές της αντοχής δεν ξεπερνούν τα 65MPa. Στην περίπτωση που ο ασβεστόλιθος περιγράφεται με GSI ως πολύ τεμαχώδης με μέτρια έως φτωχή ποιότητα ασυνεχειών και αντοχή 55-65MPa, το MBI κυμαίνεται από 44 έως 60. Στις υπόλοιπες παρατηρήσεις, στις οποίες η αντοχή είναι περίπου η ίδια με τις καταγραφές στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος, αλλά η δομή γίνεται καλύτερη, γίνεται φανερή η αύξηση των τιμών του MBI.



Σχήμα 9.2.16. Διακύμανση του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI) συναρτήσει του GSI και της μονοαξονικής αντοχής, για το λατομείο Ταγαράδων.

3^ο στάδιο εργασιών

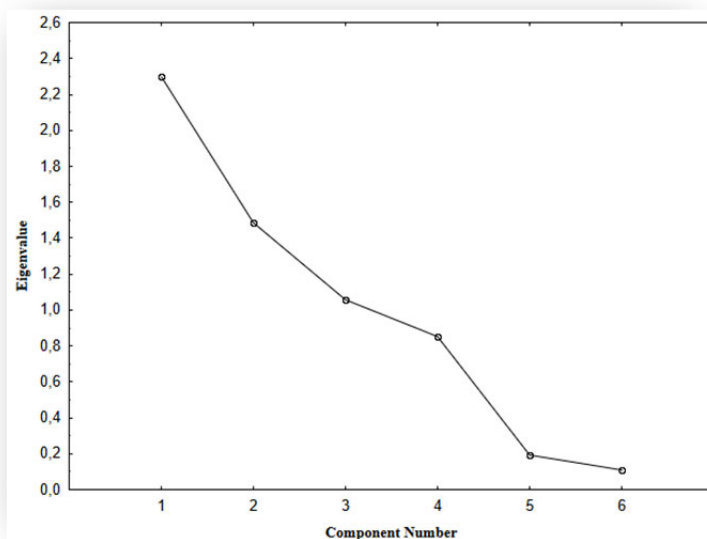
Στο κεφάλαιο 8 αναφέρθηκε εκτενώς η διαδικασία ποσοτικοποίησης και αξιολόγησης του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών, από την κάθε ανατίναξη που καταγράφηκε στα δύο λατομεία αδρανών υλικών, με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού ανάλυσης εικόνας WipFrag 3.0[®]. Παράλληλα διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ του αποτελέσματος από τη χρήση του εν λόγω λογισμικού και του αντίστοιχου όμοιου από την εφαρμογή της μαθηματικής εξίσωσης Kuz-Ram Model 1987, για την εύρεση της κοκκομετρίας του υλικού. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων, προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της εκρηκτικής ικανότητας του ασβεστολίθου στο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών. Σύμφωνα με τους Nur, Hareyani, Kamar, Hazizan (2015), οι παράγοντες οι οποίοι ασκούν σημαντική επιρροή στο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών είναι οι ασυνέχειες που αναπτύσσονται στο μέτωπο της εξόρυξης, τα χαρακτηριστικά της δομής της βραχομάζας και η αντοχή της. Οι απόψεις αυτές βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που εξάγονται στην παρούσα έρευνα, καθώς το σύνολο των παραμέτρων αυτών που προέκυψαν από τις καταγραφές, αναλύθηκαν εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η *παραγοντική ανάλυση* (factor analysis), η οποία αποτελεί μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος πολυμεταβλητής ανάλυσης. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η ικανότητα να περιγράφει μία ομάδα μεγάλου αριθμού δεδομένων με έναν πολύ μικρό αριθμό παραγόντων (factors), που να εκφράζουν με υψηλά ποσοστά διακύμανσης (variance) τις αρχικές μεταβλητές, (Βουδούρης 2004). Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των παραγόντων που εξάγεται είναι δυνατόν να αποτελέσει μία ένδειξη του αριθμού των αιτιών που προκαλούν τη διακύμανση των δεδομένων (Sandow et al. 2008). Πρακτικά, οι παράγοντες είναι διανύσματα που αντιπροσωπεύουν μία ομάδα ισχυρά συσχετιζόμενων μεταβλητών και οι συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών με τους παράγοντες ονομάζονται παραγοντικά φορτία (loadings). Η ένταση της σχέσης είναι εξαιρετικά ισχυρή σε τιμές κοντά στο ± 1.00 (ισχυρή θετική ή αρνητική συσχέτιση) και ασήμαντη σε τιμές κοντά στο μηδέν. Έτσι, όσο υψηλότερα είναι τα φορτία τόσο σημαντικότερες είναι οι υποψήφιες μεταβλητές για το σχηματισμό των κύριων συνιστωσών. Η διαδικασία

αυτή περιλαμβάνει την ανάλυση κυρίων συνιστωσών (Principal Components Analysis), στην οποία σκοπός είναι να αποδώσει το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής διακύμανσης με ένα μικρό αριθμό συνιστωσών (Βουδούρης 2004). Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε για να αποδώσει τον βαθμό επίδρασης των διαφόρων παραγόντων σχετικών με τη βραχομάζα και την εκρηκτική ύλη, στο μέγεθος των αποσπώμενων τεμαχίων. Βασικός, λοιπόν, στόχος της ανάλυσης αυτής είναι να εντοπίσει ένα μικρό αριθμό παραγόντων, που να ερμηνεύει σε μεγάλο ποσοστό τη διακύμανση των δεδομένων. Έτσι, αποκαλύπτονται οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών και του βαθμού συσχέτισής τους κατά την υλοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο.

Μέτρο καταλληλότητας της δειγματοληψίας αποτελεί ο δείκτης Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), που συγκρίνει τους παρατηρούμενους συντελεστές συσχέτισης με τους συντελεστές μερικής συσχέτισης. Οι τιμές μεγαλύτερες του 0.5 υποδηλώνουν ότι η παραγοντική ανάλυση είναι αποδεκτή ως μέθοδος στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων (Βουδούρης 2004). Έτσι, λοιπόν, για τα δεδομένα της παρούσας έρευνας υπολογίστηκε μέσω του στατιστικού προγράμματος «Statistica®», ότι ο δείκτης KMO είναι 0.61 για τα δεδομένα του Δρυμού και 0.60 για τα δεδομένα των Ταγαράδων, αποτελώντας αποδεκτή τιμή για την εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στα δεδομένα.

Από την εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στα δεδομένα του λατομείου του Δρυμού προκύπτει ότι δύο παράγοντες ερμηνεύουν συνολικά το 63% της ολικής διακύμανσης. Επιπλέον, κριτήριο επιλογής των παραγόντων αποτελεί το Σχήμα 10.2.17, το οποίο ονομάζεται κριτήριο “Cattell’s Scree-test”. Σε αυτό το διάγραμμα απεικονίζεται ο αριθμός των κυρίων συνιστωσών σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιοτιμές (eigenvalues) και επιλέγονται εκείνοι οι παράγοντες που αντιστοιχούν σε ιδιοτιμές (δείχνουν το ποσοστό της ολικής διακύμανσης, κάθε παράγοντα) μεγαλύτερες της μονάδας (Cattel 1978).



Σχήμα 9.2.17. Διάγραμμα απεικόνισης των παραγόντων σε σχέση με τις ιδιοτιμές.

Στον Πίνακα 9.2.4 παρουσιάζονται τα παραγοντικά φορτία για κάθε μία μεταβλητή, όπως εξήχθησαν από την εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης, μέσω του στατιστικού προγράμματος «Statistica®». Ο πρώτος παράγοντας εκφράζει το 38% της ολικής διακύμανσης και χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο ισχυρά συσχετιζόμενων μεταβλητών που αφορούν την περιγραφή της βραχομάζας και το μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών. Παρουσιάζει υψηλά παραγοντικά φορτία στις μεταβλητές του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (0.91), του Γεωλογικού δείκτη αντοχής (0.84) και του μεγέθους των τεμαχών (0.79). Ο δεύτερος παράγοντας εκφράζει το 25% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων, και αποτελείται από μεταβλητές με υψηλή συσχέτιση που αφορούν την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (-0.87) και το μέγεθος των αποσπώμενων τεμαχών (0.82).

Πίνακας 9.2.4. Παραγοντικά φορτία μεταβλητών για το λατομείο του Δρυμού.

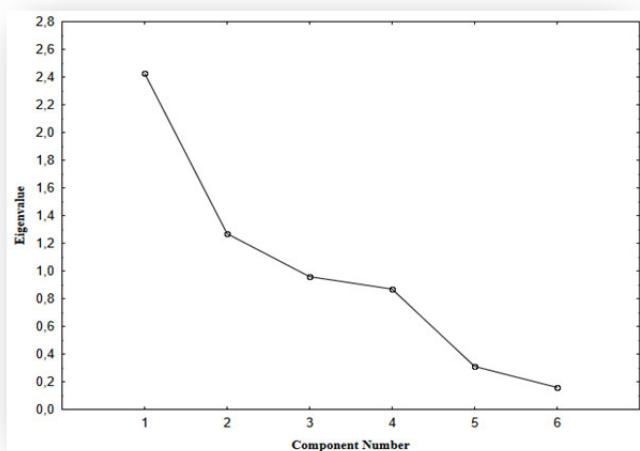
Variable	Factor Loadings (Varimax normalized) (Data_Drymos) Extraction: Principal components (Marked loadings are >,700000)	
	Factor 1	Factor 2
GSI	0,840046	0,431950
UCS	0,148104	0,146359
PF	-0,181526	-0,879675
Tn	0,235205	-0,412604
Xav	0,798576	0,826181
MBI	0,919280	0,293743
Prp.Totl	0,383114	0,247757

Επίσης, από τη στατιστική ανάλυση προέκυψε ο πίνακας των συντελεστών συσχέτισης των μεταβλητών (correlation coefficient matrix), (Πίνακας 9.2.5). Απεικονίζει τους συντελεστές συσχέτισης οι οποίοι διευθετούνται υπό μορφή πίνακα, δίνοντας την αλληλοσυσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. Από την παρατήρηση του παρακάτω πίνακα προκύπτει ότι το μέσο μέγεθος των τεμαχών (X_{av}) που προκύπτουν μετά την ανατίναξη επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου ($r=0.70$), από τη δομή του ($r=0.60$) και από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης εκφρασμένη σε Powder Factor (ANFO kg/m^3), ($r=-0.62$).

Πίνακας 9.2.5. Συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών για το λατομείο του Δρυμού.

Variable	Correlations (Data_Drymos) Casewise deletion of MD N=47					
	GSI	UCS	PF	Tn	Xav	MBI
GSI	1,00	0,04	0,20	0,05	0,60	0,86
UCS	0,04	1,00	0,03	-0,10	0,09	0,13
PF	0,20	0,03	1,00	-0,10	-0,62	0,07
Tn	0,05	-0,10	-0,10	1,00	0,26	0,05
Xav	0,60	0,09	-0,62	0,26	1,00	0,70
MBI	0,86	0,13	0,07	0,05	0,70	1,00

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και με τα δεδομένα του λατομείου Ταγαράδων. Το 61% της ολικής διακύμανσης των μεταβλητών ερμηνεύεται από δύο παράγοντες, όπως προκύπτει από το διάγραμμα στο Σχήμα 9.2.18.



Σχήμα 9.2.18. Διάγραμμα απεικόνισης των παραγόντων σε σχέση με τις ιδιοτιμές.

Ψηφιακή συλλογή
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

Από την εφαρμογή της μεθόδου της παραγοντικής ανάλυσης προέκυψαν τα παραγοντικά φορτία για κάθε μία μεταβλητή και παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2.6. Ο πρώτος παράγοντας εκφράζει το 33% της ολικής διακύμανσης και χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο ισχυρά συσχετιζόμενων μεταβλητών που αφορούν τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας και το μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών. Παρουσιάζει υψηλά παραγοντικά φορτία στις μεταβλητές του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (0.93), του Γεωλογικού δείκτη αντοχής (0.93) και του μεγέθους των τεμαχών (0.80). Ο δεύτερος παράγοντας εκφράζει το 28% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων, και αποτελείται από μεταβλητές με υψηλή συσχέτιση που αφορούν την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (-0.85) και το μέγεθος των αποσπώμενων τεμαχών (0.77).

Πίνακας 9.2.6. Παραγοντικά φορτία μεταβλητών για το λατομείο Ταγαράδων.

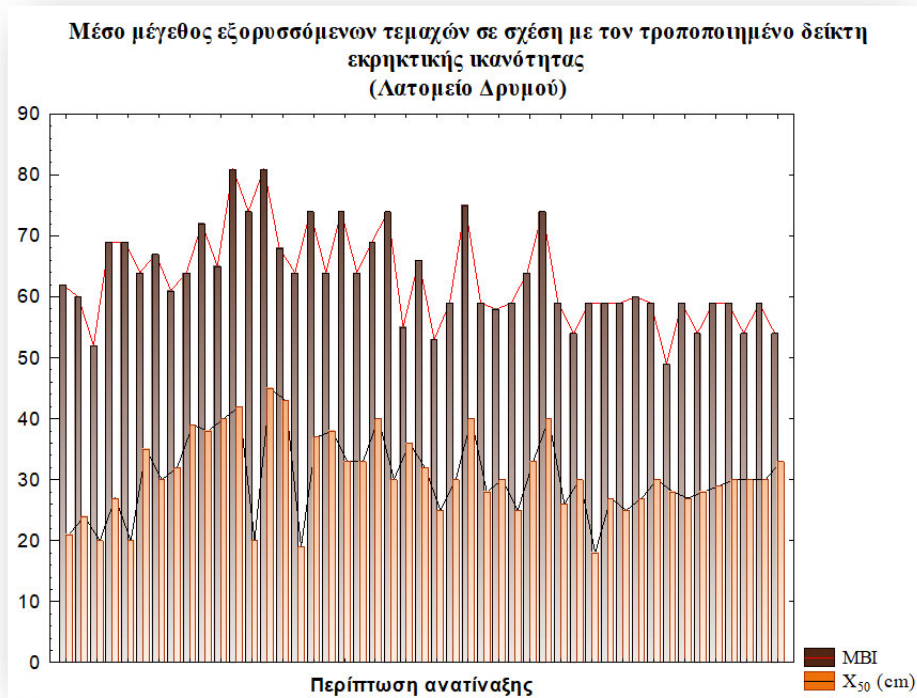
Variable	Factor Loadings(Varimax normalized) Extraction: Principal components (Marked loadings are >,700000)	
	Factor 1	Factor 2
GSI	0,935079	0,081590
UCS	0,217217	0,405801
PF	0,111552	-0,856602
Tn	0,041185	0,411150
Xav	0,804101	0,776508
MBI	0,939360	0,154056
Prp.Totl	0,332993	0,283474

Ο πίνακας των συντελεστών συσχέτισης των μεταβλητών, (Πίνακας 9.2.7) παρουσιάζει τις αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων. Παρατηρώντας τον παρακάτω πίνακα συμπεραίνεται ότι το μέσο μέγεθος των τεμαχών (X_{av}) που προκύπτουν μετά την ανατίναξη επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου ($r=0.65$), από τη δομή του ($r=0.60$) και από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης εκφρασμένη σε Powder Factor ($ANFO\ kg/m^3$), ($r=-0.70$).

Πίνακας 9.2.7. Συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών για το λατομείο των Ταγαράδων.

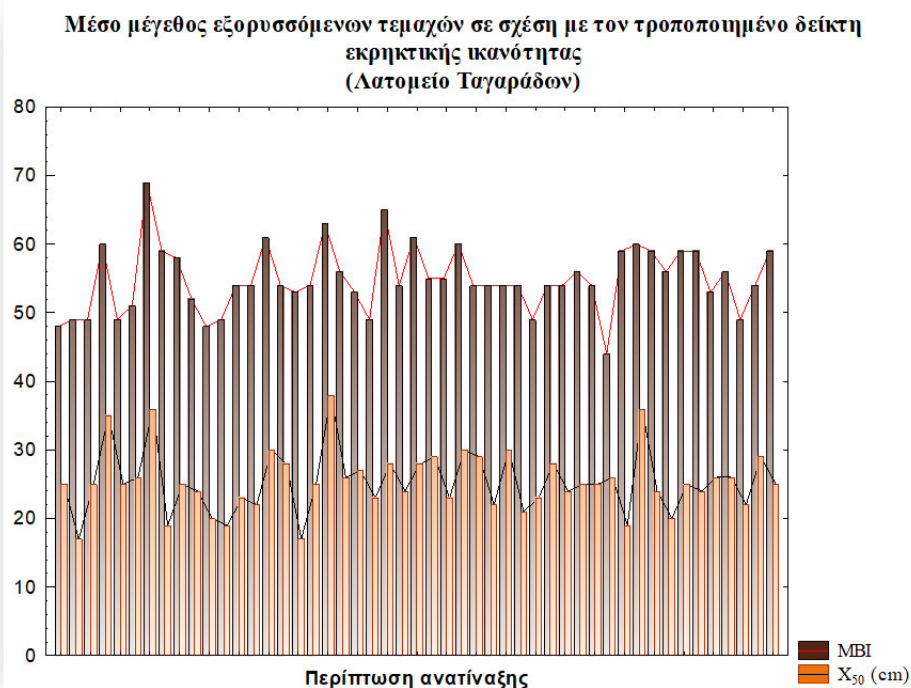
Variable	Correlations (Tagarades_Data) Casewise deletion of MD N=49					
	GSI	UCS	PF	Tn	Xav	MBI
GSI	1,00	0,19	-0,06	0,03	0,41	0,82
UCS	0,19	1,00	-0,15	0,12	0,23	0,19
PF	-0,06	-0,15	1,00	-0,07	-0,70	0,05
Tn	0,03	0,12	-0,07	1,00	0,23	0,13
Xav	0,60	0,23	-0,70	0,23	1,00	0,65
MBI	0,82	0,19	-0,05	0,13	0,65	1,00

Στα διαγράμματα που ακολουθούν εξετάζεται η διακύμανση των τιμών του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας του ασβεστολιθικού πετρώματος σε σχέση με το μέσο μέγεθος των τεμαχών που προκύπτουν μετά την υλοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης. Εκτός από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης, η εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας, γίνεται φανερό και μέσω της παραγοντικής ανάλυσης, παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά της και στο αποτέλεσμα που θα προκύψει στην εξορυσσόμενη σωρό. Η εκρηκτική ικανότητα, όπως αναλύθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 7, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή και την ποιότητά της. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 9.2.19 αναπαριστάται η μεταβολή της εκρηκτικής ικανότητας σε σύγκριση με το μέσο μέγεθος των τεμαχών για το λατομείο του Δρυμού. Από την παρατήρηση του σχήματος, γίνεται αντιληπτό ότι η μεταβολή του μέσου μεγέθους ακολουθεί, σε μεγάλο μέρος των καταγραφών, τη μεταβολή των τιμών της εκρηκτικής ικανότητας. Ειδικότερα, αυτό γίνεται πιο φανερό στο τμήμα του διαγράμματος στο οποίο το MBI έχει τη μέγιστη τιμή 81 και το αντίστοιχο μέσο μέγεθος των τεμαχών ορίζεται στη μεγαλύτερη σχεδόν τιμή στα 45 cm, ενώ στην περίπτωση που το MBI κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (περίπου 52), τότε και το μέσο μέγεθος κυμαίνεται σε μικρές τιμές μεταξύ 18 με 22 cm.



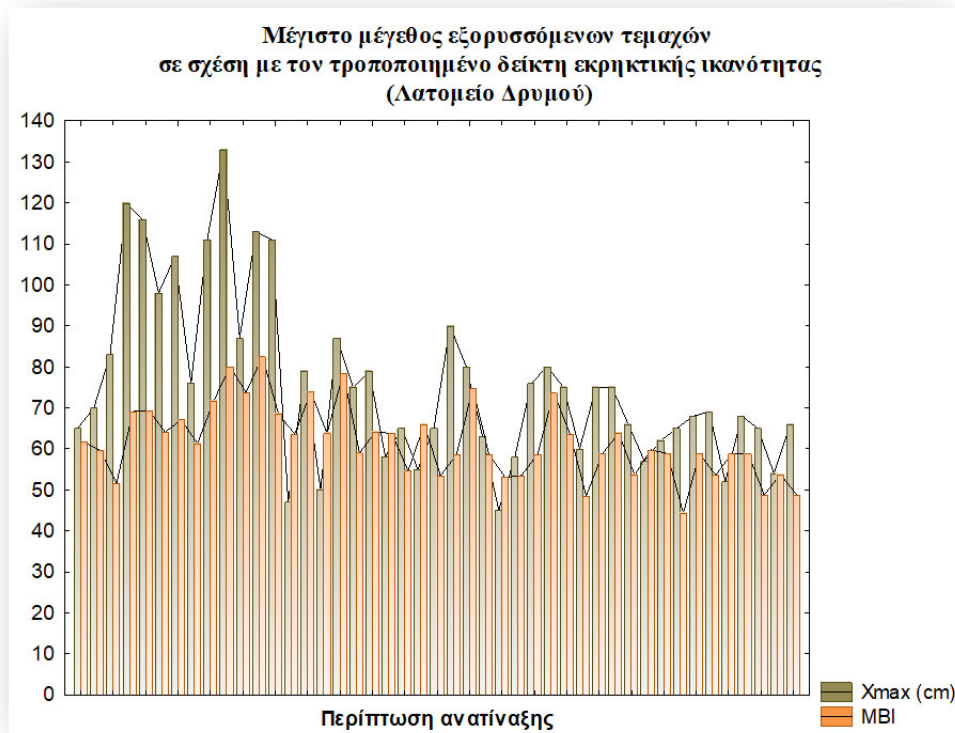
Σχήμα 9.2.19. Διακύμανση των τιμών της εκρηκτικής ικανότητας σε σύγκριση με τις τιμές του μέσου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχίων.

Παράλληλα, αντίστοιχο διάγραμμα πραγματοποιήθηκε για την απεικόνιση της διακύμανσης των τιμών της εκρηκτικής ικανότητας του ασβεστολίθου και του αντίστοιχου μέσου μεγέθους των τεμαχίων όπως προσδιορίστηκαν μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για το λατομείο Ταγαράδων, (Σχήμα 9.2.20). Όμοια συνθήκη επικρατεί και σε αυτές τις καταγραφές, όπου είναι χαρακτηριστικό ότι η μικρότερη τιμή του MBI (44) περιγράφεται από αντίστοιχη μικρή τιμή μεγέθους τεμαχίων (17 cm). Ενώ οι υψηλότερες μεγέθους καταγραφές αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολιθικού πετρώματος.



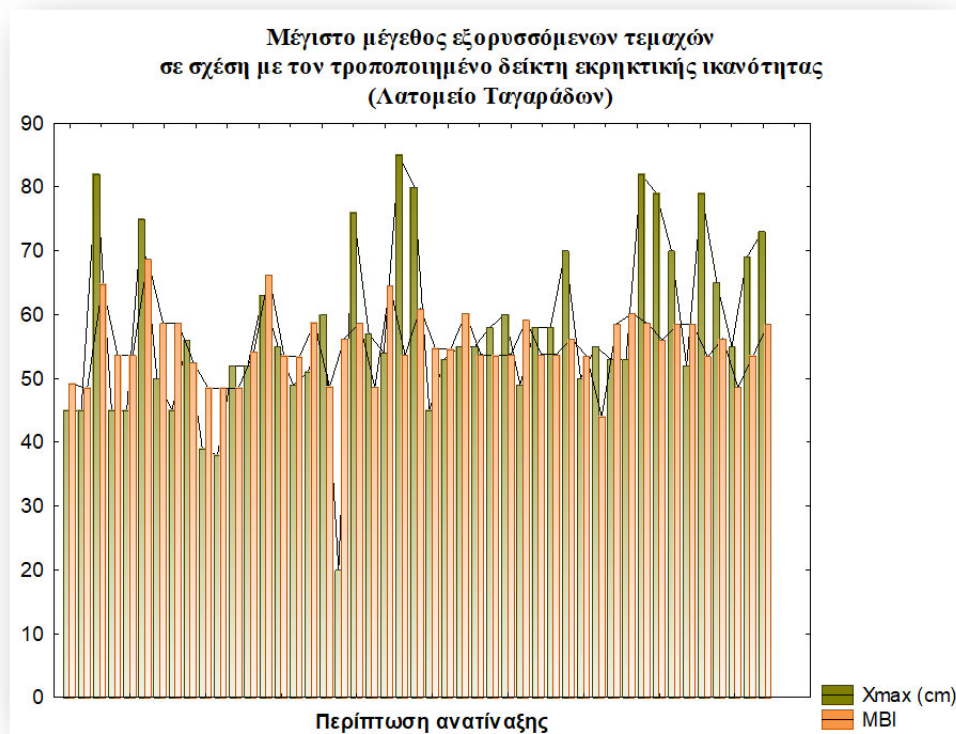
Σχήμα 9.2.20. Διακύμανση των τιμών της εκρηκτικής ικανότητας σε σύγκριση με τις τιμές του μέσου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχίων.

Στα επόμενα διαγράμματα απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές του μεγέθους των αποσπώμενων τεμαχίων σε σχέση με την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου, στα οποία διακρίνεται η δημιουργία μεγάλων ογκολίθων σε κάποιες περιπτώσεις, καθώς το μέγεθος ξεπερνά το 1.0m. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 9.2.21 παρουσιάζονται οι παράμετροι αυτές για το λατομείο του Δρυμού, όπου εντοπίζονται ογκόλιθοι μεγέθους από 1.10m έως 1.33m, οι οποίοι αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές GSI (70-80), όπου η βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως τεμαχώδης με καλή ποιότητα ασυνεχειών και αντίστοιχα το MBI κυμαίνεται μεταξύ 69 και 80.



Σχήμα 9.2.21. Διακύμανση των τιμών του μέγιστου μεγέθους των αποσπώμενων τεμαχίων σε σχέση με την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου.

Αντίστοιχο διάγραμμα δημιουργήθηκε και για το λατομείο των Ταγαράδων, όπου σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι το μέγιστο μέγεθος των ογκολίθων δεν ξεπερνά τα 80 cm με 85 cm, μικρότερο σε σχέση με το λατομείο του Δρυμού. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη αυτά αντιστοιχούν σε χειρότερη ποιότητα ασβεστολίθου με GSI από 45 έως 55 (τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών) και MBI από 55 έως 65. Από την παρατήρηση των καταγραφών αυτών, προκύπτει η σημασία της εκρηκτικής ικανότητας του ασβεστολίθου και κατ' επέκταση η δομή και η ποιότητά του, στο τελικό αποτέλεσμα και μάλιστα στο μέγεθος των πιθανών μεγάλων ογκολίθων που είναι δυνατόν να παραχθούν στην εξορυσσόμενη σωρό, (Σχήμα 9.2.22).



Σχήμα 9.2.22. Διακύμανση των τιμών του μέγιστου μεγέθους των αποσπώμενων τεμαχίων σε σχέση με την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου.

4^ο στάδιο εργασιών

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τα παραπάνω στάδια, έπειτα από τη στατιστική τους επεξεργασία, συνδυάστηκαν προκειμένου να δημιουργηθούν διαγράμματα-νομογράμματα, με σκοπό τον προσδιορισμό των επί μέρους παραμέτρων κατά το στάδιο υλοποίησης της ανατίναξης. Απώτερος στόχος, λοιπόν, είναι με τη χρήση αυτών των νομογραμμάτων να είναι δυνατή η εκτίμηση του αποτελέσματος της ανατίναξης, πριν αυτή λάβει χώρα στο εκάστοτε μέτωπο εξόρυξης στα λατομεία αδρανών υλικών. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί, ότι οι καταγραφές οι οποίες λήφθηκαν από τα δύο συγκεκριμένα λατομεία, διέπονται από συγκεκριμένα γεωμετρικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά, τα οποία αναφέρθηκαν αναλυτικά στον Πίνακα 9.2.1. Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρατίθενται με τη σειρά που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται, προκειμένου να εξαχθεί το τελικό αποτέλεσμα.

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα νομόγραμμα το οποίο βασίζεται στη γεωτεχνική ταξινόμηση του ασβεστολίθου σύμφωνα με το διάγραμμα του GSI και δίνει τη

δυνατότητα άμεσης εκτίμησης του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI). Η εκτίμηση αυτή προκύπτει από την επί τόπου οπτική παρατήρηση του ασβεστολίθου στο μέτωπο της εξόρυξης, και αφού πρώτα προσδιοριστεί ο προσανατολισμός των κύριων ασυνεχειών ως προς αυτό, (Σχήμα 9.2.23). Έτσι, λοιπόν, για την εύρεση της εκρηκτικής ικανότητας αξιολογείται αρχικά το εύρος του GSI και αφού έχει οριστεί η περιοχή αυτή, στη συνέχεια εκτιμάται η μέση τιμή του. Έπειτα, προβάλλεται η μέση τιμή στον αντίστοιχο οριζόντιο άξονα και εν τέλει εκτιμάται η εκρηκτική ικανότητα.

Το διάγραμμα που προέκυψε αφορά τις τεμαχώδεις και πολύ τεμαχώδεις δομές του ασβεστολίθου, καθώς ο σχηματισμός στα μέτωπα της εξόρυξης, έχει υποστεί τόσο την έντονη συμπίεστική τεκτονική σε βάθος γεωλογικών χρόνων, κατά το Τριτογενές και το Α.Ιουρασικό - Κ.Κρητιδικό, (βλέπε κεφάλαιο 7) αλλά και τις διαταράξεις από την επανειλημμένη πραγματοποίηση των ανατινάξεων. Αυτό καθιστά δύσκολη την εύρεση αδιατάρακτης βραχομάζας, αλλά και από την άλλη η ισχυρά κερματισμένη – αποδιοργανωμένη βραχομάζα δεν απαιτεί τη χρήση εκρηκτικής ύλης παρά μόνο η εκσκαφή της επιτυγχάνεται με συμβατικά μηχανικά μέσα. Από την παρατήρηση του διαγράμματος προκύπτει ότι στην περίπτωση που η δομή του ασβεστολίθου χαρακτηρίζεται πολύ τεμαχώδης, με πολύ καλή έως πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, τότε η εκρηκτική του ικανότητα κυμαίνεται από 49 έως 70 για ασυνέχειες με κλίση αντίρροπη του πρανούς, από 39 έως 60 με κλίση ομόρροπη του μετώπου και από 42 έως 66 για ασυνέχειες με άλλο προσανατολισμό. Από την άλλη πλευρά, όταν η δομή του ασβεστολίθου γίνεται καλύτερη και χαρακτηρίζεται τεμαχώδης, τότε οι αντίστοιχες τιμές του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας είναι υψηλότερες και πιο συγκεκριμένα κυμαίνονται από 52 έως 78 για ασυνέχειες με άλλο προσανατολισμό, από 47 έως 72 με κλίση ομόρροπη του μετώπου και από 57 έως 83 για ασυνέχειες με κλίση αντίρροπη του πρανούς.

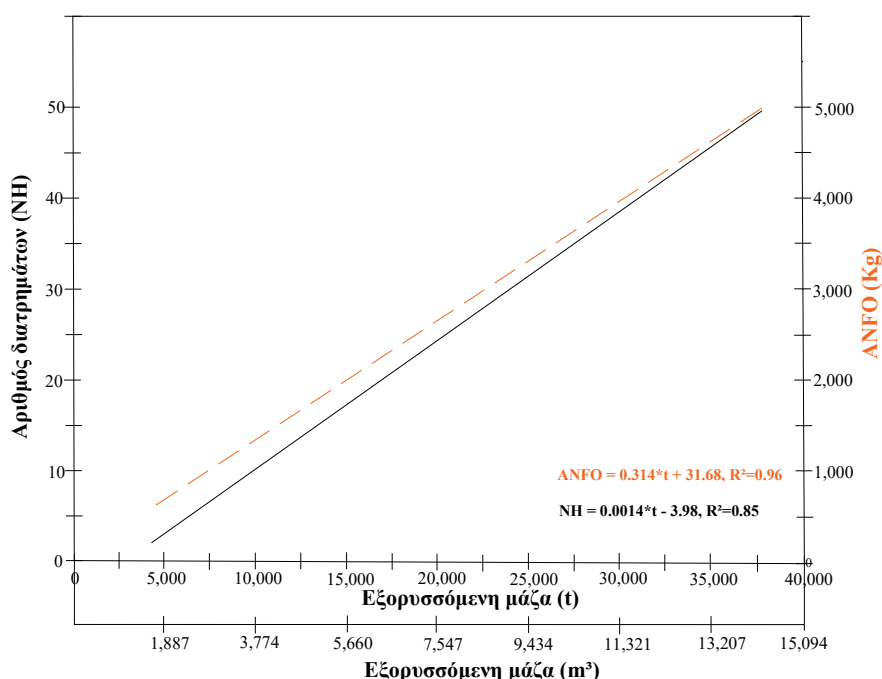
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ



Σχήμα 9.2.23. Διάγραμμα εκτίμησης του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI) των ασβεστολίθων με τεμαχώδη και πολύ τεμαχώδη δομή μέσω του Γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI). Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις ανάλογα με τον προσανατολισμό του κύριου συστήματος ασυνεχειών ως προς το μέτωπο της εξόρυξης.

Από την άλλη πλευρά, τόσο το πλήθος των διατρημάτων που διανοίγονται στο μέτωπο όσο και η ποσότητα του ANFO που απαιτείται για την εξόρυξη, συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την ποσότητα της εξορυσσόμενης ύλης, (Σχήμα 9.2.24). Οι εξισώσεις που προέκυψαν από το σύνολο των καταγραφών, που αποδίδουν την μία παράμετρο σε σχέση με την άλλη, περιγράφονται από έναν σημαντικό συντελεστή προσδιορισμού. Πιο συγκεκριμένα η ποσότητα ANFO προσδιορίζεται κατά 96% σε σχέση με τους τόνους της εξορυσσόμενης ύλης, ενώ το πλήθος των διατρημάτων κατά 85% σε σχέση με την ποσότητα του αποσπώμενου υλικού.

Συνεπώς, αποτελεί έναν εύκολο τρόπο προσδιορισμού της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO που χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί στο εκάστοτε μέτωπο εξόρυξης. Ειδικότερα, αρχικά ορίζεται η ποσότητα της εξορυσσόμενης μάζας (είτε σε τόνους είτε σε κυβικά μέτρα) που είναι επιθυμητή να αποσπαστεί από το μέτωπο και στη συνέχεια το σημείο αυτό προεκτείνεται κατακόρυφα έως ότου τέμνει τις δύο ευθείες. Η πρώτη, συνεχόμενη ευθεία που θα συναντήσει αντιπροσωπεύει τον αριθμό των διατρημάτων που θα πρέπει να διανοιχτούν στο μέτωπο και προβάλλεται στον αριστερό κατακόρυφο άξονα. Η δεύτερη, διακεκομμένη ευθεία, που συναντά αφορά την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ANFO που είναι απαραίτητη να καταναλωθεί για την υλοποίηση της ανατίναξης και προβάλλεται στον δεξί κατακόρυφο άξονα.

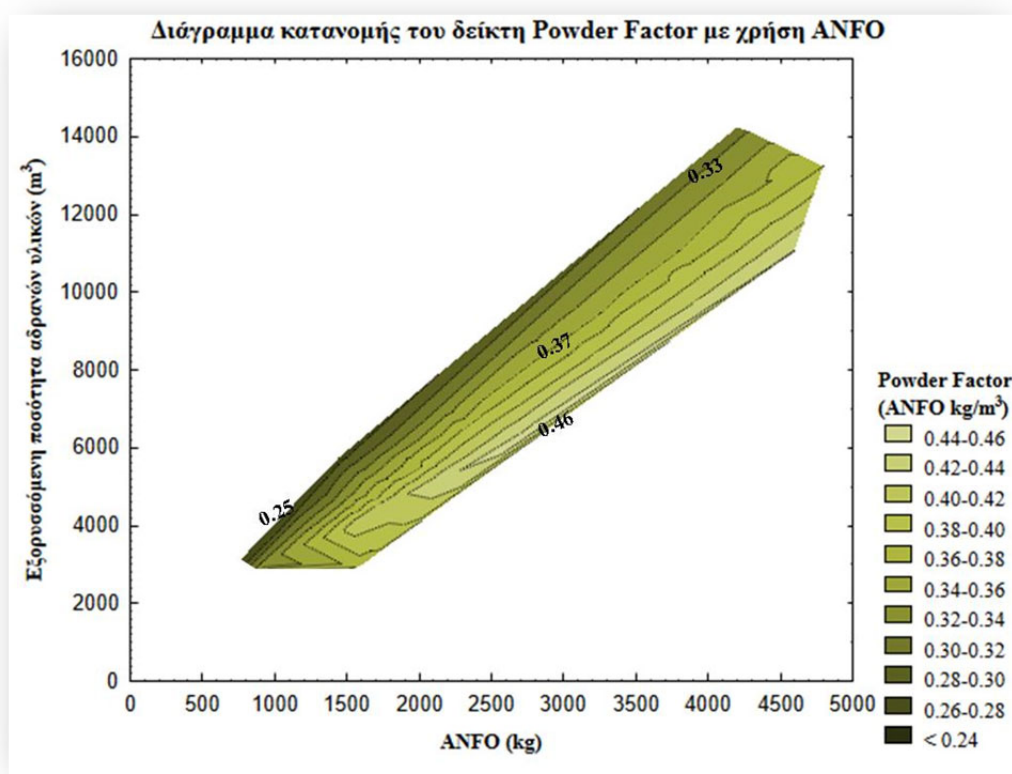


Σχήμα 9.2.24. Προσδιορισμός της ποσότητας ANFO και του αριθμού των διατρημάτων.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

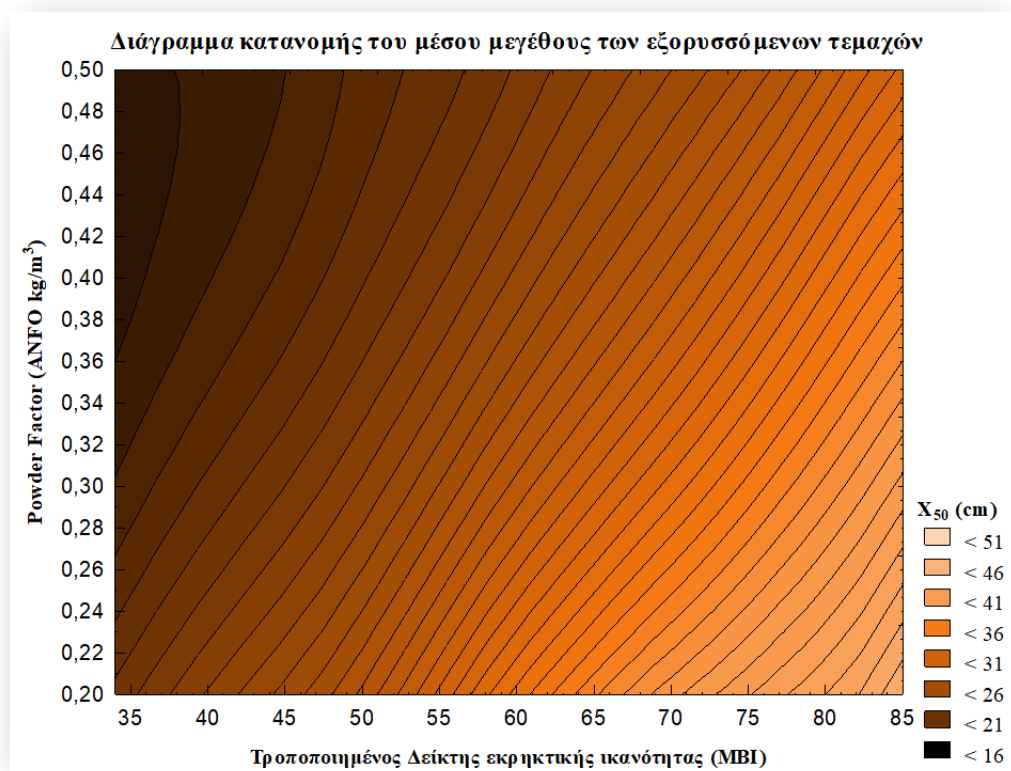
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

Εν συνεχεία, κατασκευάστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 9.2.25, το οποίο απεικονίζει την κατανομή του δείκτη Powder Factor. Ο δείκτης αυτός αποτελεί μία πολύ σημαντική ένδειξη για την κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης στα μέτωπα εξόρυξης. Ορίζεται ως η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO σε kg ανά κυβικό μέτρο εξορυσσόμενου υλικού. Αφού, λοιπόν, προσδιοριστεί η ποσότητα ANFO που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με την επιθυμητή εξορυσσόμενη ύλη μέσω του προηγούμενου Σχήματος 9.2.24, έπειτα χρησιμοποιείται το ακόλουθο, προκειμένου να εκτιμηθεί ο δείκτης Powder Factor. Από το διάγραμμα αυτό γίνεται κατανοητό, ότι ο υψηλός δείκτης αποτελεί ένδειξη κατανάλωσης υψηλής ποσότητας εκρηκτικής ύλης σε σχέση με την εξορυσσόμενη ποσότητα αδρανών υλικών, ενώ οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη αντιστοιχούν σε μικρότερη ποσότητα ANFO με μικρότερη εξορυσσόμενη μάζα υλικού.



Σχήμα 9.2.25. Διάγραμμα προσδιορισμού του δείκτη Powder Factor.

Απώτερος στόχος, λοιπόν, είναι αφού πρωτίστως έχουν προσδιοριστεί οι παράμετροι με τη χρήση των ανωτέρω διαγραμμάτων, να εκτιμηθεί το μέσο μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχίων, που θα προκύψουν μετά την υλοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης. Από τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα, (Σχήμα 9.2.26). Το διάγραμμα αυτό απεικονίζει την κατανομή του μέσου μεγέθους των τεμαχίων σε σχέση με την κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης και την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου. Οι τιμές του μέσου μεγέθους αποδόθηκαν μέσω του λογισμικού προγράμματος ψηφιακής ανάλυσης WipFrag[®] (βλέπε κεφάλαιο 8), ενώ η εκρηκτική ικανότητα με τη βοήθεια του Γεωλογικού δείκτη αντοχής και των υπολοίπων παραμέτρων, όπως περιγράφηκαν αναλυτικά οι εργασίες που υλοποιήθηκαν στα στάδια ένα έως τρία.



Σχήμα 9.2.26. Διάγραμμα κατανομής του μέσου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχίων σε σχέση με το Powder Factor και την εκρηκτική ικανότητα των ασβεστολίθων.

Συνοψίζοντας, τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν σε αυτό το στάδιο, δίνουν τη δυνατότητα να προσδιοριστούν οι επί μέρους παράμετροι, ξεκινώντας από το μέτωπο της εξόρυξης αξιολογώντας την ασβεστολιθική βραχομάζα ως προς την ποιότητά της και την εκρηκτική της ικανότητα. Στη συνέχεια, δίνεται η ευχέρεια να

προσδιορίζεται η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης σε σχέση με την επιθυμητή εξορυσσόμενη ύλη και τον αριθμό των διατρημάτων στο μέτωπο. Καταλήγοντας στην εκτίμηση του αποτελέσματος στην εξορυσσόμενη μάζα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την απαιτούμενη κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης όσο και την εκρηκτική ικανότητά της.

5^ο στάδιο εργασιών

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε η κατασκευή ενός *τεχνητού νευρωνικού δικτύου*, με σκοπό τη γρήγορη και εύκολη πρόβλεψη του μέσου μεγέθους των αποσπώμενων τεμαχίων, εισάγοντας ως δεδομένα εισόδου την εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας, την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης, καθώς και την επιθυμητή ποσότητα της εξορυσσόμενης μάζας. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υλοποίησης και το βέλτιστο δίκτυο το οποίο προτείνεται για τον σκοπό αυτόν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ

10.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο μοντελοποίησης των δεδομένων, προκειμένου να γίνει ακόμα πιο κατανοητή η σχέση των τεχνικογεωλογικών παραμέτρων και των παραμέτρων που διέπουν την ανατίναξη. Επίσης, από την εφαρμογή των ANN δημιουργήθηκε ένα εύκολα διαχειρίσιμο, αυτοματοποιημένο μοντέλο εκτίμησης του μέσου μεγέθους των τεμαχών του εξορυσσόμενου υλικού έναντι των άλλων παραμέτρων. Τέλος, είναι δυνατό να υλοποιηθεί σύγκριση του βαθμού αξιοπιστίας μεταξύ του βέλτιστου νευρωνικού δικτύου για το κάθε λατομείο και του συμβατικού στατιστικού μοντέλου. Στις αμέσως επόμενες παραγράφους πραγματοποιείται αρχικά μία αναλυτική περιγραφή της δομής και λειτουργίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και στη συνέχεια η διαδικασία υλοποίησης του βέλτιστου δικτύου με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν ένα ευρέως διαδεδομένο και αποδεκτό, υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και αυτοματοποίηση των μαθηματικών προβλημάτων στις επιστήμες. Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι ένα σύστημα επεξεργασίας πληροφοριών, εμπνευσμένο από τη δομή και τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, μιμούμενο την επιδεξιότητα της κατάκτησης και της οργάνωσης της γνώσης (Φερεντίνου και Σακελλαρίου 2007). Το αντικείμενο, λοιπόν, των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι η ανάπτυξη και η μελέτη μαθηματικών αλγορίθμων που μιμούνται την αρχιτεκτονική και το πρότυπο των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Η υπολογιστική αυτή πλατφόρμα είναι κατάλληλη για την ανάπτυξη ευφύων αλγορίθμων και γενικότερα διαδικασιών

σχετιζόμενων με τη νοημοσύνη, όπως η μάθηση, η μνήμη, η γενίκευση και η ομαδοποίηση προτύπων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η διαδικασία αυτή έχει αναπτυχθεί προκειμένου να αποτελέσει ένα πρόσθετο υποστηρικτικό εργαλείο στις συμβατικές αναλυτικές υπολογιστικές μεθόδους, συνεισφέροντας στην επίλυση του προβλήματος (Monjenzi et al. 2008).

Παρόλο που τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν εμπειρικό χαρακτήρα, παρέχουν λύσεις με ακρίβεια σε προβλήματα και φαινόμενα, τα οποία γίνονται κατανοητά μέσω εμπειρικών δεδομένων και παρατηρήσεων που πραγματοποιούνται στο πεδίο. Τα μοντέλα αυτά κατέχουν εξέχουσα θέση λόγω των κάτωθι χαρακτηριστικών: i) η μη γραμμικότητά τους επιτρέπει καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων ii) η μη ευαισθησία τους στον θόρυβο παρέχει ακριβή πρόβλεψη των επιθυμητών τιμών iii) έχουν την ικανότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων iv) ορίζουν την πολύπλοκη σχέση καθώς και όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις που είναι δυνατό να έχουν τα δεδομένα μεταξύ τους v) η γενίκευση δίνει την ικανότητα στο μοντέλο να εφαρμοστεί σε δεδομένα που δεν έχουν ξαναχρησιμοποιηθεί.

10.2 Ιστορική αναδρομή

Οι Nelson και Illingworth (1990) διαχωρίζουν τα χρόνια ιστορίας και εξέλιξης των νευρωνικών μοντέλων σε έξι αξιοσημείωτες φάσεις: (1) Σύλληψη, 1890-1949, (2) Υλοποίηση και δημιουργία, δεκαετία 1950, (3) Πρώιμο στάδιο, τέλη της δεκαετίας του 1950 και 1960, (4) Μεσοδιάστημα, 1961–1981, (5) Τελικό στάδιο I, 1982–1985 και (6) Τελικό στάδιο II, 1986–παρόν.

Η εποχή της σύλληψης περιλαμβάνει το αρχικό στάδιο ανάπτυξης στον τομέα της κατανόησης του τρόπου επεξεργασίας της πληροφορίας από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Θεωρείται ότι το έτος 1890 αποτέλεσε την αρχή για την ανάπτυξη του κλάδου των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στους υπολογιστές, με τη δημοσίευση της πρώτης εργασίας με τη δραστηριότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου, από τον William James (Nelson και Illingworth 1990). Πολλοί όπως ο Hecht-Nielsen (1990) είναι εκείνοι που πιστεύουν ότι η πραγματική εκκίνηση για την ανάπτυξη του κλάδου της τεχνητής νοημοσύνης δόθηκε το 1943 έπειτα από δημοσίευση των McCulloch and Pitts (1943), σχετικά με την ικανότητα των απλών νευρωνικών δικτύων να υπολογίσουν αριθμητικές και λογικές συναρτήσεις. Η εποχή αυτή έληξε με την παρουσίαση του κανόνα της μάθησης για τις συνάψεις των βιολογικών νευρώνων (Hebb 1949) και άνοιξε το δρόμο για την τεχνητή νοημοσύνη (Hecht-Nielsen 1990).

Η φάση της υλοποίησης και της δημιουργίας ξεκίνησε με την επερχόμενη πρόοδο της τεχνολογίας σε εξοπλισμό (hardware) και λογισμικά (software), που είχε ως αποτέλεσμα την εύκολη και ικανή προσομοίωση στους υπολογιστές. Σε αυτή την εποχή, η πρώτη απόπειρα τεχνητής νοημοσύνης (Snark) πραγματοποιήθηκε από τον Minsky στο Πανεπιστήμιο του Princeton το έτος 1951, αλλά παρουσίασε πολλούς περιορισμούς (Hecht-Nielsen 1990). Η εποχή αυτή έληξε με την έρευνα του Dartmouth Artificial Intelligence (AI), όπου τέθηκαν οι βάσεις για περεταίρω έρευνα στον τομέα (Nelson και Illingworth 1990).

Το πρώιμο στάδιο της έρευνας για την τεχνητή νοημοσύνη ξεκίνησε από την εργασία του John von Neuman (Neuman 1958), του οποίου το βιβλίο εκδόθηκε ένα χρόνο μετά το θάνατό του. Το ίδιο έτος, ο Frank Rosenblatt στο Πανεπιστήμιο Cornell, εισήγαγε το πρώτο πετυχημένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Mark I perceptron), το οποίο σχεδιάστηκε για αναγνώριση χαρακτήρων και στις ημέρες μας θεωρείται το παλαιότερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Nelson και Illingworth 1990). Παρόλο που το δίκτυο Rosenblatt ήταν γραμμικό, ήταν επαρκές για την επίλυση πολλών προβλημάτων. Το 1969 οι Minsky και Pappert με τη δημοσίευση του βιβλίου τους Perceptrons, τόνισαν τους περιορισμούς του δικτύου Rosenblatt κρίνοντάς το ως μη ικανό για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, παρόλο που αυτός ο περιορισμός ήταν ήδη γνωστός (Hecht-Nielsen 1990, Wythoff 1993).

Ο Hecht-Nielsen (1990) περιγράφει τις αρχές της δεκαετίας του 1970 ως τα ήσυχα χρόνια, όπου ο τομέας της τεχνητής νοημοσύνης σταδιακά αναβίωνε. Οι Nelson και Illingworth (1990) παραθέτουν κάποιες από τις σημαντικές έρευνες που εκπονήθηκαν, με αξιοσημείωτη τα νευρωνικά δίκτυα Hopfield (Hopfield 1984). Το 1986 οι Rumelhart και άλλοι ξαναέφεραν στο προσκήνιο τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης του λάθους (Backpropagation learning algorithm), έπειτα από την αρχική επινοήσή του από τον Werbos (1974).

Από το 1986 και έπειτα είναι πλέον φανερό ότι ο τομέας της τεχνητής νοημοσύνης αναπτύσσεται ραγδαία δημιουργώντας πολλές επιστημονικές κοινότητες για τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, προσφέροντας τις εξελίξεις στην ευρύτερη επιστημονική κοινότητα, μέσω ενός μεγάλου εύρους δημοσιεύσεων σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.

10.3 Δομή και λειτουργία του τεχνητού νευρώνα

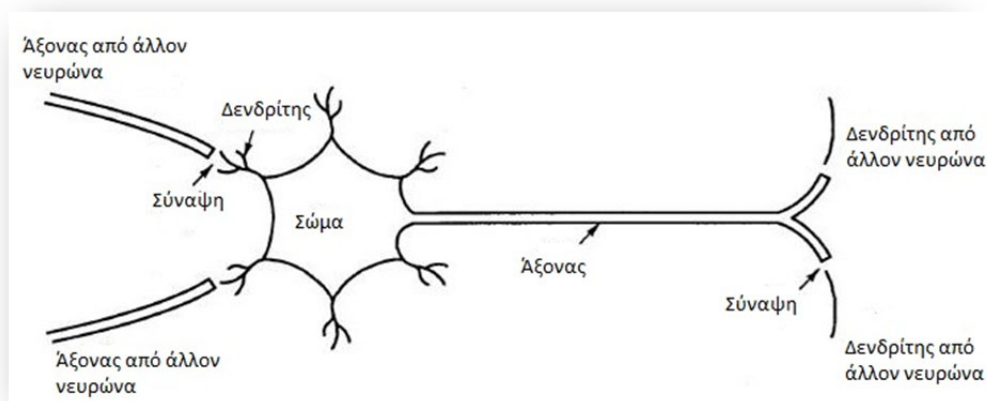
Σύμφωνα με τους Zurada (1992), Nirgin (1993) και (Haykin 1999), το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελεί έναν επεξεργαστή του οποίου η λειτουργία είναι η αποθήκευση και επεξεργασία της εμπειρικής γνώσης και η μετατροπή της σε μορφή που είναι εύχρηστη και διαθέσιμη για τον χρήστη. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα προτάθηκαν τη δεκαετία του 1940 από τους Αμερικανούς επιστήμονες McCulloch και Pitts, ως ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της πολύπλοκης λειτουργίας των βιολογικών νευρωνικών δικτύων του εγκεφάλου. Βασικό δομικό στοιχείο του εγκεφάλου είναι οι νευρώνες, δηλαδή τα νευρικά κύτταρα τα οποία δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ τους. Στόχος, λοιπόν, της λειτουργίας ενός νευρωνικού δικτύου αποτελεί η προσομοίωση του βιολογικού εγκεφάλου, έτσι ώστε να αναγνωρίζει μαθηματικά πρότυπα σε συγκεκριμένα δεδομένα.

Όπως είναι φανερό, η δομή του τεχνητού νευρωνικού δικτύου προσομοιάζει αυτήν του βιολογικού νευρικού συστήματος, οπότε κρίνεται απαραίτητη η μικρή αναφορά στη δομή του βιολογικού νευρώνα, προκειμένου να γίνει κατανοητή η διαδικασία λειτουργίας του. Το *νευρικό κύτταρο* ή *νευρώνας* είναι το βασικό δομικό στοιχείο του εγκεφάλου. Το βιολογικό νευρικό σύστημα αποτελείται από δισεκατομμύρια νευρώνες διαφόρων τύπων ανάλογα με τη θέση τους. Ο νευρώνας αποτελείται από τα εξής τμήματα: α) το σώμα β) τους δενδρίτες γ) τον άξονα και δ) τις συνάψεις, που συνδέουν τις διακλαδώσεις του άξονα με τους δενδρίτες άλλων νευρώνων δημιουργώντας έτσι ένα νευρωνικό δίκτυο. Οι *δενδρίτες* είναι οι πύλες εισόδου του νευρώνα που δέχονται ηλεκτρικά σήματα από άλλους νευρώνες. Ο *άξονας* αποτελεί την πύλη εισόδου του νευρώνα, ο οποίος στέλνει σήματα προς άλλους νευρώνες υπό μορφή ηλεκτρικών παλμών σταθερού πλάτους αλλά μεταβλητής συχνότητας. Στους βιολογικούς νευρώνες, η πληροφορία μεταδίδεται μέσω των ηλεκτρικών παλμών, στον άξονα κάθε νευρώνα και μέσω των συνάψεων διαδίδονται στους δενδρίτες των παραληπτών νευρώνων. Οι συνάψεις διαχωρίζονται σε ενισχυτικές (excitatory) και σε ανασταλτικές (inhibitory), ανάλογα με το αν το φορτίο που εκλύεται από τη σύναψη ερεθίζει το νευρώνα προς το να παράγει παλμούς ή αντίθετα αν τον καταστέλλει εμποδίζοντάς τον, (Διαμαντάρας 2007).

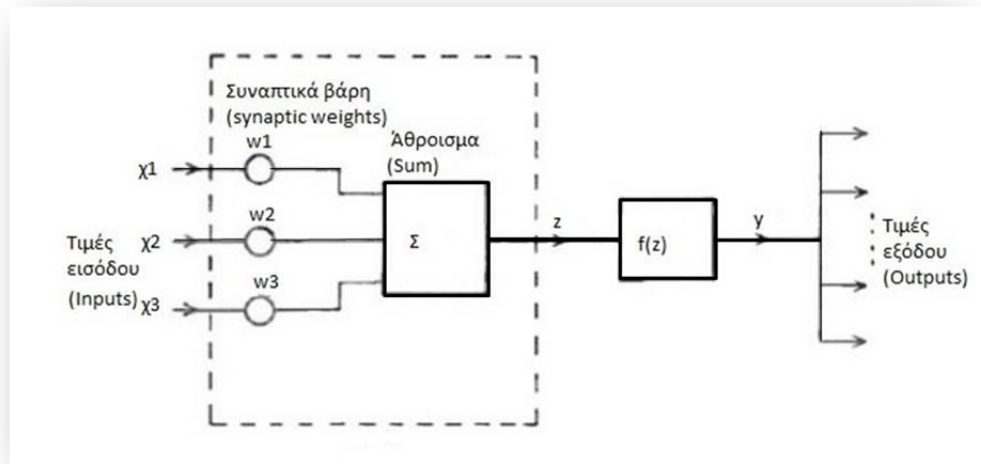
Κατ' αναλογία επομένως, με ένα δίκτυο νευρώνων εγκεφάλου, ένα τεχνητό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο *τεχνητών νευρώνων* (nodes) που αλληλεπιδρούν, συνδεδεόμενοι μεταξύ τους με τις λεγόμενες *συνάψεις* (synapses). Σε ένα τεχνητό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ

νευρωνικό δίκτυο οι νευρώνες αποτελούν τις βασικές μονάδες επεξεργασίας ή όπως αποκαλούνται «black box», οι οποίοι *εκπαιδεύονται* (training) προκειμένου να αναγνωρίσουν μοτίβα συσχετίσεων, ταξινόμησης, πρόβλεψης, μέσω ενός μεγάλου συνόλου δεδομένων (data) και να επιλύσουν ένα πρόβλημα. Οι νευρώνες διαχωρίζονται σε νευρώνες εισόδου και σε υπολογιστικούς νευρώνες. Ο βαθμός αλληλεπίδρασης των νευρώνων μεταξύ τους, είναι διαφορετικός για κάθε ζεύγος και καθορίζεται από τα *συναπτικά βάρη* (synaptic weights). Κάθε σήμα που μεταβαίνει από τον ένα νευρώνα στον άλλο περιγράφεται από μία τιμή βάρους, η οποία υποδηλώνει το πόσο στενά συνδεδεμένοι είναι οι νευρώνες μεταξύ τους. Κάθε νευρώνας, λοιπόν, δέχεται την πληροφορία (input), την επεξεργάζεται και προκύπτει μία τιμή εξόδου (output). Οι είσοδοί του είναι είτε οι έξοδοι προηγούμενων νευρώνων, είτε το αρχικό σήμα εισόδου του δικτύου, (Σχήμα 10.3.1 και Σχήμα 10.3.2).



Σχήμα 10.3.1. Βιολογικός Νευρώνας, (Fausett 1994).



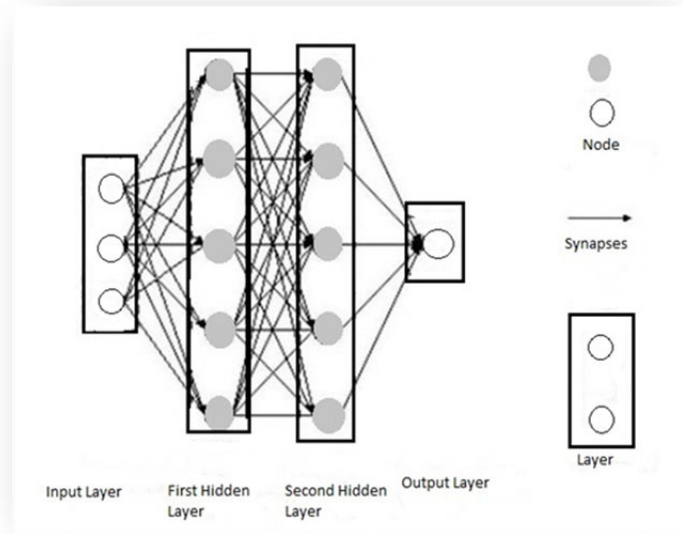
Σχήμα 10.3.2. Τυπικός νευρώνας τεχνητού νευρωνικού δικτύου, (Graupe 2007).

10.4 Σύνθεση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

10.4.1 Δομή του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων ή τεχνητών νευρώνων (nodes), τα οποία είναι οργανωμένα σε παράλληλα επίπεδα (layers). Κάθε νευρώνας ενώνεται με όλους τους άλλους νευρώνες μέσω των συνάψεων (synapses). Το νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από τα εξής τμήματα, (Σχήμα 10.4.1):

- Ένα επίπεδο εισόδου (input layer), στο οποίο εισάγονται οι τιμές εισόδου που έχουν οριστεί.
- Ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα (hidden layers), όπου τα στοιχεία εισόδου υφίστανται επεξεργασία με διάφορους μαθηματικούς τρόπους.
- Ένα επίπεδο εξόδου (output layer), με κάποια υπολογιστική ικανότητα, το οποίο περιέχει τα τελικά αποτελέσματα και τα αποδίδει στον χρήστη.



Σχήμα 10.4.1. Δομή ενός τυπικού τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Τυπικά οι νευρώνες του ίδιου επιπέδου συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο, (Fausett 1994). Ο παράγοντας ο οποίος ορίζει τη συμπεριφορά του κάθε νευρώνα είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης (transfer function ή activation function). Εντός του ίδιου επιπέδου οι νευρώνες συνήθως έχουν την ίδια συνάρτηση ενεργοποίησης και το ίδιο μοτίβο συνδέσεων με τους υπόλοιπους νευρώνες. Το μοτίβο σύνδεσης του κάθε νευρώνα με τους νευρώνες του αμέσως επόμενου επιπέδου, αποτελεί τη δομή του νευρωνικού δικτύου (net architecture).

Τα νευρωνικά δίκτυα διακρίνονται σε δίκτυα ενός επιπέδου ή πολυεπίπεδα. Τα δίκτυα ενός επιπέδου αποτελούνται από ένα επίπεδο σύνδεσης των βαρών (weights). Συνήθως, οι μονάδες δομής τους διακρίνονται σε μονάδες εισόδου, οι οποίες λαμβάνουν την πληροφορία και τη μεταφέρουν στις μονάδες εξόδου οι οποίες αποδίδουν το αποτέλεσμα. Σε αντίθεση με τα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούνται από ένα ή περισσότερα *κρυφά επίπεδα* (hidden layers) μεταξύ των μονάδων εισόδου και εξόδου. Τα πολυεπίπεδα δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να επιλύσουν πιο πολύπλοκα προβλήματα, τα οποία δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν από τα δίκτυα του ενός επιπέδου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή μεγάλου αριθμού κρυφών νευρώνων είναι δυνατό να οδηγήσει σε κακή προσαρμογή του μοντέλου, ενώ ο πολύ μικρός αριθμός σε πολύ αργή εκπαίδευση του δικτύου. Στα περισσότερα μοντέλα ένα ή δύο κρυφά

επίπεδα είναι επαρκή για την επίλυση των προβλημάτων. Τέλος, αναφέρεται ότι το επίπεδο εισόδου, συνήθως δεν προσμετρείται στο συνολικό αριθμό επιπέδων ενός δικτύου.

10.4.2 Λειτουργία του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Η λειτουργία του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, βασίζεται στη ροή της πληροφορίας από τις μονάδες εισόδου στις μονάδες εξόδου και πιο συγκεκριμένα κάθε νευρώνας δέχεται μία σειρά τιμών εισόδου και αποδίδει μία τιμή εξόδου. Οι νευρώνες του πρώτου κρυφού επιπέδου λαμβάνουν ως τιμές εισόδου τις τιμές των νευρώνων του επιπέδου εισόδου με το οποίο είναι συνδεδεμένοι μέσω των συνάψεων. Τα υπόλοιπα κρυφά επίπεδα λαμβάνουν ως τιμές εισόδου τις τιμές εξόδου των νευρώνων των κρυφών επιπέδων με τα οποία είναι συνδεδεμένα. Το σύνολο των πληροφοριών που καταφτάνουν σε κάθε νευρώνα επεξεργάζονται και μετατρέπονται, έτσι ώστε να μπορούν να μεταδοθούν στον επόμενο νευρώνα με τον οποίο συνδέεται.

Η σύνδεση των νευρώνων πραγματοποιείται μέσω των *βαρών* (weights). Σε κάθε νευρώνα οι τιμές εισόδου πολλαπλασιάζονται με έναν τυχαίο συντελεστή που αποκαλείται *συναπτικό βάρος*. Το συναπτικό βάρος αντιπροσωπεύει το μέγεθος του αποτελέσματος που μεταδίδεται μεταξύ των νευρώνων, υποδηλώνοντας το πόσο στενά συνδεδεμένοι είναι οι νευρώνες μεταξύ τους. Στο αμέσως επόμενο στάδιο στα γινόμενα αυτά προστίθεται ένας εξωτερικά εφαρμοζόμενος παράγοντας, πόλωση ή κατώφλι (bias neuron), ο οποίος αποτελεί έναν νευρώνα που έχει μία πάγια τιμή εισόδου ίση με τη μονάδα ($x_0=1$) και με συναπτικό βάρος ίσο προς την τιμή του. Στο επόμενο βήμα τα γινόμενα αυτά αθροίζονται και το άθροισμα αυτό διοχετεύεται σε μία *συνάρτηση μεταφοράς* (transfer function), αποτελώντας το όρισμα της συνάρτησης. Το τελικό αποτέλεσμα αποστέλλεται μέσω των συνάψεων στους υπόλοιπους νευρώνες. Εν ολίγοις κάθε νευρώνας υπολογίζει αρχικά το *δυναμικό*, δηλαδή λαμβάνει ως είσοδο ένα διάνυσμα (x_i) και το κάθε στοιχείο του διανύσματος εισέρχεται σταθμισμένο (πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή βάρους (w_i)).

$$v_j = \sum_{i=0}^n w_{ij} * y_i$$

Στη συνέχεια αθροίζεται με τα υπόλοιπα στοιχεία και με την τιμή κατωφλίου (bias), αποτελώντας το όρισμα της συνάρτησης ενεργοποίησης.

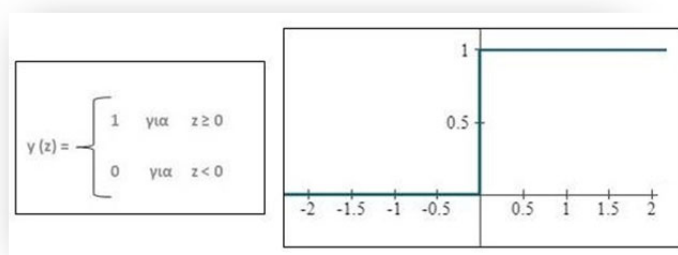
$$y_j = f(v_j)$$

Οι τιμές των βαρών διαφοροποιούνται σε κάθε κύκλο λειτουργίας του νευρωνικού δικτύου με τη βοήθεια των αλγορίθμων εκπαίδευσης, ώστε να υλοποιηθεί η επιθυμητή μετατροπή διανυσμάτων εισόδου σε διανύσματα εξόδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή βάρους, τόσο περισσότερο το συγκεκριμένο στοιχείο εισόδου επηρεάζει το αποτέλεσμα.

10.4.3 Συναρτήσεις μεταφοράς

Τυπικά η ίδια συνάρτηση μεταφοράς χρησιμοποιείται για όλους τους νευρώνες για κάθε επίπεδο του τεχνητού δικτύου, παρόλο που αυτό δεν είναι απαραίτητο, (Fausett, 1994). Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η μη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, ιδιαίτερα στα πολυεπίπεδα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, για την επίτευξη του στόχου, συγκρινόμενα με τα δίκτυα του ενός επιπέδου που έχουν περιορισμένες δυνατότητες. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις μεταφοράς είναι οι ακόλουθες:

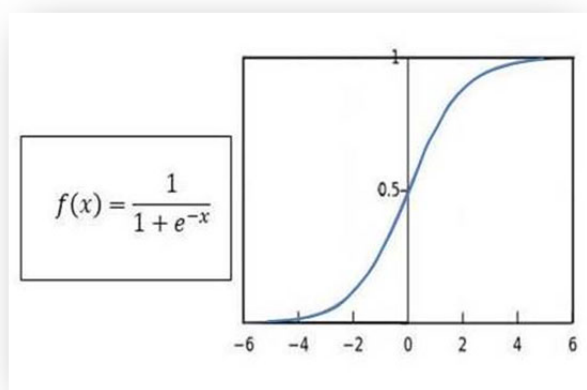
- Η βηματική συνάρτηση (step function): Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιούνταν στα πρώτα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ενός επιπέδου δίκτυα εισόδου – εξόδου) και περιορίζει την τιμή εξόδου του νευρώνα σε 0, αν αυτή λάβει τιμή μικρότερη από 0 (αναστέλλοντας τη λειτουργία του νευρώνα), και σε 1, αν αυτή λάβει τιμή μεγαλύτερη ή ίση από 0 (ενεργοποιώντας τον νευρώνα). Αποκλείοντας όμως τις ενδιάμεσες τιμές ενεργοποίησης, εκτός του δυαδικού αυτού συστήματος, (Σχήμα 10.4.2)



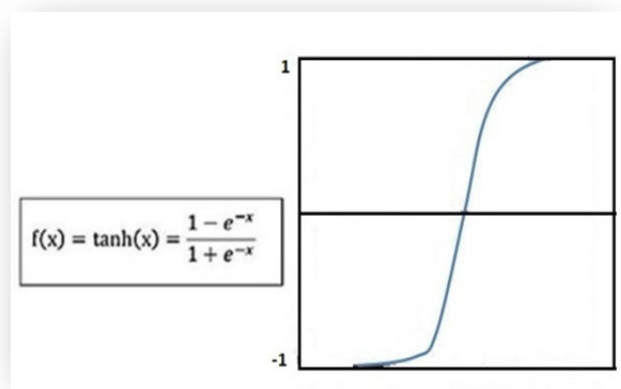
Σχήμα 10.4.2. Η βηματική συνάρτηση, (Debes et al. 2005).

- Η σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid function): Η συνάρτηση αυτή αποτελεί μία χρήσιμη συνάρτηση και εφαρμόζεται στα περισσότερα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Το πεδίο ορισμού της μπορεί θεωρητικά να είναι όλο το σύνολο των πραγματικών αριθμών, αλλά πρακτικά μπορεί να περιοριστεί, θέτοντας όρια στις τιμές των συναπτικών βαρών. Το σύνολο των τιμών είναι

συνήθως το διάστημα $[0,1]$ ή $[-1,1]$. Οι πιο κοινές σιγμοειδείς συναρτήσεις είναι η *λογιστική συνάρτηση* (logistic function) και η *υπερβολική εφαπτομένη συνάρτηση* (hyperbolic tangent). Η *λογιστική συνάρτηση* με εύρος από 0 έως 1, συνήθως χρησιμοποιείται στα νευρωνικά δίκτυα, στα οποία οι επιθυμητές τιμές εξόδου είτε είναι δυαδικές είτε μεταξύ των τιμών 0 και 1, (Σχήμα 10.4.3). Από την άλλη πλευρά, η *υπερβολική συνάρτηση*, συνήθως εφαρμόζεται όταν το επιθυμητό εύρος των τιμών εξόδου είναι μεταξύ -1 και 1, (Σχήμα 10.4.4).

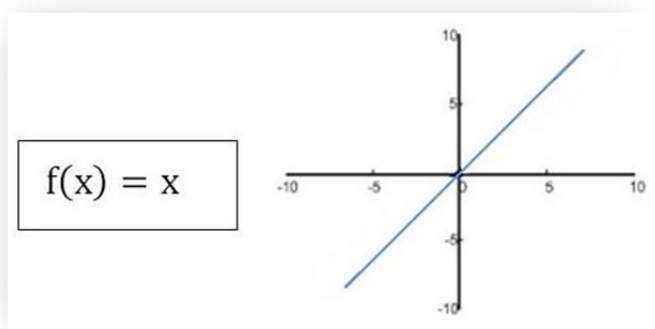


Σχήμα 10.4.3. Η σιγμοειδής λογιστική συνάρτηση, (Debes et al. 2005).



Σχήμα 10.4.4. Η υπερβολική εφαπτομένη συνάρτηση, (Debes et al. 2005).

- Η γραμμική συνάρτηση (linear function): Χρησιμοποιεί γραμμικά φίλτρα για την κανονικοποίηση των δεδομένων εισόδου. Το όρισμα της συνάρτησης αυτής είναι ανάλογο των τιμών εισόδου, δηλ. το αθροιστικό βάρος που προκύπτει από τον νευρώνα., (Σχήμα 10.4.5).



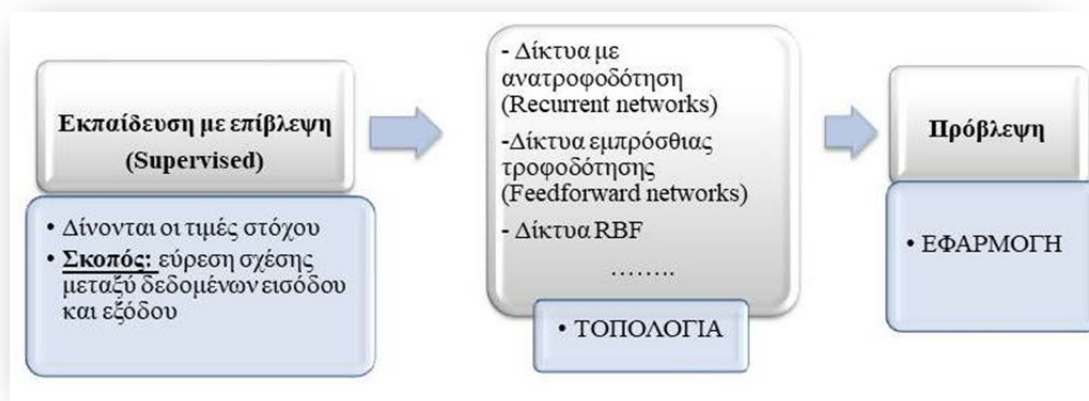
Σχήμα 10.4.5. Η γραμμική συνάρτηση, (Debes et al. 2005).

10.4.4 Εκπαίδευση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Η κωδικοποίηση της πληροφορίας σε ένα δίκτυο, επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της μάθησης (learning) και της εκπαίδευσής του (training). Η μέθοδος προσαρμογής των συναπτικών βαρών (training), αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό διαφοροποίησης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων μεταξύ τους. Το ζητούμενο σε ένα νευρωνικό δίκτυο είναι η αυτοματοποίηση των παραμέτρων του συστήματος ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός στόχος.

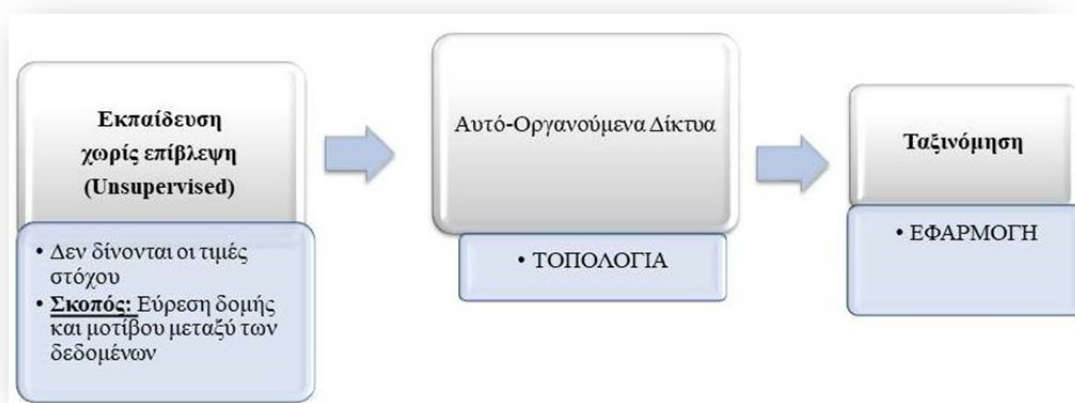
Με βάση τη μέθοδο εκπαίδευσης τα νευρωνικά δίκτυα διαχωρίζονται ως εξής :

- Με επίβλεψη (supervised training): Αποτελεί ίσως την πιο κοινή μορφή εκπαίδευσης ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Ο χρήστης του νευρωνικού δικτύου με επίβλεψη, καλείται να συνθέσει ένα σύνολο δεδομένων (training data), το οποίο περιέχει τα δεδομένα εισόδου (inputs) με τα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου (outputs), (Σχήμα 10.4.6). Έπειτα από την εισαγωγή τους στο δίκτυο, αυτό μαθαίνει τη σχέση που υπάρχει μεταξύ των δεδομένων αυτών. Με άλλα λόγια, υπάρχει ένας «δάσκαλος» που δίνει την τιμή στόχου για κάθε πρότυπο εκπαίδευσης (Διαμαντάρας, 2007). Το αποτέλεσμα, λοιπόν, είναι το δίκτυο να μαθαίνει προσαρμόζοντας τα συναπτικά βάρη, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές εισόδου και τους στόχους, χρησιμοποιώντας κάποιον επαναληπτικό αλγόριθμο.



Σχήμα 10.4.6. Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων με επίβλεψη, (Fausett 1994).

- Χωρίς επίβλεψη (unsupervised training): Τα αυτό-οργανούμενα νευρωνικά δίκτυα, ομαδοποιούν όμοια διανύσματα εισόδου χωρίς τη χρήση ενός συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης (training data), για να προσδιορίσει τη μορφή του κάθε μέλους της ομάδας ή σε ποια ομάδα το κάθε διάνυσμα ανήκει, (Σχήμα 10.4.7). Στο δίκτυο παρέχεται μία σειρά από τιμές εισόδου, αλλά χωρίς να προσδιορίζονται οι στόχοι. Το δίκτυο τροποποιεί τα συναπτικά βάρη, έτσι ώστε τα όμοια διανύσματα εισόδου να εκχωρούνται στις όμοιες μονάδες εξόδου (κλάσεις). Ως αποτέλεσμα, το νευρωνικό δίκτυο παράγει ένα αντιπροσωπευτικό διάνυσμα για κάθε κλάση που δημιουργείται (Διαμαντάρας, 2007).



Σχήμα 10.4.7. Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων χωρίς επίβλεψη (Fausett 1994).

10.4.5 Ταξινόμηση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Ιστορικά το πρώτο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που δημιουργήθηκε είναι το δίκτυο Perceptron, το οποίο προτάθηκε από τον ψυχολόγο Frank Rosenblatt (1958) και αποτελεί το πιο απλό νευρωνικό δίκτυο. Αποτελείται από ένα μόνο επίπεδο απλών νευρώνων, οι οποίοι λειτουργούν τόσο ως είσοδοι όσο και ως έξοδοι του δικτύου. Επισημαίνεται ότι κάθε νευρώνας είναι ανεξάρτητος από τους υπόλοιπους νευρώνες, άρα και η μάθηση κάθε νευρώνα γίνεται ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους. Το 1960 δημιουργήθηκε το Adaline (Adaptive Linear Neuron, B.Widrow), το οποίο είναι γνωστό και ως ALC (adaptive linear combiner), και δεν αποτελεί δίκτυο αλλά έναν νευρώνα. Επίσης, ο B.Widrow το 1988, κατασκεύασε ένα νευρωνικό δίκτυο το οποίο βασίζεται στο Adaline, το λεγόμενο Madaline (συνδυασμός νευρώνων Adaline). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία των νευρωνικών δικτύων που εξελίχτηκαν στο αμέσως επόμενο στάδιο, βασίζονται στα παραπάνω δίκτυα και ειδικότερα στο δίκτυο Perceptron.

Το 1986 επινοήθηκε το μοντέλο των πολλαπλών στρωμάτων (δίκτυο Multilayer Perceptron), (από Rumelhart και άλλους), με τη χρήση του αλγορίθμου Backpropagation. Ένα ακόμη νευρωνικό δίκτυο αποτελεί το δίκτυο Hopfield (1982). Αυτό το δίκτυο είναι διαφορετικό από τα προηγούμενα σε πολλά σημεία, με κυριότερο χαρακτηριστικό την αναδρομικότητά του. Οι νευρώνες τροφοδοτούνται από τις εξόδους των υπολοίπων νευρώνων ακόμα και από τη δική τους έξοδο και επίσης, οι εξωτερικές είσοδοι εφαρμόζονται ως αρχικές συνθήκες στην αναδρομή. Τέλος, το 1987 δημιουργήθηκε το δίκτυο Self-Organized Map του Kohonen, το οποίο ανήκει στα δίκτυα χωρίς επίβλεψη, και το δίκτυο αυτό-οργανώνεται με τρόπο που είναι εμπνευσμένος από την τοπογραφική οργάνωση του εγκεφάλου.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) με εκπαιδευόμενα βάρη και β) με σταθερά βάρη, (Διαμαντάρας, 2007). Τα νευρωνικά δίκτυα που ανήκουν στην κατηγορία με τα εκπαιδευόμενα βάρη διαχωρίζονται με βάση το είδος εκπαίδευσης: με επίβλεψη και χωρίς επίβλεψη. Έτσι, τα νευρωνικά δίκτυα τα οποία ανήκουν στη κατηγορία με επίβλεψη είναι: α) Perceptron β) Adaline/Madaline γ) αναδρομικό δίκτυο Backpropagation δ) δίκτυο RBF ε) μηχανή Boltzmann. Τα αντίστοιχα δίκτυα τα οποία ανήκουν στην κατηγορία χωρίς επίβλεψη είναι τα συσχετιστικά μοντέλα (κανόνας του Hebb), δηλ. τα δίκτυα PCA, δίκτυα ICA και τα δίκτυα Linsker και τα ανταγωνιστικά μοντέλα (Learning VQ, δίκτυο Kohonen

(SOM) και ART). Τέλος, τα δίκτυα με σταθερά βάρη είναι το δίκτυο Hopfield, οι συσχετιστικές μνήμες BAM, CMM και Brain-State-in-a-Box.

10.4.6 ANN & εκτίμηση του μέσου μεγέθους των τεμαχών του εξορυσσόμενου υλικού

Το μέγεθος των τεμαχών του εξορυσσόμενου υλικού που προκύπτει μετά την πραγματοποίηση της ανατίναξης, αποτελεί έναν δείκτη της αποτελεσματικότητας της πρακτικής της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης. Το μέγεθος των τεμαχών εξαρτάται από παραμέτρους που διέπουν τόσο τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας του εξορυσσόμενου μετώπου όσο και τις παραμέτρους που συνθέτουν τη διαδικασία της ανατίναξης, (Nur Lyana et al., 2016). Ένα αποδεκτό αποτέλεσμα, θεωρείται όταν τα τεμάχια που προκύπτουν δεν είναι απαραίτητο να υποστούν δευτερογενή θραύση με τη χρήση υδραυλικού σφυριού και επιπλέον υπάρχει μικρό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού στην εξορυσσόμενου υλικού, (Mohanty et al., 1996). Ωστόσο, το επιθυμητό αποτέλεσμα σαφώς εξαρτάται από τα μέσα που διατίθενται στο λατομείο, όπως φορτωτές και ειδικά μηχανήματα, αλλά και για το σκοπό χρήσης του υλικού.

Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε, αρχικά στατιστική ανάλυση μεταξύ τεσσάρων μεταβλητών, προκύπτοντας ένα μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης (multiple regression model): ο τροποποιημένος Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας (MBI), η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό μέτρο εξορυσσόμενου υλικού (PF), μία δεδομένη ποσότητα εξορυσσόμενου υλικού (t), το μέσο μέγεθος τεμαχών της εξορυσσόμενης μάζας (Xav). Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν, κατά το στάδιο της έρευνας πεδίου στα δύο λατομεία εξόρυξης αδρανών υλικών της εταιρίας TITAN (στο λατομείο των Ταγαράδων και στο λατομείο του Δρυμού). Ως εξαρτημένη μεταβλητή (dependent value) ορίστηκε το μέσο μέγεθος τεμαχών και οι υπόλοιπες μεταβλητές αποτέλεσαν τις ανεξάρτητες μεταβλητές (independent values) Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του στατιστικού υπολογιστικού πακέτου «STATISTICA®».

Εν τούτοις, κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστούν και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο μοντελοποίησης των δεδομένων, προκειμένου να γίνει ακόμα πιο κατανοητή η σχέση των παραμέτρων μεταξύ τους. Επίσης, από την εφαρμογή των ANN δημιουργήθηκε ένα εύκολα διαχειρίσιμο, αυτοματοποιημένο μοντέλο εκτίμησης του μέσου μεγέθους των τεμαχών του εξορυσσόμενου υλικού έναντι των άλλων παραμέτρων. Τέλος, μέσα από τις δύο

αυτές διαδικασίες, είναι δυνατό να υλοποιηθεί σύγκριση του βαθμού αξιοπιστίας μεταξύ του βέλτιστου νευρωνικού δικτύου για το κάθε λατομείο και του στατιστικού μοντέλου.

10.4.7 Δομή και λειτουργία του εφαρμοζόμενου νευρωνικού δικτύου

Η εφαρμογή ενός δικτύου εμπρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward net) με επίβλεψη (supervised training), θεωρείται ως ένα αποτελεσματικό μοντέλο, για την επεξεργασία των δεδομένων στην παρούσα έρευνα. Στόχος αποτελεί ο προσδιορισμός ενός μοτίβου εκτίμησης του μέσου μεγέθους των τεμαχών μετά την πρακτική της ανατίναξης, σε σχέση με την εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας, της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης και της ποσότητας του εξορυσσόμενου υλικού. Έτσι, το μοτίβο συσχέτισης των παραπάνω δεδομένων, κρίνεται ότι είναι δυνατό να αποδοθεί μέσω ενός μοντέλου με δεδομένα εισόδου με τα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου. Το μοτίβο συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων, παρέχεται στο δίκτυο μέσω της πληροφορίας των δεδομένων εισόδου και των τιμών εξόδου, οι οποίες λειτουργούν ως στόχοι για κάθε πρότυπο εκπαίδευσης του δικτύου. Έτσι λοιπόν, όταν εισάγονται οι τιμές εισόδου στο δίκτυο, πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι υπολογισμοί σε κάθε νευρώνα, δηλ. τα γινόμενα των τιμών εισόδου με την τιμή του συναπτικού βάρους, το άθροισμα των γινομένων και με την τιμή κατωφλίου (bias), διοχετεύεται σε μία συνάρτηση μεταφοράς που έχει οριστεί. Εν τέλει, το αποτέλεσμα αυτό αποστέλλεται στους υπόλοιπους νευρώνες. Έπειτα, το αποτέλεσμα που προκύπτει στο επίπεδο εξόδου συγκρίνεται με την αντίστοιχη επιθυμητή τιμή, και υπολογίζεται το άθροισμα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE).

Στο αμέσως επόμενο στάδιο, πραγματοποιείται η οπισθοδιάδοση του λάθους στο δίκτυο, με τη χρήση της κατάβασης δυναμικού, προκειμένου να επιτευχθεί η τροποποίηση των συναπτικών βαρών και να ελαχιστοποιηθεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Τελικός σκοπός είναι να αποδοθεί ένα καλό μοτίβο συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων εισόδου και των επιθυμητών τιμών, καταλήγοντας σε ένα δίκτυο πρόβλεψης μίας επιθυμητής τιμής σε σχέση με τις δεδομένες τιμές εισόδου.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται πιο αναλυτικά, το είδος και τα χαρακτηριστικά του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που εφαρμόστηκε στις παραμέτρους της παρούσας έρευνας.

10.4.8 Το δίκτυο πολλών στρωμάτων (Multilayer Perceptron-MLP)

Το πιο διαδεδομένο δίκτυο νευρωνικών το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων, αποτελεί το δίκτυο πολλών στρωμάτων με την εφαρμογή του κανόνα εκπαίδευσης της οπισθοδιάδοσης. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από τουλάχιστον τρία στρώματα: το επίπεδο εισόδου, ένα ή δυο κρυφά επίπεδα και το επίπεδο εξόδου. Το επίπεδο εισόδου δεν προσμετρείται στον συνολικό αριθμό των επιπέδων, καθώς στο επίπεδο αυτό δεν διενεργείται καμία διαδικασία υπολογισμού, παρά μόνο πραγματοποιείται η είσοδος των παραμέτρων στο δίκτυο. Το συγκεκριμένο είδος δικτύου (MLP) έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στον τομέα της βραχομηχανικής, των γεωεπιστημών, της μηχανικής της εξόρυξης κτλ., (Neaupane και Adhikari 2006, Neaupane και Achet 2004). Τόσο ο αριθμός των κρυφών επιπέδων όσο και ο αριθμός των νευρώνων σε κάθε επίπεδο, εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του προβλήματος που μελετάται κάθε φορά. Συνηθέστερα, θεωρείται ότι στα περισσότερα μοντέλα, για την εφαρμογή τους στον τομέα της μηχανικής, έως δύο κρυφά επίπεδα επαρκούν (Lee et al. 2003, Gomez & Kavzoglu 2005, Ermini et al. 2005, Yesilnacar & Topal 2005).

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν ο αριθμός των νευρώνων στο κρυφό επίπεδο είναι ανεπαρκής, τότε είναι δυνατό να προκληθεί υπό-εκπαίδευση στο δίκτυο (underfitting). Σε αντίθετη περίπτωση η επιλογή περισσότερων νευρώνων από ότι είναι απαραίτητο καθώς και η μεγάλη πολυπλοκότητα του δικτύου δεν επιτρέπουν την ορθή εκπαίδευσή του, απαιτώντας μεγαλύτερο χρόνο εκπαίδευσης. Η διαδικασία αυτή είναι δυνατό να οδηγήσει στην υπέρ-εκπαίδευση του δικτύου (overfitting). Η δυνατότητα ελέγχου του δικτύου για την αποφυγή οποιασδήποτε από τις δύο αυτές περιπτώσεις, γίνεται μέσω του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) μεταξύ της εκπαίδευσης (training) και του ελέγχου (test). Στην περίπτωση όπου το MSE του ελέγχου είναι μεγαλύτερο από αυτό της εκπαίδευσης, τότε το δίκτυο έχει οδηγηθεί σε υπέρ-εκπαίδευση. Ενώ αν το MSE του ελέγχου είναι μικρότερο, τότε στο δίκτυο έχει συντελεστεί ατελής μάθηση (Frank Dieterle, 2003).

Στη βιβλιογραφία δεν εντοπίζονται με σαφήνεια πρότυποι κανόνες για τον προσδιορισμό του αριθμού των κρυφών νευρώνων. Ο βέλτιστος αριθμός τους περιγράφεται από εμπειρικούς κανόνες, οι οποίοι είναι δυνατό να λειτουργήσουν ως σημείο εκκίνησης για τη δομή του κρυφού επιπέδου. Οι ακόλουθοι εμπειρικοί

κανόνες ορίζονται από συγκεκριμένες εξισώσεις και αποδίδουν το μέγιστο πλήθος των κρυφών νευρώνων:

i) Θεώρημα του Kolmogorov (1987): $2 * n + 1$, όπου n ορίζεται ο αριθμός των παραμέτρων εισόδου.

ii) Ge και Sun (2007): $\sum_{i=0}^n C_N^i > k$, και $C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}$, όπου n είναι ο αριθμός των παραμέτρων εισόδου, k είναι ο αριθμός των δεδομένων και N ο αριθμός των κρυφών νευρώνων.

iii) Jeff Heaton (2008): Το πλήθος των κρυφών νευρώνων ορίζεται ως ο αριθμός μεταξύ του μεγέθους των παραμέτρων εισόδου και του μεγέθους των παραμέτρων εξόδου,

ή ορίζεται ως τα $2/3$ του μεγέθους των παραμέτρων εισόδου + το μέγεθος των παραμέτρων εξόδου

ή ορίζεται ως μικρότερος από το διπλάσιο του μεγέθους των παραμέτρων εισόδου

iv) Masters (1993): $\sqrt{n * m}$, όπου n είναι ο αριθμός των παραμέτρων εισόδου και m το πλήθος των παραμέτρων εξόδου

Βασική εμπειρική αρχή της μηχανικής μάθησης (Occam's Razor), είναι ότι προτιμάται το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να μάθει επαρκώς τα παραδείγματα εκπαίδευσης.

Στην παρούσα έρευνα, στο δίκτυο πολλών στρωμάτων το οποίο εφαρμόζεται, η ροή της πληροφορίας πραγματοποιείται από αριστερά προς τα δεξιά, δηλαδή δεν υπάρχει βρόχος αναδρομής, ο οποίος να επιστρέφει την πληροφορία από τις εξόδους προς τις εισόδους. Επίσης, οι νευρώνες κάθε επιπέδου αλληλεπιδρούν με τους νευρώνες που βρίσκονται στα άμεσα γειτονικά τους επίπεδα. Το πρώτο κρυφό επίπεδο δέχεται τις τιμές του επιπέδου εισόδου, έπειτα τα αποτελέσματα του πρώτου κρυφού επιπέδου διοχετεύονται στο δεύτερο κρυφό επίπεδο (αν υπάρχει) και στη συνέχεια καταλήγουν στο επίπεδο εξόδου.

10.4.9 Εκπαίδευση του δικτύου MLP με τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης του σφάλματος (Back-propagation algorithm)

Ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης του σφάλματος (Back-propagation), προτάθηκε από τον Paul Werbos το 1974, στα πλαίσια της ανάλυσης μοντέλων οικονομικής και πολιτικής πρόβλεψης, (Διαμαντάρας 2007). Τη δεκαετία του 1980, έγινε αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων πολλών στρωμάτων (Rumelhart, Hinton, Williams 1986), αποτελώντας την πιο διαδεδομένη και αποτελεσματική μέθοδο.

Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής αποτελεί η ύπαρξη στόχων, δηλαδή το μοντέλο αυτό ανήκει στην κατηγορία των δικτύων με επίβλεψη. Έτσι, λοιπόν, σε ένα δίκτυο πολλών στρωμάτων, με ένα ή περισσότερα κρυφά στρώματα, έστω ότι έχουμε τιμές εισόδου $x_1, x_2, \dots, x_n$ και τις επιθυμητές τιμές εξόδου $d_1, d_2, \dots, d_n$. Ανάλογα με το σύνολο των δεδομένων, που εισάγονται στο δίκτυο, στόχος είναι να βρεθεί ένας κατάλληλος αλγόριθμος για να εκπαιδευτεί το δίκτυο. Άρα, για μία σειρά από διανύσματα εισόδου, επιθυμείται οι εξοδοί ($y_1, y_2, \dots, y_n$) να πετύχουν τιμές που να δίνονται από τα αντίστοιχα διανύσματα στόχων.

Οπότε έχουμε:

$\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ το διάνυσμα των τιμών εισόδου

$\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ το διάνυσμα των τιμών εξόδου

$\bar{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ το διάνυσμα των τιμών στόχου

Σε κάθε βήμα εκπαίδευσης, πραγματοποιείται προσαρμογή των συναπτικών βαρών (synaptic weights), έτσι ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατό πλησιέστερη τιμή της εξόδου με την αντίστοιχη τιμή στόχου. Η διαδικασία της εκπαίδευσης τερματίζεται, όταν κρίνεται ότι το δίκτυο πλέον έχει μάθει τα δεδομένα σε ικανοποιητικό βαθμό. Το ιδανικό θα ήταν να επιτευχθεί μία ταύτιση των τιμών εξόδου (y) και στόχου (d). Όμως, επειδή αυτό δεν είναι απολύτως εφικτό, επιζητείται μία βέλτιστη προσέγγιση της επιθυμητής κατάστασης, χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο κόστους. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι ένα κλασικό κριτήριο κόστους που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλά προβλήματα. Βασικό πλεονέκτημά του αποτελεί ότι η ελαχιστοποίησή του σημαίνει ελαχιστοποίηση της τετραγωνικής απόστασης μεταξύ των διανυσμάτων y και d . Επομένως, για ένα πλήθος προτύπων N

υπολογίζεται το άθροισμα του τετραγώνου του σφάλματος (e) για όλους τους νευρώνες εξόδου, σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$E_{average} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_j e_j^2(n) \quad (10.4.9.1)$$

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου οπισθοδιάδοσης είναι να προσαρμόζονται τα βάρη, σε κάθε βήμα επανάληψης, έτσι ώστε να μειώνεται η συνάρτηση κόστους. Επομένως, η προσαρμογή των βαρών γίνεται σύμφωνα με τα σφάλματα που υπολογίζονται σε κάθε βήμα της διαδικασίας. Συνεπώς, η διαδικασία η οποία ακολουθείται κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου οπισθοδιάδοσης συνοπτικά, έχει ως εξής: α) πρώτα πραγματοποιείται προς τα εμπρός πέρασμα και υπολογίζεται η έξοδος με βάση τον στόχο και επίσης υπολογίζεται το σφάλμα της εξόδου, β) ακολουθεί προς τα πίσω πέρασμα (οπισθοδιάδοση του λάθους) και υπολογίζεται η συμβολή στο λάθος (ονομάζεται *τοπική κλίση του νευρώνα*) σε κάθε υπολογιστικό νευρώνα, δηλαδή υπολογίζεται ένας αριθμός και ο αριθμός αυτός αντιπροσωπεύει το πόσο συμβάλλει ο νευρώνας αυτός για το λάθος το οποίο γίνεται. Με αυτόν τον τρόπο διορθώνονται τα βάρη και εξάγονται τα νέα. Η διαδικασία αυτή (*προς τα εμπρός πέρασμα και προς τα πίσω πέρασμα*) επαναλαμβάνεται για κάθε τιμή στόχου. Η εκπαίδευση ολοκληρώνεται όταν το νευρωνικό δίκτυο έχει εκπαιδευτεί, έτσι ώστε να προβλέπει ικανοποιητικά και να είναι σε θέση να αποδώσει σωστά ένα καινούριο πρότυπο

Πιο αναλυτικά για ένα σύνολο νευρώνων $j=1 \dots N$, έχουμε:

Προς τα εμπρός πέρασμα (κατά αύξοντα αριθμό νευρώνων) :

- Αρχικά για κάθε νευρώνα εισόδου τίθεται ως y_j η είσοδος που παράγεται στους επόμενους νευρώνες. Σημειώνεται ότι η λειτουργία των νευρώνων εισόδου είναι να λαμβάνουν τις τιμές εισόδου και να τις μεταφέρουν στο επόμενο επίπεδο νευρώνων.
- Έπειτα, για κάθε υπολογιστικό νευρώνα (κρυφό και εξόδου), υπολογίζεται το δυναμικό, δηλαδή το άθροισμα των γινομένων βαρών και τιμών εισόδων, συμπεριλαμβανομένης της τιμής εισόδου κατωφλίου (bias), αν υπάρχει:

$$v_j = \sum_{i=0}^n w_{ij} * y_i$$

Ακολουθώντας, υπολογίζεται η έξοδος από τη συνάρτηση ενεργοποίησης, της οποίας το όρισμα αποτελεί το δυναμικό:

$$y_j = f(v_j)$$

- Για κάθε νευρώνα εξόδου υπολογίζεται το σφάλμα, κατά το n-οστό βήμα επανάληψης του αλγορίθμου εκπαίδευσης, από την ακόλουθη σχέση:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n)$$

Όπου: d_j είναι η επιθυμητή τιμή (ή τιμή στόχου)

y_j είναι η τιμή πρόβλεψης

Προς τα πίσω πέρασμα (κατά φθίνοντα αριθμό νευρώνων):

- Σε ένα πρώτο στάδιο κατά το προς τα πίσω πέρασμα, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των *τοπικών κλίσεων* (δ) σε κάθε νευρώνα. Η παράμετρος δ , όπως θα διαπιστωθεί και αμέσως παρακάτω σχετίζεται με το σφάλμα του κάθε νευρώνα. Από το γράμμα «δέλτα» που χρησιμοποιείται για τον συμβολισμό αυτόν, ο κανόνας Back-propagation παίρνει και το όνομα «Γενικευμένος Κανόνας Δέλτα». Επομένως, για κάθε νευρώνα ο υπολογισμός αυτός υλοποιείται ως εξής:
- Για τους *νευρώνες εξόδου*, το σφάλμα προκύπτει από το γινόμενο του σφάλματος του νευρώνα με την παράγωγο της συνάρτησης ενεργοποίησης με όρισμα το δυναμικό του νευρώνα:

$$\delta_j(n) = e_j * f'_j(v_j)$$

- Για τους *νευρώνες κρυφού επιπέδου*, το σφάλμα υπολογίζεται ως το γινόμενο της παραγώγου της συνάρτησης ενεργοποίησης με όρισμα το δυναμικό του νευρώνα και το άθροισμα (σφάλμα επί βάρους) για κάθε έξοδο του νευρώνα.

$$\delta_j(n) = f'_j(v_j) * \sum_k [\delta_k(n) * w_{jk}(n)]$$

- Για τους *νευρώνες εισόδου*, δεν γίνεται υπολογισμός της τοπικής κλίσης.
- Σε ένα δεύτερο στάδιο, πραγματοποιούνται οι *διορθώσεις στα βάρη* των ακμών, με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta_{wij}(n) = \eta * \delta_j(n) * y_i(n)$$

όπου η = ο ρυθμός εκπαίδευσης

Τέλος, υπολογίζονται τα νέα βάρη σύμφωνα με τη σχέση:

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta_{w_{ij}}(n)$$

Τέλος, αναφέρεται ότι ανάλογα με τη συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται, εφαρμόζεται και η αντίστοιχη παράγωγος f' . Για τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις, η παράγωγος για την κάθε μία δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

i) για τη σιγμοειδή συνάρτηση $f(x) = (1 - e^{-x})/(1 + e^x)$ η παράγωγος είναι

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x))$$

ii) για την υπερβολική εφαπτομένη $f(x) = (e^x - e^{-x})/(e^x + e^{-x})$

η παράγωγος είναι $f'(x) = (1 + f(x))(1 - f(x))$

iii) για τη γραμμική συνάρτηση $f(x) = x$ η παράγωγος είναι $f'(x) = 1$

10.4.10 Η παράμετρος του βήματος εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και τα κριτήρια τερματισμού της εκπαίδευσης

Η εκπαίδευση σε ένα νευρωνικό δίκτυο αποτελεί μία διαδικασία προσαρμογής των βαρών, μέχρι το δίκτυο να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο ρυθμός εκπαίδευσης (learning rate), του τεχνητού νευρωνικού δικτύου αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο, η οποία καθορίζει το πόσο γρήγορα ή αργά πραγματοποιείται αυτή η προσαρμογή των συναπτικών βαρών. Με την επιλογή ενός πολύ μικρού ρυθμού εκπαίδευσης, ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης, θα συγκλίνει στο κοντινότερο τοπικό ελάχιστο, αλλά η σύγκλιση θα επιτευχθεί πολύ αργά. Είναι δυνατό να επιτευχθεί ταχύτερη σύγκλιση με μεγαλύτερο βήμα εκπαίδευσης. Όμως, τότε οι διορθώσεις σε κάθε βήμα μπορεί να γίνουν πολύ μεγάλες και να οδηγήσουν σε αστάθεια του αλγόριθμου (κακή σύγκλιση, απόκλιση του αλγορίθμου).

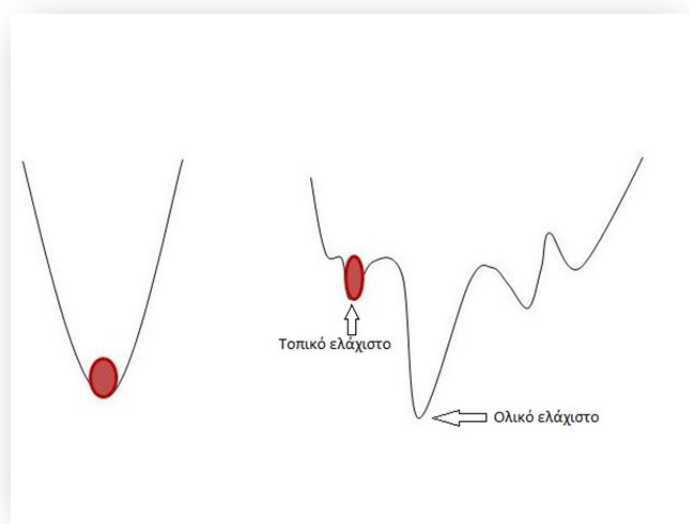
Από τα παραπάνω διαπιστώνεται, ότι η επιλογή του κατάλληλου ρυθμού εκπαίδευσης δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί εύκολα, παρά μόνο με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Τυπικά χρησιμοποιούνται τιμές μικρότερες έως πολύ μικρότερες από τη μονάδα. Σε γενικές γραμμές, μπορεί να αναφερθεί ότι αν το δίκτυο έχει πολλές εισόδους ή οι εισοδοί έχουν μεγάλες τιμές τότε καλό είναι το βήμα εκπαίδευσης να έχει μικρή τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση σε δίκτυα με μικρό αριθμό εισόδων ή εισόδους με μικρές τιμές, το βήμα εκπαίδευσης μπορεί να είναι μεγαλύτερο (Διαμαντάρας, 2007).

Για την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου υπάρχουν κάποια κριτήρια, σύμφωνα με τα οποία αποφασίζεται για το πότε ο

αλγόριθμος Back-propagation θα τερματιστεί. Το πρώτο κριτήριο σχετίζεται με το αν το δίκτυο παράγει πλέον τις επιθυμητές εξόδους (αυτό είναι αδύνατον να υλοποιηθεί), ή έχουν σφάλμα μικρότερο από αυτό που έχουμε θέσει. Ένα δεύτερο κριτήριο αποτελεί αν το σφάλμα παρέμεινε το ίδιο σε δύο διαδοχικούς κύκλους εκπαίδευσης. Επίσης, ένα κριτήριο τερματισμού της εκπαίδευσης, αποτελεί αν τα συναπτικά βάρη δέχτηκαν αμελητέα τροποποίηση κατά τον n-οστό κύκλο εκπαίδευσης.

10.4.11 Τοπικά ελάχιστα και η χρήση της ορμής (momentum) στον αλγόριθμο

Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και στοχεύοντας στην εύρεση του ολικού ελαχίστου κατά τη διαδικασία της κατάβασης δυναμικού, υπάρχει η πιθανότητα να καταλήξει η συνάρτηση κόστους σε τοπικά ελάχιστα. Τα τοπικά ελάχιστα αποτελούν ανεπιθύμητες λύσεις, καθώς είναι κατώτερες, σε σχέση με την εύρεση του ολικού ελαχίστου. Μία ιδανική επιφάνεια σφάλματος θα ήταν ομαλή χωρίς την παρουσία τοπικών ελαχίστων, παρά μόνο με την παρουσία ενός ολικού ελαχίστου. Όμως, στην πραγματικότητα η επιφάνεια του λάθους, περιέχει τοπικά ελάχιστα και κατά τη διαδικασία της εύρεσης του ολικού ελαχίστου, ο αλγόριθμος είναι δυνατό να φτάσει σε ένα τοπικό ελάχιστο, θεωρώντας ότι έχει φτάσει στο ιδεατό ελάχιστο (Σχήμα 10.4.8).

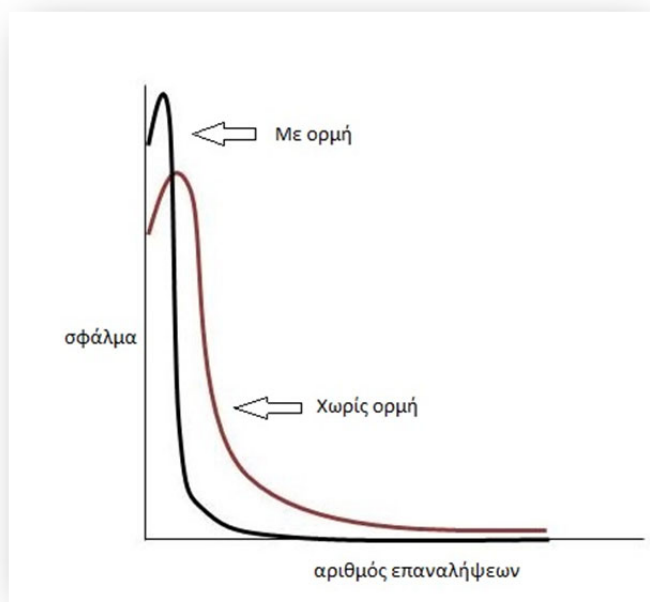


Σχήμα 10.4.8. Αριστερά η ιδεατή επιφάνεια σφάλματος με ένα ολικό ελάχιστο και δεξιά η πραγματική επιφάνεια σφάλματος με τοπικό ελάχιστο (Ott et al. 1998).

Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου είναι δυνατό να αυξηθεί με τη χρήση της ορμής (momentum). Αποτελεί μία τιμή μεταξύ 0 και 1, αυξάνοντας το μέγεθος του

βήματος μεταξύ των ελαχίστων, προσπαθώντας να υπερπηδήσει πιθανά τοπικά ελάχιστα. Η παράμετρος αυτή αποτελεί μία λύση στο δίλημμα της επιλογής του κατάλληλου βήματος εκπαίδευσης (μεγάλο ή μικρό). Σημειώνεται, ότι αν η τιμή της ορμής είναι μεγάλη, τότε το βήμα εκπαίδευσης θα πρέπει να είναι μικρό. Η μεγάλη τιμή της ορμής οδηγεί σε γρήγορη σύγκλιση του αλγορίθμου. Ωστόσο, αν ο ρυθμός εκπαίδευσης και η ορμή έχουν μεγάλες τιμές, τότε υπάρχει η πιθανότητα να υπερπηδήσει το επιθυμητό ελάχιστο. Από την άλλη πλευρά, αν η τιμή της ορμής είναι πολύ μικρή, τότε υπάρχει ο κίνδυνος να μην πραγματοποιηθεί με αξιόπιστο τρόπο η αποφυγή του τοπικού ελαχίστου και η εκπαίδευση να υλοποιηθεί με πολύ αργό ρυθμό.

Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι η κατάλληλη επιλογή της τιμής της ορμής, γίνεται μέσα από τη διαδικασία πολλών δοκιμών. Ακολουθεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εκπαίδευσης ενός νευρωνικού δικτύου, με εφαρμογή μίας δεδομένης τιμής ορμής και εκπαίδευσής του χωρίς ορμή (Σχήμα 10.4.9). Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα, η εκπαίδευση του δικτύου με χρήση της ορμής ολοκληρώνεται πολύ πιο γρήγορα με μικρότερο αριθμό επαναλήψεων και η τελική τιμή του σφάλματος είναι μικρότερη.



Σχήμα 10.4.9. Εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου με ή χωρίς τη χρήση της ορμής (Διαμαντάρας 2007).

10.5 Διαδικασία υλοποίησης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου για την πρόβλεψη του μέσου μεγέθους των τεμαχών του εξορυσσόμενου υλικού

Το μέγεθος των τεμαχών εξαρτάται από παραμέτρους που διέπουν τόσο τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας του εξορυσσόμενου μετώπου, όσο και τις παραμέτρους που συνθέτουν τη διαδικασία της ανατίναξης (Nur Lyana K. Et al., 2016). Αξίζει να σημειωθεί ότι, στην παρούσα έρευνα ο κánaβος διάνοιξης των διατρημάτων (φορτίο x απόσταση), το ύψος του μετώπου εξόρυξης (12 m), η διάμετρος των διατρημάτων για κάθε λατομείο (4.5 in (11.43 cm) στο λατομείο του Δρυμού & 6.5 in (16.51 cm) στο λατομείο των Ταγαράδων), τα μέσα έναυσης και πυροδότησης της ανατίναξης (χρήση ηλεκτρικών και μη ηλεκτρικών καψυλίων), και το είδος της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO, διατηρούνται σταθερά σε κάθε διαδικασία ανατίναξης. Επομένως, οι παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη σύνθεση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, προκειμένου να προβλεφθεί το μέσο μέγεθος των τεμαχών του εξορυσσόμενου υλικού, είναι οι ακόλουθες, (Dimitraki et al. 2018):

Λεδομένα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο:

- 1) Ο τροποποιημένος Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας της βραχομάζας του εκάστοτε εξορυσσόμενου μετώπου (Modified Blastability Index)
- 2) Η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ανά κυβικό μέτρο εξορυσσόμενου υλικού, Powder Factor (ANFO kg/m³),
- 3) Η επιθυμητή ποσότητα του εξορυσσόμενου υλικού σε τόνους (t),

Λεδομένα εξόδου στο νευρωνικό δίκτυο:

Το μέσο μέγεθος των τεμαχών της εξορυσσόμενης μάζας σε cm (Xav).

Το υπολογιστικό πρόγραμμα το οποίο εφαρμόστηκε προκειμένου να εξαχθεί το βέλτιστο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για τις παραπάνω παραμέτρους, είναι το *Neuroph Java Neural Network Framework*[®]. Το συγκεκριμένο πλαίσιο εργασίας δημιουργήθηκε στο Τμήμα Οργανωτικών Επιστημών, στο Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου, το 2008 (δημιουργοί του προγράμματος είναι: Zoran Sevarac, Jon Tait, Laura Carter-Greaves, Aidan Morgan (NEAT support for Neuroph) και Dr. Valentin Steinhauer). Το Neuroph έχει αναγνωριστεί ως ο πρωτεργάτης στην καινοτομία, στην πλατφόρμα Java (Duke's Choice Award, 2013). Το Neuroph Studio, αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο ανάπτυξης νευρωνικών δικτύων, το οποίο δίνει τη δυνατότητα με γρήγορο και αυτοματοποιημένο τρόπο να πραγματοποιούνται οι κατάλληλες επιλογές, για να δημιουργηθεί ένα νευρωνικό δίκτυο.

Ο καθορισμός του βέλτιστου δικτύου πρόβλεψης της επιθυμητής μεταβλητής, προέκυψε μέσω της διαδικασίας της δοκιμής και σφάλματος. Στόχος ήταν να δημιουργηθούν δύο νευρωνικά δίκτυα, ένα για κάθε λατομείο. Η σειρά των εργασιών που ακολουθήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η εξής:

- 1) Εισαγωγή των δεδομένων (data set) στο πλαίσιο εργασίας Neuroph Studio. Το σύνολο των δεδομένων ανέρχεται σε 50 για κάθε λατομείο, (δηλαδή εκατό καταγραφές ανατινάξεων συνολικά). Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η κανονικοποίηση των δεδομένων (normalization) σύμφωνα με τη μέθοδο min-max, προκειμένου να δημιουργηθεί μία ορισμένη κλίμακα ανάπτυξης τιμών, μέσα σε ένα μικρό και καθορισμένο εύρος (συγκεκριμένα από 0 έως 1). Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα να επιταχύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης του δικτύου. Έτσι λοιπόν, η μέθοδος min-max εντάσσει κάθε τιμή (x) σε ένα νέο εύρος τιμών με καινούρια ελάχιστη (new_{min}) και μέγιστη τιμή (new_{max}), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} (new_{max} - new_{min}) + new_{min} \quad (10.5.1)$$

- 2) Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εκπαίδευσης (train) και ελέγχου (test), διαφορετικής δομής νευρωνικών δικτύων, προκειμένου να γίνει η τελική επιλογή του βέλτιστου μοντέλου. Ο διαχωρισμός των δεδομένων σε ποσοστό που θα συμμετάσχει στην εκπαίδευση από εκείνο που θα συμμετάσχει στον έλεγχο του μοντέλου, πραγματοποιήθηκε αυτόματα από το Neuroph, με εφαρμογή της μεθόδου Hold out. Ο ίδιος ποσοστιαίος διαχωρισμός των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για όλες τις δομές των δικτύων για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, (70% training και 30% test).
- 3) Για κάθε μία διαφορετική δομή νευρωνικού δικτύου επιλέχθηκε διαφορετικός αριθμός κρυφών νευρώνων, σύμφωνα με εμπειρικούς κανόνες, ο οποίος αρχικά ανήλθε στους τρεις κρυφούς νευρώνες και αυξήθηκε μέχρι και τους δέκα νευρώνες. Ο αριθμός των επιπέδων των κρυφών νευρώνων διατηρήθηκε στο ένα επίπεδο, καθώς έπειτα από δοκιμές με προσθήκη δεύτερου κρυφού επιπέδου, το σύστημα δεν είχε την επιθυμητή απόδοση (αργή απόδοση με μεγάλο αριθμό επαναλήψεων).
- 4) Για κάθε μία διαφορετική δομή μοντέλου εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι αλγορίθμου με επίβλεψη, ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης με ορμή (Back-

propagation with momentum) και χωρίς ορμή (Back-propagation), προκειμένου να αξιολογηθεί η διαδικασία εκπαίδευσης του κάθε μοντέλου. Επιπλέον, για κάθε είδος νευρωνικού δικτύου πραγματοποιήθηκε αλλαγή του βήματος εκπαίδευσης (learning rate) από 0.2 έως 0.5, για να διαπιστωθεί η επίδρασή του στο αποτέλεσμα. Το ίδιο υλοποιήθηκε και με διαφοροποίηση της συνάρτησης μεταφοράς στο τελευταίο επίπεδο του κάθε δικτύου. Οι δύο συναρτήσεις μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν στο επίπεδο εξόδου είναι η σιγμοειδής λογιστική συνάρτηση και η γραμμική συνάρτηση, διατηρώντας ίδια τη σιγμοειδή λογιστική συνάρτηση στο επίπεδο των κρυφών νευρώνων. Η τιμή της ορμής διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 0.7 για όλες τις δομές των δικτύων.

- 5) Ακολούθησε η καταγραφή των αποτελεσμάτων για κάθε ένα μοντέλο και η αξιολόγησή τους. Τα αποτελέσματα από το μοντέλο υπέστησαν τη διαδικασία της από-κανονικοποίησης (denormalization), προκειμένου να επανέλθουν στο αρχικό εύρος τιμών πριν την κανονικοποίησή τους (normalization). Η εξίσωση η οποία δίνει την κάθε τιμή μετά την από-κανονικοποίηση είναι η ακόλουθη:

$$y_{denorm} = y_{norm} * (maxY_{denorm} - minY_{denorm}) + minY_{denorm} \quad (10.5.2)$$

Έπειτα, επιλέχθηκαν τα δίκτυα με το μικρότερο σφάλμα γενίκευσης, Normalized RMSE για κάθε λατομείο και υπολογίστηκε το MAPE (Mean Absolute Percentage Error) και το SS (Skill Score). Επίσης, προσδιορίστηκε το πλήθος των μεμονωμένων τιμών που αποκλίνουν περισσότερο από 15% $\approx 5cm$ μέσο μέγεθος τεμαχίου, από την πραγματική τιμή. Η τελική επιλογή του βέλτιστου μοντέλου έγινε με γνώμονα το RMSE, το MAE (Mean Absolute Error), το SS (Skill Score) και τον συντελεστή συσχέτισης R μεταξύ των πραγματικών τιμών και αυτών που προβλέπονται από το κάθε ένα μοντέλο. Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), μεταξύ της πραγματικής τιμής (x_{meas}) και της προβλεπόμενης τιμής (x_{pred}) από το μοντέλο, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{meas} - x_{pred})^2} \quad (10.5.3)$$

Το ποσοστιαίο μέσο απόλυτο σφάλμα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{meas - pred}{pred} \right| * 100 \quad (10.5.4)$$

Ενώ, το Skill Score υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$SS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [meas - pred]^2}{\sum_{i=1}^n [meas - \overline{meas}]^2} \quad (10.5.5)$$

Οι παραπάνω στατιστικές παράμετροι υπολογίστηκαν μέσω των υπολογιστικών προγραμμάτων Statistica[®], R[®] και Excel[®].

- 6) Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο, με τα αποτελέσματα από τη συμβατική πολλαπλή παλινδρόμηση.
- 7) Επαληθεύτηκε το βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο με τη μέθοδο της Διασταυρωμένης Επικύρωσης (Cross Validation), προκειμένου να διαπιστωθεί η ικανότητα γενίκευσής του.

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 10.5.1 και Πίνακας 10.5.2) παρουσιάζονται οι στατιστικές παράμετροι των δεδομένων εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν στα νευρωνικά δίκτυα, για τα δύο λατομεία αδρανών υλικών.

Πίνακας 10.5.1. Παράμετροι εισόδου και εξόδου στο νευρωνικό δίκτυο για το λατομείο του Δρυμού

Λατομείο Δρυμού					
Είδος δεδομένων	Παράμετροι	Στατιστικές Παράμετροι			
		Minimum	Maximum	Mean	Median
Εισόδου	Τροποποιημένος Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας (MBI)	52	81	64	61
	Powder Factor (PF) (ANFO kg /m ³)	0.28	0.62	0.37	0.35
	Ποσότητα εξορυσσόμενου υλικού (t)	7,942	48,654	25,928	26,474
Εξόδου	Μέσο μέγεθος τεμαχών της εξορυσσόμενης μάζας (Xav,cm)	18	45	31	30

Πίνακας 10.5.2. Παράμετροι εισόδου και εξόδου στο νευρωνικό δίκτυο για το λατομείο των Ταγαράδων

Λατομείο Ταγαράδων					
Είδος δεδομένων	Παράμετροι	Στατιστικές Παράμετροι			
		Minimum	Maximum	Mean	Median
Εισόδου	Τροποποιημένος Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας (MBI)	44	69	55	54
	Powder Factor (PF) (ANFO kg /m ³)	0.24	0.45	0.35	0.36
	Ποσότητα εξορυσσόμενου υλικού (t)	4,306	22,896	13,202	13,547
Εξόδου	Μέσο μέγεθος τεμαχίων της εξορυσσόμενης μάζας (Xav ,cm)	17	38	25	25

Όπως προαναφέρθηκε, εξετάστηκαν διαφορετικά είδη νευρωνικών δικτύων ως προς τη δομή αλλά και ως προς τη διαδικασία εκπαίδευσής τους, προκειμένου να επιλεγεί το βέλτιστο για τις δεδομένες παραμέτρους της παρούσας έρευνας. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι διαφορετικές συνθέσεις δικτύων για κάθε λατομείο (Πίνακας 10.5.3 και Πίνακας 10.5.4).

Υποσημειώσεις πινάκων:

***BP_S** (Κανόνας εκπαίδευσης: Back Propagation /Σιγμοειδής λογιστική συνάρτηση στο επίπεδο εξόδου)

***BPM_S** (Κανόνας εκπαίδευσης: Back Propagation with Momentum/ Σιγμοειδής λογιστική συνάρτηση στο επίπεδο εξόδου)

***BPM_L**(Κανόνας εκπαίδευσης: Back Propagation with Momentum / Γραμμική συνάρτηση στο επίπεδο εξόδου)

*Default values (Momentum=0.7)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΟΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ

Πίνακας 10.5.3. Διαφορετικές συνθέσεις νευρωνικών δικτύων και το αντίστοιχο Normalized RMSE για το λατομείο του Δρυμού

Δοκιμή Εκπαίδευσης	Κρυφοί νευρώνες	Βήμα εκπαίδευσης	Ορμή	Μέγιστο σφάλμα	Αριθμός επαναλήψεων	Τελικό σφάλμα δικτύου εκπαίδευσης	Ολικό MSE ελέγχου	Normalized RMSE	Αρ. μεμονωμένων σφαλμάτων >15%≈ 5cm
1_BPM_S	3	Πολύ μικρό 0.002	0.7	0.01	111,680	0.010	0.0140	0.1183	2
2_BPM_S	3	Πολύ μεγάλο 0.9	0.7	0.01	634	0.010	0.0149	0.1220	2
3a BPM S	3	0.2	0.7	0.01	2,311	0.010	0.0135	0.1161	2
3b BPM L	3	0.2	0.7	0.01	5,640	0.010	0.0160	0.1265	3
3c BP S	3	0.2	0.7	0.01	2,848	0.010	0.0137	0.1170	2
4a BPM S	3	0.3	0.7	0.01	1,581	0.010	0.0135	0.1161	2
4b BPM L	3	0.3	0.7	0.01	4,663	0.010	0.0201	0.1418	4
4c BP S	3	0.3	0.7	0.01	2,715	0.010	0.0146	0.1208	2
5a BPM S	3	0.5	0.7	0.01	1,187	0.010	0.0128	0.1131	2
5b BPM L	3	0.5	0.7	0.01	13,369	0.010	0.0905	0.3008	5
5c BP S	3	0.5	0.7	0.01	1,239	0.010	0.0134	0.1158	2
6a BPM S	5	0.2	0.7	0.01	3,121	0.010	0.0133	0.1153	2
6b BPM L	5	0.2	0.7	0.01	7,369	0.010	0.0166	0.1288	2
6c BP S	5	0.2	0.7	0.01	1,641	0.010	0.0138	0.1175	2
7a BPM S	5	0.3	0.7	0.01	1,345	0.010	0.0133	0.1153	4
7b BPM L	5	0.3	0.7	0.01	3,983	0.010	0.0310	0.1761	6
7c BP S	5	0.3	0.7	0.01	2,231	0.010	0.0136	0.1166	2
8a BPM S	5	0.5	0.7	0.01	1,106	0.010	0.0130	0.1140	2
8b BPM L	5	0.5	0.7	0.01	2,284	0.010	0.0445	0.2110	7
8c BP S	5	0.5	0.7	0.01	1,632	0.010	0.0137	0.1170	2
9a BPM S	10	0.2	0.7	0.01	2,350	0.010	0.0130	0.1140	2
9b BPM L	10	0.2	0.7	0.01	5,297	0.010	0.0197	0.1404	3
9c BP S	10	0.2	0.7	0.01	4,107	0.010	0.0132	0.1149	2
10a BPM S	10	0.3	0.7	0.01	2,458	0.010	0.0128	0.1149	3
10b BPM L	10	0.3	0.7	0.01	3,358	0.010	0.0502	0.2241	3
10c BP S	10	0.3	0.7	0.01	2,546	0.010	0.0128	0.1131	2
11a BPM S	10	0.5	0.7	0.01	1,732	0.010	0.0130	0.1140	2
11b BPM L	10	0.5	0.7	0.01	3,233	0.010	0.0812	0.2850	6
11c BP S	10	0.5	0.7	0.01	1,580	0.010	0.0132	0.1149	2

Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα, προκύπτουν οι εξής χρήσιμες παρατηρήσεις:

1. Με πολύ χαμηλή τιμή του ρυθμού εκπαίδευσης, η εκπαίδευση πραγματοποιείται πολύ αργά με μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (111,680), σε αντίθεση με την πολύ υψηλή τιμή του ρυθμού εκπαίδευσης (634 επαναλήψεις).
2. Με αύξηση του ρυθμού εκπαίδευσης (από 0.2 έως 0.5) παρατηρείται μείωση του αριθμού των επαναλήψεων και μικρή μείωση του RMSE testing και για τα τρία είδη νευρωνικών δικτύων (3-3-1/3-5-1/3-10-1) και για τους δύο κανόνες εκπαίδευσης με σιγμοειδή λογιστική συνάρτηση (BPM_S & BP_S). Επίσης, το ίδιο ισχύει, στις περισσότερες περιπτώσεις, για τον αριθμό των επαναλήψεων και με εφαρμογή του αλγορίθμου BPM_L με γραμμική συνάρτηση στο επίπεδο εξόδου.
3. Ο αριθμός των επαναλήψεων με τον κανόνα εκπαίδευσης BPM είναι μικρότερος σε σχέση με το κανόνα BP, συγκρινόμενος για τους ίδιους ρυθμούς μάθησης, την ίδια δομή του νευρωνικού δικτύου και τα ίδια ποσοστά εκπαίδευσης και ελέγχου.
4. Με αύξηση του αριθμού των κρυφών νευρώνων παρατηρείται μικρή σχετικά μείωση του RMSE testing.
5. Με την εφαρμογή του κανόνα μάθησης BPM_L σε συνδυασμό με την γραμμική συνάρτηση στο τελευταίο επίπεδο, παρατηρείται μεγάλη αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων καθώς και του RMSE σε σχέση με την εφαρμογή της σιγμοειδούς λογιστικής συνάρτησης και για τον ίδιο κανόνα μάθησης.
6. Με την εφαρμογή του κανόνα μάθησης BPM σε συνδυασμό με την γραμμική συνάρτηση στο τελευταίο επίπεδο και με αύξηση του ρυθμού εκπαίδευσης (από 0.2 έως 0.5) παρατηρείται αύξηση του RMSE για όλα τα είδη νευρωνικών δικτύων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΟΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ

Πίνακας 10.5.4. Διαφορετικές συνθέσεις νευρωνικών δικτύων και το αντίστοιχο Normalized RMSE για το λατομείο των Ταγαράδων

Δοκιμή Εκπαίδευσης	Κρυφοί νευρώνες	Βήμα εκπαίδευσης	Ορμή	Μέγιστο σφάλμα	Αριθμός επαναλήψεων	Τελικό σφάλμα δικτύου εκπαίδευσης	Ολικό MSE ελέγχου	Normalized RMSE	Αρ. μεμονωμένων σφαλμάτων >15%≈ 5cm
1_BPM_S	3	Πολύ μικρό 0.002	0.7	0.01	147,548	0.010	0.0220	0.1483	6
2_BPM_S	3	Πολύ μεγάλο 0.9	0.7	0.01	993	0.010	0.0213	0.1459	3
3a BPM S	3	0.2	0.7	0.01	2,553	0.010	0.0212	0.1456	6
3b BPM L	3	0.2	0.7	0.01	25,418	0.010	0.0370	0.1924	4
3c BP S	3	0.2	0.7	0.01	4,904	0.010	0.0212	0.1456	6
4a BPM S	3	0.3	0.7	0.01	2,168	0.010	0.0210	0.1449	5
4b BPM L	3	0.3	0.7	0.01	1,828	0.010	0.0375	0.1936	7
4c BP S	3	0.3	0.7	0.01	1,402	0.010	0.0223	0.1493	5
5a BPM	3	0.5	0.7	0.01	1,136	0.010	0.0212	0.1456	2
5b BPM L	3	0.5	0.7	0.01	115,224	0.010	4.7702	2.1841	3
5c BP S	3	0.5	0.7	0.01	1,100	0.010	0.0215	0.1466	4
6a BPM S	5	0.2	0.7	0.01	3,381	0.010	0.0210	0.1449	4
6b BPM L	5	0.2	0.7	0.01	13,822	0.010	0.0814	0.2853	10
6c BP S	5	0.2	0.7	0.01	2,619	0.010	0.0210	0.1449	5
7a BPM S	5	0.3	0.7	0.01	1,366	0.010	0.0204	0.1428	3
7b BPM L	5	0.3	0.7	0.01	9,242	0.010	0.0805	0.2837	3
7c BP S	5	0.3	0.7	0.01	1,926	0.010	0.0217	0.1473	5
8a BPM S	5	0.5	0.7	0.01	1,158	0.010	0.0204	0.1428	3
8b BPM L	5	0.5	0.7	0.01	1,475	0.010	0.1164	0.3412	3
8c BP S	5	0.5	0.7	0.01	1,751	0.010	0.0220	0.1483	4
9a BPM S	10	0.2	0.7	0.01	2,993	0.010	0.0209	0.1446	3
9b BPM L	10	0.2	0.7	0.01	9,275	0.010	0.0484	0.2200	9
9c BP S	10	0.2	0.7	0.01	3,517	0.010	0.0207	0.1439	5
10a BPM S	10	0.3	0.7	0.01	2,280	0.010	0.0204	0.1868	3
10b BPM L	10	0.3	0.7	0.01	6,005	0.010	0.0814	0.2853	12
10c BP S	10	0.3	0.7	0.01	2,030	0.010	0.0202	0.1421	3
11a BPM S	10	0.5	0.7	0.01	1,436	0.010	0.0202	0.1421	3
11b BPM L	10	0.5	0.7	0.01	4,790	0.010	0.0766	0.2768	11
11c BP S	10	0.5	0.7	0.01	1,312	0.010	0.0212	0.1456	3

Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα, προκύπτουν οι εξής χρήσιμες παρατηρήσεις:

1. Με πολύ χαμηλή τιμή του ρυθμού εκπαίδευσης, η εκπαίδευση πραγματοποιείται πολύ αργά με μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (147,548), σε αντίθεση με την πολύ υψηλή τιμή του ρυθμού εκπαίδευσης (993).
2. Με αύξηση του ρυθμού εκπαίδευσης (από 0.2 έως 0.5) παρατηρείται μείωση του αριθμού των επαναλήψεων και πολύ μικρή μείωση του RMSE testing και για τα τρία είδη νευρωνικών δικτύων (3-3-1/3-5-1/3-10-1) και για τους δύο κανόνες εκπαίδευσης (BPM_S & BP_S). Το ίδιο παρατηρείται και με εφαρμογή του BPM_L, με γραμμική συνάρτηση στο επίπεδο εξόδου.
3. Ο αριθμός των επαναλήψεων με τον κανόνα εκπαίδευσης BPM_S είναι μικρότερος σε σχέση με το κανόνα BP_S, συγκρινόμενος για τους ίδιους ρυθμούς μάθησης, την ίδια δομή του νευρωνικού δικτύου και τα ίδια ποσοστά εκπαίδευσης και ελέγχου.
4. Με αύξηση του αριθμού των κρυφών νευρώνων παρατηρείται μικρή σχετικά μείωση του RMSE testing.
5. Με την εφαρμογή του κανόνα μάθησης BPM σε συνδυασμό με την γραμμική συνάρτηση στο τελευταίο επίπεδο, παρατηρείται μεγάλη αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων και του RMSE testing, σε σχέση με εφαρμογή της σιγμοειδούς λογιστικής συνάρτησης για τον ίδιο κανόνα εκπαίδευσης.
6. Με εφαρμογή του κανόνα εκπαίδευσης BPM σε συνδυασμό με την γραμμική συνάρτηση στο επίπεδο εξόδου και με αύξηση του ρυθμού εκπαίδευσης (από 0.2 έως 0.5), παρατηρείται αύξηση του RMSE για όλα τα είδη νευρωνικών δικτύων.

10.5.1 Επιλογή του βέλτιστου Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου & σύγκριση με το συμβατικό στατιστικό μοντέλο

Όπως αναλύθηκε εκτενώς στην παράγραφο 10.5, πραγματοποιήθηκαν συνθέσεις διαφορετικών δομών νευρωνικών δικτύων, προκειμένου να επιλεγεί το βέλτιστο για την εκτίμηση του μέσου μεγέθους τεμαχών του εξορυσσόμενου υλικού. Από τον Πίνακα 10.5.3 και Πίνακα 10.5.4, αρχικά επισημαίνονται τα δίκτυα εκείνα τα οποία χαρακτηρίζονται με τη μικρότερη τιμή Normalized RMSE.

Για τα δίκτυα αυτά υπολογίστηκαν οι στατιστικές παράμετροι MAE, MAPE, SS και r , για να προσδιοριστεί η ακρίβεια υπολογισμού της προβλεπόμενης μεταβλητής, καθώς και ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των πραγματικών τιμών και των προβλεπόμενων από το κάθε μοντέλο. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε συμβατική στατιστική ανάλυση, με εφαρμογή της πολυμεταβλητής ανάλυσης παλινδρόμησης (MVRA), με την οποία προκύπτει μία συνάρτηση πρόβλεψης της εξαρτημένης μεταβλητής σε σχέση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 10.5.5 και Πίνακας 10.5.6), παρατίθενται τα μοντέλα με τη μικρότερη τιμή Normalized RMSE, με τις αντίστοιχες στατιστικές παραμέτρους που υπολογίστηκαν για κάθε λατομείο.

Πίνακας 10.5.5. Στατιστικές παράμετροι αξιοπιστίας των νευρωνικών δικτύων με τις μικρότερες τιμές Normalized RMSE, για το λατομείο του Δρυμού

Λατομείο Δρυμού							
Νευρωνικό Δίκτυο	RMSE		MAE (cm)	MAPE (%)	Αρ. μεμονωμένων MAPE >15%≈5 cm	SS	r
	Normalized	Denormalized (cm)					
8a	0.1140	3.26	2.55	8.35	2	0.767	0.88
10a	0.1149	3.30	2.62	8.80	3	0.757	0.87
3b	0.1265	3.55	2.85	8.87	3	0.727	0.87

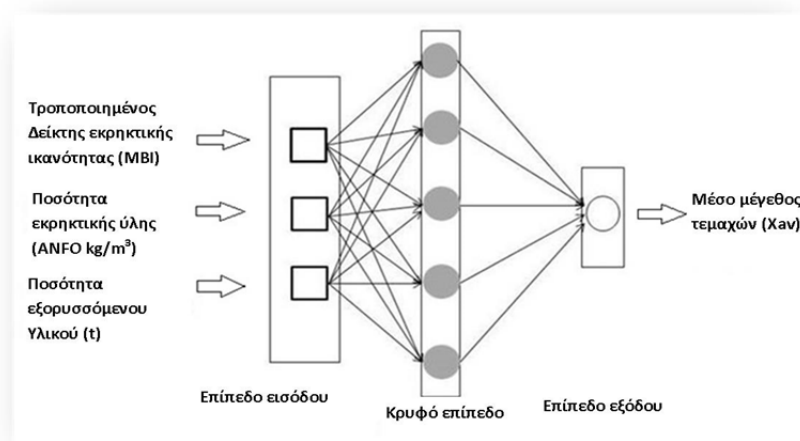
Πίνακας 10.5.6. Στατιστικές παράμετροι αξιοπιστίας των νευρωνικών δικτύων με τις μικρότερες τιμές Normalized RMSE, για το λατομείο των Ταγαράδων

Λατομείο Ταγαράδων							
Νευρωνικό Δίκτυο	RMSE		MAE (cm)	MAPE (%)	Αρ. μεμονωμένων MAPE >15%≈5 cm	SS	r
	Normalized	Denormalized (cm)					
7a	0.1428	2.92	2.38	9.57	3	0.65	0.77
4a	0.1449	2.98	2.47	9.89	5	0.575	0.76
10a	0.1868	3.17	2.60	10	3	0.486	0.75

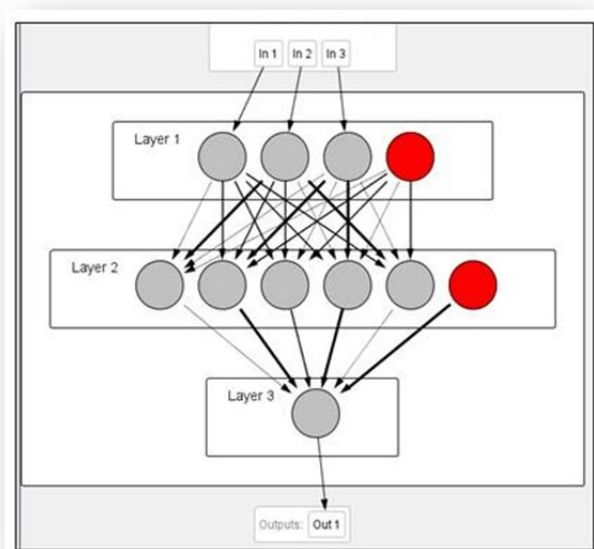
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 10.5.5 το βέλτιστο δίκτυο για το λατομείο του Δρυμού είναι το 8a. Το δίκτυο αυτό έχει δομή 3-5-1, δηλαδή με 5 κρυφούς νευρώνες και βήμα εκπαίδευσης 0.5 (Σχήμα 10.5.1 και Σχήμα 10.5.2). Η εκπαίδευση πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης με ορμή (Backpropagation with momentum) και εφαρμόστηκε η σιγμοειδής λογιστική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ

συνάρτηση ενεργοποίησης τόσο στους κρυφούς νευρώνες όσο και στο επίπεδο εξόδου. Το δίκτυο εκπαιδεύτηκε μετά από 1,106 επαναλήψεις. Σε σύγκριση με τα άλλα δύο δίκτυα (10a, 3b) αποτελεί το δίκτυο με τον ισχυρότερο βαθμό συσχέτισης μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών (0.88), με ακρίβεια υπολογισμού του μεγέθους των τεμαχών στα 2.55 cm.



Σχήμα 10.5.1. Δομή του βέλτιστου Νευρωνικού Δικτύου για την πρόβλεψη του μέσου μεγέθους τεμαχών της εξορυσσόμενης μάζας.



Σχήμα 10.5.2. Δομή του βέλτιστου Νευρωνικού Δικτύου (λατομείο Δρυμού) με τα αντίστοιχα βάρη των νευρώνων, όπως υπολογίστηκαν από το Neuroph Java Neural Network Framework.

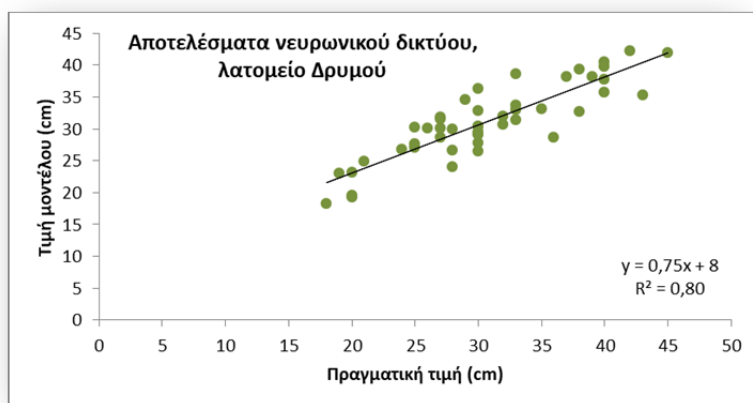
Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε η συμβατική στατιστική ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis), για τα δεδομένα του λατομείου του Δρυμού, με τις ίδιες παραμέτρους με το νευρωνικό δίκτυο, ως εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές, προκύπτοντας η εξίσωση: $X_{av} = 0,45 * MBI - 64 * PF * 10^{-4}t + 22$ (10.5.6).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10.5.7), παρουσιάζονται οι στατιστικές παράμετροι αξιοπιστίας του στατιστικού μοντέλου, όπως προέκυψε από την ανάλυση παλινδρόμησης, σε σύγκριση με το νευρωνικό δίκτυο.

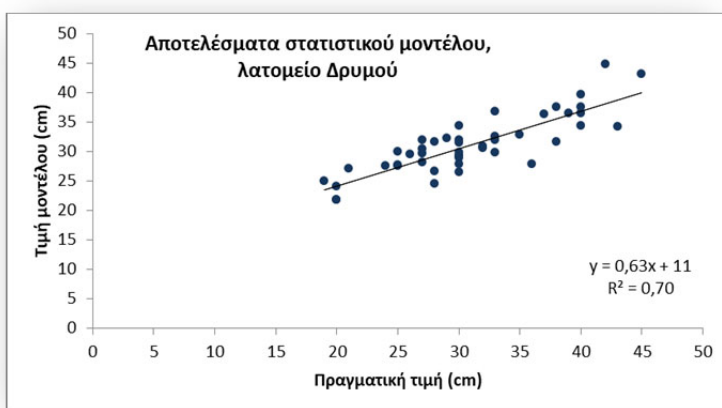
Πίνακας 10.5.7. Στατιστικές παράμετροι αξιοπιστίας του στατιστικού μοντέλου και του νευρωνικού δικτύου για το λατομείο του Δρυμού

Λατομείο Δρυμού					
	RMSE (cm)	MAE (cm)	MAPE (%)	Αρ. μεμονωμένων MAPE >15% ≈ 5 cm	r
Στατιστικό μοντέλο	3.53	2.86	9.69	5	0.84
Νευρωνικό δίκτυο	3.26	2.55	8.35	2	0.88

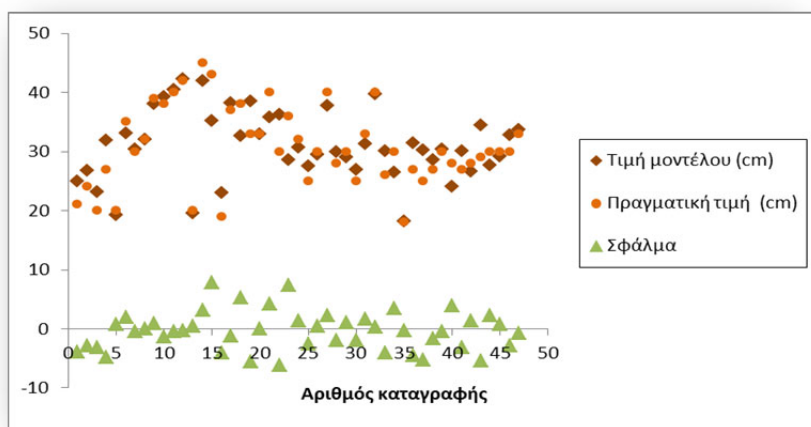
Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η αξιοπιστία του νευρωνικού δικτύου σε σχέση με το στατιστικό μοντέλο είναι μεγαλύτερη, καθώς η πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής έναντι των υπολοίπων μεταβλητών, πραγματοποιείται ευμενέστερα, με μικρότερο ποσοστό του απόλυτου λάθους 8.35% έναντι 9.69%. Επίσης, ο αριθμός των μεμονωμένων τιμών που έχουν σφάλμα εκτίμησης του μέσου μεγέθους τεμαχών μεγαλύτερο από 5 cm, είναι μεγαλύτερος με τη συμβατική μέθοδο, σε σχέση με το νευρωνικό δίκτυο (πέντε έναντι δύο περιπτώσεων αντίστοιχα). Στο Σχήμα 10.5.3 και Σχήμα 10.5.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς των πραγματικών τιμών έναντι των προβλεπόμενων, όπως προκύπτουν από το στατιστικό μοντέλο και το νευρωνικό δίκτυο. Στο Σχήμα 10.5.5, παρουσιάζεται το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει τις πραγματικές τιμές, τις τιμές του νευρωνικού δικτύου και τα αντίστοιχα σφάλματα, για κάθε καταγραφή. Τα σφάλματα προκύπτουν από τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της τιμής που προέκυψε από την εφαρμογή του νευρωνικού δικτύου. Το εύρος του σφάλματος κυμαίνεται από -6 έως 8.



Σχήμα 10.5.3. Σύγκριση μεταξύ των πραγματικών τιμών και των τιμών από το νευρωνικό δίκτυο.

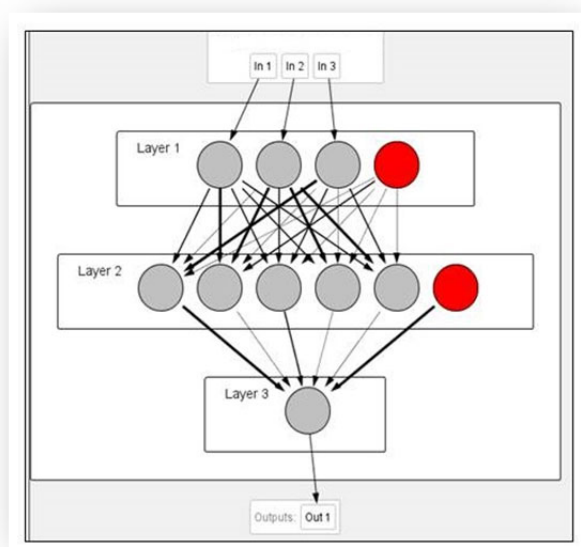


Σχήμα 10.5.4. Σύγκριση μεταξύ των πραγματικών τιμών και των τιμών από το στατιστικό μοντέλο.



Σχήμα 10.5.5. Απεικόνιση των πραγματικών τιμών έναντι των τιμών του νευρωνικού δικτύου και τα αντίστοιχα σφάλματα.

Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.5.6, το βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο για την περιγραφή των δεδομένων του λατομείου των Ταγαράδων είναι το δίκτυο 7a. Η δομή του δικτύου είναι η ίδια με αυτή του λατομείου του Δρυμού, δηλαδή 3-5-1, με 5 κρυφούς νευρώνες, με βήμα εκπαίδευσης 0.5, (Σχήμα 10.5.6). Η εκπαίδευση πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης με ορμή (Backpropagation with momentum) και εφαρμόστηκε η σιγμοειδής λογιστική συνάρτηση ενεργοποίησης τόσο στους κρυφούς νευρώνες όσο και στο επίπεδο εξόδου. Το δίκτυο χρειάστηκε 1,158 επαναλήψεις για να εκπαιδευτεί. Σε σύγκριση με τα άλλα δύο δίκτυα (4a και 10a) αποτελεί το δίκτυο με τον ισχυρότερο βαθμό συσχέτισης μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών (0.77) με ακρίβεια υπολογισμού του μέσου μεγέθους των τεμαχών στα 2.38cm.



Σχήμα 10.5.6. Δομή του βέλτιστου Νευρωνικού Δικτύου (λατομείο Ταγαράδων) με τα αντίστοιχα βάρη των νευρώνων, όπως υπολογίστηκαν από το Neuroph Java Neural Network Framework.

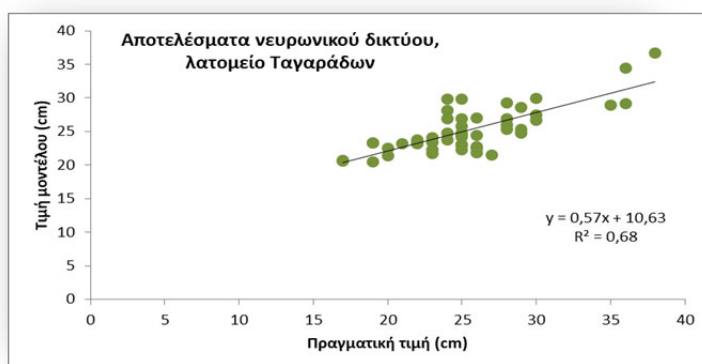
Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι με το νευρωνικό δίκτυο, ως εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές, για τα δεδομένα του λατομείου των Ταγαράδων, για την πραγματοποίηση της συμβατικής στατιστικής ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis). Η εξίσωση η οποία προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση είναι η ακόλουθη: $X_{av} = 0,46 * MBI - 56 * PF + 10^{-4} * t + 19$

(11.5.7). Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 10.5.8), παρουσιάζονται οι στατιστικές παράμετροι αξιοπιστίας του στατιστικού μοντέλου, όπως προέκυψε από την ανάλυση παλινδρόμησης, σε σύγκριση με το νευρωνικό δίκτυο.

Πίνακας 10.5.8. Στατιστικές παράμετροι αξιοπιστίας του στατιστικού μοντέλου και του νευρωνικού δικτύου για το λατομείο των Ταγαράδων

Λατομείο Ταγαράδων					
	RMSE (cm)	MAE (cm)	MAPE (%)	Αρ. μεμονωμένων MAPE >15% ≈ 5cm	r
Στατιστικό μοντέλο	3.08	2.52	9.85	6	0.70
Νευρωνικό δίκτυο	2.90	2.38	9.57	2	0.77

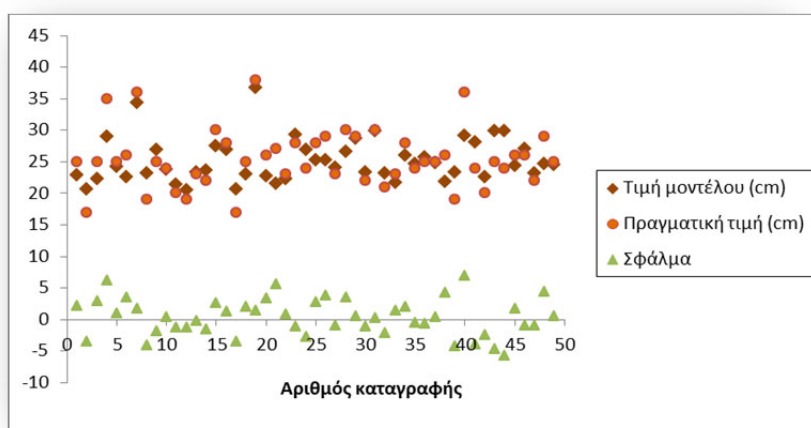
Από τις στατιστικές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι η εκτίμηση της εξαρτημένης μεταβλητής (μέσο μέγεθος τεμαχών εξορυσσόμενης μάζας) με το νευρωνικό δίκτυο, παρουσιάζει μία μικρή υπεροχή, με μικρότερο ποσοστό σφάλματος 9.57%, έναντι 9.85% σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο. Επιπλέον, ο αριθμός των μεμονωμένων σφαλμάτων που υπερβαίνουν τα 5cm σφάλματος, είναι κατά πολύ μεγαλύτερος με το στατιστικό μοντέλο έναντι του νευρωνικού δικτύου (έξι παρατηρήσεις έναντι δύο). Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 10.5.7) παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες τιμές από το νευρωνικό δίκτυο και από την πολλαπλή παλινδρόμηση σε σχέση με τις πραγματικές τιμές που προέκυψαν από τις καταγραφές στο λατομείο των Ταγαράδων. Επιπλέον, στο Σχήμα 10.5.8 και Σχήμα 10.5.9, απεικονίζονται τα σφάλματα μεταξύ των τιμών που καταγράφηκαν και αυτών που υπολογίστηκαν μέσω του νευρωνικού δικτύου. Το εύρος των σφαλμάτων κυμαίνεται μεταξύ -6 και 7.



Σχήμα 10.5.7. Σύγκριση μεταξύ των πραγματικών τιμών και των τιμών από το νευρωνικό δίκτυο.



Σχήμα 10.5.8. Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών του στατιστικού μοντέλου.



Σχήμα 10.5.9. Απεικόνιση των πραγματικών τιμών έναντι των τιμών του νευρωνικού δικτύου και τα αντίστοιχα σφάλματα.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε testing με τα δεδομένα του Δρυμού στο δίκτυο των Ταγαράδων και αποδείχθηκε ότι το MAPE είναι της τάξης του 9%, σε αντίθεση με τον έλεγχο που έγινε με εφαρμογή των δεδομένων των Ταγαράδων στο δίκτυο του Δρυμού, όπου το σφάλμα ήταν μεγαλύτερο στο 12%.

10.5.2 Αξιολόγηση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

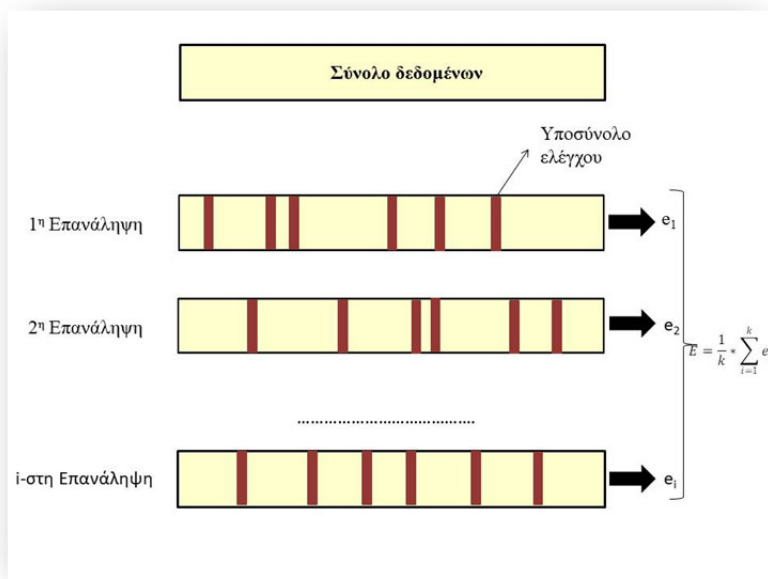
Ο απώτερος στόχος ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι η παροχή ορθών αποφάσεων για παραδείγματα που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την εκπαίδευσή του. Το δίκτυο έχοντας εκπαιδευτεί ορθώς με ένα σύνολο δεδομένων, θα έχει τη δυνατότητα να προβλέπει σωστά, με δεδομένα που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν. Η ικανότητα αυτή του δικτύου αποτελεί την ικανότητα γενίκευσής του,

(Haykin 2017). Ένας τρόπος για τη βελτιστοποίηση της ικανότητας γενίκευσης μιας μηχανής μάθησης είναι να εκπαιδεύουν πολλά μοντέλα πάνω σε διαφορετικές οικογένειες συναρτήσεων, να εκτιμηθεί η ικανότητα γενίκευσης της τελικής συνάρτησης που έμαθε το κάθε μοντέλο και τέλος να επιλεγεί εκείνη η συνάρτηση – μοντέλο που επιτυγχάνει τη βέλτιστη γενίκευση.

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο νευρωνικό δίκτυο διαιρέθηκαν σε δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου, σύμφωνα με τη μέθοδο hold out. Παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή έχει κάποιους βασικούς περιορισμούς. Πρώτο βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο διαχωρισμός είναι δυνατό να είναι τέτοιος που να οδηγήσει σε παραπλάνηση του σφάλματος και ειδικότερα στην περίπτωση όπου ο αριθμός των δεδομένων είναι περιορισμένος, το σύνολο των δεδομένων ελέγχου να μην επαρκούν πλήρως για την ορθή εξαγωγή συμπεράσματος για τη γενίκευση. Ο δεύτερος περιορισμός της μεθόδου αυτής έγκειται στο γεγονός της μοναδικής διαίρεσης του συνόλου σε υποσύνολο εκπαίδευσης και ελέγχου, χωρίς να δίνει τη δυνατότητα σε όλα τα δεδομένα να χρησιμοποιηθούν για εκπαίδευση και για έλεγχο. Οι παραπάνω περιορισμοί μπορούν να ξεπεραστούν με την εφαρμογή της διασταυρωμένης επικύρωσης (Cross validation). Παρακάτω παρατίθενται κάποιες από τις μεθόδους της διασταυρωμένης επικύρωσης, (Hagan et al. 2014):

- Τυχαία υποδειγματοληψία (Random Subsampling)
- Εξαίρεσε ένα (Leave-one-out)
- Διασταυρωμένη επικύρωση σε k μέρη

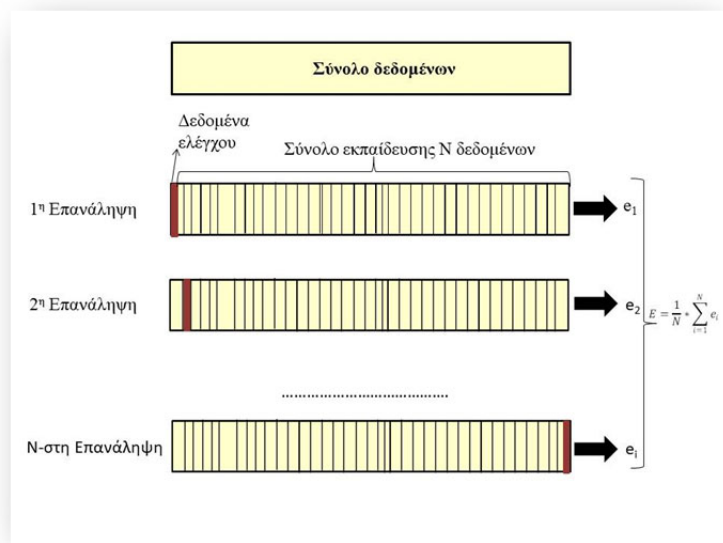
Στην περίπτωση της διασταυρωμένης επικύρωσης με τυχαία υποδειγματοληψία, εκτελούνται k επαναλήψεις στο κάθε υποσύνολο δεδομένων στα οποία έχουν διαιρεθεί τα δεδομένα. Για κάθε δειγματοληψία επιλέγεται τυχαία ένας συγκεκριμένος αριθμός δεδομένων ελέγχου. Το αποτέλεσμα είναι μετά από κάθε νέα διαίρεση το μοντέλο να εκπαιδεύεται με τα υπόλοιπα δείγματα και στη συνέχεια να υπολογίζεται το σφάλμα ελέγχου E_i . Το ολικό σφάλμα ελέγχου υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των επί μέρους σφαλμάτων, $E = \frac{1}{k} * \sum_{i=1}^k e_i$, (Σχήμα 10.5.10).



Σχήμα 10.5.10. Η μέθοδος της διασταυρωμένης επικύρωσης με τυχαία υποδειγματοληψία.

Μία ακόμη μέθοδος αξιολόγησης της γενίκευσης ενός νευρωνικού μοντέλου αποτελεί η μέθοδος εξαίρεσε ένα (Leave-one-out), η οποία αποτελεί ειδική περίπτωση της διασταυρωμένης επικύρωσης σε k μέρη. Στην περίπτωση αυτή το k επιλέγεται ίσο με τον αριθμό N του συνόλου των δεδομένων. Για ένα σύνολο δεδομένων με N δείγματα θα πραγματοποιηθούν N πειράματα. Ακολούθως, για κάθε πείραμα χρησιμοποιούνται $N-1$ δείγματα για την εκπαίδευση και ένα δείγμα για τον έλεγχο. Από κάθε μία εκτέλεση προκύπτει το σφάλμα ελέγχου και στο τέλος υπολογίζεται το ολικό σφάλμα ως ο μέσος όρος των επί μέρους σφαλμάτων,

$$E = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N e_i, \text{ (Σχήμα 10.5.11).}$$



Σχήμα 10.5.11. Η μέθοδος της διασταυρωμένης επικύρωσης εξαίρεσε ένα.

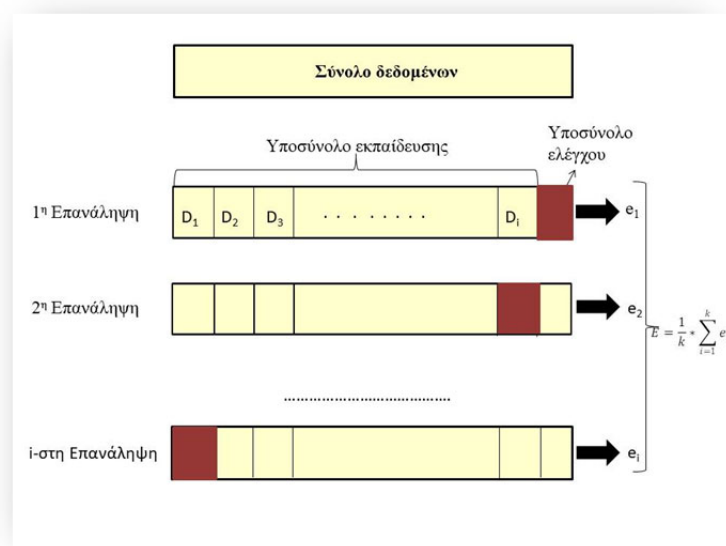
Στην παρούσα έρευνα, έπειτα από την επιλογή του βέλτιστου νευρωνικού δικτύου για το κάθε λατομείο, ακολούθησε η διαδικασία της διασταυρωμένης επικύρωσης σε k μέρη, (k fold Cross Validation). Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επικύρωση του μοντέλου αυτού, με βάση ένα σύνολο δεδομένων διαφορετικό από αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη φάση της εκπαίδευσης. Όπως, αναφέρθηκε στην παράγραφο 6, τα δεδομένα διαιρέθηκαν σε δύο υποσύνολα: σύνολο εκπαίδευσης (training set) και σύνολο ελέγχου (test set). Όμως, ο διαχωρισμός αυτός είναι αυθαίρετος και η εκτίμηση της ικανότητας γενίκευσης του μοντέλου με βάση το σφάλμα ελέγχου, ενέχει ρίσκο. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με τη διαδικασία της διασταυρωμένης επικύρωσης. Στόχος, λοιπόν, της μεθόδου, είναι η καλή εκτίμηση της ικανότητας γενίκευσης του υπό εξέταση μοντέλου.

Η μέθοδος της διασταυρωμένης επικύρωσης που εφαρμόστηκε στα δεδομένα, είναι η διασταυρωμένη επικύρωση σε k μέρη (k -Fold Cross Validation), η οποία αποτελεί την πιο συστηματική και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο και είναι παρόμοια με τη μέθοδο της τυχαίας υποδειγματοληψίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος χωρίζει το σύνολο των δεδομένων D , σε k ξένα μεταξύ τους υποσύνολα (folds) ($D_1, \dots, D_k$). Για κάθε υποσύνολο χρησιμοποιούνται $k-1$ μέρη ($D - D_i$) για την εκπαίδευση και το υπόλοιπο μέρος για τον έλεγχο. Σε κάθε i -στη φορά που εκπαιδεύεται το υπό εξέταση δίκτυο, υπολογίζεται το σφάλμα ελέγχου (e_i), (Simon Haykin 2017). Τέλος, αφού ολοκληρωθούν οι k επαναλήψεις, υπολογίζεται το μέσο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΟΡΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ

σφάλμα ελέγχου από τον μέσο όρο των επιμέρους σφαλμάτων ελέγχου:

$E = \frac{1}{k} * \sum_{i=1}^k e_i$, (Σχήμα 10.5.12). Γίνεται αντιληπτό, ότι το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι, ότι όλα τα δεδομένα χρησιμοποιούνται σε κάποια επανάληψη του δικτύου και στην εκπαίδευση και στον έλεγχο.



Σχήμα 10.5.12. Η μέθοδος της διασταυρωμένης επικύρωσης σε k μέρη.

Για κάθε βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο που έχει οριστεί για κάθε λατομείο, εφαρμόστηκε η μέθοδος της διασταυρωμένης επικύρωσης σε k μέρη. Για τον καλύτερο διαχωρισμό των δεδομένων, συνυπολογίζοντας τον αριθμό των δεδομένων για το κάθε λατομείο, ορίστηκε ως $k = 4$. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 10.5.8), παρατίθεται το σφάλμα ελέγχου που προέκυψε μετά από την εκπαίδευση του κάθε δικτύου και το μέσο σφάλμα ελέγχου που προέκυψε από τη διασταυρωμένη επικύρωση. Όπως παρατηρείται, η διαφορά τους είναι ελάχιστη, γεγονός που επικυρώνει την ικανότητα γενίκευσης του κάθε μοντέλου.

Πίνακας 10.5.8. Σύγκριση των σφαλμάτων ελέγχου και διασταυρωμένης επικύρωσης.

	Normalized MSE ελέγχου	Normalized RMSE ελέγχου	Normalized RMSE Cross Validation
Λατομείο Δρυμού	0,0130	0,1140	0,1053
Λατομείο Ταγαράδων	0,0204	0,1428	0,1049

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συμβάλλει στο χώρο της Τεχνικής Γεωλογίας μέσω της δημιουργίας νέων, εύχρηστων και λειτουργικών συστημάτων, ώστε με βάση την ποιότητα της βραχομάζας των ασβεστολίθων στο μέτωπο της εξόρυξης, να προσδιορίζεται επί τόπου η εκρηκτική ικανότητα της βραχομάζας, η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης (ANFO) που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, ο αριθμός των διατρημάτων και η τελική κοκκομετρία του εξορυσσόμενου υλικού που θα προκύψει από την ανατίναξη. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η σχέση της τεχνικογεωλογικής δομής της βραχομάζας των ασβεστολίθων (εκρηκτική ικανότητα, αντοχή, δομή, ποιότητα της βραχομάζας, κατάσταση των ασυνεχειών), του εκάστοτε μετώπου εξόρυξης, σε λατομεία παραγωγής αδρανών υλικών, με την κοκκομετρία του υλικού που προκύπτει μετά την ανατίναξη, συνυπολογίζοντας την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO που εφαρμόζεται.

Η συλλογή του συνόλου των δεδομένων για την πραγματοποίηση της παρούσας έρευνας πραγματοποιήθηκε από δύο λατομεία αδρανών υλικών της Ιντερμπετόν Δομικά Υλικά Α.Ε., που ανήκει στον όμιλο εταιριών TITAN. Συγκεκριμένα, τα δύο αυτά λατομεία είναι το λατομείο Δρυμού, στην περιοχή της Μυγδονίας, στον Δήμο Ωραιοκάστρου, στην περιοχή Ντεβέ Κοράν και το λατομείο Ταγαράδων, στον Δήμο Θέρμης, στον Νομό Θεσσαλονίκης.

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση της επιδεκτικότητας των ασβεστολιθικών σχηματισμών σε εκσκαφή με εκρηκτικές ύλες, που πραγματοποιήθηκε στα δύο λατομεία αδρανών υλικών είναι τα ακόλουθα:

1. Η απόδοση του κύριου συστήματος ασυνεχειών στο μέτωπο της εξόρυξης είναι αξιοσημείωτη, επειδή το πυκνό δίκτυο των ασυνεχειών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, ευνοώντας τη θραύση του πετρώματος, καθώς αυτή καθορίζεται από τις προϋπάρχουσες ασυνέχειες, από ότι από τη γένεση των κυμάτων παραμόρφωσης από την δυναμική της εκρηκτικής ύλης.

- Στο λατομείο του Δρυμού για το 50% των παρατηρήσεων η απόδοση του GSI κυμαίνεται από 50 έως 60 με τεμαχώδη έως πολύ τεμαχώδη δομή και

από καλή έως μέτρια ποιότητα ασυνεχειών ενώ το υπόλοιπο ποσοστό περιγράφεται με GSI 65-70, δηλαδή με τεμαχώδη δομή και καλή ποιότητα ασυνεχειών.

- Από την άλλη πλευρά στο λατομείο των Ταγαράδων οι καταγραφές αφορούν στο σύνολό τους πολύ τεμαχώδεις ασβεστολίθους με καλή έως μέτρια ποιότητα ασυνεχειών και το GSI κυμαίνεται μεταξύ 45 και 60.

2. Ο τροποποιημένος Δείκτης εκρηκτικής ικανότητας (MBI) που προσδιορίστηκε με τη βοήθεια του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (GSI) για το κάθε λατομείο, κυμαίνεται για το κάθε λατομείο όπως παρατίθεται στη συνέχεια:

- Στο λατομείο του Δρυμού η ελάχιστη τιμή του MBI κυμαίνεται από 52 για χειρότερη ποιότητα βραχομάζα έως 74 για καλύτερη ποιότητα ασβεστόλιθο. Από την άλλη πλευρά η μέγιστη τιμή εκρηκτικής ικανότητας για τεμαχώδη ασβεστόλιθο με καλή ποιότητα ασυνεχειών μπορεί να φτάσει μέχρι και 81. Ενώ, η χειρότερη ποιότητα που χαρακτηρίζεται ως πολύ τεμαχώδης με φτωχή ποιότητα ασυνεχειών, το MBI μπορεί να προσδιοριστεί μέχρι και 58. Επιπλέον, η μέση τιμή του MBI παρουσιάζει αυξητική τάση και κυμαίνεται από 56 έως 78.
- Στο λατομείο των Ταγαράδων η μέση τιμή του τροποποιημένου δείκτη εκρηκτικής ικανότητας κυμαίνεται σε μικρότερα επίπεδα, δηλαδή από 49 έως 61, καθώς και οι τιμές του GSI κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα. Ειδικότερα, το MBI κυμαίνεται μεταξύ 59 και 69 για ποιότητα ασβεστολίθου μεταξύ 60-65 (τεμαχώδης-καλή ποιότητα ασυνεχειών). Ενώ στην περίπτωση που η βραχομάζα χαρακτηρίζεται με χειρότερη ποιότητα, η ελάχιστη τιμή του MBI είναι 44 και η μέγιστη 54.

3. Η σκληρότητα του ασβεστολιθικού πετρώματος προσδιορίστηκε επί τόπου με τη χρήση της σφύρας Schmidt και αποτελεί έναν παράγοντα επιρροής στον τροποποιημένο Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας, ωστόσο δεν ασκεί τόσο μεγάλη επίδραση όσο οι υπόλοιπες παράμετροι.

- Στο λατομείο του Δρυμού η μέση αντοχή εκτιμήθηκε στα 65 MPa, με την ελάχιστη τιμή να προσδιορίζεται στα 60 MPa και τη μέγιστη στα 75 MPa. Ενώ στο λατομείο των Ταγαράδων ο μέσος όρος της αντοχής του ασβεστολίθου ανήλθε στα 60 MPa, με την ελάχιστη τιμή να καταγράφεται στα 50 MPa και τη μέγιστη στα 68 MPa. Από τις

καταγραφές συμπεραίνεται ότι στην περίπτωση που το GSI του ασβεστολίθου κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα, με υψηλές τιμές αντοχής από 55 MPa έως 70 MPa, το σύνολο των τιμών του MBI έχει εύρος μεταξύ 40 και 65. Αντίθετα, στις περιπτώσεις, όπου επικρατούν χαμηλότερες αντοχές (52 με 60 MPa), και υψηλοί δείκτες GSI, τότε οι τιμές του MBI κινούνται σε υψηλά επίπεδα (60 έως 80). Από αυτό γίνεται κατανοητό το γεγονός της σημαντικής επίδρασης που ασκεί η ποιότητα της βραχομάζας στην εκρηκτική ικανότητα, έναντι της αντοχής της.

4. Η ποσοτικοποίηση του μέσου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών, όπως προέκυψε μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού ψηφιακής ανάλυσης εικόνων WipFrag 3.0[®], καθώς και μέσω της τροποποιημένης εξίσωσης από τον Lilly (1986) και τον Cunningham (1987), συνοψίζεται στα κάτωθι:

- Η μέση ποσοστιαία διαφορά των δύο μεθόδων για το λατομείο του Δρυμού ανέρχεται στο 14%, ενώ η μέση τιμή του μέσου μεγέθους των τεμαχών όπως προκύπτει από το WipFrag είναι στα 31 cm, έναντι 38 cm από το μοντέλο Kuz-Ram. Επιπλέον, το D_{50} κυμαίνεται από 18 cm έως 45 cm σύμφωνα με την ψηφιακή ανάλυση, ενώ από το μοντέλο Kuz-Ram προκύπτει η ίδια μέση ελάχιστη τιμή, με τη μέση μέγιστη να είναι λίγο μεγαλύτερη στα 56 cm. Το σύνολο των τιμών περιγράφεται από έναν ικανοποιητικό συντελεστή προσδιορισμού της τάξης του 73%.
- Για το λατομείο των Ταγαράδων η μέση ποσοστιαία διαφορά ανέρχεται στο 25%. Η μέση τιμή του μέσου μεγέθους των τεμαχών όπως προκύπτει από το WipFrag είναι στα 25 cm, έναντι 33 cm από το μοντέλο Kuz-Ram. Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι το μέσο μέγεθος των τεμαχών κυμαίνεται σε μικρότερες τιμές για το λατομείο των Ταγαράδων σε σχέση με το λατομείο του Δρυμού. Πιο συγκεκριμένα, για το λατομείο των Ταγαράδων η μέση ελάχιστη τιμή είναι στα 17 cm και η μέση μέγιστη στα 38 cm, σύμφωνα με τη μέθοδο WipFrag, ενώ 22 cm και 40 cm προκύπτει αντίστοιχα σύμφωνα με το μοντέλο Kuz-Ram. Το σύνολο των τιμών περιγράφεται από έναν ικανοποιητικό συντελεστή προσδιορισμού της τάξης του 72%.

5. Από την παραγοντική ανάλυση (factor analysis) η οποία πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα που συλλέχθηκαν, αποκαλύφθηκαν οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών

και ο βαθμός συσχέτισής τους κατά την υλοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης.

- Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν δύο παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στο μέγεθος των αποσπώμενων τεμαχών και ο πρώτος αφορά τη συμπεριφορά της βραχομάζας, ενώ ο δεύτερος την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO. Για το λατομείο του Δρυμού το μέσο μέγεθος των τεμαχών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου ($r=0.70$), από τη δομή του ($r=0.60$) και από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης εκφρασμένη σε Powder Factor (ANFO kg/m³), ($r=-0.62$). Ενώ για το λατομείο των Ταγαράδων προέκυψε ότι το μέγεθος των εξορυσσόμενων τεμαχών επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό αντίστοιχα από την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου ($r=0.65$), από τη δομή του ($r=0.60$) και λίγο περισσότερο από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης εκφρασμένη σε Powder Factor (ANFO kg/m³), ($r=-0.70$).

6. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της εκρηκτικής ικανότητας στο αποτέλεσμα που προκύπτει στην εξορυσσόμενη σωρό, προέκυψε ότι η κατανομή του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας στα δεδομένα ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό την κατανομή του μέσου και μέγιστου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών.

- Ειδικότερα, οι υψηλές τιμές του MBI (81) αντιστοιχούν σε μέγεθος τεμαχών που ορίζουν τη μεγαλύτερη σχεδόν μέση τιμή (45 cm), ενώ στην περίπτωση που η εκρηκτική ικανότητα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (περίπου 44 με 52), τότε και το μέσο μέγεθος κυμαίνεται σε μικρές τιμές μεταξύ 18 με 22 cm.
- Εντοπίστηκαν ογκόλιθοι μεγέθους από 1.10 m έως 1.33 m, οι οποίοι αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές GSI (70-80), όπου η βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως τεμαχώδης με καλή ποιότητα ασυνεχειών και αντίστοιχα το MBI κυμαίνεται μεταξύ 69 και 80. Σε αντίθεση με ογκόλιθους από 80 cm έως 85 cm, όπου τα μεγέθη αυτά αντιστοιχούν σε χειρότερη ποιότητα ασβεστόλιθου με GSI από 45 έως 55 (τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών) και MBI από 55 έως 65.

7. Δημιουργήθηκαν νομογράμματα εύρεσης της μίας παραμέτρου σε σχέση με την άλλη, για επί τόπου χρήση στο πεδίο, που εκκινούν από την τεχνικογεωλογική ταξινόμηση του ασβεστολίθου στο μέτωπο της εξόρυξης και καταλήγουν στους

παράγοντες που περιγράφουν την ανατίναξη (ποσότητα ANFO, αριθμός διατρημάτων, ποσότητα εξορυσσόμενης ύλης, μέσο μέγεθος αποσπώμενων τεμαχίων).

- Αρχικά δημιουργήθηκε το νομόγραμμα εύρεσης του τροποποιημένου Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI) του ασβεστολίθου σε σχέση με τον Γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI) (Σχήμα 9.2.23). Από την παρατήρηση του διαγράμματος προκύπτει ότι στην περίπτωση που η δομή του ασβεστολίθου χαρακτηρίζεται πολύ τεμαχώδης, με πολύ καλή έως πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, τότε η εκρηκτική του ικανότητα κυμαίνεται από 49 έως 70 για ασυνέχειες με κλίση αντίρροπη του πρανούς, από 39 έως 60 με κλίση ομόρροπη του μετώπου και από 42 έως 66 για ασυνέχειες υπό γωνία. Από την άλλη πλευρά, όταν η δομή του ασβεστολίθου γίνεται καλύτερη και χαρακτηρίζεται τεμαχώδης, τότε οι αντίστοιχες τιμές του MBI είναι υψηλότερες και πιο συγκεκριμένα κυμαίνονται από 52 έως 78 για ασυνέχειες υπό γωνία, από 47 έως 72 με κλίση ομόρροπη του μετώπου και από 57 έως 83 για ασυνέχειες με κλίση αντίρροπη του πρανούς. Το διάγραμμα αυτό αφορά τις τεμαχώδεις και πολύ τεμαχώδεις δομές του ασβεστολίθου, καθώς οι καταγραφές που λήφθηκαν αφορούν περιοχές που έχουν υποστεί τόσο την έντονη συμπίεστική τεκτονική καταπόνηση σε βάθος γεωλογικών χρόνων, κατά το Τριτογενές και το Α.Ιουρασικό - Κ.Κρητιδικό, αλλά και τις διαταράξεις από την επανειλημμένη πραγματοποίηση των ανατινάξεων στους λατομικούς χώρους.

8. Προτείνεται διάγραμμα εύρεσης της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO που χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί στο εκάστοτε μέτωπο εξόρυξης, (Σχήμα 9.2.24). Ειδικότερα, αρχικά ορίζεται η ποσότητα της εξορυσσόμενης μάζας (είτε σε τόνους είτε σε κυβικά μέτρα) που είναι επιθυμητή να αποσπαστεί από το μέτωπο και στη συνέχεια προσδιορίζεται τόσο ο αριθμός των διατρημάτων που θα πρέπει να διανοιχτούν στο μέτωπο, όσο και η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης ANFO που είναι απαραίτητη να καταναλωθεί για την υλοποίηση της ανατίναξης.

9. Συστήνεται η χρήση του διαγράμματος απεικόνισης της κατανομής του δείκτη Powder Factor, (Σχήμα 9.2.25). Ο δείκτης αυτός αποτελεί μία πολύ σημαντική ένδειξη για την κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης στα μέτωπα εξόρυξης. Ορίζεται ως η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης τύπου ANFO σε kg ανά κυβικό μέτρο εξορυσσόμενου υλικού. Από το διάγραμμα αυτό γίνεται κατανοητό, ότι ο υψηλός

δείκτης αποτελεί ένδειξη κατανάλωσης υψηλής ποσότητας εκρηκτικής ύλης σε σχέση με την εξορυσσόμενη ποσότητα αδρανών υλικών, ενώ οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη αντιστοιχούν σε μικρότερη ποσότητα ANFO με μικρότερη εξορυσσόμενη μάζα υλικού.

10. Η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών, που θα προκύψουν μετά την υλοποίηση της ανατίναξης στο μέτωπο της εξόρυξης πραγματοποιείται με τη βοήθεια του διαγράμματος που κατασκευάστηκε (Σχήμα 9.2.26), μέσω του οποίου ορίζεται η κατανομή του μέσου μεγέθους των τεμαχών σε σχέση με την κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης και την εκρηκτική ικανότητα του ασβεστολίθου.

11. Προτείνεται ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για κάθε λατομείο για την πρόβλεψη του μέσου μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχών, με σημαντική ικανότητα γενίκευσης και με δεδομένα εισόδου τον τροποποιημένο Δείκτη εκρηκτικής ικανότητας (MBI), το Powder Factor (ANFO kg /m³), την ποσότητα εξορυσσόμενης ύλης σε τόνους.

- Τα δίκτυα αυτά έχουν δομή 3-5-1, δηλαδή με 5 κρυφούς νευρώνες και βήμα εκπαίδευσης 0.5. Η εκπαίδευση πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης με ορμή (Backpropagation with momentum) και εφαρμόστηκε η σιγμοειδής λογιστική συνάρτηση ενεργοποίησης τόσο στους κρυφούς νευρώνες όσο και στο επίπεδο εξόδου. Τα αποτελέσματα από τα δίκτυα συγκρίθηκαν με την συμβατική στατιστική ανάλυση (multiple linear regression), υποδεικνύοντας υπεροχή των νευρωνικών δικτύων και συγκεκριμένα οι συντελεστές προσδιορισμού ανέρχονται στο 88% έναντι 84% (λατομείο Δρυμού), και 77% έναντι 70% (λατομείο Ταγαράδων).

Τα αποτελέσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάζουν προοπτική για περαιτέρω συνέχιση της έρευνας, με εμπλουτισμό των δεδομένων ακολουθώντας τα κάτωθι:

- Συλλογή δεδομένων από λατομεία με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανατινάξεων (φορτίο, απόσταση διατρημάτων κ.α.) από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα έρευνα, με σκοπό την πρόσθετη διερεύνηση της επίπτωσης αυτών στο αποτέλεσμα της ανατίναξης.



- Επέκταση της έρευνας σε διαφορετικά υλικά εξόρυξης με στόχο την ενίσχυση της βάσης δεδομένων και διερεύνηση της εκρηκτικής ικανότητάς τους.
- Διερεύνηση οικονομικών προεκτάσεων που προκύπτουν από την προτεινόμενη μεθοδολογία με σκοπό την εφαρμογή στην παραγωγική εκμετάλλευση.



BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adhikari, G., 1999. Studies on Flyrock at Limestone Quarries. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32, 291-301.
- Aimone, C., 1992. Rock breakage: Explosives, blast design. International H.L. Hartman (ed.), *SME Mining Engineering Handbook*, Society of mining engineers, Littleton, 722-746.
- Alexander, M., Mindess, S., 2005. *Aggregates in concrete*, Modern Concrete Technology, CRC Press.
- Al-Thyabat, S., & Miles, J., 2006. An improved estimation of size distribution from particle profile measurements. *Powder Technology*, 166, 152–160.
- Al-Thyabat, S., Miles, J., Koh S., 2007. Estimation of the size distribution of particles moving on a conveyor belt. *Minerals Engineering*, 20, 72-83.
- Ambraseys, R., Hendron, J., 1968. Dynamic behavior of rock masses, rock mechanics, In. K.G. Stagg & O.C. Zeinkiewicz (eds), *Engineering Practice*, John Wiley & Sons Inc., London.
- Anon, 1980. *Blaster's Handbook*, E.I., Wilmington.
- Ash, L., 1968. The design of blasting rounds, In E.P. Pfeider (ed.), *Surface Mining*, AIME, New York.
- Ash, L., 1973. The influence of geologic discontinuities on rock blasting, *Ph.D. dissertation*, University of Minnesota.
- ASTM D 5873 (2000) *Standard test methods for determination of rock hardness by rebound hammer method*, Annual Book of ASTM Standards Soil and Rock, Building stones, Section-4, Construction, V.04.08, ASTM Publication, 972.
- Aswegen, V., and Cunningham, 1986. The estimation of fragmentation in blast muckpiles by means of standard photographs, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 86, 469-474.
- Atchinson, C., 1968. Fragmentation principles, In E.P. Pfeider (ed.), *Surface mining*, AIME, New York, 355-372.

- Badal, R., Bhandari, S., 1992. Fragmentation mechanism in rock joints, International society of Rock Mechanics. *Regional symposium of Rock Slopes, New Delphi*, 337-385.
- Bajpayee, S., Rehak, R., Mowrey, L., Ingram, K., 2004. *Blasting injuries in surface mining with emphasis on flyrock and blast area security*. Safety Res 35,47–57.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 189-236.
- Bellairs, G., 1986. Blasthole density logging as an aid to blast pattern design Sheppard. *Proceedings of Large Open Pit Mining Conference, Newman*, 93-97
- Bergmann, R., Riggle, W., Wu C., 1973. Model rock blasting effect of explosives properties and their variables on blasting results. *International Journal Rock Mechanics and Mining Science*, 10, 585-612.
- Bergmann, R., Wu C., Edl, W., 1974. Model rock blasting measures effects of delays and holes patterns on dock fragmentation. *Engineering And Mining Journal*, 175 (6), 124-127.
- Berta, G., 1985. The explosive working tool, *Italesplosivi*, Milano.
- Bhandari, S., 1974. Rock fragmentation with longitudinal charges. *3rd International Congress of Rock Mechanics*, Denver, 137-1242.
- Bhandari, S., 1996. Changes in fragmentation processes with blasting conditions. *5th Symposium of Rock Fragmentation by Blasting, Montreal*, 301-309.
- Bhandari, S., 1997. *Engineering rock blasting operations*, Balkema, Rotterdam.
- Bieniawski, T., 1974. Geomechanics classification of rockmass and application in tunneling. *Proceedings 3rd congress ISRM (Denver)*, 27.
- Bond, C., Whitney, B., *The work index in Blasting Quarterly of the Colorado School of Mines*, 77-82.
- Brady, H., Brown, T., 1985. *Rock mechanics for underground mining*, George Allen & Co., London.
- Brulia, J., 1985. Power AN emulsion/ANFO explosive system. *11th Conference Proceedings Society of Explosives Engineers*, San Diego, 293-299.
- Burkle, C., 1979. Geology and its effect on blasting. *Proceedings of the 5th Conference on Explosives and Blasting Techniques*, Society of Explosives Engineers.

- Carlsson, O., and Nyberg, L., 1983. A method for estimation of fragmentation size distribution with automatic image processing. *Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-FRAGBLAST*, 333-345. Luleå, Sweden.
- Cattell, B., 1978. The scientific use of factor analysis in behavioral and life sciences. New York, NY: Plenum Press.
- Chakraborty, K., Raina, A., Ramulu, M., Bandopadhyay, C., 2004. Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations. *Engineering Geology*, 105–116
- Chatziangelou, M., Christaras, B., 2013. Rock Mass Blastability Dependence on Rock Mass Quality. Bulletin of the Geological Society of Greece, *Proceedings of the 13th International Congress*, 47, 1-12.
- Chatziangelou, M., Christaras, B., 2013. Blastability index on poor quality rock mass. International Academy of Science, Engineering and Technology. *International Journal of Civil Engineering*.
- Chiappetta, F., 1991. Pre-Splitting And Controlled Blasting Techniques, *Proceedings of the Blast Technical Instrumentation and Explosives Application Seminar, San Diego, USA*, 171-186.
- Chimi, O., Hegarat, L., Vannier, E., Taconet, O., and Dusseaux, R., 2014. Automatic clod detection and boundary estimation from Digital Elevation Model images using different approaches, *Catena*, 118, 73–83.
- Christaras, V., 1989. Mechanical behavior of marbles from the Rhodope massif; examples from Pangaio mountain and Thassos island. *2nd Hellenic – Bulgarian Symposium*, Thessaloniki.
- Christaras, V., 1994. Anisotropy effects on the elastic parameters of rocks; determination using ultrasonic techniques. *7th International Congress of Geological Society of Greece*, 381-387.
- Christaras, V., 1996. Non destructive methods for investigation of some mechanical properties of natural stones in the protection of monuments. *Bulletin of IAEG*.
- Christaras, V., 1998. Non destructive methods used for the estimation of the damage (weathering and cracks) of the building and ornamental stones, *PACT 55 (Revue du Conseil de l'Europe)*, 213-219.

Christaras, B., Chatziangelou, M., 2014. Blastability quality system (BQS) for using it, in bedrock excavation, *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 51.

Clark, B., 1987. Principles of rock fragmentation, John Wiley & Sons Inc., London.

Clerici, C., Mancini, R. et al, 1974. Blasting operations in quarry. Mutual influence between blasting and fragmentation. *Proceedings of Congress on Ornamental Stones and Industrial Minerals Mining, Torino*.

Coates, F., 1981. Rock mechanics principles, Ottawa: CANMET, Energy, Mines and Resources, Canada.

Cook, A., Cook, O., Clay, B., Keyes, J., Udy, L., 1966. Behavior of rock during blasting. *Transactions of the Society of Mining Engineers, AIME*, 235-283.

Cunningham, C., 1983. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. *1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden*, 439-453.

Cunningham, C., 1987. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on. *Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, 439–453.

Cunningham, C., 2005. The kuz-ram fragmentation model - 20 years on. *Proceedings of 3rd EFEE World Conference on Explosives and Blasting*, 201-210.

Cunningham, C., 2006. Concepts of blast hole pressure applied to blast design, Fragblast. *International Journal of blasting and fragmentation*, 10, 33-46.

Daubney, P., 1988. The explosive industry has challenging task ahead, *Chem. Business*, 11-12.

Debes, K., Koenig, A., Gross, HM., 2005. Transfer functions in artificial neural networks. A simulation – based tutorial. *Brains, Minds & Media*.

Deere, U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 18.

De Gama, D., 1983. Use of comminution theory to predict fragmentation of jointed rock mass subjected to blasting. *Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden*, 563-579.

De Graaf, W., 2011. *Specialised Blasting Techniques*. Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Namibia

Dick, A., Fletcher, L., Andrea, D., 1983. *Explosives and Blasting Procedures Manual*, US Department of Interior Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement.

Dieterle, F., Busche, S., Gauglitz, G., 2003. *Growing neural networks for a multivariate calibration and variable selection of time-resolved measurements*, *Analytica Chimica Acta*, 490, 71-83.

Dimitraki, L., Christaras, V., Marinos, V., Chatziangelou, M., 2016. The use of ultrasonic velocity for determining mechanical characteristics of limestones. *Proceedings of XV Symposium Society of Geological Engineers and Technicians of Serbia, Belgrade*, 340–350.

Dimitraki, L., Christaras, B., Marinos, V. et al., 2018. Predicting the average size of blasted rocks in aggregate quarries using artificial neural networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

Duvall, I., Atchinson, C., 1957. *Rock breakage by explosives*, US Bureau of mines, R.I. 5336, 52.

Duvall, I., Fogelson, E., 1962. *Review of criteria for estimating damages to residences from blasting vibrations*, US Bureau of Mines, R.I. 5968.

Ermini, L., Catani, F., and Casagli, N., 2005. Artificial Neural Network applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66, 327–343.

Farmer, W., Kemeny, M., McDoniel, C., 1991. Analysis of rock fragmentation in bench blasting using digital image processing. *Proceedings of 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam*, 1037-1042.

Fausett, L., 1994. *Fundamentals of neural networks architectures algorithms and applications*. Prentice Hall, New Jersey.

Ferentinou, M., Sakellariou, M., 2007. Computational intelligence tools for the prediction of slope performance. *Computers and Geotechnics*, 362–384.

Franklin, A., and Maerz, H., 1988. Photographic measurements of jointing and fragmentation. *2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Balkema, Rotterdam*, 227-237.

Franklin, A., Maerz, H., 1996. *Empirical design and rock mass characterisation, Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam.

Graupe, D., 2007. *Principles of artificial neural networks*, 1st edition, University of Illinois, Chicago.

Grenon, M., Hadjigeorgiou, J., Liu, Q., 1998. Quantifying in-situ rock block size and

- resulting fragment size distributions due to blasting. *Fragblast - International journal of blasting and fragmentation*, 205-218.
- Gomez, H., and Kavzoglu, T., 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 7, 11–27.
- Gorgulu, K., 2014. Investigation of the effects of blasting design parameters and rock properties on blast-induced ground vibrations. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6).
- Guney, A., Altindag, R., Yavuz, H. and Sarac, S., 2005. Evaluation of the Relationships Between the Schmidt Hardness Rebound Number and Other (Engineering) Properties of Rocks. *19th International Mining Congress and Fair of Turkey, JMCET*, 1- 8.
- Gupta, R., Singh, B., 1988. Prediction of peak particle velocity and peak air pressure generated by buried explosion. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 6, 15-26.
- Hagan, N., 1973. Rock breakage by explosives. *National Symposium of Rock Fragmentation*, Adelaide, 1-17.
- Hagan, N., Just D., 1974. Rock breakage by explosives: theory, practice and optimisation. *Proceedings of 3rd Congress ISRM. National Academy Sciences, Washington, DC*, 1349-1358.
- Hagan, M., Demuth, H., Beale, MH., Jesus, O., 2014. *Neural network design*, 2nd edition, eBook.
- Haghighi, G., Konya, J., 1986. Effects of geology on burden displacement. *Proceedings of the 12th Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers*, Montville, OH.
- Harries, G., 1973. A mathematical problem of cratering and blasting. *National symposium of rock fragmentation*, Adelaide, 107-113.
- Hartman, H., 1987. *Introductory mining engineering*, Michigan.
- Haykin, S., 2017. *Neural networks and learning machines*, 3rd edition, Pearson, London.
- Hecht-Nielsen, R., 1990. Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. *Proceedings of 1st IEEE Annual International Conference on Neural Networks, San Diego*, 11–14.

- Heinio, M., 1999. *Rock excavation handbook for civil engineering*, Sandvik, Tamrock, Sweden.
- Hemphill, B., 1981. *Blasting operations*, McGraw-Hill, New York.
- Hendron, J., 1977. *Engineering of rock blasting on civil projects*, Structural and Geotechnical Mechanics, W.J. (ed.), Prentice Hall, NY.
- Hino, K., 1959. *Theory and Practice of Blasting*, Nippon Kayaku Co, Ltd, Japan.
- Hoek, E., Wood, D., Shah, S., 1992. A modified Hoek–Brown criterion for jointed rock masses. *Proceedings of the rock mechanic symposium. International Society of Rock Mechanics Eurock, British Geotechnical Society, London*, 209–214
- Hoek, E, Marinos, P., Benissi, M., 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for weak and sheared rock masses—the case of the Athens schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57, 151–160.
- Hopfield, J., 1984. Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. *Proceedings of National Academy of Science*, 81, 3088–3092.
- Jimeno, L., Jimeno, L., Carcedo, A., 1995. *Drilling & Blasting of Rocks*, A. A. Bulkema, Rotterdam, Brookfield Publication, 160-180.
- Jemwa, T., and Aldrich, C., 2012. Estimating size fraction categories of coal particles on conveyor belts using image texture modeling methods. *Expert Systems with Applications*, 39, 7947–7960.
- Johansson, H., Persson, A., 1974. Fragmentation systems. *3rd International Congress on Rock Mechanics*, Denver, 1957-1966.
- JKMRC, 1991. *Advanced blasting technology, AMRIA P39D (1987-1990) Final Report*, JKMRC, University of Queensland, Australia.
- Just, D., 1973. The application of size distribution equations to rock breakage by explosives. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 3, 77-82.
- Kauffmann, G., Kockel, F., Mollat, H., 1976. Notes on the stratigraphic and paleogeographic position of the Svoula Formation in the innermost Zone of the Hellenides (Northern Greece). *Bulletin of the geological society of France*, 18, 225-230.
- Kecojevic, V., Radomsky, M., 2005. Flyrock phenomena and area security in blasting-related accidents. *Safety Science, Elsevier*, 739-750.

- Khandelwal, M., 2010. Evaluation and Prediction of Blast Induced Ground Vibration using Support Vector Machine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (3), 509-516.
- Konya, C., Walter, E., 1990. *Surface blast design*, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey.
- Konya, C., Walter, E., 1991. *Rock blasting and overbreake control*, U.S. Department of Transportation, National Highway Institute.
- Kuznetsov, M., 1973. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining Science*, 9, 144-148.
- Kwangmin, K., 2006. Blasting design using fracture toughness and image analysis of the bench face and muckpile, *Virginia Tech*.
- Langefors, U., Kihlstrom, B., 1978. *The modern technique of rock blasting*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Larson, C., Pugliese, M., 1974. *Effect of jointing and bedding separation on limestone breakage at reduced scale*, US Bureau of Mines, R.I. 7863.
- Latham, J.P., and Lu P., 1998. Development of an assessment system for the blastability of rock masses. *International Journal Rock Mechanics and Mining Science*, 36, 41–55.
- Lee, S., Ryu, H., Lee, J., Won, S., 2003. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 44, 820–833.
- Lilly, P., A., 1986. An empirical method of assessing rock mass blastability. *AwIhfM/JTAust. Large Open Pit. Mining Conference, Newman*, 89–92.
- Lilly, P., A., 1992 The use of the blastability index in the design of blasts for open pit mines. *Western Australian Conference on Mining Geomechanics, Kalgoorlie*, 421–426.
- Lilly, P., 1986. An empirical method of assessing rock mass blastability. *AwIhfM/JTAust Large Open Pit. Mining Conference, Newman*, 89–92.
- Lilly, P., 1992. The use of the blastability index in the design of blasts for open pit mines. *Western Australian Conference on Mining Geomechanics, Kalgoorlie*, 421–426.
- Liu, Q., Tran, H., 1996. Comparing systems – Validation of FragScan, WipFrag and Split. *Measurements of blast fragmentation, Franklin & Katsabianis (eds), Balkema, Rotterdam*, 151-156.

- Lizotte, C., Scoble, J., 1994. Geological control over blast fragmentation, *CIM Buletin*, 57-71
- Lu, P., 1997. *The characterization and analysis of in situ and blasted block size distributions and the blastability of rock masses*. PhD Thesis, Queen Mary and Westfield College, University of London, England.
- Maerz, H., 1996. Image sampling techniques and requirements for automated image analysis of rock fragmentation. *Proceedings of Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam.
- Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne*, 1422–1446.
- Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E., 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 55-65.
- Matheson, D., 1995. *Aspects of highway rock engineering in the UK*. In *Engineering Geology of Construction* (Eddleston et al. eds.), London: Geol. Soc., pp. 169-187.
- Mc Kenzie, S., 1967. Optimum blasting. *Proceedings of Annual Minnesota Mining Duluth*, MN, 181-188.
- Mohanty, B., 1985. Characteristic crack patterns close to exploding charge, rock breakage and mechanical excavation, P. Baumgartener (ed.), Special Vol. No. 3, *Canadian Institute of Mining Metallurgy Bulletin*, 32-36.
- Mohanty, B., 1996. *Rock fragmentation by blasting, 1st edition*. CRC Press/Balkema, Netherlands.
- Monjezi, M., Singh, TN., Khandelwal, M., Sinha, S., Singh, V., Hosseini, I., 2008. *Prediction and analysis of blast parameters using artificial neural network*. *Noise Vibrat Worldwide* 37, 8–16.
- Monjezi, M., Ghafurikalajahi, M., Bahrami, A., 2011. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunneling and Underground Space Technology*, 26, 46-50.
- Moser, P., 2008. Energy controlled blasting, *Environmental and mining geoengineering (GEAM, rivista della Associazione Georisorse e Ambiente)*.

- Neaupane, M., and Achet, H., 2004. Use of backpropagation neural network for landslide monitoring: a case study in the higher Himalaya. *Engineering Geology*, 74, 213–226.
- Neaupane, K., and Adhikari, N., 2006. Prediction of tunneling-induced ground movement with the multi-layer perceptron, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 151-159.
- Nelson, M., Illingworth, W.T., 1990. *A Practical Guide To Neural regression models. Proceedings of Intelligent Engineering Nets*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Nie, L., and Rustan, A., 1987. Techniques and procedures in analyzing fragmentation after blasting by photographic methods. *Proceedings of 2nd International Symposium of Rock Fragmentation by blasting*, 102-113.
- Noren, H., Porter, D., 1974, A comparison of theoretical explosive energy and energy measured underwater with measured rock fragmentation. *Proceedings of 3rd Congress of International Society of Rock Mechanics, Denver, II*, 1371-1376.
- Nur, L., Hareyani, Z., Kamar, S., Hazizan, M., 2015. Effect of geological condition on degree of fragmentation in a Simpang Pulai marble quarry. *5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Minerals and Polymer (MAMIP)*, 694 – 701.
- Onederra, A., and Riihioja, J., 2006. An alternative approach to determine the uniformity index of Rosin-Rammler based fragmentation models. *Fragblast 8, Santiago, Chile*.
- Oriard, L., 2002. *Explosives engineering, construction, vibrations and geotechnology*, Published by Isee Explosive Engineers.
- Orr, G., Muller, KR., 1998. *Neural Networks: Tricks of the Trade*, Lecture Notes in Computer Science, Springer.
- Otuonye, O., Konya, J., Skidmore, R., 1983. Effects of stemming size distribution on explosive charge confinement: A laboratory study, *Transactions of the society of mining engineers of AIME*.
- Ozdemir, K., Kahriman, A., Karadogan, A., and Tuncer, G., 2003. Blasting Fragmentation Assessment and control using the split digital image analysis system. *International Conference on Earth Sciences and Electronics*.

- Persson, A., Holmberg, R., Persson, G., 1970. The basic mechanism of rock blasting. *Proceedings of 2nd International Congress of Society of Rock Mechanics, Belgrade*, Vol. III, 19-33.
- Persson, P.A., Holmberg, R., Lee, J., 1994. *Rock Blasting and Explosives Engineering*, CRC Press.
- Poole, M., 1987. Recent development in blasting products and techniques, *Mine and quarry eng.* 19-20.
- Rehak, R., Bajpayee, S., Mowrey, L., Ingram, K., 2001. Flyrock issues in blasting. *Proceedings of the 27th annual conference on explosives and blasting technique*, vol. I. International Society of Explosives Engineers, Cleveland, 165–175.
- Rinehart, S., 1975. *Stress transients in solids, hyperdynamics*, Santa Fe, NM.
- Rorke, A., 2003. *BME Training Module: Pre-Splitting, Bulk Mining Explosives*, Johannesburg. South Africa, 1-24.
- Rosin, P., Rammler, E., 1933. The laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of Institute of Fuel*, 7, 29–36.
- Roy, J., Ranjit, P., Sarim, M., Suraj, K., 2017. Geological Discontinuities, Blast Vibration And Fragmentation Control – A Case Study. *7th Asian Mining Congress & IME 2017*.
- Rumelhart DE, McClelland JL, PDP Research Group, 1986. *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*, MIT Press, Cambridge.
- Rustan, A., 1981. *Fragmentation influencing factors in rock blasting*, Lulea University of Techn, Sweden.
- Rustan, A., Vutukuri, S., Naartijarvi, T., 1983. The influence from specific charge, geometric scale and physical properties of homogenous rock on fragmentation, *Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden*, 115-142.
- Rzhevsky, N., Novik, G., 1971. *The Physics of rocks*, Mir Publishers, Moscow.
- Ryu, W., Shim, J., Han, Y., Ahn, 2009. Prediction of rock fragmentation and design of blasting pattern based on 3-D spatial distribution of rock factor. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 326-332.
- Sadwin, D., Duvall, I., 1965. A comparison of explosives by cratering and other methods. *Transactions of the Society of Mining Engineers, AIME*, 232, 110.

- Sassa, K., Ito, I., 1974. On the relation between the strength of a rock and the pattern of breakage by blasting. *Proceedings of 3rd International Congress of rock mechanics*, Denver, 1501-1505.
- Sastry, V., Chandar, K., 2004. Influence of the initiation system on blast results: case studies. *Fragblast*, n.8, 207- 220.
- Schuhmann, R., 1960. Energy input and size distribution in comminution. *Trans. Am. 1st Min. Metall. Petrol. Engrs*, 217-225.
- Scott, A., Chitombo, P., Kleine, T., 1993. The challenge of the prediction and control of fragmentation in mining. *4th International Symposium of Rock Fragmentation by Blasting, Vienna*, 507-517.
- Seccatore, Jacopo & de Tomi, Giorgio & Munaretti, Enrique & Dompieri, Mauricio. 2011. *Blasting fragmentation management: An innovative approach using complexity analysis*, 64, 525-530.
- Sharma, P., 2010. Application of Air-Deck Technique in Surface Blasting, miningandblasting.wordpress.com/tag/air-deck/.
- Sharma, P., 2012. Rock breakage and blast design considerations in openpit, *Technical papers for mining and blasting*.
- Singh, P., Sarma, S., 1983. Influence of joints on rock blasting- A model scale study. *1st International Symposium of Rock Fragmentation by blasting, Lulea*, 533-554.
- Singh, P., Sastry, R., 1986. Rock fragmentation by blasting influence of joint filling material. *Journal of Explosives Engineers*, 18-27.
- Singh, A., Scoble, M., Lizotte, Y. & Crowther, G., 1991. Characterization of underground rock fragmentation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 9, 93-107.
- Singh, P., Singh, N. and Goyal, M., 1994. Ground vibration due to blasting and its effect, *In: Pradhan, G.K., Hota, J.K, editors, ENVIROMIN, Bhubaneshwar, India*, 287–93.
- Singh, P., 2003. The Influence of Rock mass Quality in Controlled Blasting. *12th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Kalgoorlie, Australia*, 219-222.
- Singh, P., Narendura, R., Duffy, D., 2005. Influence of blasted muck on the productivity of the loading equipment. *3rd EFEE Conference on explosives and blasting*, 347-353.

- Singh, P., Roy, M., Paswan, R., Sarim, M., Kumar, S., Jha, R., 2016. Rock fragmentation control in opencast blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 225-237.
- Siskind, E., Fumanti, R., 1974. *Blast-produced fractures in Lithuania granite, US Bureau of mines*, TPR 78.
- Siskind, E., Kopp, W., 1995. Blasting accidents in mines: a 16-year summary. *Proceedings of the 21st annual conference on explosives and blasting technique*, International society of Explosives Engineers, Cleveland, 224–239.
- Stagg, S., Otterness, E., Siskind, E., 1992. Effects of blasting practices on fragmentation. *Proceedings of the 33rd US Symposium in rock Mechanics*.
- Surface Blasting Handbook, 2014. *AEL Mining Services*, Johannesburg.
- Singh, K., Roy, P., Paswan, K., Md. Sarim, S., Jha R., 2015. Rock fragmentation control in opencast blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Scott, A., Onederra, I., 2015. Characterising rock mass properties for fragmentation modelling. *Proceedings of the 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blast*, Sydney.
- Thornely, M., Aldert A., 1981. Aluminised blasting agent. *7th Conference Proceedings Society of Explosives Engineers*, Phoenix, 271-292.
- Thornson, D., Kanchibolta, S., Brunton, I., 2002. Modelling the impact of rock mass and blast design variation on blast fragmentation, *Fragblast - International journal of blasting and fragmentation*, 6, The Netherlands.
- Thurley, J., 2011. Automated online measurement of limestone particle size distributions using 3D range data. *Journal of Process Control*, 21, 254–262.
- Turata, U., Galimulin, T., Pancheko, F., 1966. Time relations in shotfiring. *Soviet Mining Science*, 3, 32-36.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1972. *Systematic drilling and blasting for the surface excavation, Engineering and Design*, Department of the Army, Washington.
- United States, National Park, 1999. *National Park Service Handbook for the Storage, Transportation and Use of Explosives*, Minnesota.
- Verzani, J., 2014. Using R for introductory statistics, 2nd edition, CRC Press, Florida
- Wang, H., Latam, J-P, Poole, B., 1991. *Blasting design for armour-stone production, Quarry management*.

Wang, W., 2006. Size and shape measure of particles by image analysis. *11th International Workshop, IWCIA Proceedings, Berlin, Germany*, 4040, 253 – 262.

Wiss. J., 1981. Construction vibrations: State - of- the – art. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107, 167-181.

Workman, J., Calder, P., 1994. Flyrock prediction and control in surface mine blasting. *Proceedings conference on explosives and blasting technique, Austin Texas*, 59-74.

Wythoff, J., 1993. Backpropagation neural networks: a tutorial. Training Using Genetic Algorithms, *World Scientific, Singa - Chemometr. Intell. Lab. Syst.* 18, 115–155.

Xu, S., Grasso, P., Mahtab, A., 1990. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock. *Proceedings of 6th International IAEG Congress, Balkema, Rotterdam*, 511 – 519.

Yesilnacar, E. and Topal, T., 2005. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79, 251–266.

Zelin, Z., Jianguo, Y., Lihua, D. & Yuemin, Z., 2012. Estimation of coal particle size distribution by image segmentation. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22, 739–744.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγιουτάντης, Ζ., 1996. Εκμετάλλευση ΙΙ: Τεχνολογία Εξόρυξης (Διάτρηση και Ανατίναξη), Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Βουδούρης, Κ., 2004. Στατιστική ανάλυση δεδομένων στην εφαρμοσμένη και περιβαλλοντική γεωλογία, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Διαμαντάρας, Κ., 2007. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα
Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (ΚΜΛΕ), ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227, 14/06/11

Κουλλάλης, Ι., 2003. Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της ταχύτητας έκρηξης εντός διατρημάτων επιφανειακών ανατινάξεων, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

Μουντράκης, Δ., 2010. Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη

Μπαρκονίκος, Α., 2015. Επανασχεδιασμός εκμετάλλευσης λατομείου αδρανών υλικών στη θέση «Μύτη Σεσμελή» του δήμου Θέρμης και εκτίμηση των επιπτώσεων στο τοπίο, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλευτικής Τεχνολογίας

Παναγιώτου, Γ., 2014 . Εξόρυξη πετρωμάτων Ι, Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, Ε.Μ.Π., Αθήνα

Τσουτρέλης, Χ., 1997. Εκρηκτικές ύλες και τεχνική των ανατινάξεων, Τόμος 1^{ος}, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Διαδικτυακές Πηγές

AEL Mining Services, www.aelminingservices.com (ανακτήθηκε την 14-09-2017)

Blast Training International, <http://online.blasttraining.com.au> (ανακτήθηκε την 29-06-2017)

Explosives Trading Company SA, www.extraco.gr (ανακτήθηκε την 10-03-2018)

Hellenic Ministry of Environment & Energy, <http://www.ypeka.gr/> (ανακτήθηκε την 20-04-2018)

International Society of Explosives (ISEE), <https://www.isee.org/> (ανακτήθηκε την 10-03-2018)

Institute of Geology & Mineral Exploration, www.igme.gr (ανακτήθηκε την 10-05-2018)

Institute of Makers of Explosives (IME), <https://www.ime.org/> (ανακτήθηκε την 10-03-2018)

Neuroph Java Neural Network Framework, <http://neuroph.sourceforge.net/> (ανακτήθηκε την 23-09-2017)

TITAN Group, www.titan.gr (ανακτήθηκε την 2-02-2015)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

WipFrag – WipWare – Fragmentation Analysis Software and Hardware,

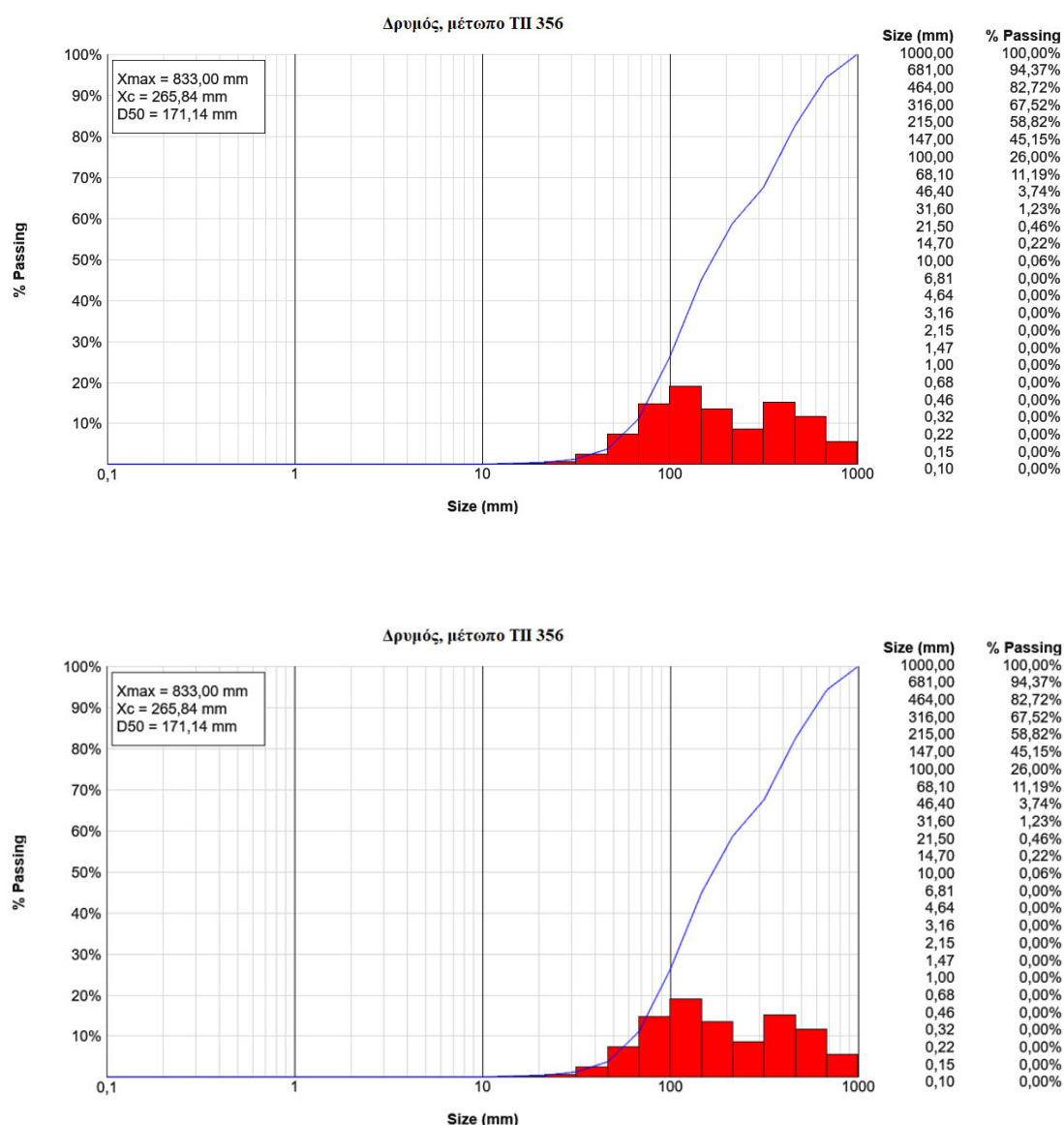
<http://wipware.com/products/wipfrag/> (ανακτήθηκε την 24-10-2015)

www.orykta.gr (ανακτήθηκε την 10-04-2018)

<https://www.lafargeholcim.com/> (ανακτήθηκε την 8-06-2018)

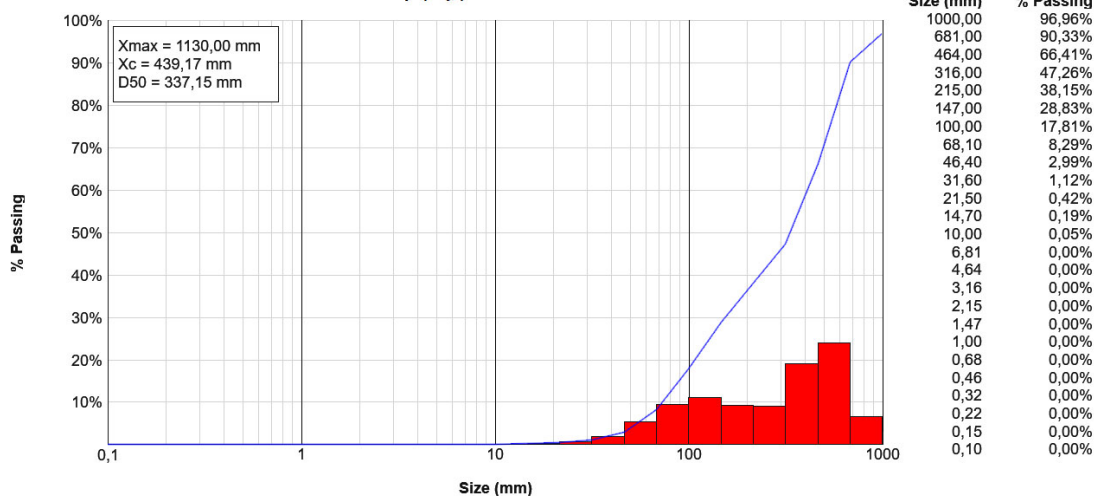
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ενδεικτικές καμπύλες κατανομής του μεγέθους των εξορυσσόμενων τεμαχίων, για τα δύο λατομεία έρευνας, μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού ανάλυσης εικόνας WipFrag 3.0®.

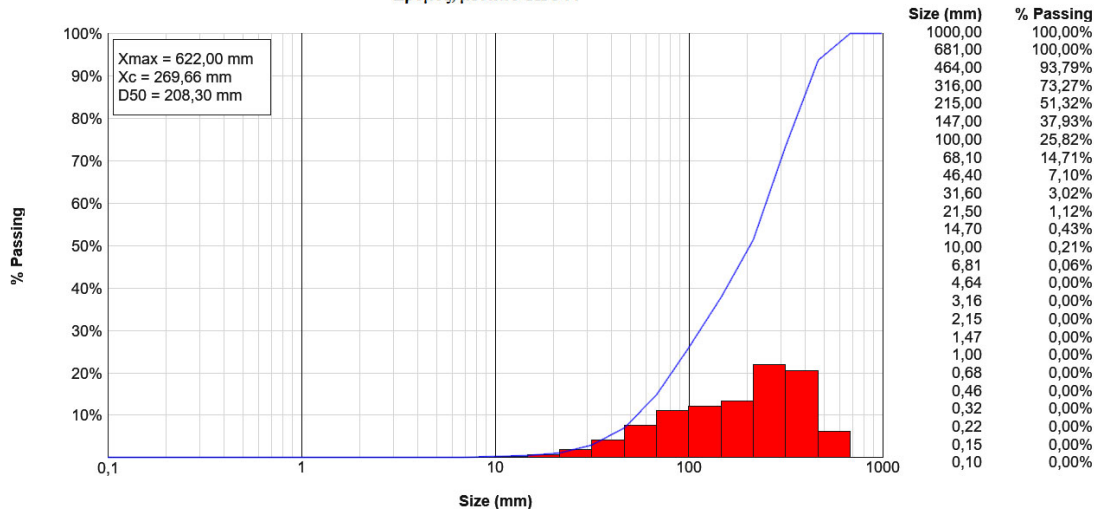


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Δρυμός, μέτωπο ΤΠ 356

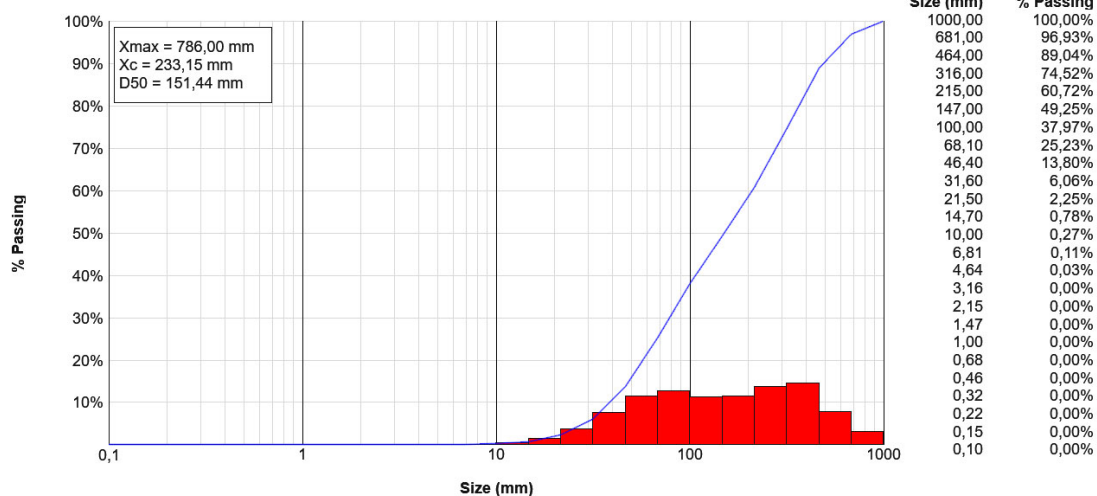


Δρυμός, μέτωπο ΤΠ 344

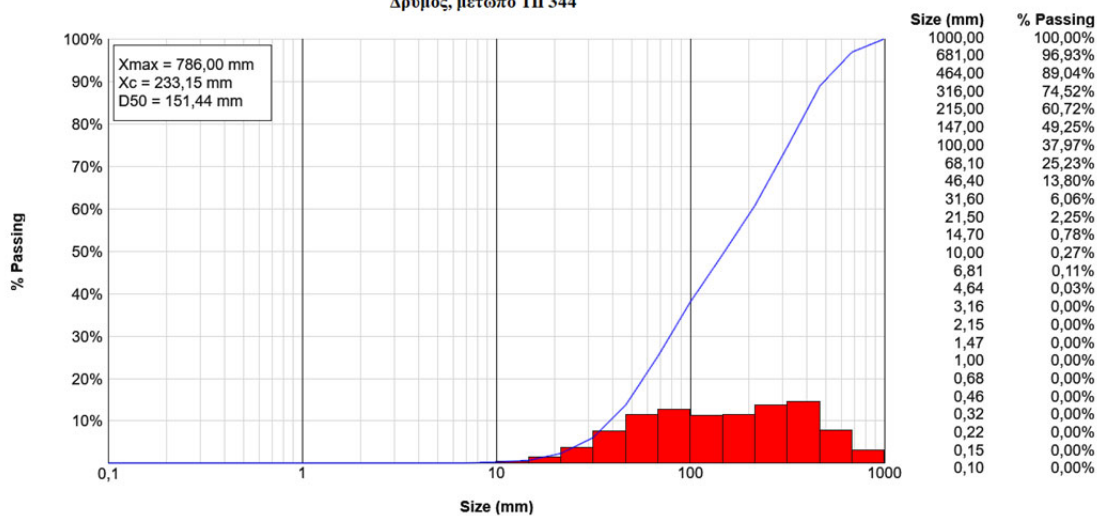


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

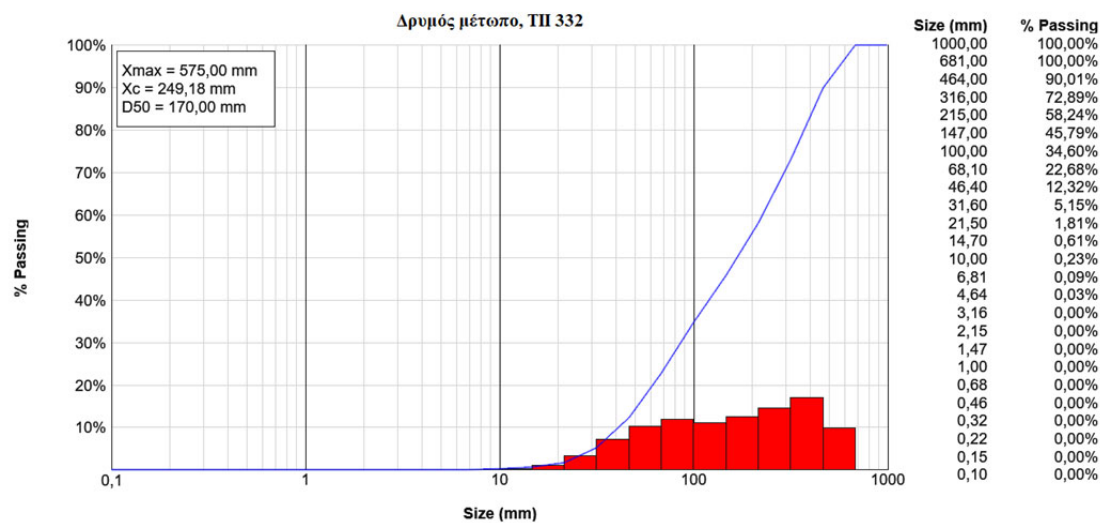
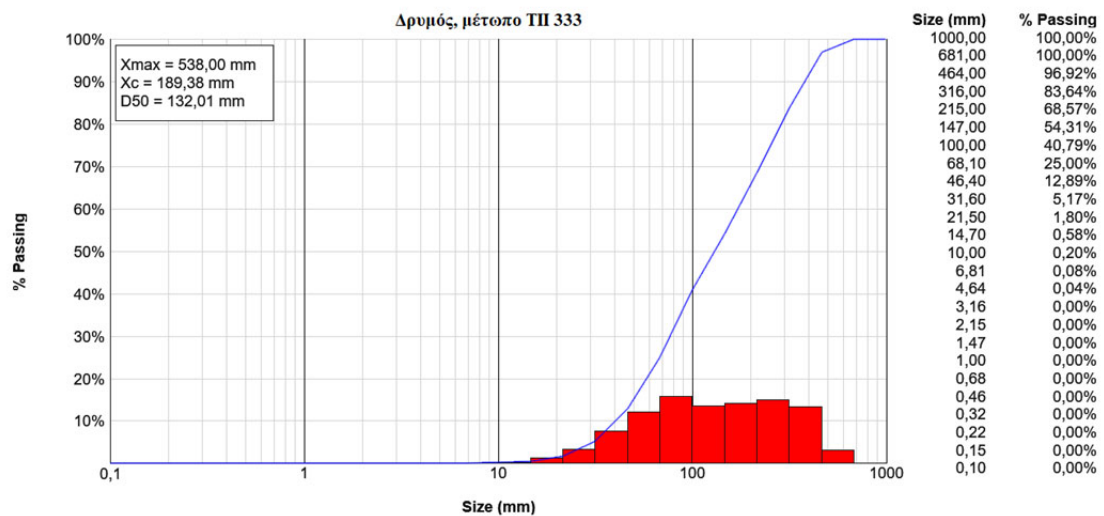
Δρυμός, μέτωπο ΠΠ 344

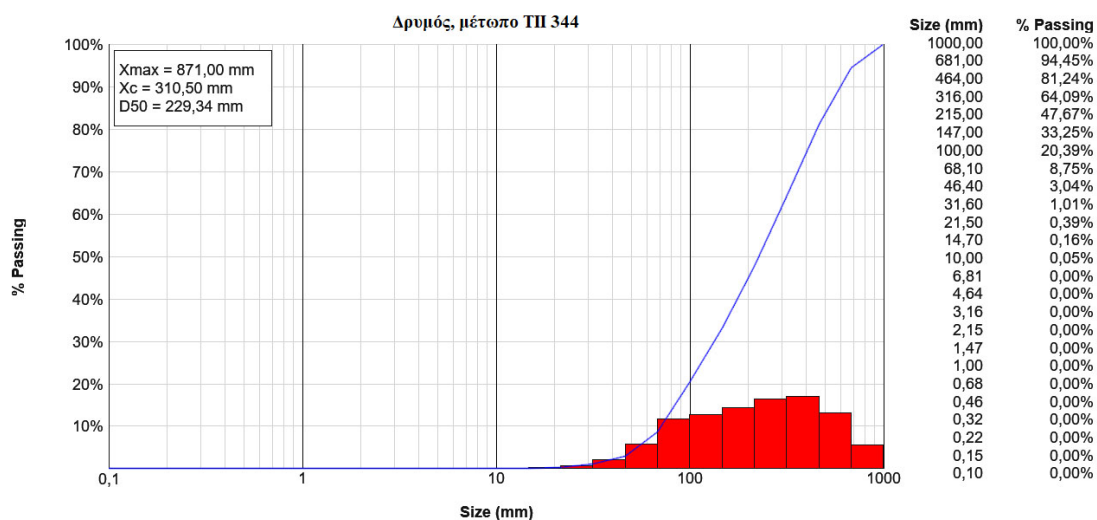
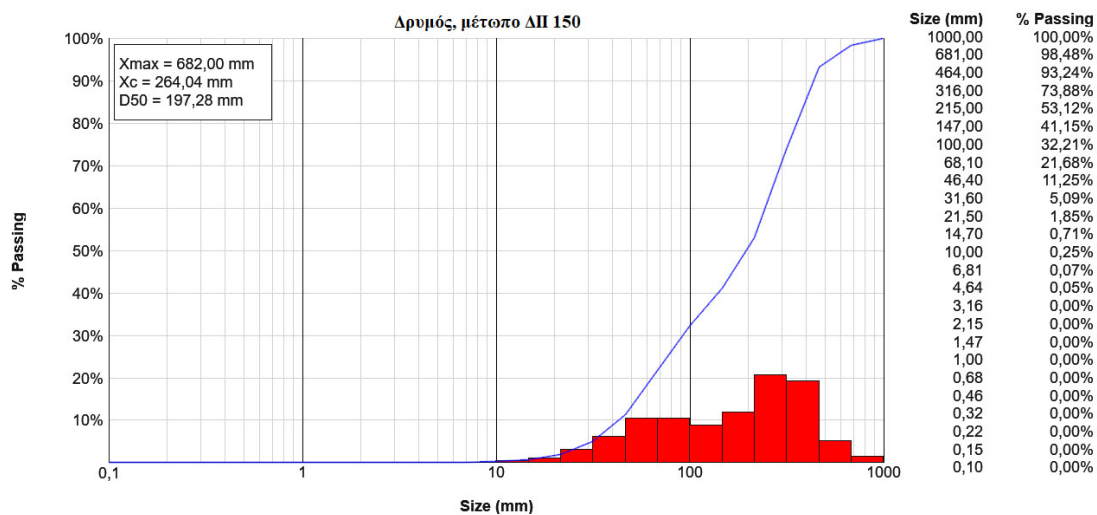


Δρυμός, μέτωπο ΠΠ 344



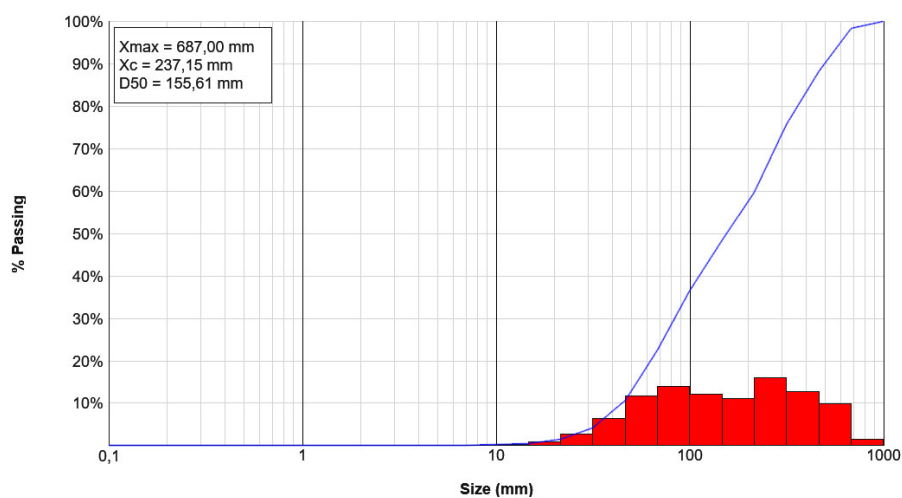
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



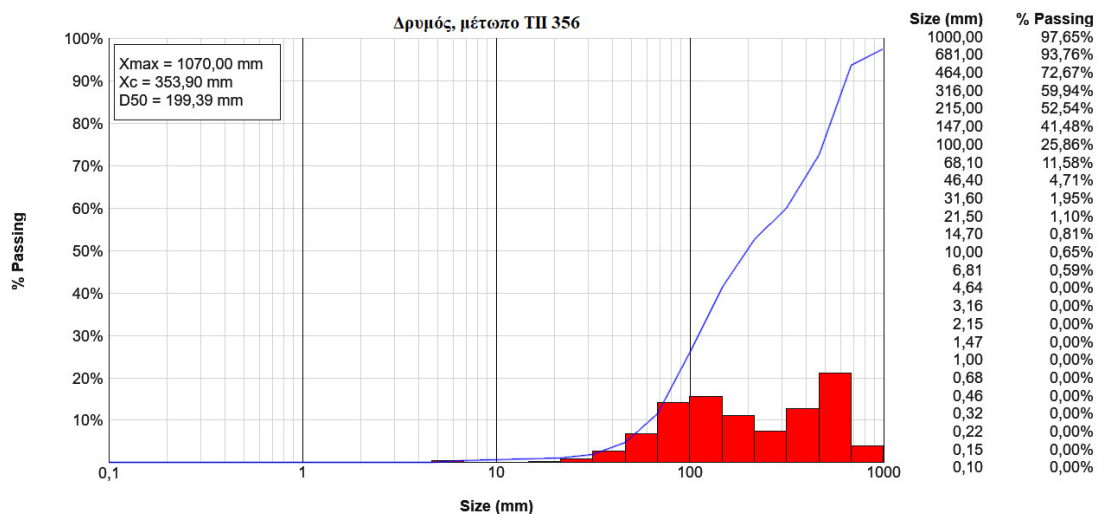


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

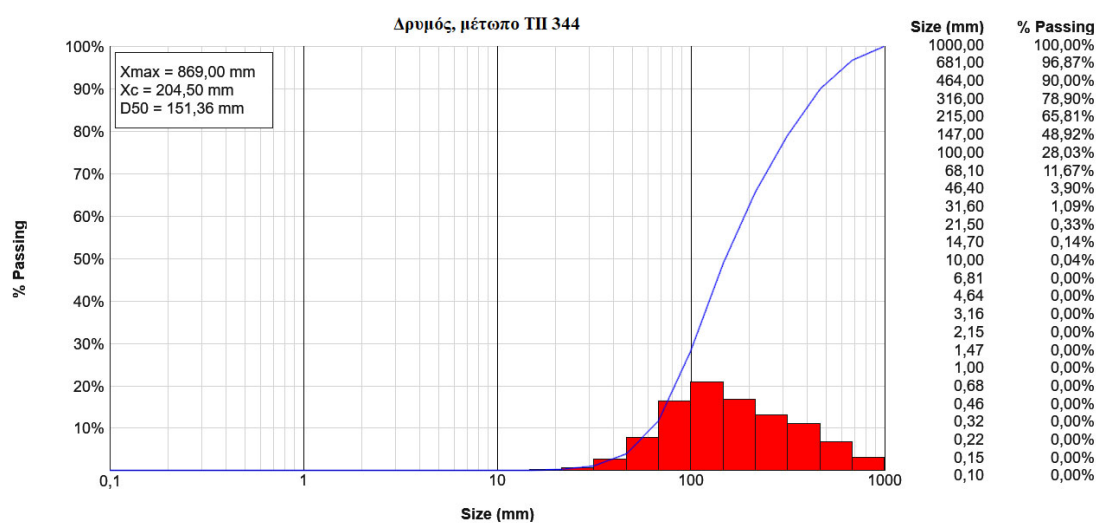
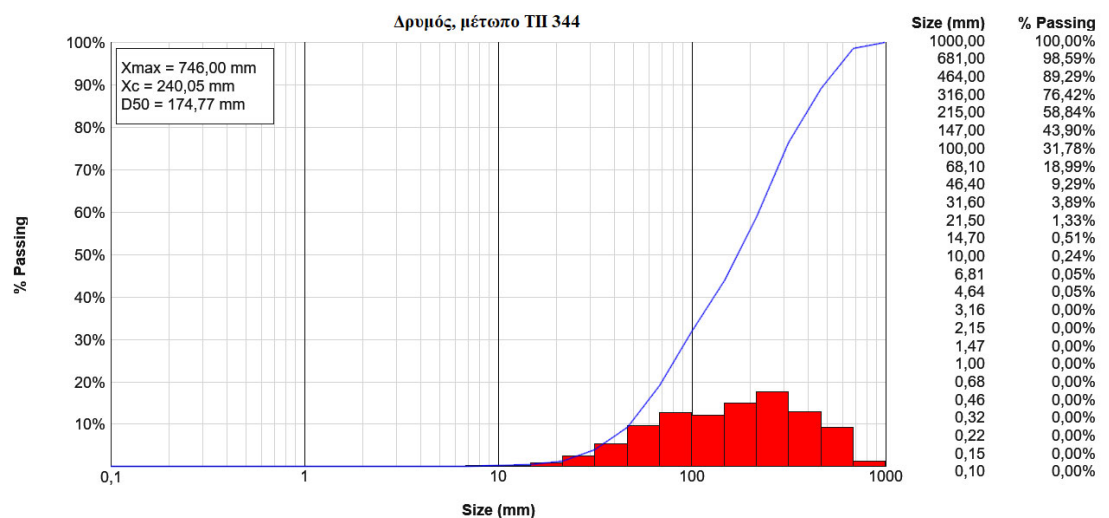
Δρυμός, μέτωπο ΔΠ 150

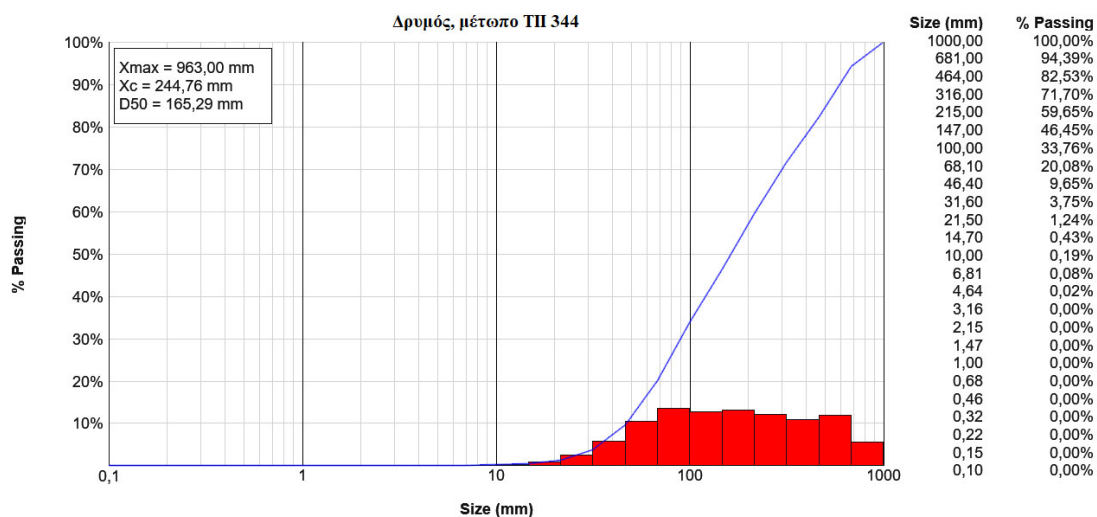
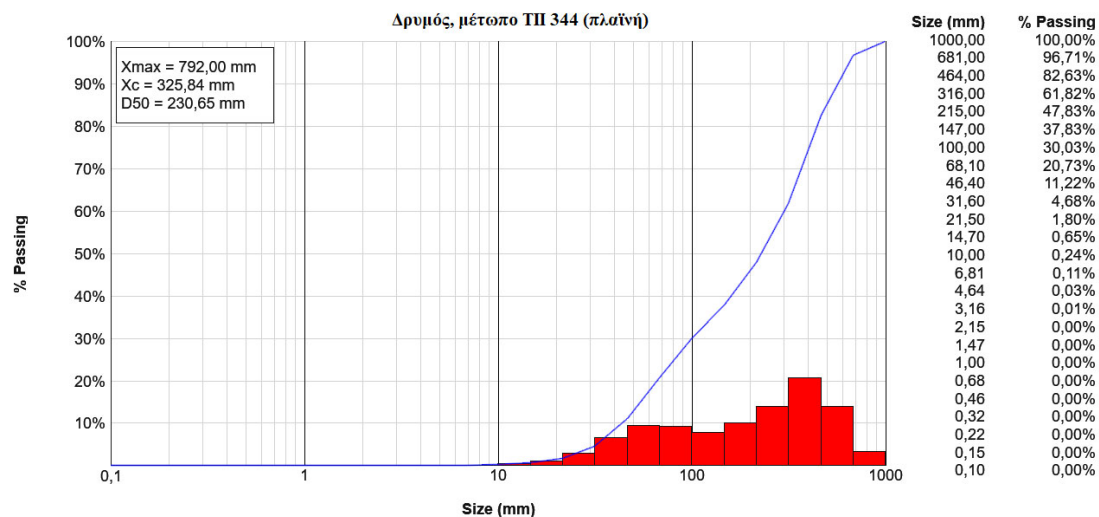


Δρυμός, μέτωπο ΠΠ 356

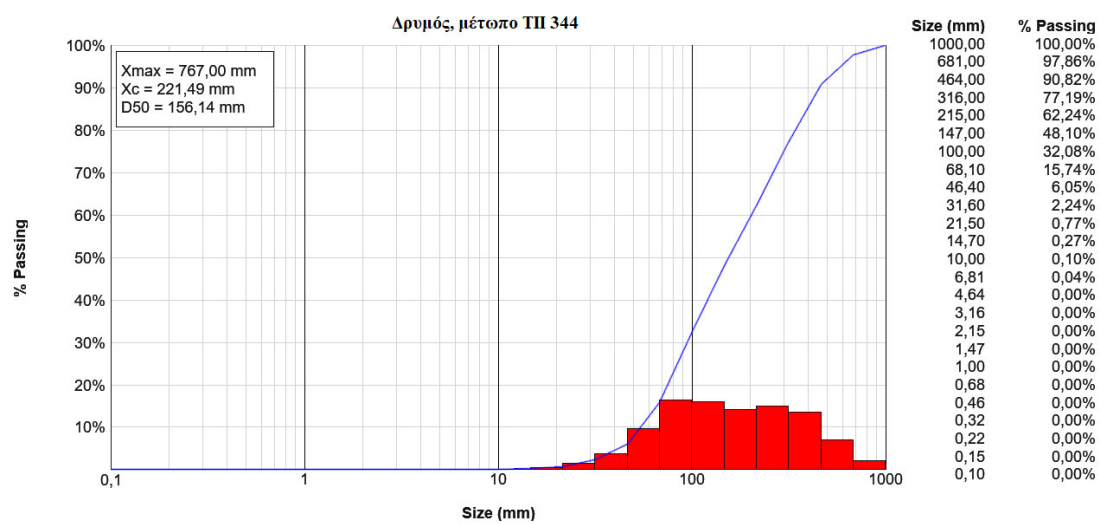
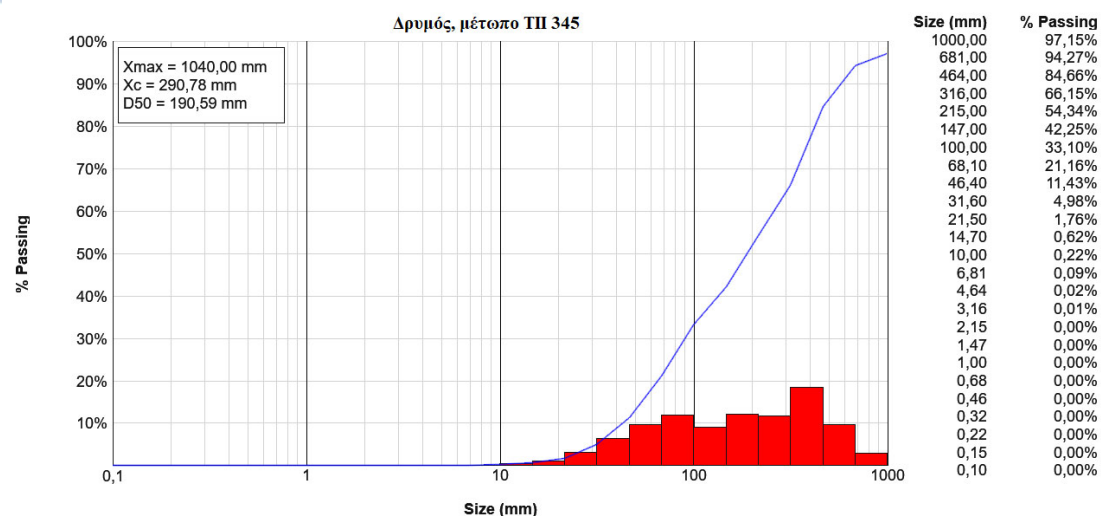


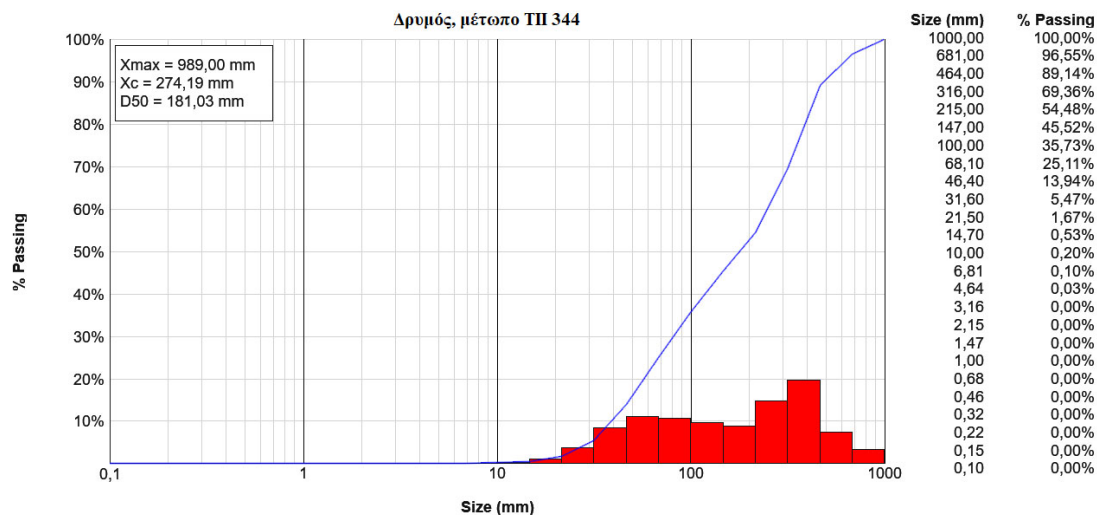
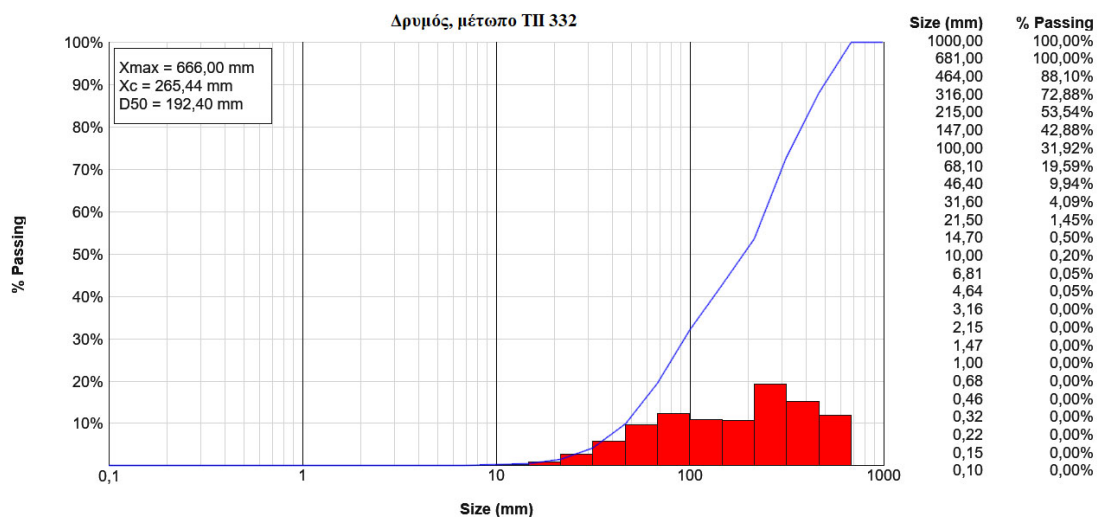
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



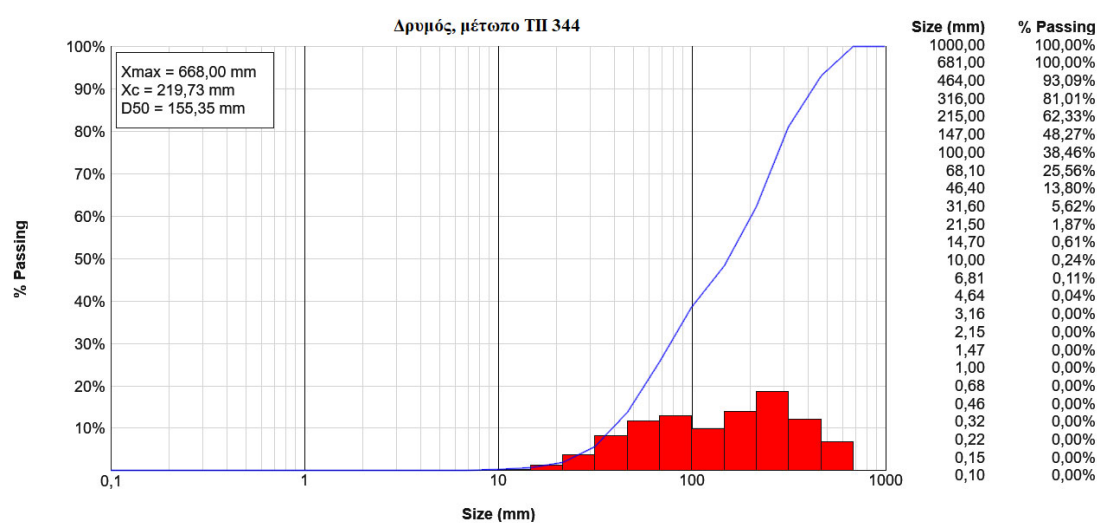
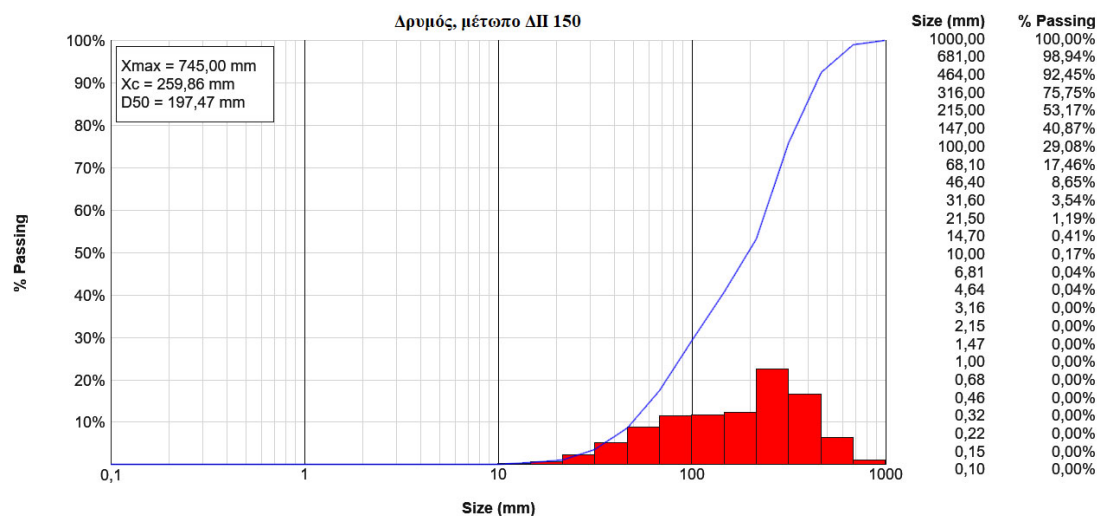


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

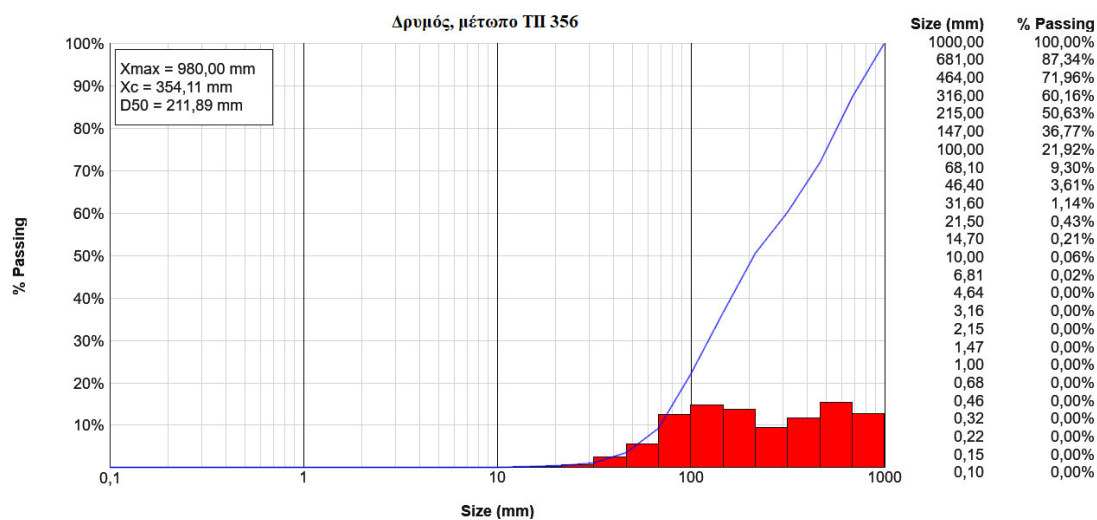
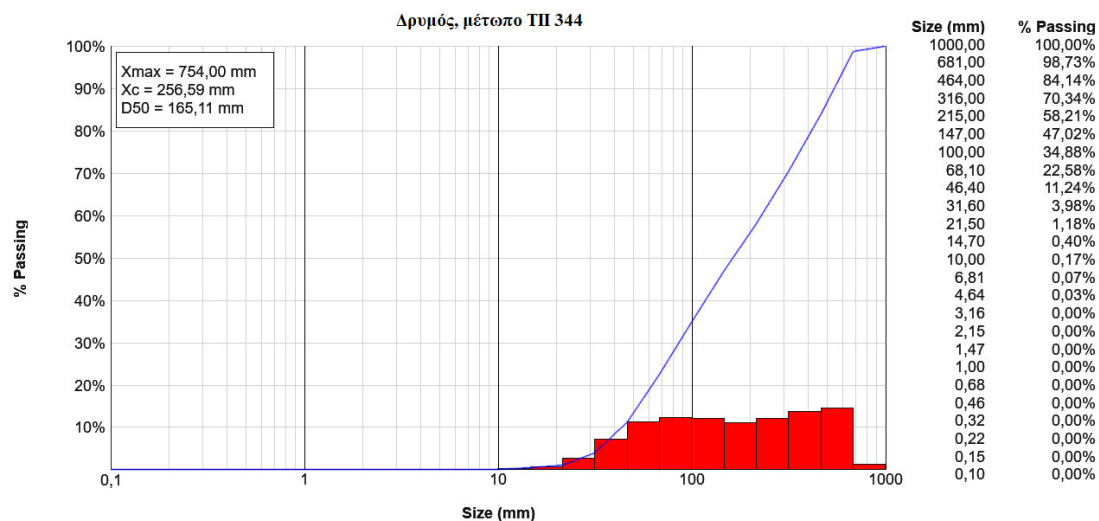


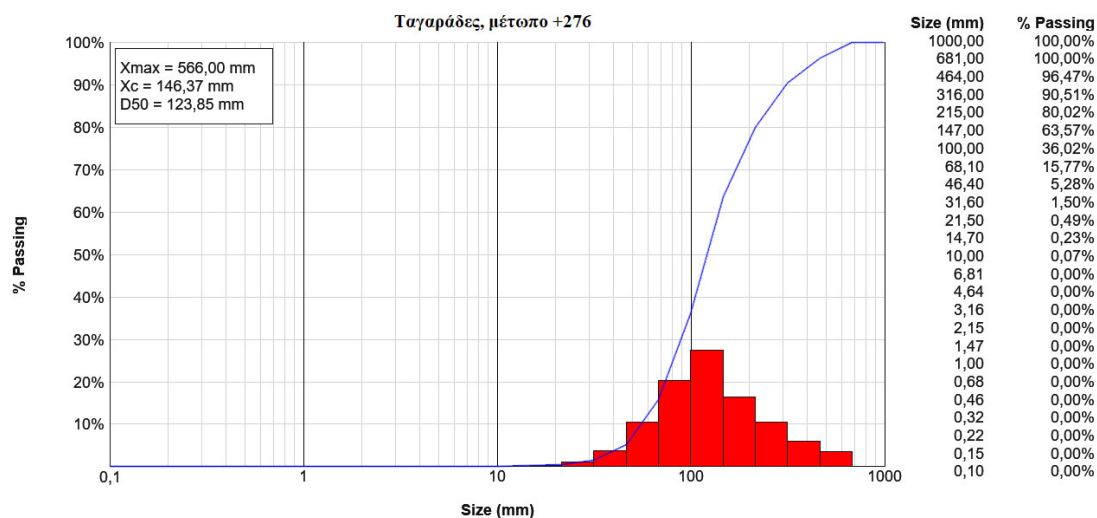
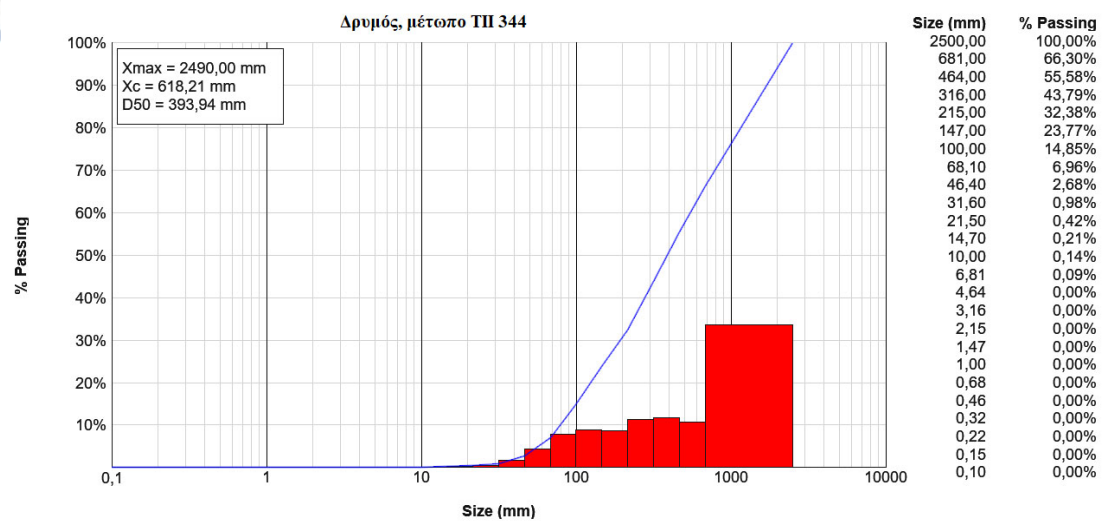


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

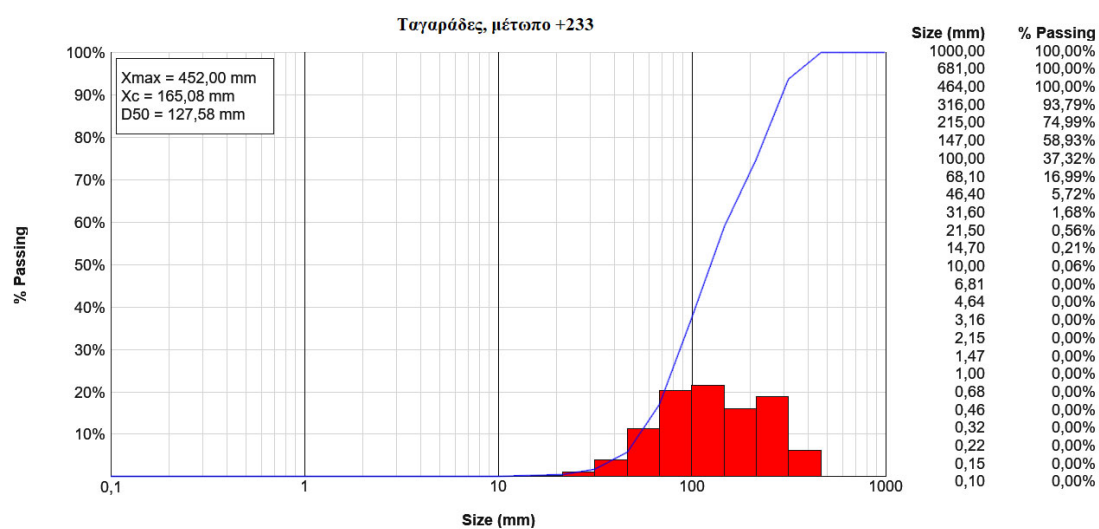
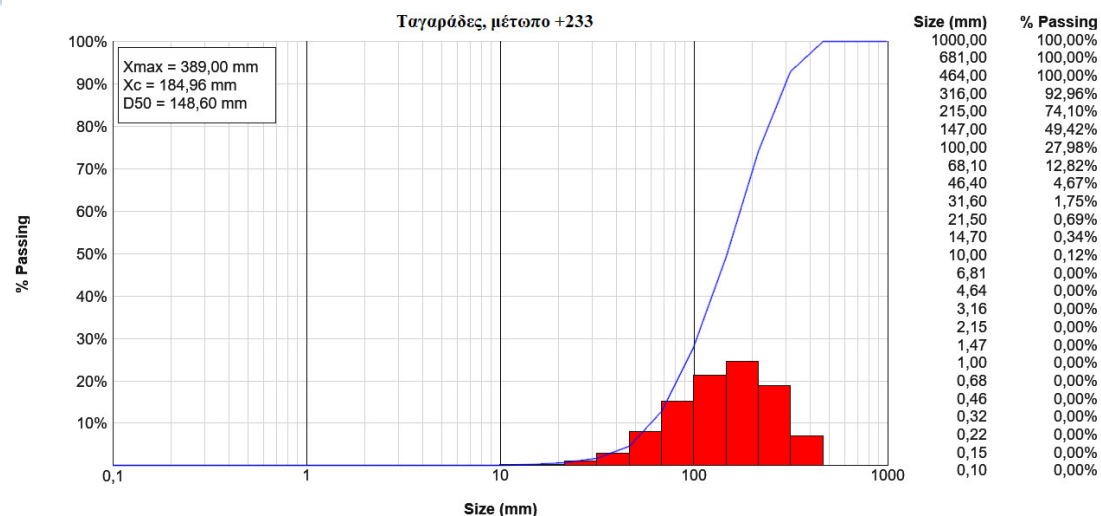


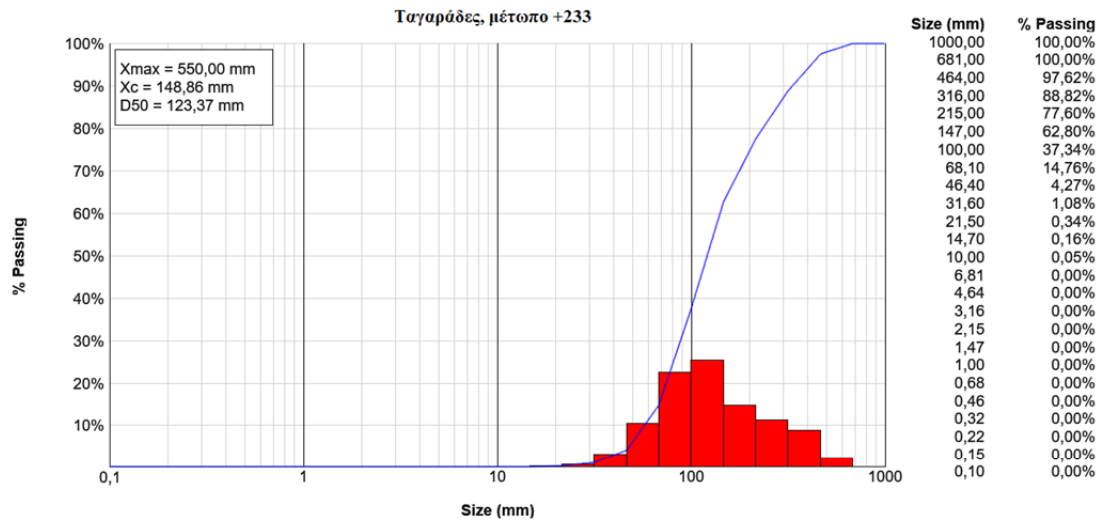
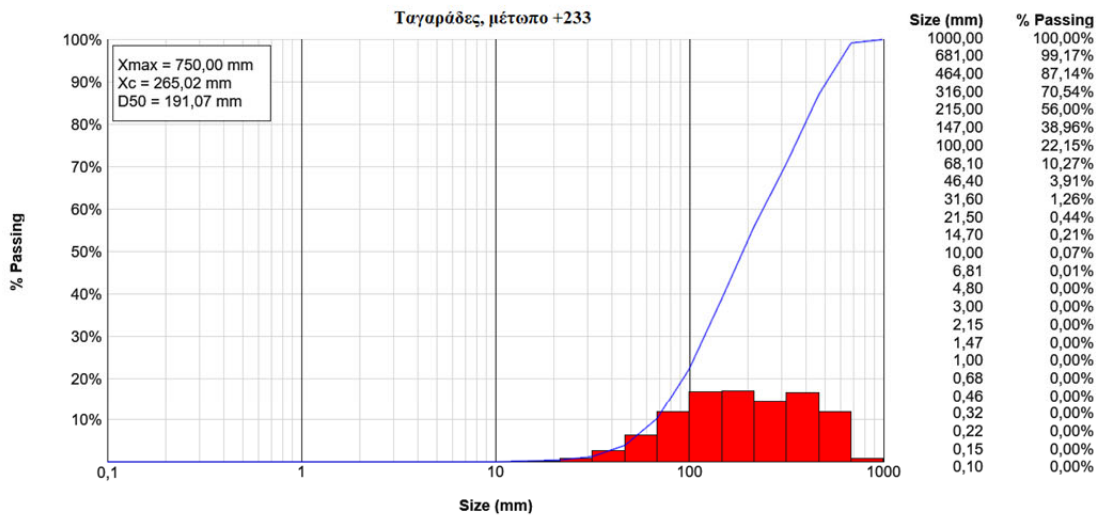
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



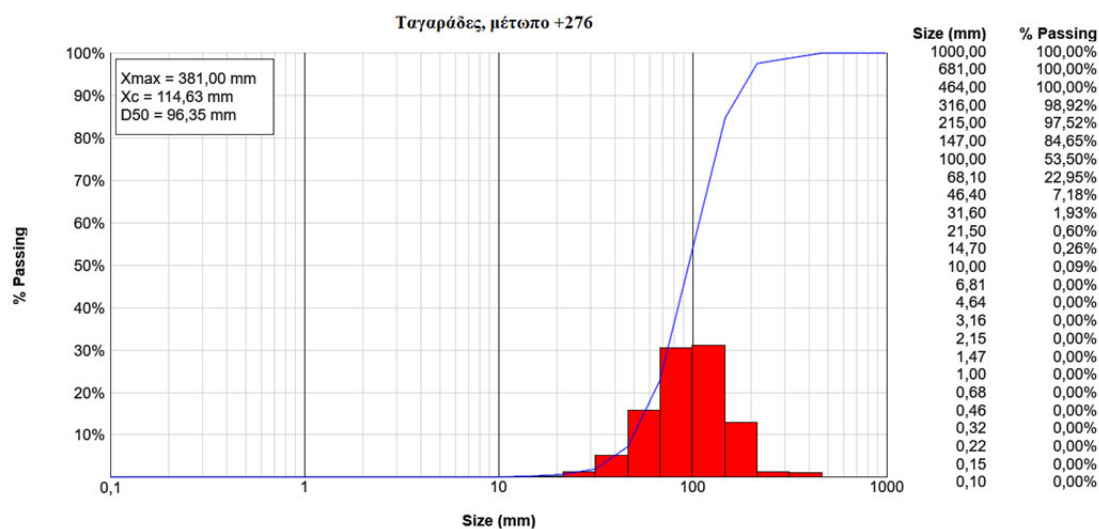
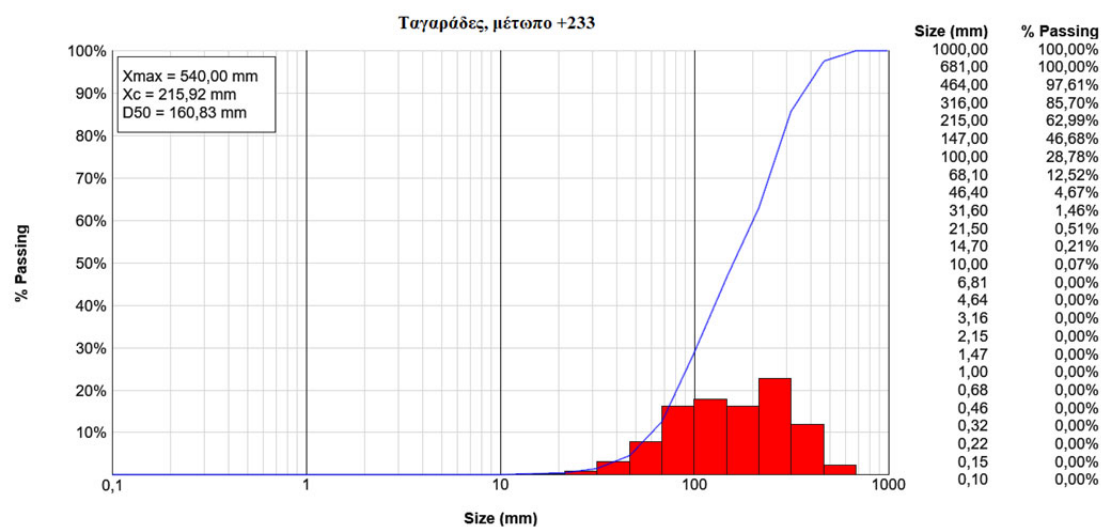


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

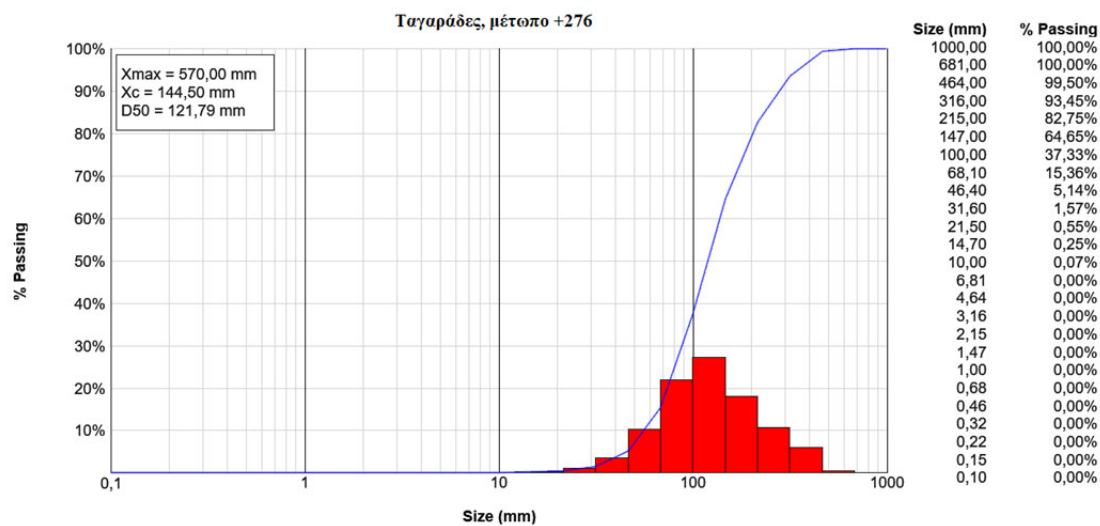
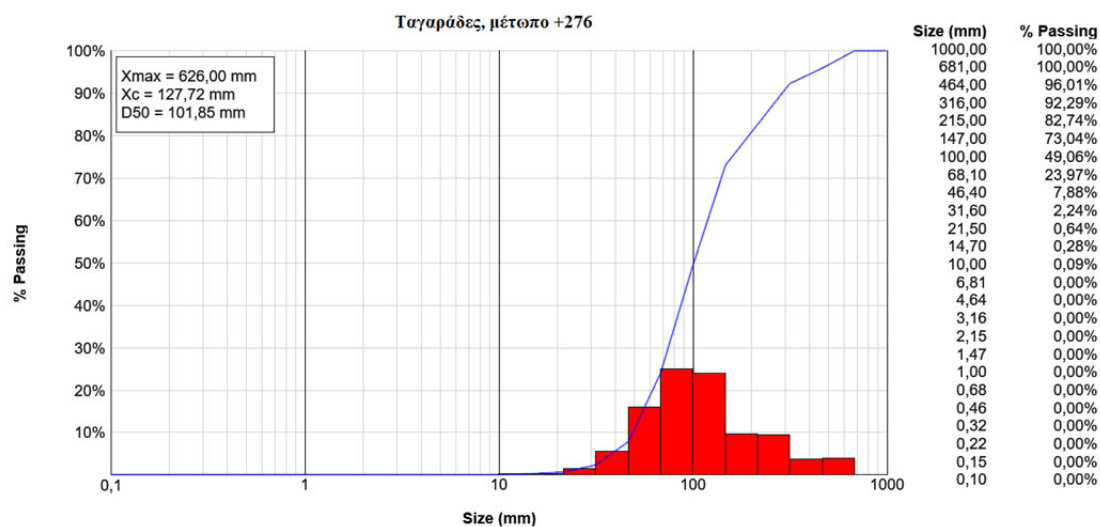


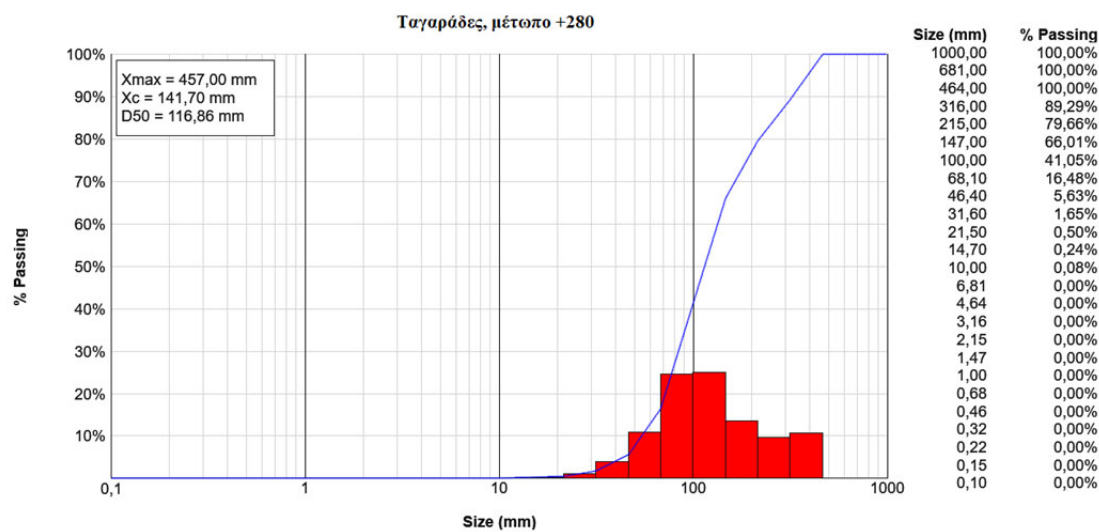
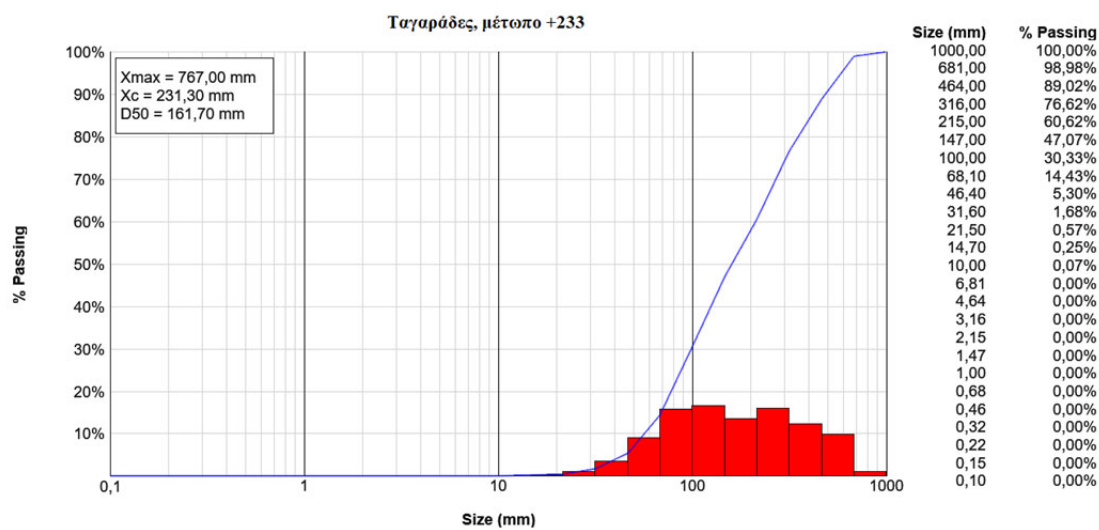


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ





ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

