ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών (ΔΠΜΣ)

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Γεωτεχνική αξιολόγηση ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Καμάρης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF MINING & METALLURGICAL ENGINEERING

Master of Science

DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND WORKS

Geotechnical evaluation of external limestone waste dumps of Agios Ioannis Mines

MSc Thesis

Georgios Kamaris

Supervisor: Ioannis E. Zevgolis
Assistant Professor N.T.U.A.

Athens, February 2022

Π Ρ Ο Λ Ο Γ Ο Σ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η γεωτεχνική αξιολόγηση των ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη Περιφερειακής Ενότητας Βοιωτίας, όπου παρατίθενται και περιγράφονται τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά αυτών, καθώς και η πρόβλεψη της κοκκομετρίας των εξορυκτικών αποθέσεων από το μοντέλο Kuz – Ram.

Σκοπός της εργασίας είναι αφενός η περιγραφή των μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών των ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη και η σύγκριση της κοκκομετρίας από την φωτοανάλυση αυτής με το μοντέλο Kuz – Ram.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Ζευγώλη Ιωάννη, η συμβολή του οποίου ήταν καθοριστική για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Η καθοδήγησή του, οι συμβουλές του και η αμέριστη υποστήριξη που μου παρείχε, έκαναν δυνατή την ολοκλήρωσή της.

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει και αναλύει τα φυσικά, μηχανικά χαρακτηριστικά των ασβεστολιθικών εξωτερικών αποθέσεων των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας.

Στα πλαίσια της γεωτεχνικής αξιολόγησης των ασβεστολιθικών εξωτερικών αποθέσεων προσδιορίστηκαν ο βαθμός συμπύκνωσης, περιεχόμενης υγρασίας, η κοκκομετρική διαβάθμιση, τα όρια Atterberg και η φυσική υγρασίας από την λήψη 10 δειγμάτων των ασβεστολιθικών σωρών απόθεσης των Μεταλλείων. Επίσης, από τα 10 παραπάνω δείγματα, ελήφθησαν 2 συγκεντρωτικά όπου προσδιορίστηκαν ο βαθμός συμπύκνωσης κατά τροποποιημένη Proctor που επιτυγχάνεται στους σωρούς απόθεσης, καθώς και η διαπερατότητά τους. Από τα παραπάνω, αποτελέσματα, έγινε η κατάταξη των υλικών με βάση το αμερικάνικο σύστημα ταξινόμησης USCS.

Για την κατάταξη της κοκκομετρίας, ελήφθησαν 2 φωτογραφίες από ανατιναγμένο υλικό σε σωρό απόθεσης του Μεταλλείου της Μαγούλας, όπου έγινε σύγκριση της κοκκομετρίας που προέκυψε από τη φωτοανάλυση και την πρόβλεψη της κοκκομετρίας αυτής με το μοντέλο πρόβλεψης θρυμματισμού Kuz – Ram.

Λέξεις Κλειδιά: συμπύκνωση, κοκκομετρική διαβάθμιση, όρια Atterberg, μέθοδος Kuz- Ram, φωτοανάλυση.

A B S T R A C T

Geotechnical evaluation of the limestone waste dump material at Agios Ioannis Mines

by *Kamaris George*

Thesis Submitted for the Degree
MSc – Design and Construction of Underground Works

School of Mining and Metallurgical Engineering
National Technical University of Athens

Supervisor: Dr. Ioannis E. Zevgolis
Assistant Professor, NTUA

This thesis study describes and analyzes the physical and mechanical characteristics of the limestone waste dump material at the Agios Ioannis Mines in Viotia Prefecture.

Regarding the geotechnical evaluation of the limestone waste dump material, there have been 10 samples of the waste material collected, which have been used for the determination of the grade of the compaction, the contained water content, the Atterberg limits, and the natural humidity. From the 10 samples referred above, 2 samples have been aggregated to determine the grade of the modified Proctor compaction which is made at the waste dump, and the permeability. The above results were used to categorize the waste dump material according to the American system of USCS.

Regarding the grading of the material, there have been 2 photos from the blasted material in the waste dump at the Magoula Mine, in which comparison has been made between the determination of the grading through the photo analysis technique and the Kuz - Ram prediction model.

Keywords: compaction, grading, Atterberg limits, Kuz – Ram model, photo-analysis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1 . Ε Ι Σ Α Γ Ω Γ Η

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στον προσδιορισμό των μηχανικών και των φυσικών χαρακτηριστικών των εξωτερικών αποθέσεων των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας, παράμετροι οι οποίοι συντελούν στην γνώση για την διασφάλιση της σταθερότητας τους που αποσκοπεί στην εναρμόνιση των Μεταλλείων με την κείμενη νομοθεσία, ώστε να διασφαλιστεί η δημόσια υγεία και οι περιβαλλοντικές δεσμεύσεις.

Στα Κεφάλαια που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα της **γεωτεχνικής αξιολόγησης** που αφορά στις αποθέσεις των **ασβεστολιθικών εξορυκτικών εκμετάλλευσης** των ακόλουθων κοιτασμάτων:

- *«Μαγούλας»* (Δημοτικού Διαμερίσματος Κόκκινου Δήμου Ορχομενού (πρώην Δήμου Ακραιφνίας) Νομού Βοιωτίας),
- *«Νησιού»* (Δημοτικού Διαμερίσματος Κόκκινου Δήμου Ορχομενού (πρώην Δήμου Ακραιφνίας) Νομού Βοιωτίας),
- *«Μπίνιας»* (Δημοτικού Διαμερίσματος Μαρτίνου Δήμου Λοκρών (πρώην Δήμου Οπουντίων) Νομού Φθιώτιδας)
- *«Τσούκας»* (Δημοτικού Διαμερίσματος Μαρτίνου Δήμου Λοκρών (πρώην Δήμου Οπουντίων) Νομού Φθιώτιδας).

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ - ΣΚΟΠΟΣ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των ασβεστολιθικών αποθέσεων εξόρυξης των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη:

Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα μελέτη πραγματεύεται το ακόλουθο αντικείμενο: **Χαρακτηρισμό των ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων των Μεταλλείων ως προς τη γεωτεχνική συμπεριφορά τους, μέσω της εκτίμησης και προσδιορισμού των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους** (όπως για παράδειγμα, κοκκομετρία, διαπερατότητα, όρια υδαρότητας και πλαστικότητας, πυκνότητα, βαθμό συμπύκνωσης, διατμητική αντοχή και συμπιεστότητα).

1.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για τη σύνταξη της παρούσας μελέτης ελήφθησαν υπόψη εργαστηριακά δεδομένα από την ακόλουθη μελέτη που εκπονήθηκε το 2013 για λογαριασμό της ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ: «Σχέδιο διαχείρισης εξορυκτικών αποβλήτων μεταλλείου Νησιού Δ.Δ. Κόκκινου, Δήμου Ακραιφνίας, Ν. Βοιωτίας».

Επιπλέον, όσον αφορά στις κοκκομετρίες των εξορυκτικών αποθέσεων ελήφθησαν υπόψη αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για λογαριασμό της ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ από την καναδική εταιρεία WipWare Inc.

1.4 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από 9 Κεφάλαια στα οποία αναφέρονται αντίστοιχα τα παρακάτω:

Κεφάλαιο 1ο :

Στο 1ο Κεφάλαιο δίνονται τα εισαγωγικά στοιχεία, όπως αντικείμενο της εργασίας, η δομή αυτής και η θέση του έργου.

Κεφάλαιο 2ο :

Στο 2ο Κεφάλαιο αναλύεται η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη.

Κεφάλαιο 3ο :

Στο 3ο Κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία της πρόβλεψης του θρυμματισμού των ασβεστολιθικών στείρων των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη μέσω του μοντέλου θρυμματισμού κατά Kuz-Ram, καθώς και η συσχέτιση του θρυμματισμού από ανατίναξη με το συνολικό κόστος της εξόρυξης.

Κεφάλαιο 4ο :

Στο 4ο Κεφάλαιο δίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθορισμού της κοκκομετρίας μέσω της τεχνικής της φωτοανάλυσης.

Κεφάλαιο 5ο :

Στο 5ο Κεφάλαιο περιγράφεται η υφιστάμενη κατάσταση των εξωτερικών αποθέσεων των Μεταλλείων, όπως η θέση, το μέγεθος και η γενικότερη μορφολογία τους.

Κεφάλαιο 6ο :

Στο 6ο Κεφάλαιο αναφέρονται τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών προσδιορισμού της κοκκομετρίας που εκτελέστηκαν με την μέθοδο της φωτοανάλυσης, καθώς και οι εργαστηριακές μετρήσεις των ασβεστολιθικών αποθέσεων, όπως ποσοστό συμπύκνωσης και υγρασίας.

Κεφάλαιο 7ο :

Στο 7ο Κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης της κοκκομετρίας από την φωτοανάλυση και από την πρόβλεψη του θρυμματισμού μέσω του μοντέλου Kuz-Ram, δίνονται επίσης τα αποτελέσματα των δοκιμών των ορίων Atterberg και των δοκιμών της τροποποιημένης Proctor, καθώς επίσης και στοιχεία που αφορούν την υδροπερατότητα.

Κεφάλαιο 8ο :

Στο 8ο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα και δίνονται τα συμπεράσματα της γεωτεχνικής αξιολόγησης των ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων των Μεταλλείων.

Κεφάλαιο 9ο :

Στο 9ο Κεφάλαιο παρατίθεται εκτενής σύνοψη της εργασίας στα αγγλικά.

Κεφάλαιο 10ο :

Στο 10ο Κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία.

1.5 ΘΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΑΓΙΟΥ ΙΩΑΝΝΗ

Η ευρύτερη περιοχή των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη βρίσκεται εντός των νομών Βοιωτίας και Φθιώτιδας (Εικόνες 1 και 2). Οι θέσεις των τεσσάρων κοιτασμάτων και τα αντίστοιχα εργοτάξια συνδέονται μεταξύ τους με οδικό δίκτυο και βρίσκονται σε απόσταση περίπου 115 km (κοιτάσματα Μαγούλας, Νησιού και Μπίνιας) και 130 km (κοίτασμα Τσούκας) βόρεια των Αθηνών.

Τα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας αποτελούν αντικείμενο εκμετάλλευσης των Ελληνικών λατεριτικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων, για την παραγωγή κράματος σιδηρονικελίου (FeNi), τα οποία ανήκουν στην Γενική Μεταλλευτική και Μεταλλουργική Α.Ε. ΛΑΡΚΟ.

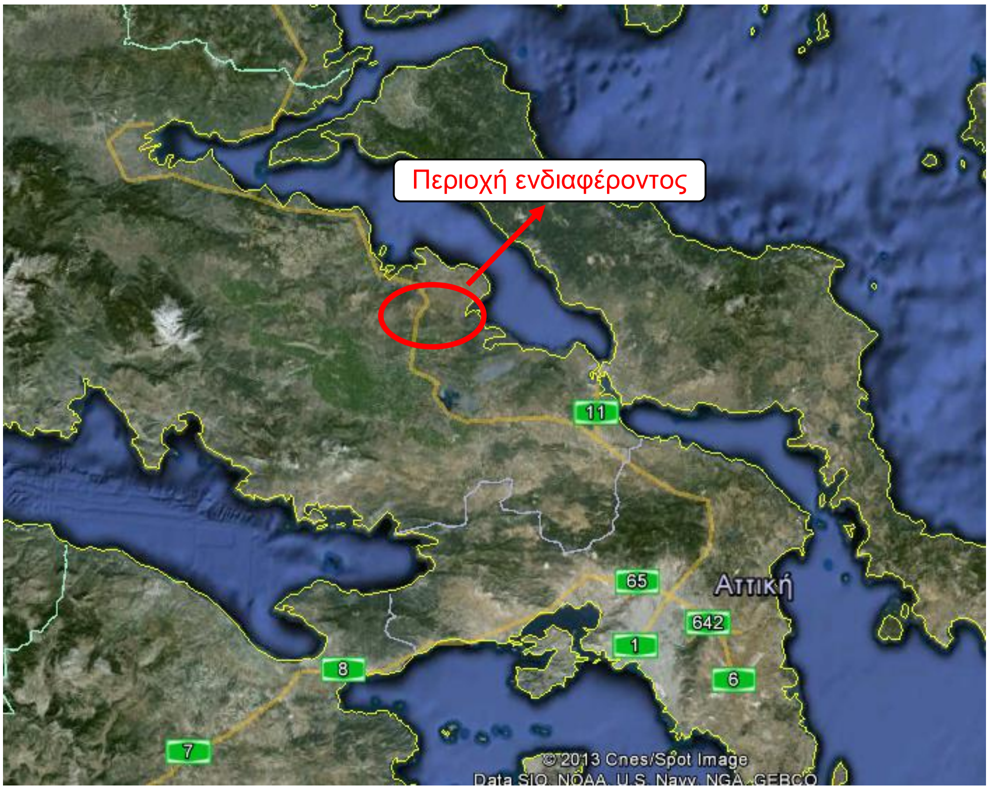
Τα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας εντάσσονται σε μια ευρύτερη μεταλλοφόρο περιοχή λατεριτικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων, τα οποία κατά την τελευταία 40ετία αποτέλεσαν αντικείμενο μεταλλευτικής δραστηριότητας των «Μεταλλείων Αγ. Ιωάννη» της Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ. Την εκμετάλλευση των προαναφερθέντων Μεταλλείων συμπληρώνουν τα Μεταλλεία της Κωπαΐδας που εντοπίζεται στην ανατολική απόληξη της πεδιάδας της Κωπαΐδας, το Μεταλλείο της Νότιας Περιοχής που βρίσκονται ανατολικά από τα εξεταζόμενα Μεταλλεία, καθώς και το Μεταλλείο του Πτώου που εντοπίζεται νότιο ανατολικά των Μεταλλείων Νησιού και Μαγούλας.

Τα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας αποτελούν μέρος της καθετοποιημένης παραγωγικής διαδικασίας της εταιρίας, όπου το μετάλλευμα από τα εν λόγω κοιτάσματα μαζί με αυτά των Μεταλλείων Ευβοίας και Μεταλλείων Καστοριάς τροφοδοτούν το πυρομεταλλουργικό εργοστάσιο της Λάρυμνας για την παραγωγή κοκκοποιημένου σιδηρονικελιούχου τελικού προϊόντος.

1.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ

Τα χαρακτηριστικά της μεταλλοφορίας και ειδικότερα η διακύμανση ποιότητας και ποσότητας τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια, το μικρό πάχος του εκμεταλλεύσιμου μεταλλεύματος, η μέτρια προς χαμηλή συγκριτικά με άλλα μεταλλεύματα περιεκτικότητα σε νικέλιο και ο τεκτονισμός της περιοχής καθιστούν τη μέθοδο της επιφανειακής εκσκαφής με ορθές βαθμίδες ως τη μόνη τεχνοοικονομικά ενδεδειγμένη και εφαρμόσιμη μέθοδο εκμετάλλευσης για τα κοιτάσματα των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, πριν την εξόρυξη του μεταλλεύματος προηγείται η φάση της αποκάλυψης για την απομάκρυνση του υπερκείμενου Άνω-Κρητιδικού ασβεστόλιθου με εκρηκτικές ύλες. Η εξόρυξη των μεταλλευτικών στείρων πραγματοποιείται τμηματικά κατά ζώνες, ώστε το εκάστοτε αποκαλυπτόμενο μετάλλευμα να επαρκεί για τις ανάγκες του προγράμματος εξόρυξης.



Εικόνα 1. Ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος

Εικόνα 2. Θέσεις κοιτασμάτων - εργοταξίων

2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής των Μεταλλείων του Αγίου Ιωάννη, τα μορφολογικά και τοπιολογικά χαρακτηριστικά της καθώς και το υδρολογικό καθεστώς αυτής.

2.1 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΠΙΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η περιοχή των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας στα όρια με το ΒΒΑ. τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Βοιωτίας. Το σύνολο της εδαφικής περιφέρειας της ευρύτερης περιοχής δεν χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο. Στο σύνολο της η περιοχή χαρακτηρίζεται ως ημιορεινή περιοχή με μικρές έως μέτριες κλίσεις εδάφους, όπου στο σύνολό της απαρτίζεται από σχεδόν επίπεδη επιφάνεια στο υψόμετρο των 95 m, περιστοιχιζόμενη από λόφους με μέγιστο υψόμετρο έως 400m. Όσον αφορά στα υψόμετρα, επισημαίνεται ότι δεν υπάρχουν στο εσωτερικό της περιοχής μελέτης μεγάλες υψομετρικές διαφορές, χωρίς τοπιολογικές εξάρσεις.

2.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η ευρύτερη περιοχή (όπου εντάσσονται τα Μεταλλεία Μπίνια, Μαγούλα και Νησί) ανήκει στην υδρολογική λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, με συνολική έκταση περίπου 2.720 km^2, εκτείνεται στο κεντρικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος και ορίζεται δυτικά από τα όρη Οίτη και Γκιώνα, βόρεια από το Καλλίδρομο και το Χλωμό, και νότια από τον Παρνασσό και τον Ελικώνα. Στη λεκάνη διακρίνονται τρεις υπολεκάνες (άνω, μέσου και κάτω ρου) που εκτείνονται κατά μήκος του ποταμού και βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα. Οι απορροές του Βοιωτικού Κηφισού καταλήγουν στη λίμνη Υλίκη μέσω της σήραγγας Καρδίτσας. Ο Μέλας ποταμός, όπου στη μέση του βόρειου άκρου της Κωπαΐδας η ροή του διχάζεται, καθώς τμήμα του κατευθύνεται μέσω διευθετημένης κοίτης (Τάφρος Μέλανα) προς τη Συγκεντρωτική Τάφρο και τη Διώρυγα Καρδίτσας, ενώ το υπόλοιπο τμήμα υδάτων, ακολουθώντας την παλιά κοίτη του ποταμού, κατευθύνεται προς το Κάστρο και καταλήγει στις καταβόθρες του Αγίου Ιωάννη, στα ανατολικά της ζώνης. Με τον τρόπο αυτό, το μεγαλύτερο μέρος του υδατικού δυναμικού του Μέλανα εκτρέπεται προς τον Βοιωτικό Κηφισό.

2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Το γεωλογικό περιβάλλον της περιοχής αναλύεται παρακάτω, όπου δίνεται το γεωτεκτονικό καθεστώς στο οποίο ανήκει η περιοχή, η στρωματογραφική αλληλουχία των γεωλογικών στρωμάτων. Η απεικόνιση της γεωλογίας της περιοχής φαίνεται στην Εικόνα 3.

2.3.1 Γεωλογικό περιβάλλον

Το αλπικό γεωλογικό περιβάλλον της περιοχής δομείται από σχηματισμούς που ανήκουν σε δυο διαφορετικές γεωτεκτονικές ενότητες των εξωτερικών Ελληνίδων: τις ενότητες Υποπελαγονικής και Ανατολικής Ελλάδας. Ο διαχωρισμός των ενοτήτων Ανατολικής Ελλάδας και Υποπελαγονικής είναι χρονικός, καθώς η Ανατολική Ελλάδα δεν έχει καθαρά τοπικό χαρακτήρα, αλλά αποτελεί ένα ομογενοποιημένο πλήθος παλαιοτεκτονισμένων ενοτήτων, που έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την άνω Κρητιδική (Κενομάνια) επίκλυση. Κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της ζώνης αυτής είναι η παρουσία των οφιολίθων – σχιστοκερατολίθων και η κενομάνιος επίκλυση με την οποία συνδέεται η μεταλλοφορία των γνωστών σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων. Συνεπώς, η Υποπελαγονική ενότητα αποτελεί το τμήμα του υποβάθρου ενός συγκεκριμένου παλαιογεωγραφικού χώρου, με ηλικία εξέλιξης Τριαδικό-Ιουρασικό, ενώ αντίθετα η έννοια της Ανατολικής Ελλάδας δεν υφίσταται για ηλικίες προ-Κενομάνιες, λόγω της απουσίας του γεγονότος που τη χαρακτηρίζει. Τα Μεταλπικά ιζήματα καταλαμβάνουν το σύνολο της περιοχής ενδιαφέροντος (Κωπαϊδικό πεδίο – λεκάνη Κάστρου), έχοντας πολλές φορές σημαντικό πάχος, ιδίως στα κεντρικότερα τμήματα της λεκάνης. Οι Μεταλπικοί σχηματισμοί της Κωπαΐδας καλύπτονται σχεδόν εξ’ ολοκλήρου από Τεταρτογενείς σχηματισμούς.

2.3.2 Στρωματογραφία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντούν στην ευρύτερη περιοχή του Έργου από τους παλαιότερους προς τους νεότερους, είναι :

<u>Αλπικοί σχηματισμοί</u>

- **Άνω Τριαδικό – Ιουρασικό**:

Οι αρχαιότεροι σχηματισμοί είναι οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι που αποτελούν τα κατώτερα μέλη της ανθρακικής σειράς, τα μεταβατικά στρώματα Περμίου-Τριαδικού. Ακολουθούν οι παχυστρωματώδεις, τεφροί έως λευκορόδινοι δολομίτες και οι δολομιτικοί ασβεστόλιθοι του μέσου-άνω Τριαδικού. Το πάχος τους είναι κυμαινόμενο μεταξύ 300 και 700 m και η επιφανειακή τους εξάπλωση σχετικά μικρή, περιοριζόμενη στις περιοχές ανατολικά του Κάστρου (Μικροβούνι, Πρ. Ηλίας, Σκληρό, Στάνες, Στήθος, Σπαρτιά, καθώς και στο βόρειο τμήμα του όρμου των Σκροπονερίων).

Η ανθρακική ακολουθία συνεχίζεται, χωρίς να υπάρχει σαφές όριο, με Ιουρασικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι εξελισσόμενοι προς τα ανώτερα στρώματα γίνονται μέσο-λεπτοπλακώδεις, τεφρού ως μελανού χρώματος. Στους ανώτερους ορίζοντες υπάρχουν ωολιθικές ενστρώσεις με κερατολιθικούς κονδύλους και σχιστολιθικά στρώματα με χαρακτηριστικά απολιθώματα Cladocoropsis mirabilis, ενώ σημαντική είναι και η παρουσία μικροκρυσταλλικών βιτουμενιούχων ασβεστόλιθων, με ενδεχόμενες βωξιτικές παρεμβολές). Το πάχος της ασβεστολιθικής Ιουρασικής σειράς υπολογίζεται σε 700 m και άνω, ενώ η εξάπλωσή τους στη περιοχή είναι σημαντική, καταλαμβάνοντας τα Α και ΝΑ κράσπεδα της Κωπαΐδας (υψώματα Φαγάς, Τζουμπίτσες, Κοκορέτσα, Κοκκινόβραχος), καθώς και στα Β (υψώματα Κομήτης, Τουρλογιάννης).

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, αλλά και γενικότερα στον «χώρο» της Υποπελαγονικής ενότητας, απαντά το ηφαιστειοϊζηματογενές σύμπλεγμα πετρωμάτων της «σχιστοψαμμιτοκερατολιθικής διάπλασης», το οποίο υπέρκειται τεκτονικά των ασβεστόλιθων του άνω Τριαδικού – κάτω-μέσου Ιουρασικού και υπόκειται της Ανωκρητιδικής επίκλυσης. Ο Παρασκευαΐδης (1972) υποστηρίζει την ύπαρξη μιας και μοναδικής διάπλασης, ενώ ο Τάταρης κ.ά. (1970), με βάση απολιθωματοφόρους ορίζοντες, θεωρεί ότι υπάρχουν δυο διαφορετικές διαπλάσεις, μια παλαιότερη, ηλικίας ανώτερο Λιάσιο ως κατώτερο Μάλμιο (περιοχή Πτώου όρους), και μια νεότερη, ηλικίας Τιθώνιο ως κατώτερο Κρητιδικό (περιοχή Στρολόγγου). Όσον αφορά στον πετρολογικό χαρακτήρα της, αποτελείται από ένα σύμπλεγμα εναλλασσόμενων αργιλικών σχιστόλιθων και κερατόλιθων, με ασβεστολιθικές φακοειδείς παρεμβολές και οφιόλιθους. Χαρακτηριστικές ασβεστολιθικές ενστρώσεις, παρατηρούνται στις περιοχές Χελώνα, Παλιομετόχι και Ράχη Λιέπουρα. Τέλος, ο Μαρίνος (1958) αναφέρει ότι τα οφιολιθικά πετρώματα της διάπλασης αποτελούνται από περιδοτίτες, δουνίτες, γάβββρους, διαβάσες, δολερίτες, κεροστιλβίτες, ηφαιστειακά λατυποπαγή κ.τ.λ., τα οποία αποτελούν τη πλειονότητα του σχηματισμού. Το πάχος του συμπλέγματος είναι κυμαινόμενο, ανάλογα της θέσης.

- **Κρητιδικό:**

Το βασικό χαρακτηριστικό είναι η Ανωκρητιδική επίκλυση, με γενική ηλικία το Κενομάνιο. Ο Κουμαντάκης (1968) περιγράφοντας μια τυπική τομή, αναφέρει στα κατώτερα στρώματα της ακολουθίας την ύπαρξη κίτρινων μαργών και κατά θέσεις βασικού κροκαλοπαγούς (κροκαλοπαγές επίκλυσης), με ασβεστολιθικές και οφιολιθικές κροκάλες. Η ακολουθία συνεχίζεται διαδοχικά με κίτρινους μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθους, τεφρούς ασβεστόλιθους με Radiolites douvileei, τεφρούς-τεφροκίτρινους άστρωτους ασβεστόλιθους με Radiolites lusitanicus, κίτρινους μαργαΐκούς ασβεστόλιθους με Vaccinites gaudri και τελειώνει στο Ανώτερο Κρητιδικό – Ηώκαινο, πριν την απόθεση του φλύσχη, με μια σειρά μικρολατυποπαγών ασβεστόλιθων με Globotruncana, Siderolites, Nummulites κ.ά.

Οι ασβεστόλιθοι του Κρητιδικού είναι γενικά έντονα διερρηγμένοι και καρστικοποιημένοι, το δε πάχος τους ποικίλει ανάλογα τους ερευνητές, καθώς ο Παρασκευαΐδης (1972) το υπολογίζει γύρω στα 500 m, ενώ ο Παγούνης κ.ά. (1994) αναφέρουν ότι δεν ξεπερνάει τα 200 m. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της ασυνέχειας του Κενομάνιου, είναι η ύπαρξη κατά θέσεις επί και κάτω αυτής, των κοιτασμάτων Fe-Ni (ευρύτερη περιοχή Αγίου Ιωάννη). Η εμφάνισή τους, εκτός από την προαναφερθείσα περιοχή, εστιάζεται και στα Β και ΒΑ κράσπεδα της Κωπαΐδας (υψώματα Στρώμα, Μύτικας, Φτελιά, Μεγάλο Βουνό κ.ά.).

- **Ηώκαινο:**

Την Ανωκρητιδική σειρά ακολουθεί στο Ηώκαινο ο τυπικός φλύσχης. Αποτελείται κυρίως από αργιλικές, μαργαΐκές και ψαμμιτικές αποθέσεις, που περιέχουν κατά θέσεις ασβεστολιθικούς φακούς. Σύμφωνα με τον Κουμαντάκη (1968), η μετάβαση από το άνω Κρητιδικό στο Ηώκαινο γίνεται μέσω εναλλαγών στρωμάτων ασβεστόλιθων και ερυθρών μαργών και αργίλων, συνολικού πάχους 250 m. Την κανονική μετάβαση (χαρακτηριστικές θέσεις Ούγγρα και Μονή Πελαγίας) υποστηρίζουν και οι Τάταρης κ.ά. (1970), διαφωνώντας με την αρχική εκτίμηση του Petrascheck περί τεκτονικής επαφής. Με βάση τα απολιθώματα που προσδιορίστηκαν στον υποκείμενο ασβεστόλιθο (Orbitoides, Siderolites, Lenticulina κ.ά.), η άφιξη του φλύσχη τοποθετείται στο Μαιστρίχτιο (Κουμαντάκης, 1968). Αξιοσημείωτο, σύμφωνα με τον Παρασκευαΐδη (1972), είναι ότι το πάχος του σχηματισμού είναι σχετικά μικρό, χωρίς αυτό να οφείλεται στη διάβρωση. Η εξάπλωσή του περιορίζεται στην περιοχή του Ακραίφνιου.

Μεταλπικοί σχηματισμοί

- **Νεογενές:**

Οι λιθοφασικοί χαρακτήρες των αποθέσεων του Νεογενούς διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θέση στη οποία βρίσκονται. Στην περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος δεν παρατηρούνται εμφανίσεις Νεογενών σχηματισμών, πάρα μόνο στην ευρύτερη περιοχή. Γενικότερα μπορεί να λεχθεί ότι υπάρχουν δυο συστήματα σχηματισμών, ένα ανώτερο και ένα κατώτερο, τα οποία διαχωρίζονται με κριτήριο τη φάση και την ηλικία τους.

Το κατώτερο σύστημα περιλαμβάνει εναλλασσόμενα στρώματα αργίλων, κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, μαργών και μαργαΐκών ασβεστόλιθων, λιμνοθαλάσσιας και θαλάσσιας φάσης, που σε ορισμένες θέσεις περιέχουν κοίτες λιγνιτών. Το πάχος τους είναι κυμαινόμενο (50-170 m) και οι λιθολογικές διαφοροποιήσεις μέσα στο σύστημα είναι μεγάλες. Στο Κωπαϊδικό πεδίο επικρατούν αργιλομαργαΐκές αποθέσεις με λεπτά στρώματα λιγνιτών, ενώ ανατολικότερα στον κάμπο των Θηβών, επικρατούν οι ψαμμιτοκροκαλοπαγείς σχηματισμοί με ασβεστολιθικούς ολισθόλιθους.

Το ανώτερο σύστημα περιλαμβάνει σχηματισμούς ηπειρωτικής φάσης, αποτελούμενο από κροκαλοπαγή, άμμους και πηλούς, οι οποίοι εναλλάσσονται με στρώσεις ψαμμιτών και άμμων.

- **Τεταρτογενές:**

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις αποτελούν τα ανώτερα στρώματα των μεταλπικών αποθέσεων, καλύπτοντας κυρίως το Κωπαϊδικό πεδίο στα δυτικά της περιοχής μελέτης. Αποτελούνται κυρίως από αργίλους με μικρές ενδιαστρώσεις τύρφης, μαργών και λιγνιτών. Σύμφωνα με στοιχεία του ΙΓΜΕ οι αποθέσεις φθάνουν μέχρι τα 220 m.

2.3.3 Τεκτονική

Γενικά, η περιοχή είναι έντονα τεκτονισμένη με εμφανή ρήγματα, όπου ο τεκτονισμός της διακρίνεται σε τρεις διαφορετικές χρονολογικές περιόδους.

- Προαλπικές ορογενετικές κινήσεις

Οι Νεοκιμμερικές ορογενετικές πιέσεις ενήργησαν στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος με αποτέλεσμα την Κάτω Κρητιδική ανάδυση – χέρσευση, η οποία είχε σαν συνέπεια τη λατεριτίωση των οφιόλιθων και το σχηματισμό των νικελιούχων κοιτασμάτων

- Αλπική ορογένεση

Κατά την Αλπική ορογένεση στην ευρύτερη περιοχή έλαβαν χώρα έντονα τεκτονικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα την απόθεση των ασβεστόλιθων Σενωνίου ηλικίας επί του οφιολίθου και έτσι σε πολλές περιοχές έχουμε στείρα επαφή

- Μεταλπική τεκτονική

Κατά το Μεταλλικό στάδιο έλαβαν χώρα ισοστατικές κινήσεις μεταξύ Μειόκαινου και Τεταρτογενούς. Αυτές είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κατακόρυφων ρηγμάτων με διεύθυνση περίπου Α-Δ και Β-Ν.

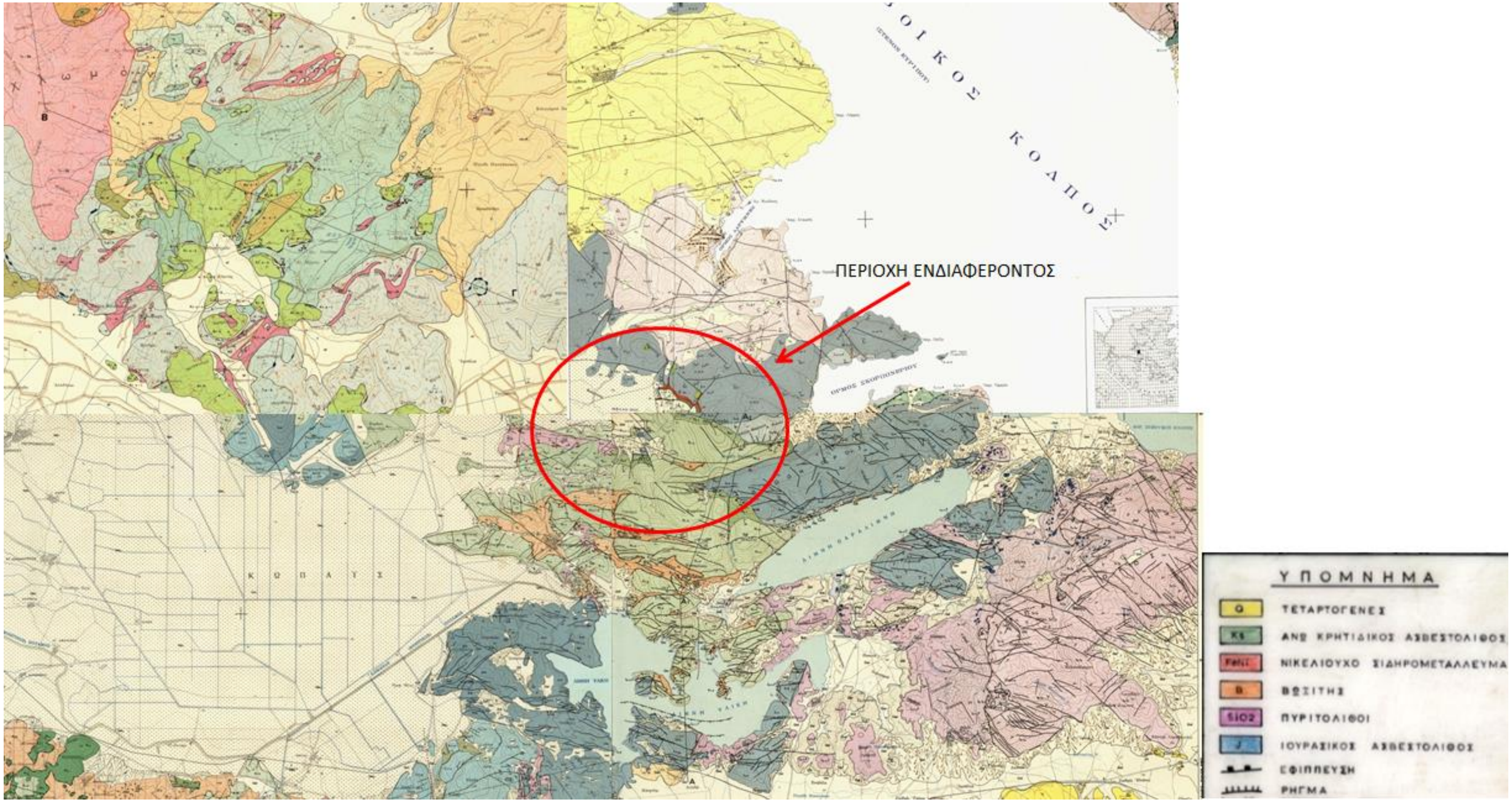
2.3.4 Κοιτασματολογία

Τα λατεριτικά κοιτάσματα αναπτύσσονται σε συμφωνία στρώσης κάτω από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους Κενομάνιου ηλικίας και υπέρκεινται ασύμφωνα των Ανωτριαδικών – Ιουρασικών δολομιτών και ασβεστόλιθων. Έχουν μορφή φακών και στρωματοειδών κοιτών διάφορων διαστάσεων, μεταξύ των οποίων υπάρχουν στείρες ζώνες η ζώνες με μικρό πάχος μεταλλεύματος. Το λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα και ο βωξίτης αποτέθηκαν στα καρστικά έγκοιλα των υποκείμενων ανθρακικών πετρωμάτων και σε αβαθές θαλάσσιο περιβάλλον, με τη μορφή κυρίως χημικού ιζήματος και δευτερευόντως κλαστικού ιζήματος.

Από την εν γένει κοιτασματολογική διερεύνηση διαπιστώνεται ότι, τόσο από ποσοτικής, όσο και ποιοτικής πλευράς, στα λατεριτικά σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα του Άγ. Ιωάννη υπάρχει μεγάλη διακύμανση, τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια. Διακρίνουμε διάφορους τύπους σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος, όπως πισσολιθικό, συμπαγές, πυριτολιθικό κ.λπ. Το πισσολιθικό μετάλλευμα το συναντάμε συνήθως στα κατώτερα στρώματα, ενώ το συμπαγές και πυριτολιθικό στα ανώτερα, χωρίς τούτο να αποτελεί γενικό κανόνα.

Μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Ni έχουμε συνήθως στα κατώτερα, πισσολιθικά στρώματα και αυτό οφείλεται στην παρουσία φυλλοπυριτικών ορυκτών του νικελίου, καθώς και στην επαφή του μεταλλεύματος με τους υποκείμενους ασβεστόλιθους. Τα πάνω στρώματα είναι συνήθως πτωχά σε Ni και πλούσια σε Fe ή SiO_2 και χαρακτηρίζονται, αντίστοιχα, ως συμπαγή σιδηρούχα ή πυριτολιθικά στρώματα.

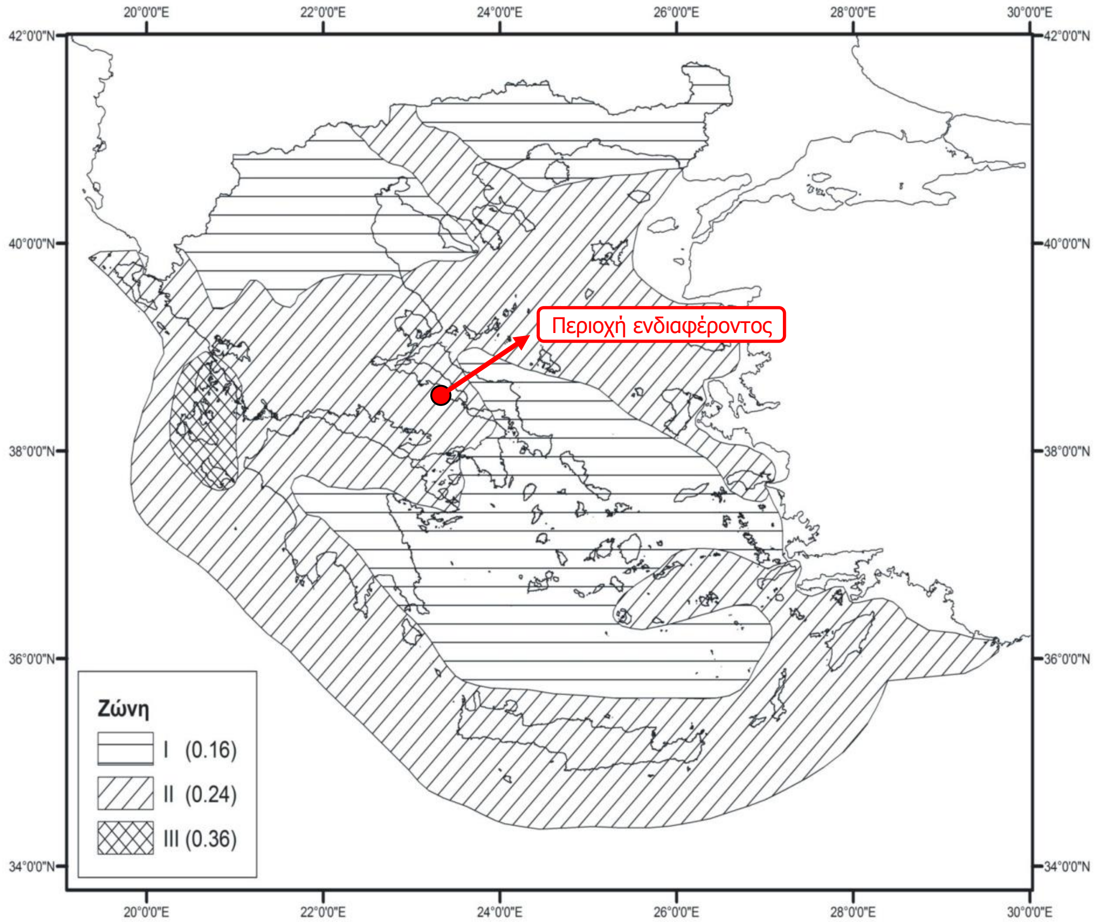
Γενικά, το σιδηρονικελιούχο κοίτασμα του Άγιου Ιωάννη αναπτύσσεται από την περιοχή Μπίνια (Βόρειος Τομέας) στα βορειοδυτικά μέχρι το ύψωμα Μαλί Ντάρδα στα νοτιοανατολικά ως ενιαία μεταλλοφορία, όπου διακόπτεται από σχεδόν παράλληλα κανονικά ρήγματα. Το κοίτασμα παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση σε περιεκτικότητα Ni, τόσο κατά την οριζόντια όσο και την κατακόρυφη έννοια. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται και στην λεκάνη της Κωπαΐδας (στο ανατολικό τμήμα αυτής), όπου δεν αποτελεί ενιαίο τμήμα με την προαναφερθείσα μεταλλοφορία. Το πάχος της μεταλλοφορίας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση όπου κυμαίνεται από 1 m έως και 30 m.



Εικόνα 3. Γεωλογικό περιβάλλον περιοχής ενδιαφέροντος

2.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ), ΦΕΚ 2184Β/20.12.1999, όπως τροποποιήθηκε με την υπουργική απόφαση αριθμ. Δ17α/115/9/φν275 (ΦΕΚ 1154Β/12.8.2003), από την άποψη της γεωγραφικής κατανομής της σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα (Εικόνα 3), η εν λόγω περιοχή βρίσκεται εν μέρει στη Ζώνη ΙΙ σεισμικής επικινδυνότητας. Η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους (Α) δίνεται από τη σχέση Α = α×g, όπου α είναι η εδαφική επιτάχυνση ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας g. Συγκεκριμένα, για τη Ζώνη ΙΙ η εδαφική επιτάχυνση ισούται με α = 0,24 και συνεπώς η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση εδάφους είναι Α = 0,24g με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα επόμενα 50 χρόνια.



Εικόνα 4. Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδος

3. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΩΝ ΣΕ ΥΠΑΙΘΡΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η σχέση θρυμματισμού του ανατιναγμένου υλικού από εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες και του συνολικού κόστους από τις διάφορες εργασίες εξόρυξης και αναλύεται το μοντέλο πρόβλεψης του θρυμματισμού κατά Kuz-Ram.

3.1 ΣΧΕΣΗ ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΝΑΤΙΝΑΓΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ

Ο θρυμματισμός της βραχομάζας από χρήση εκρηκτικών υλών αποτελεί ένα πεδίο πολλών ερευνητικών εργασιών, καθότι αυτός ερμηνεύεται ως ο πιο σημαντικός παράγοντας για την παραγωγή ανατιναγμένου υλικού στις μεταλλευτικές δραστηριότητες όπου επηρεάζει άμεσα το κόστος της έκρηξης, της διάτρησης, καθώς και την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών φόρτωσης, μεταφοράς και θραύσης.

Ο βαθμός κερματισμού του ανατιναγμένου υλικού θεωρείται ως ο σημαντικότερος παράγοντας στις επιφανειακές εκσκαφές, λόγω των άμεσων επιπτώσεων στην παραγωγικότητα και στο κόστος της διάτρησης, ανατίναξης, φόρτωσης, μεταφοράς, στην θραύση του υλικού, να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της ευστάθειας του σωρού απόθεσης και να προσδιοριστεί ο κύκλος φόρτωσης.

Γενικότερα, τα κόστη της φόρτωσης, μεταφοράς και θραύσης μειώνονται με την αύξηση του μεγέθους των τεμαχών του εξορυγμένου υλικού, ενώ τα κόστη της διάτρησης και της ανατίναξης αυξάνονται.

Για την σημασία μιας επιτυχούς ανατίναξης, ο Mackenzie (1966, 1967) εκτίμησε την σχέση κόστους και βαθμού κερματισμού της βραχομάζας με χρήση εκρηκτικών υλών για την ανοικτή εκσκαφή του σιδηρούχου κοιτάσματος Quebec-Cartier κυρίως για την παραγωγική διαδικασία της:

Διάτρησης

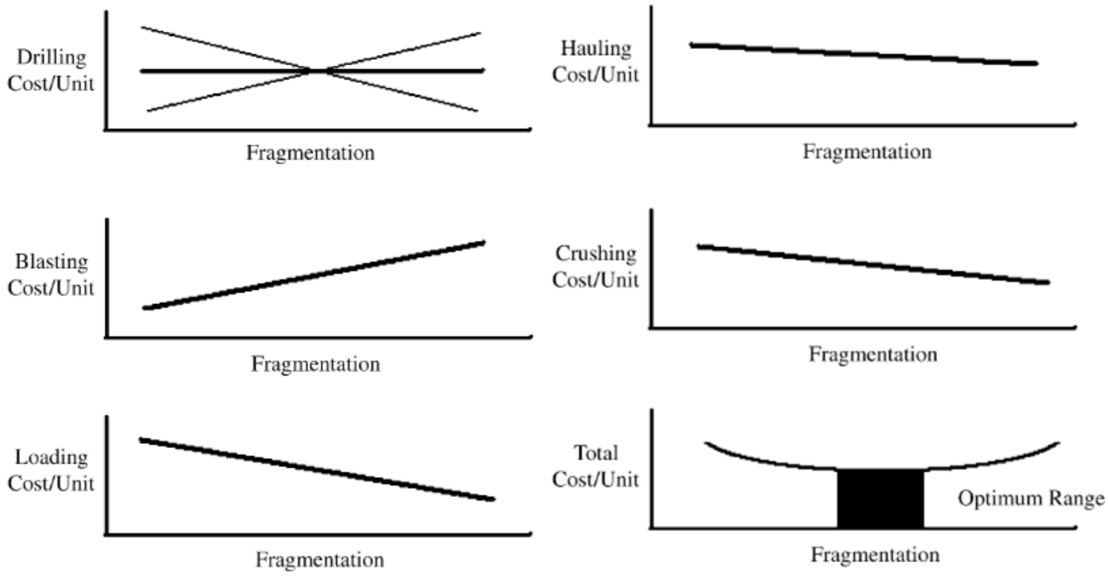
Ανατίναξης

Φόρτωσης

Μεταφοράς

Θραύσης

Ο κύρος στόχος του Mackenzie ήταν να προσδιορίσει καμπύλες κόστους που βασίζονται σε ένα μέσο μέγεθος θρυμματισμού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, η ομαδοποίηση του κόστους κατέδειξε μια ανεστραμμένη καμπύλη κόστους – μέγεθος κερματισμού, όπου για ένα συγκεκριμένο βαθμό κερματισμού αντιστοιχεί ένα συνδυασμένο ελάχιστο κόστος.



Εικόνα 5. Επίδραση βαθμού κερματισμού σε επί μέρους και συνολικό κόστος

Όπως φαίνεται και στο τελευταίο διάγραμμα της Εικόνας 5, από την συνάθροιση όλων των προηγούμενων διαγραμμάτων προκύπτει το συνολικό κόστος έναντι του βαθμού κερματισμού, όπου καταδεικνύεται ένα ευρύ φάσμα θρυμματισμού στο οποίο το κόστος είναι ελάχιστο.

Με βάση τα παραπάνω, κρίνεται αναγκαία η πρόβλεψη του βαθμού κερματισμού του ανατιναγμένου υλικού, όπου κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλά μοντέλα για την πρόβλεψη αυτού του βαθμού.,

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ KUZ-RAM

Το μοντέλο Kuz-Ram είναι το πλέον διαδεδομένο μοντέλο πρόβλεψης θρυμματισμού μέχρι σήμερα. Χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς ανατινάξεων κυρίως γιατί είναι εύκολο στην χρήση και μερικώς γιατί δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με κατάλληλες τροποποιήσεις (Sigh et al., 2006). Το μοντέλο αυτό, βασίζεται στον υπολογισμό του μέσου μεγέθους x_{50} που επιτυγχάνεται κατά τον θρυμματισμό του υλικού και επινοήθηκε από τον Kuznetsov το 1973 και στην καμπύλη Rosin – Rammler ή στην καμπύλη Weibull (Cunnigham, 1983, 1987). Το μοντέλο αποτελείται από 4 εξισώσεις, όπου περιγράφονται παρακάτω:

- <u>1η εξίσωση</u>: Η καμπύλη θρυμματισμού (κοκκομετρική κατανομή) *P(x)* δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Kuznetzov 1973):

$$\boldsymbol{P(x) = 1 - e^{-ln2\cdot\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^{n}}} \qquad [1]$$

όπου:

P(x): το ποσοστό (%) διερχόμενων από κόσκινο βροχίδας μεγέθους *x*,

x: το μέγεθος του τεμαχίου,

x_{50}: το μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50} που παράγονται από την ανατίναξη

n: ο συντελεστής ομοιομορφίας n.

- <u>2η εξίσωση:</u> Το μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50} (σε cm) ορίζεται ως:

$$\boldsymbol{x_{50}=A_r \cdot q^{-0,8} \cdot Q_t^{1/6} \cdot \left(\frac{E}{115}\right)^{-19/30}} \qquad [2]$$

όπου: $\boldsymbol{q=\frac{\pi\cdot(\frac{d}{2})^2}{B\cdot}}$

x_{50}: το μέσο μέγεθος τεμαχίων, δηλαδή το μέγεθος εκείνο που το 50% του υλικού είναι μικρότερό του (cm)

A_r: ο συντελεστής εξορυξιμότητας (με χρήση εκρηκτικών υλών) του πετρώματος

q: η ειδική κατανάλωση εκρηκτικής ύλης (kg/m^3)

Q_t: το βάρος της εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα (kg)

E: η σχετική κατά βάρος ισχύς της εκρηκτικής ύλης ως προς το ANFO (για το οποίο λαμβάνεται ίση με 100)

- <u>3η εξίσωση:</u> Ο συντελεστής εξορυξιμότητας με εκρηκτικές ύλες A_r δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Lilly 1986):

$$\boldsymbol{A_r = 0,06 \cdot (RMD + RDI + HF)} \qquad [3]$$

όπου:

RMD: συντελεστής περιγραφής της βραχόμαζας (rock mass description),

RDI: συντελεστής επίδρασης ειδικού βάρους (πυκνότητας ρ) βραχόμαζας (rock density influence) και

HF: συντελεστής σκληρότητας (hardness factor).

Οι 3 επιμέρους προαναφερθέντες συντελεστές υπολογίζονται ως εξής:

Ο συντελεστής *RMD* λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

10, αν το πέτρωμα είναι εύθρυπτο

JF (Joint Factor) δείκτης κερματισμού, αν στο πέτρωμα παρατηρούνται κατακόρυφες ασυνέχειες (διακλάσεις)

50, αν το πέτρωμα είναι συμπαγές.

Η παράμετρος του δείκτη κερματισμού JF (Joint Factor) ισούται με:

JF = JPS + JPA, όπου:

JPS (Joint Plane Spacing) είναι ο δείκτης που περιγράφει την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

JPA (Joint Plane Angle) είναι ο δείκτης που περιγράφει την κλίση των ασυνεχειών.

Ο δείκτης JPS (Joint Plane Spacing) λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

10, αν η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από 0.1m.

20, αν η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών κυμαίνεται μεταξύ 0,1m ως 0.3m

50, αν η μέση απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από το γινόμενο $(B*S)^{0.5}$.

Ο δείκτης JPA (Joint Plane Angle) λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

20, αν οι εξέρχονται του μετώπου

30, αν οι ασυνέχειες είναι κάθετες στο μέτωπο

40, αν οι ασυνέχειες βυθίζονται προς το μέτωπο.

Ο συντελεστής RDI, όπου σχετίζεται με το ειδικό βάρος της βραχόμαζας, δίνεται από την σχέση:

RDI = 0.025*ρ – 50, όπου ρ το ειδικό βάρος του πετρώματος σε kg/m^3.

Ο συντελεστής σκληρότητας *HF* (hardness factor) καθορίζεται από την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σ_c (MPa) και της τιμής του μέτρου ελαστικότητας Young (GPa) του πετρώματος. Συγκεκριμένα, λαμβάνει τις τιμές:

E/3, όταν η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E είναι μικρότερη από 50 GPa

$\sigma_c/5$, όταν η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E είναι μεγαλύτερη από 50 GPa

- <u>4η εξίσωση:</u> Ο συντελεστής ομοιομορφίας *n* (ο οποίος δεν εξαρτάται καθόλου από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, παρά μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διατρήματος) ορίζεται ως ακολούθως:

$$\boldsymbol{n} = \left(\mathbf{2,2} - \mathbf{14} \cdot \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{d}}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{\mathbf{1}+\frac{\boldsymbol{S}}{\boldsymbol{B}}}{\mathbf{2}}}\right) \cdot \left(\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{\omega}}{\boldsymbol{B}}\right) \cdot \left(\frac{|\boldsymbol{h_b} - \boldsymbol{h_c}|}{\boldsymbol{h_t}} + \mathbf{0,1}\right)^{\mathbf{0,1}} \cdot \left(\frac{\boldsymbol{h_t}}{\boldsymbol{H_b}}\right) \qquad [4]$$

όπου:

B: το φορτίο ανατίναξης (m)

d: η διάμετρος του διατρήματος (mm)

S: η απόσταση των διατρημάτων (m)

ω: η τυπική απόκλιση της ακρίβειας διάτρησης (m)

h_b: η γόμωση πυθμένα

h_c: η γόμωση στήλης

h_t: η συνολική γόμωση

H_b: το ύψος βαθμίδας

Το μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50} που περιγράφεται στην εξίσωση 1, επηρεάζεται κυρίως από τις παραμέτρους που σχετίζονται με την ανατίναξη. Για να επιτευχθεί βελτιωμένη κοκκομετρία του θρυμματισμένου υλικού, δηλαδή μέγεθος μικρότερο του x_{50}, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εκρηκτικό με μεγαλύτερη ενέργεια έκρηξης με μεγαλύτερη πυκνότητα, το οποίο θα επηρεάσει την ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης. Αν η ειδική κατανάλωση αυξηθεί μέσω της συρρίκνωσης του κανάβου της ανατίναξης, διατηρώντας τον λόγο της απόστασης S προς το φορτίο B και την διάμετρο D των υπονόμων σταθερούς, τότε ο θρυμματισμός θα βελτιωθεί, δηλαδή το υλικό θα προκύψει πιο λεπτομερές, και ο συντελεστής ομοιομορφίας θα αυξηθεί.

Ο συντελεστής ομοιομορφίας n, όπως προκύπτει από τις παραμέτρους που απαρτίζεται στην εξίσωση, φαίνεται να επηρεάζεται κυρίως από τις παραμέτρους γεωμετρίας της ανατίναξης και από το μήκος της στήλης γόμωσης. Η αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας θα έχει ως αποτέλεσμα μια ομοιόμορφη κοκκομετρία ανατιναγμένου υλικού με λιγότερα λεπτομερή και λιγότερα μεγάλου μεγέθους τεμάχια. Η μείωση του λόγου φορτίου B προς την διάμετρο D (B/D) θα έχει θετική επίδραση στην ομοιομορφία του εξορυγμένου υλικού. Επίσης, η αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας n θα επιτευχθεί μέσω της αύξησης του λόγου της απόστασης των διατρημάτων S προς το φορτίο B, της τυπική απόκλιση της ακρίβειας διάτρησης καθώς και του λόγου της συνολικής γόμωσης προς το ύψος της βαθμίδας. Επίσης, κατά τον Cunningham, μια αύξηση της τάξης του 10% στον συντελεστή ομοιομορφίας n θα επιτευχθεί μέσω της επιλογής της εναλλασσόμενης διάταξης ανατίναξης έναντι της αντίστοιχης τετραγωνικής .

4. ΦΩΤΟΑΝΑΛΥΣΗ - ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ

Η αξιολόγηση της κοκκομετρίας μιας ανατίναξης αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα το οποίο συνήθως χαρακτηρίζεται ως καλή ανατίναξη, κακή, με μεγάλο ποσοστό λεπτομερούς υλικού ή αντίθετα μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκου υλικού, δίνοντας την εντύπωση μιας ασαφούς εικόνας. Ο πιο αξιόπιστος τρόπος αξιολόγησης της κοκκομετρίας μιας ανατίναξης θα ήταν μέσω κοσκινίσματος ολόκληρου του σωρού του ανατιναγμένου υλικού ή τουλάχιστον ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος αυτού. Αυτή η διαδικασία είναι πρακτικά αδύνατη να εκτελεστεί δεδομένου των όγκων που διαχειρίζονται στις σύγχρονες εγκαταστάσεις μεταλλείων. Οι ανατινάξεις στις βαθμίδες των σύγχρονων μεταλλείων αποτιμώνται σε χιλιάδες κυβικά, καθιστώντας την διαδικασία κοσκίνισης εξαιρετικά ασύμφορη. Η ανάλυση φωτογραφιών αποτελεί μία μέθοδο όπου μπορεί να μετρηθεί η κοκκομετρία μιας ανατίναξης με την χρήση ψηφιακών φωτογραφιών. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα (Maerz and Zhou, 1998) όπως:

- Οι μετρήσεις δύναται να είναι πλήρως αυτοματοποιημένες, όπου εξαλείφονται έξοδα σχετιζόμενα με διαδικασίες
- Μπορεί να ληφθεί ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων, όπου αυξάνει την συνολική στατιστική αξιοπιστία μέσω την μείωση των λαθών δειγματοληψίας
- Δεν αποτελεί εμπόδιο στην παραγωγική διαδικασία
- Δύναται να αξιολογήσει την κατανομή των τεμαχίων του ανατιναγμένου υλικού ειδικά στην περίπτωση όπου το υλικό αποτελείται από ιδιαίτερα χονδρόκοκκα τεμάχη.

Η μέθοδος της ανάλυσης φωτογραφιών – φωτογραμμετρίας παρουσιάζει επίσης και μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται με λάθη των παρακάτω κατηγοριών.

- Λάθη που σχετίζονται με την μέθοδο ανάλυσης των φωτογραφιών
- Λάθη που σχετίζονται με την παρουσίαση των δειγμάτων
- Λάθη που σχετίζονται με την λήψη των φωτογραφιών
- Λάθη που σχετίζονται την διαδικασία δειγματοληψίας.

Επιπλέον μειονεκτήματα στην μέθοδος της ανάλυσης φωτογραφιών εντοπίζονται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Τα πολύ λεπτόκοκκα τεμάχη μπορεί να υπερεκτιμηθούν, ειδικότερα μετά την ανατίναξη στον ανατιναγμένο σωρό.
- Τα τεμάχη μπορεί να υπερ - τεμαχιστούν ή να συνδυαστούν, δηλαδή μεγαλύτερα τεμάχη να διαιρεθούν σε μικρότερα και μικρότερα τεμάχη να ομαδοποιηθούν σε μεγαλύτερα. Το συγκεκριμένο θέμα αποτελεί κοινό πρόβλημα σε όλα τα προγράμματα επεξεργασίας εικόνας. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται επεξεργασία της εικόνας.
- Το υλικό μπορεί να είναι στεγνό ή υγρό. Στην περίπτωση του υγρού υλικού, τα λεπτόκοκκα τεμάχη προσκολλώνται στην επιφάνεια μεγαλύτερων τεμαχίων και λειτουργούν ως καμουφλάζ και δυσχεραίνουν στην αναγνώριση των πετρωμάτων. Η υγρή επιφάνεια επίσης αυξάνει την πιθανότητα της αντανάκλασης όπου δυσχεραίνει την επεξεργασία της εικόνας μέσω λαμπερών σημείων στις επιφάνειες.

Γενικότερα, είναι αποδεκτό ότι τα προαναφερθέντα λάθη μπορούν να ελαχιστοποιηθούν μέσω καθιερωμένων μεθόδων δειγματοληψίας και κατάλληλου περιβάλλοντος αυτού, καθώς και μέσω της βαθμονόμησης του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένα στο πεδίο (Maerz and Zhou,1998, 2000, Katsabanis, 1999).

Οι φωτογραφίες που λαμβάνονται, χρησιμοποιούνται στο λογισμικό της ανάλυσης. Το λογισμικό αυτό μέσω ενός ειδικού αλγόριθμου, διαγραμμίζει τα όρια του κάθε τεμάχους του ανατιναγμένου υλικού και κατόπιν μετράει το μέγεθος αυτών, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό μιας καμπύλης κοκκομετρίας. Οι φωτογραφίες μπορούν να ληφθούν μέσω μιας σταθερής κάμερας τοποθετημένη για παράδειγμα πάνω από μια ταινία μεταφοράς υλικού ή μπορούν να ληφθούν από έναν χρήστη της κάμερας στον ανατιναγμένο σωρό.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατάταξη των ασβεστολιθικών στείρων των Μεταλλείων της περιοχής Αγίου Ιωάννη είναι το Wipfrag της Καναδικής εταιρίας WipWare Inc.

5. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Στα υπό εξέταση εργοτάξια (Μπίνια, Μαγούλα, Νησί και Τσούκα) των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη της ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ, τα εξορυκτικά στείρα αποτελούν προϊόντα ανατινάξεων κυρίως επί ανωκρητιδικών ασβεστολίθων. Μακροσκοπικά τα εν λόγω υλικά μπορούν να περιγράφουνε ως κροκάλες ή λίθοι με χάλικες. Ένα τυπικό μέτωπο εργασίας από αυτά τα εργοτάξια μετά από ανατίναξη δίνεται στην Εικόνα 6.

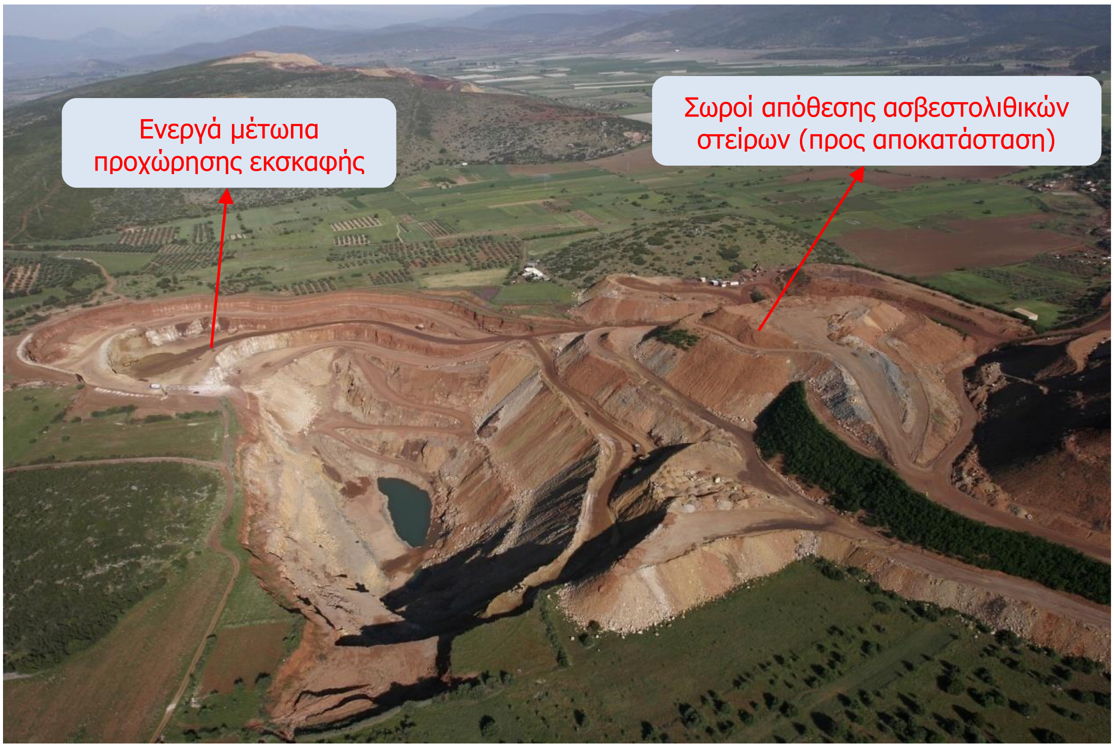
Εικόνα 6. Τυπικά ασβεστολιθικά προϊόντα ανατίναξης (Μαγούλα)

Η απόθεση των εξορυκτικών στείρων γίνεται σε σωρούς που σήμερα φθάνουν σε ύψος έως 100m. Η απόθεσή τους γίνεται με ανατροπή φορτηγών από τη στέψη κάθε σωρού. Κατά συνέπεια, η κλίση των πρανών των σωρών διαμορφώνεται από την ελεύθερη θέση που λαμβάνουν τα υλικά και μπορεί να φθάσει, ανάλογα και με τη μορφολογία του φυσικού εδάφους, έως και 35° - 40° (βλ. Εικόνες 7 και 8).

Κατά την απόθεση των στείρων λαμβάνει χώρα συμπύκνωση των αποθέσεων από τη διέλευση βαρέων φορτηγών, ενώ οι ογκώδεις λίθοι κατρακυλάνε στον πόδα του πρανούς. Αν η κλίση του φυσικού εδάφους είναι ομόρροπη της κλίσης του σωρού απόθεσης, οι ογκώδεις λίθοι δύναται να κατρακυλήσουν σε μεγάλη απόσταση.

Λόγω της συγκέντρωσης ογκωδών λίθων στον πόδα, τα κατώτερα στρώματα των σωρών απόθεσης έχουν πολύ αδρόκοκκη σύσταση με αποτέλεσμα την ελεύθερη κίνηση υδάτων που ενδεχομένως εισέρχονται στο σώμα των σωρών.

Από άποψη ευστάθειας οι ασβεστολιθικοί σωροί απόθεσης στα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη κρίνεται γενικά καλή, αφού ιστορικά δεν έχουν σημειωθεί σοβαρές αστοχίες έως σήμερα.



Εικόνα 7. Αεροφωτογραφία εργοταξίου Μαγούλας

Εικόνα 8. Αεροφωτογραφία εργοταξίου Νησιού

6. ΕΚΤΕΛΕΣΘΕΙΣΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

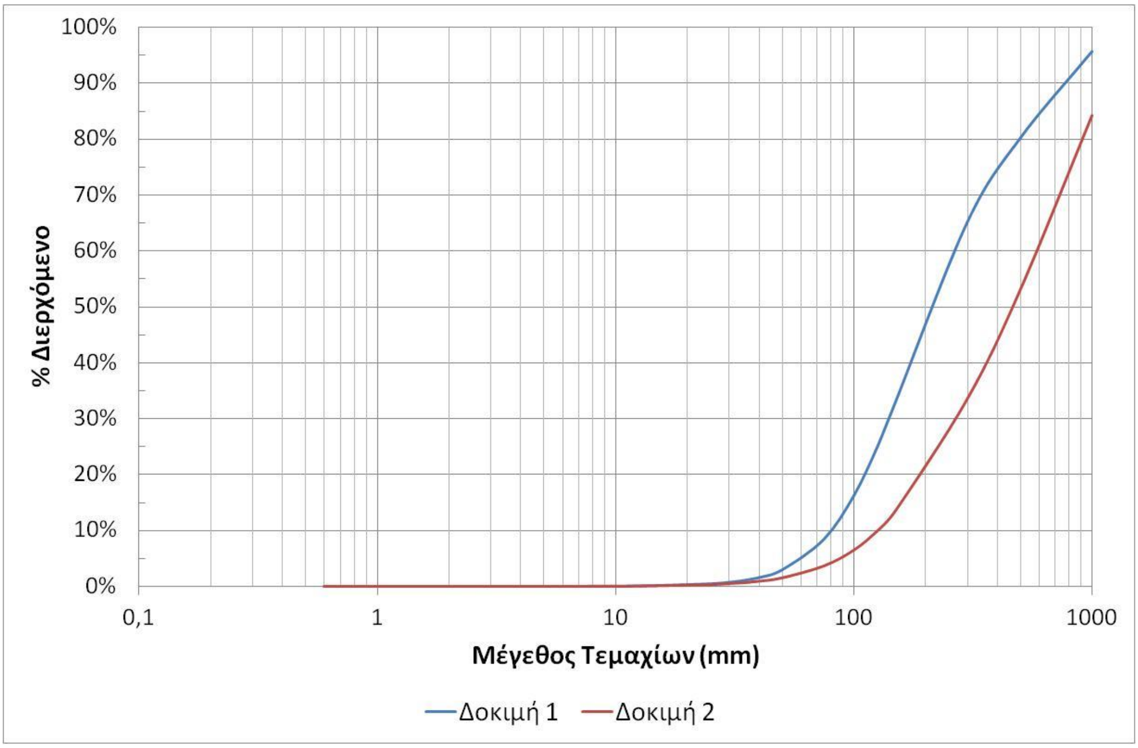
6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα ασβεστολιθικά στείρα των εξορυκτικών δραστηριοτήτων σε όλα τα εργοτάξια των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη αποτελούν προϊόντα ανατίναξης με εκρηκτικές ύλες. Δεδομένου του κοινού μητρικού πετρώματος (ανωκρητιδικός ασβεστόλιθος) και του κοινού σχεδιασμού ανατινάξεων (τυπικός κάνναβος διατρημάτων από 4,5m×4,5m έως 5m×5m και σταθερή πυκνότητα γόμωσης διατρημάτων), ο θρυμματισμός που επιτυγχάνεται στους ασβεστόλιθους είναι παρεμφερής σε όλα τα εργοτάξια ανεξαιρέτως. Συγκεκριμένα, τα προϊόντα ανατίναξης αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ένα μίγμα λίθων/ογκολίθων (boulders), κροκαλών (cobbles) και χαλίκων, καθώς και ένα μικρό κατά βάρος ποσοστό λεπτότερων υλικών. Κατά συνέπεια, πρόκειται για ιδιαιτέρως χονδρόκοκκα υλικά, των οποίων η γεωτεχνική συμπεριφορά (φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των τεμαχίων τους, δηλαδή την κοκκομετρία τους (Holtz & Kovacs 1981). Με βάση τα παραπάνω, είναι φανερό ότι επί της ουσίας η γεωτεχνική συμπεριφορά των ασβεστολιθικών στείρων είναι κοινή για όλα τα εργοτάξια των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη. Κατά συνέπεια, δεν απαιτούνται ξεχωριστές επί τόπου ή εργαστηριακές δοκιμές ανά εργοτάξιο, αλλά η αξιολόγηση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς γίνεται από κοινού και τεκμηριώνεται και από δοκιμές που έχουν γίνει στο παρελθόν σε αντίστοιχα υλικά. Επίσης, όπου απαιτείται γίνεται χρήση διαδεδομένων εμπειρικών σχέσεων, αλλά και δεδομένων της διεθνούς βιβλιογραφίας.

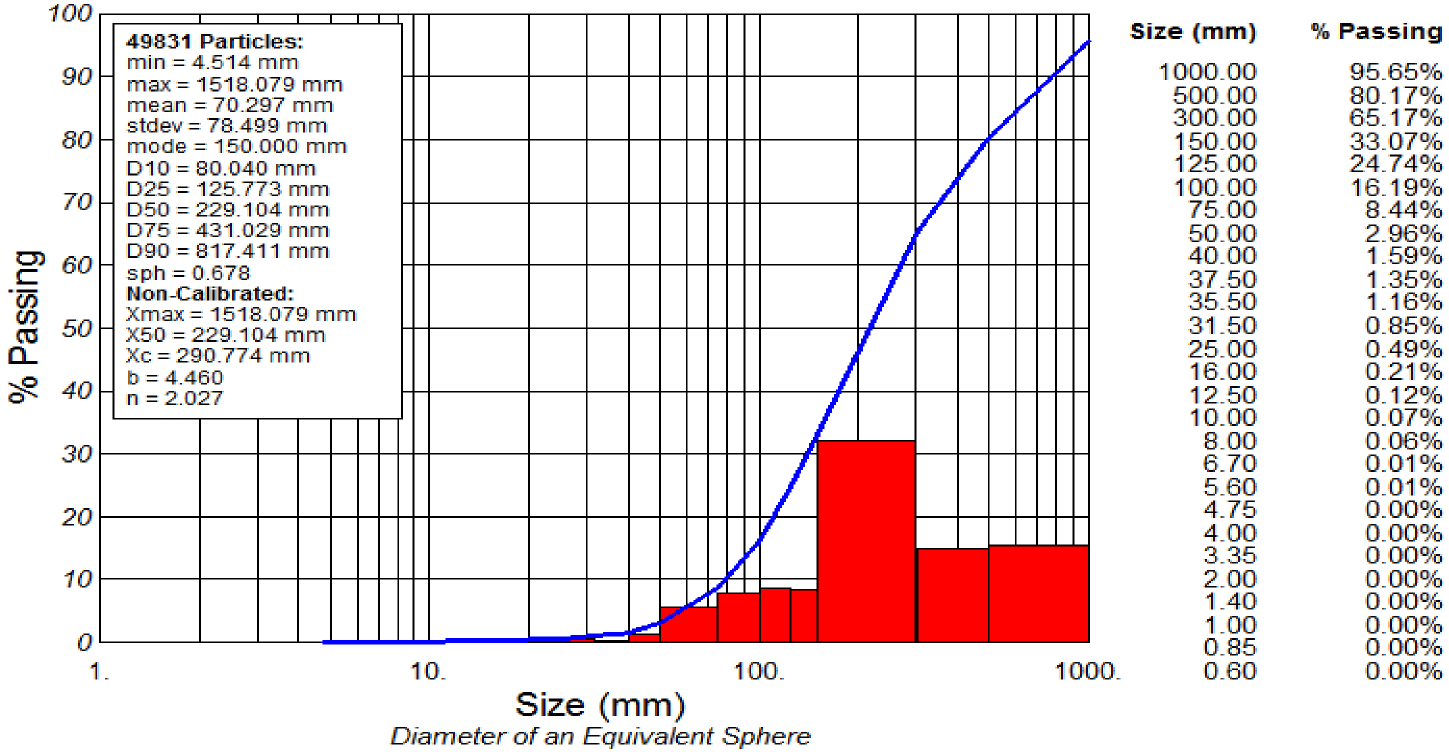
6.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ

Λόγω του μεγέθους των προϊόντων μιας ανατίναξης, η ταξινόμησή τους σε κλάσματα με τις κλασσικές μεθόδους (π.χ. κόσκινα) και εν συνεχεία η παρουσίαση της κοκκομετρικής κατανομής τους, εμφανίζει αντικειμενικές δυσχέρειες και προϋποθέτει την πραγματοποίηση μιας πρακτικώς αδύνατης διαδικασίας (Τσουτρέλης 2001). Για αυτό το λόγο, διεθνώς έχουν αναπτυχθεί έμμεσες μέθοδοι, όπως π.χ. η μέθοδος της φωτο-ανάλυσης, για την εκτίμηση του αποτελέσματος μιας ανατίναξης από πλευράς θρυμματισμού.

Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα Wipfragτης καναδικής εταιρίας WipWare Inc. για την εκπόνηση αναλύσεων προϊόντων θρυμματισμού σε εργοτάξια των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμαστικές ανατινάξεις (εργοτάξιο Μαγούλας) για τις οποίες εκπονήθηκαν αναλύσεις κοκκομετρίας – θρυμματισμού. Οι κοκκομετρικές καμπύλες παρουσιάζονται συνδυαστικά στην Εικόνα 9, η κοκκομετρική καμπύλη της δοκιμής 1 δίνεται στην Εικόνα 10, ενώ η φωτογραφική αποτύπωση βάσει της οποίας πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις αυτής της δοκιμής δίνεται στην Εικόνα 11. Η κοκκομετρική καμπύλη της δοκιμής 2 δίνεται στην Εικόνα 12 ενώ η φωτογραφική αποτύπωση βάσει της οποίας πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις της δοκιμής 2 δίνεται στην Εικόνα 13.

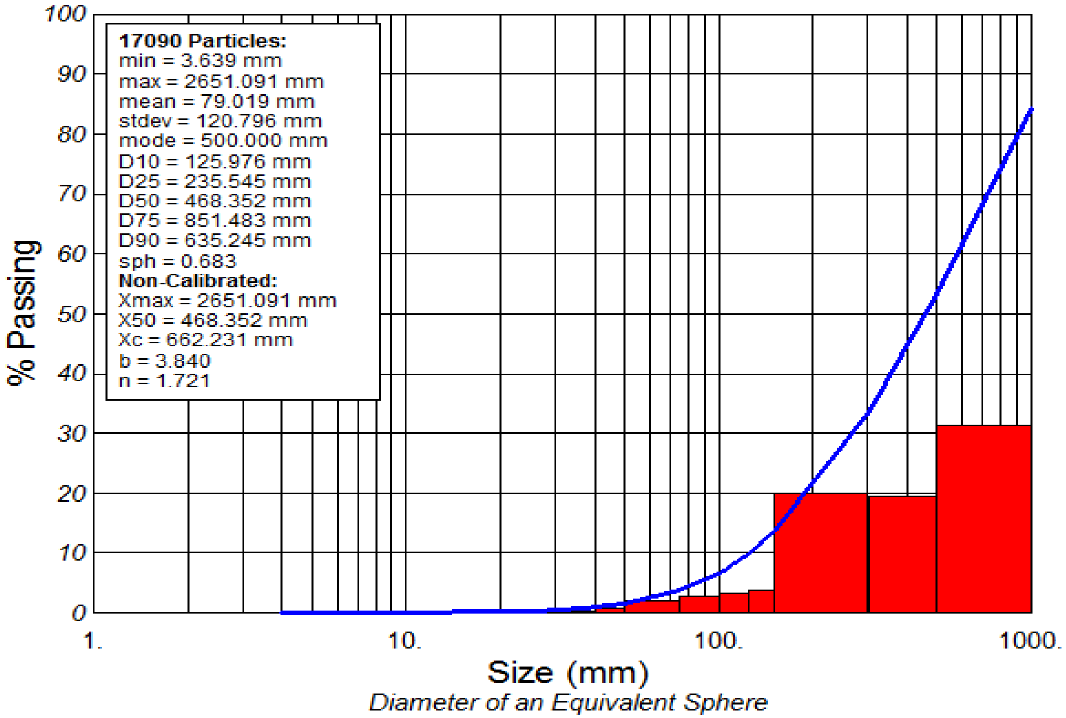


Εικόνα 9. Κοκκομετρικές καμπύλες εξορυκτικών αποθέσεων Μαγούλας



Εικόνα 10. Κοκκομετρική καμπύλη εξορυκτικών στείρων δοκιμής 1

Εικόνα 11. Φωτογραφίες εξορυκτικών στείρων δοκιμής 1



Size (mm)	% Passing
1000.00	84.26%
500.00	53.08%
300.00	33.59%
150.00	13.60%
125.00	9.85%
100.00	6.49%
75.00	3.68%
50.00	1.54%
40.00	0.94%
37.50	0.83%
35.50	0.71%
31.50	0.57%
25.00	0.33%
16.00	0.15%
12.50	0.06%
10.00	0.02%
8.00	0.01%
6.70	0.01%
5.60	0.00%
4.75	0.00%
4.00	0.00%
3.35	0.00%
2.00	0.00%
1.40	0.00%
1.00	0.00%
0.85	0.00%
0.60	0.00%

Εικόνα 12. Κοκκομετρική καμπύλη εξορυκτικών στείρων δοκιμής 2

Εικόνα 13. Φωτογραφίες εξορυκτικών στείρων δοκιμής 2

6.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Για τη διερεύνηση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν μελέτη, η οποία περιλάμβανε επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές σε κατάλληλα επιλεγμένα δείγματα. Δεδομένης της κοινής γεωτεχνικής συμπεριφοράς των ασβεστολιθικών αποθέσεων σε όλα τα εργοτάξια του Αγίου Ιωάννη (όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1), τα αποτελέσματα των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών της παραπάνω μελέτης συν-αξιολογούνται και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Οι δειγματοληψίες είχαν εκτελεσθεί σύμφωνα με το πρότυπο EN 932-1 και τα ληφθέντα δείγματα είχαν σταλεί για εργαστηριακές δοκιμές. Οι εργαστηριακές δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τις ακόλουθες προδιαγραφές :

- «Τεχνικές Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής» (Ε 105 - 86), Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. / Γ.Γ.Δ.Ε. / Διεύθυνση Ερευνών Εδαφών (ΕΚ1) Φ.Ε.Κ. 955/31.12.86, Τεύχος Β.
- «Τεχνικές Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Βραχομηχανικής» (Ε 103 - 84), Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. / Γ.Γ.Δ.Ε. / Διεύθυνση Ερευνών Εδαφών (ΕΚ1) Φ.Ε.Κ. 70/08.02.85, Τεύχος Β.

Οι παραπάνω προδιαγραφές συμφωνούν γενικά με τις αντίστοιχες αμερικάνικες προδιαγραφές του American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) και του American Society for Testing and Materials (ASTM), τις βρετανικές British Standard 1377/75, αλλά και γενικά τη διεθνή βιβλιογραφία.

Πραγματοποιήθηκαν επιφανειακές δειγματοληψίες δέκα (10) ογκωδών διαταραγμένων δειγμάτων βάρους 50kg έκαστο (ΒΔ1, ΒΔ2, ΒΔ3, ΒΔ4, ΒΔ5, ΒΔ6, ΒΔ7, ΒΔ8, ΒΔ9, ΒΔ10). Επίσης, εκτελέστηκαν δέκα (10) επιτόπου δοκιμές προσδιορισμού της συμπύκνωσης και της περιεχόμενης υγρασίας στη στέψη των σωρών με την μέθοδο των ραδιοϊσοτόπων (συσκευή Troxler), σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 6938. Σε όλα τα ληφθέντα δείγματα εκτελέστηκαν δοκιμές κατάταξης, οι οποίες περιελάμβαναν τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης με κόσκινα, των ορίων Atterberg (όριο υδαρότητας LL και όριο πλαστικότητας PL) και της φυσικής υγρασίας. Εν συνεχεία, δημιουργήθηκαν δύο μίγματα, ένα με τα δείγματα ΒΔ1 έως ΒΔ5 και ένα με τα δείγματα ΒΔ6 έως ΒΔ10 και εκτελέστηκαν οι ακόλουθες δοκιμές: κοκκομετρική διαβάθμιση με κόσκινα, όρια Atterberg και δοκιμές συμπύκνωσης κατά τροποποιημένη Proctor. Οι τελευταίες εκτελέστηκαν για τον προσδιορισμό του βαθμού συμπύκνωσης που επιτυγχάνεται στους σωρούς απόθεσης. Με βάση τις παραπάνω δοκιμές, τα δείγματα κατατάχθηκαν σύμφωνα με το αμερικάνικο σύστημα κατάταξης USCS. Τονίζεται ότι όλες οι παραπάνω εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα από τα οποία είχαν απομακρυνθεί όλα τα τεμάχη μεγέθους κροκαλών και λίθων. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών δίνονται στους Πίνακες 2 έως 4.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών κατάταξης δειγμάτων

Δείγμα	Φυσική Υγρασία (%)	Όρια Atterberg (%)			Κοκκομετρική Ανάλυση - Ποσοστό Διερχομένων (%)														Κατάταξη
	w	LL	PL	PI	3''	2''	1 1/2''	1''	3/4''	1/2''	3/8''	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	Χάλικες	Άμμος	Λεπτόκοκκα	USCS
ΒΔ1	5	24,1	13	10,9	100	83	76	69	62	54	51	44	36	24	16	56	28	16	GC
ΒΔ2	4,8	25,2	13	12	100	97	88	71	63	53	48	40	33	20	13	60	27	13	GC
ΒΔ3	6,5	22,5	13	10	100	98	94	83	75	67	61	49	38	25	17	51	32	17	GC
ΒΔ4	8,9	23,2	14	9,6	90	84	81	71	67	60	56	48	39	27	19	52	29	19	GC
ΒΔ5	4,3	19,2	13	5,9	93	86	78	64	54	46	42	35	27	16	10	65	25	10	GC-GM
ΒΔ6	9,7	28,2	18	10,7	91	83	80	65	60	54	50	41	33	22	16	59	25	16	GC
ΒΔ7	6,3	24,7	15	10	100	84	74	65	57	46	42	30	23	15	12	70	18	12	GC
ΒΔ8	5,3	18,1	13	4,8	93	90	90	78	70	59	53	43	34	22	14	57	29	14	GC-GM
ΒΔ9	8,6	23,7	15	8,4	93	86	78	71	66	56	51	43	33	22	15	57	28	15	GC
ΒΔ10	4,4	19,3	13	6,7	100	100	86	76	70	60	54	42	31	20	14	58	28	14	GC-GM

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών κατάταξης και δοκιμών τροπ. Proctor μιγμάτων

Δείγμα	Όρια Atterberg (%)			Κοκκομετρική Ανάλυση - Ποσοστό Διερχομένων (%)												Δοκιμή τροπ. Proctor		Κατάταξη
	LL	PL	PI	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	Χάλικες	Άμμος	Λεπτό-κοκκα	γ_{dmax}	w_{opt}	USCS
Μίγμα 1	17	12,5	4,5	100	99	93	81	75	63	50	32	21	37	42	21	23,81	6,5	GC
Μίγμα 2	19	13	6	-	100	92	80	73	59	45	29	20	41	39	20	23,78	6,6	GC

Μίγμα 1: ΒΔ1, ΒΔ2, ΒΔ3, ΒΔ4, ΒΔ5

Μίγμα 2: ΒΔ6, ΒΔ7, ΒΔ8, ΒΔ9, ΒΔ10

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών μέτρησης ποσοστού συμπύκνωσης και υγρασίας

Σήμανση	Μέγιστη εργ. ξηρή πυκνότητα	Περιεχόμενη υγρασία	Υγρή πυκνότητα	Ξηρή πυκνότητα	Ποσοστό συμπύκνωσης
	$\rho_{d\ max}$ (kN/m^3)	w (%)	ρ_{wet} (kN/m^3)	ρ_{dry} (kN/m^3)	(%)
ΒΔ1	23,81	3,7	25,50	24,59	103,3
ΒΔ2	23,81	4	25,45	24,46	102,7
ΒΔ3	23,81	4,1	24,50	23,53	98,8
ΒΔ4	23,81	3,5	22,92	22,15	93
ΒΔ5	23,81	3,8	22,47	21,65	93,2
ΒΔ6	23,78	5,2	24,39	23,19	97,5
ΒΔ7	23,78	5,2	23,77	22,60	95
ΒΔ8	23,78	5,9	22,24	20,99	88,3
ΒΔ9	23,78	4,2	24,51	23,53	98,9
ΒΔ10	23,78	3,5	22,90	22,12	93

7. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ασβεστολιθικά στείρα των εξορυκτικών δραστηριοτήτων σε όλα τα εργοτάξια των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη εμφανίζουν ουσιαστικά την ίδια γεωτεχνική συμπεριφορά (εξαιτίας του κοινού μητρικού πετρώματος και του κοινού σχεδιασμού ανατινάξεων). Επομένως, η αξιολόγησή τους στην παρούσα ενότητα γίνεται από κοινού.

7.2 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

7.2.1 Κοκκομετρία

Στον Πίνακα 4 δίνονται στατιστικά επεξεργασμένα τα αποτελέσματα κατάταξης βάσει των δύο φωτο-αναλύσεων. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, ένα μέσο ποσοστό 50,6% κ.β. αποτελείται από λίθους και ογκόλιθους (μεγέθη τεμαχίων πάνω από 30 cm) και ένα ποσοστό 43,3% κ.β. αποτελείται από κροκάλες (μεγέθη τεμαχίων από 7,5 cm έως 30 cm). Το υπόλοιπο 6,1% κ.β. αποτελείται από υλικά που κατατάσσονται ως χάλικες (μεγέθη τεμαχίων μικρότερα από 7,5 cm).

Πίνακας 4. Σύνοψη θρυμματισμού - κοκκομετρίας βάσει φωτο-αναλύσεων

Περιγραφή	Μέγεθος	Εύρος (% κβ)	Μέση Τιμή (% κβ)
Ογκόλιθοι	> 300 mm	34,8 – 66,4	50,6
Κροκάλες	75 – 300 mm	29,9 – 56,7	43,3
Χάλικες	< 75 mm	3,7 – 8,4	6,1

Πέραν όμως των μεθόδων φωτο-ανάλυσης, λόγω της κρισιμότητας του θρυμματισμού που επιτυγχάνεται κατά τις ανατινάξεις στη μεταλλευτική, έχουν αναπτυχθεί και μαθηματικά μοντέλα διατύπωσης της κατανομής των παραγόμενων τεμαχίων. Το πλέον διαδεδομένο μοντέλο διεθνώς, εδώ και τρεις δεκαετίες, είναι το μοντέλο Kuz-Ram (Cunningham 1983, 2005), το οποίο – όπως φαίνεται παρακάτω – δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα με το θρυμματισμό που επιτυγχάνεται στα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από τέσσερις εξισώσεις, οι οποίες δίνουν την καμπύλη θρυμματισμού (κοκκομετρική κατανομή) $P(x)$, το μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50}, το συντελεστή εξορυξιμότητας (με χρήση εκρηκτικών υλών) του πετρώματος A_r και το συντελεστή ομοιομορφίας n.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο Kuz-Ram με χαρακτηριστικές παραμέτρους σχεδίασης ανατίναξης των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για την περαιτέρω διερεύνηση των χαρακτηριστικών κοκκομετρίας των ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων. Σύμφωνα με τον Τσουτρέλη (2001), ο συντελεστής εξορυξιμότητας A_r λαμβάνει τιμές γύρω στο 7 για ενδιάμεσης σκληρότητας πετρώματα, 10 για σκληρά και έντονα ρωγματωμένα και 13 για σκληρά πετρώματα με αραιές ασυνέχειες. Οι παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τιμές του A_r από 4 έως 9, οι οποίες θεωρείται ότι καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος των Ανωκρητιδικών ασβεστολίθων των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη (ως προς την εξορυξιμότητας τους).

Το κριτήριο για την διαφορετική του A_r (συντελεστής εξορυξιμότητας), όπου κυμαίνεται από 4 έως 9, βασίζεται στον διαφορετικό κερματισμό, στον διαφορετικό προσανατολισμό και στην διαφορετική σκληρότητα του πετρώματος. Σημειώνεται ότι, ο κάναβος των διατρημάτων διατηρήθηκε σταθερός με φορτίο B και απόσταση διατρημάτων S ίσο με 5m και απόκλιση 0.2 m. Οπότε, κατά περίπτωση προέκυψε:

- Για A_r =4 προέκυψε μέσο μέγεθος x_{50}: 20.4 cm (Εικόνα 14)
- Για A_r =5 προέκυψε μέσο μέγεθος x_{50}: 25.5 cm (Εικόνα 15)
- Για A_r =6 προέκυψε μέσο μέγεθος x_{50}: 30.6 cm (Εικόνα 16)
- Για A_r =7 προέκυψε μέσο μέγεθος x_{50}: 35.7 cm (Εικόνα 17)
- Για A_r =8 προέκυψε μέσο μέγεθος x_{50}: 40.8 cm (Εικόνα 18)
- Για A_r =9 προέκυψε μέσο μέγεθος x_{50}: 45.9 cm (Εικόνα 19)

Σημειώνεται ότι, ο συντελεστής ομοιομορφίας n παραμένει σταθερός ίσος με n=1.27 διότι εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά της διάτρησης, τα οποία παραμένουν σταθερά.

Στην Εικόνα 20, δίνονται οι κοκκομετρικές κατανομές για τις συνολικές τιμές του A_r, δηλαδή από 4έως 9.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της Εικόνας 21, η προσομοίωση του θρυμματισμού με το μοντέλο Kaz-Rum (για εύρος συντελεστή εξόρυξης A_r = 4 έως 9) δίνει άμεσα συγκρίσιμα αποτελέσματα με το θρυμματισμό που επιτυγχάνεται στα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη βάσει φωτο-αναλύσεων. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τη σύγκριση του Πίνακα 5 (όπου δίδονται οι μέσες αναμενόμενες τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών τεμαχίων) με τον Πίνακα 4.

Τύπος πετρώματος: Ανωκρητιδικός Ασβεστόλιθος

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος	
Ειδικό βάρος	2.75

Εκρηκτικές Ύλες	
Πυκνότητα $\rho_{E.Y.}$	0.8 SG
Σχετική κ.β. ισχύς (RWS)	75% (% ANFO)
Ονομαστική ταχύτητα έκρηξης	3000 m/s
Ενεργή ταχύτητα έκρηξης	3000 m/s
Explosive Strength	0.75

Παράμετροι ανατίναξης	
Διάταξη διατρημάτων	1
Διάμετρος διατρήματος d	165 mm
Μήκος γομούμενου τμήματος h_t	11 m
Φορτίο B	4.8 m
Απόσταση S	4.8 m
Τυπ.απόκλ. παρέκκλισης διατρ. ω	0.2 m
Ύψος βαθμίδας H_b	15 m
Κλίση μετώπου βαθμίδας φ	17 °
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.198 kg/tn
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.544 kg/m^3
Βάρος ΕΥ ανά διάτρημα	188.2 kg/διάτρημα

Διάταξη διατρημάτων:
Τετράγωνη = 1
Εναλλασσόμενη = 1,1

Συντελεστής εξορυξιμότητας A_r	**4.00**
Μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50}	**20.4** cm
Συντελεστής ομοιομορφίας n	**1.27**
Χαρακτηριστικό μέγεθος κατανομής x_c	0.27 m

% κ.β. μικρότερου	**Μέγεθος (m)**	**Μέγεθος (mm)**
0.0%	0.0006	0.6
0.1%	0.00085	0.85
0.1%	0.001	1
0.1%	0.0014	1.4
0.2%	0.002	2
0.4%	0.00335	3.35
0.5%	0.004	4
0.6%	0.00475	4.75
0.7%	0.0056	5.6
0.9%	0.0067	6.7
1.1%	0.008	8
1.5%	0.01	10
2.0%	0.0125	12.5
2.7%	0.016	16
4.7%	0.025	25
6.2%	0.0315	31.5
7.2%	0.0355	35.5
7.7%	0.0375	37.5
8.3%	0.04	40
10.9%	0.05	50
17.6%	0.075	75
24.4%	0.1	100
31.0%	0.125	125
37.4%	0.15	150
67.7%	0.3	300
88.5%	0.5	500
99.5%	1	1000

Εικόνα 14. Υπολογισμοί κοκκομετρικής κατανομής μοντέλου Kuz-Ram για Ar =4

Τύπος πετρώματος: Ανωκρητιδικός Ασβεστόλιθος

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος		
Ειδικό βάρος	2.75	

Εκρηκτικές Ύλες		
Πυκνότητα $\rho_{E.Y.}$	0.8	SG
Σχετική κ.β. ισχύς (RWS)	75%	(% ANFO)
Ονομαστική ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Ενεργή ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Explosive Strength	0.75	

Παράμετροι ανατίναξης		
Διάταξη διατρημάτων	1	
Διάμετρος διατρήματος d	165	mm
Μήκος γομούμενου τμήματος h_t	11	m
Φορτίο B	4.8	m
Απόσταση S	4.8	m
Τυπ.απόκλ. παρέκκλισης διατρ. ω	0.2	m
Ύψος βαθμίδας H_b	15	m
Κλίση μετώπου βαθμίδας φ	17	°
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.198	kg/tn
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.544	kg/m^3
Βάρος ΕΥ ανά διάτρημα	188.2	kg/διάτρημα

Διάταξη διατρημάτων:
Τετράγωνη = 1
Εναλλασσόμενη = 1,1

Συντελεστής εξορυξιμότητας A_r	**5.00**	
Μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50}	**25.5**	cm
Συντελεστής ομοιομορφίας n	**1.27**	
Χαρακτηριστικό μέγεθος κατανομής x_c	0.34	m

% κ.β. μικρότερου	**Μέγεθος (m)**	**Μέγεθος (mm)**
0.0%	0.0006	0.6
0.0%	0.00085	0.85
0.1%	0.001	1
0.1%	0.0014	1.4
0.1%	0.002	2
0.3%	0.00335	3.35
0.4%	0.004	4
0.4%	0.00475	4.75
0.5%	0.0056	5.6
0.7%	0.0067	6.7
0.8%	0.008	8
1.1%	0.01	10
1.5%	0.0125	12.5
2.0%	0.016	16
3.5%	0.025	25
4.7%	0.0315	31.5
5.5%	0.0355	35.5
5.9%	0.0375	37.5
6.4%	0.04	40
8.3%	0.05	50
13.6%	0.075	75
19.0%	0.1	100
24.4%	0.125	125
29.7%	0.15	150
57.3%	0.3	300
80.4%	0.5	500
98.0%	1	1000

Εικόνα 15. Υπολογισμοί κοκκομετρικής κατανομής μοντέλου Kuz-Ram για Ar =5

Τύπος πετρώματος: Ανωκρητιδικός Ασβεστόλιθος

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος		
Ειδικό βάρος	2.75	

Εκρηκτικές Ύλες		
Πυκνότητα $\rho_{E.Y.}$	0.8	SG
Σχετική κ.β. ισχύς (RWS)	75%	(% ANFO)
Ονομαστική ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Ενεργή ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Explosive Strength	0.75	

Παράμετροι ανατίναξης		
Διάταξη διατρημάτων	1	
Διάμετρος διατρήματος d	165	mm
Μήκος γομούμενου τμήματος h_t	11	m
Φορτίο B	4.8	m
Απόσταση S	4.8	m
Τυπ.απόκλ. παρέκκλισης διατρ. ω	0.2	m
Ύψος βαθμίδας H_b	15	m
Κλίση μετώπου βαθμίδας φ	17	°
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.198	kg/tn
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.544	kg/m^3
Βάρος ΕΥ ανά διάτρημα	188.2	kg/διάτρημα

Διάταξη διατρημάτων:
Τετράγωνη = 1
Εναλλασσόμενη = 1,1

Συντελεστής εξορυξιμότητας A_r	**6.00**	
Μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50}	**30.6**	cm
Συντελεστής ομοιομορφίας n	**1.27**	
Χαρακτηριστικό μέγεθος κατανομής x_c	0.41	m

% κ.β. μικρότερου	**Μέγεθος (m)**	**Μέγεθος (mm)**
0.0%	0.0006	0.6
0.0%	0.00085	0.85
0.0%	0.001	1
0.1%	0.0014	1.4
0.1%	0.002	2
0.2%	0.00335	3.35
0.3%	0.004	4
0.3%	0.00475	4.75
0.4%	0.0056	5.6
0.5%	0.0067	6.7
0.7%	0.008	8
0.9%	0.01	10
1.2%	0.0125	12.5
1.6%	0.016	16
2.8%	0.025	25
3.8%	0.0315	31.5
4.4%	0.0355	35.5
4.7%	0.0375	37.5
5.1%	0.04	40
6.7%	0.05	50
10.9%	0.075	75
15.4%	0.1	100
19.9%	0.125	125
24.4%	0.15	150
49.1%	0.3	300
72.6%	0.5	500
95.6%	1	1000

Εικόνα 16. Υπολογισμοί κοκκομετρικής κατανομής μοντέλου Kuz-Ram για Ar =6

Τύπος πετρώματος: Ανωκρητιδικός Ασβεστόλιθος

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος		
Ειδικό βάρος	2.75	

Εκρηκτικές Ύλες		
Πυκνότητα $\rho_{E.Y.}$	0.8	SG
Σχετική κ.β. ισχύς (RWS)	75%	(% ANFO)
Ονομαστική ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Ενεργή ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Explosive Strength	0.75	

Παράμετροι ανατίναξης		
Διάταξη διατρημάτων	1	
Διάμετρος διατρήματος d	165	mm
Μήκος γομούμενου τμήματος h_t	11	m
Φορτίο B	4.8	m
Απόσταση S	4.8	m
Τυπ.απόκλ. παρέκκλισης διατρ. ω	0.2	m
Ύψος βαθμίδας H_b	15	m
Κλίση μετώπου βαθμίδας φ	17	°
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.198	kg/tn
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.544	kg/m^3
Βάρος ΕΥ ανά διάτρημα	188.2	kg/διάτρημα

Διάταξη διατρημάτων:
Τετράγωνη = 1
Εναλλασσόμενη = 1,1

Συντελεστής εξορυξιμότητας A_r	**7.00**	
Μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50}	**35.7**	cm
Συντελεστής ομοιομορφίας n	**1.27**	
Χαρακτηριστικό μέγεθος κατανομής x_c	0.48	m

% κ.β. μικρότερου	**Μέγεθος (m)**	**Μέγεθος (mm)**
0.0%	0.0006	0.6
0.0%	0.00085	0.85
0.0%	0.001	1
0.1%	0.0014	1.4
0.1%	0.002	2
0.2%	0.00335	3.35
0.2%	0.004	4
0.3%	0.00475	4.75
0.4%	0.0056	5.6
0.4%	0.0067	6.7
0.6%	0.008	8
0.7%	0.01	10
1.0%	0.0125	12.5
1.3%	0.016	16
2.3%	0.025	25
3.1%	0.0315	31.5
3.6%	0.0355	35.5
3.9%	0.0375	37.5
4.2%	0.04	40
5.5%	0.05	50
9.1%	0.075	75
12.8%	0.1	100
16.7%	0.125	125
20.5%	0.15	150
42.6%	0.3	300
65.4%	0.5	500
92.3%	1	1000

Εικόνα 17. Υπολογισμοί κοκκομετρικής κατανομής μοντέλου Kuz-Ram για Ar =7

Τύπος πετρώματος: Ανωκρητιδικός Ασβεστόλιθος

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος		
Ειδικό βάρος	2.75	

Εκρηκτικές Ύλες		
Πυκνότητα $\rho_{E.Y.}$	0.8	SG
Σχετική κ.β. ισχύς (RWS)	75%	(% ANFO)
Ονομαστική ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Ενεργή ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Explosive Strength	0.75	

Παράμετροι ανατίναξης		
Διάταξη διατρημάτων	1	
Διάμετρος διατρήματος d	165	mm
Μήκος γομούμενου τμήματος h_t	11	m
Φορτίο B	4.8	m
Απόσταση S	4.8	m
Τυπ.απόκλ. παρέκκλισης διατρ. ω	0.2	m
Ύψος βαθμίδας H_b	15	m
Κλίση μετώπου βαθμίδας φ	17	°
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.198	kg/tn
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.544	kg/m^3
Βάρος ΕΥ ανά διάτρημα	188.2	kg/διάτρημα

Διάταξη διατρημάτων:
Τετράγωνη = 1
Εναλλασσόμενη = 1,1

Συντελεστής εξορυξιμότητας A_r	**8.00**	
Μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50}	**40.8**	cm
Συντελεστής ομοιομορφίας n	**1.27**	
Χαρακτηριστικό μέγεθος κατανομής x_c	0.54	m

% κ.β. μικρότερου	Μέγεθος (m)	Μέγεθος (mm)
0.0%	0.0006	0.6
0.0%	0.00085	0.85
0.0%	0.001	1
0.1%	0.0014	1.4
0.1%	0.002	2
0.2%	0.00335	3.35
0.2%	0.004	4
0.2%	0.00475	4.75
0.3%	0.0056	5.6
0.4%	0.0067	6.7
0.5%	0.008	8
0.6%	0.01	10
0.8%	0.0125	12.5
1.1%	0.016	16
2.0%	0.025	25
2.6%	0.0315	31.5
3.1%	0.0355	35.5
3.3%	0.0375	37.5
3.5%	0.04	40
4.7%	0.05	50
7.7%	0.075	75
10.9%	0.1	100
14.3%	0.125	125
17.6%	0.15	150
37.4%	0.3	300
59.2%	0.5	500
88.5%	1	1000

Εικόνα 18. Υπολογισμοί κοκκομετρικής κατανομής μοντέλου Kuz-Ram για Ar =8

Τύπος πετρώματος: Ανωκρητιδικός Ασβεστόλιθος

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος		
Ειδικό βάρος	2.75	

Εκρηκτικές Ύλες		
Πυκνότητα $\rho_{E.Y.}$	0.8	SG
Σχετική κ.β. ισχύς (RWS)	75%	(% ANFO)
Ονομαστική ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Ενεργή ταχύτητα έκρηξης	3000	m/s
Explosive Strength	0.75	

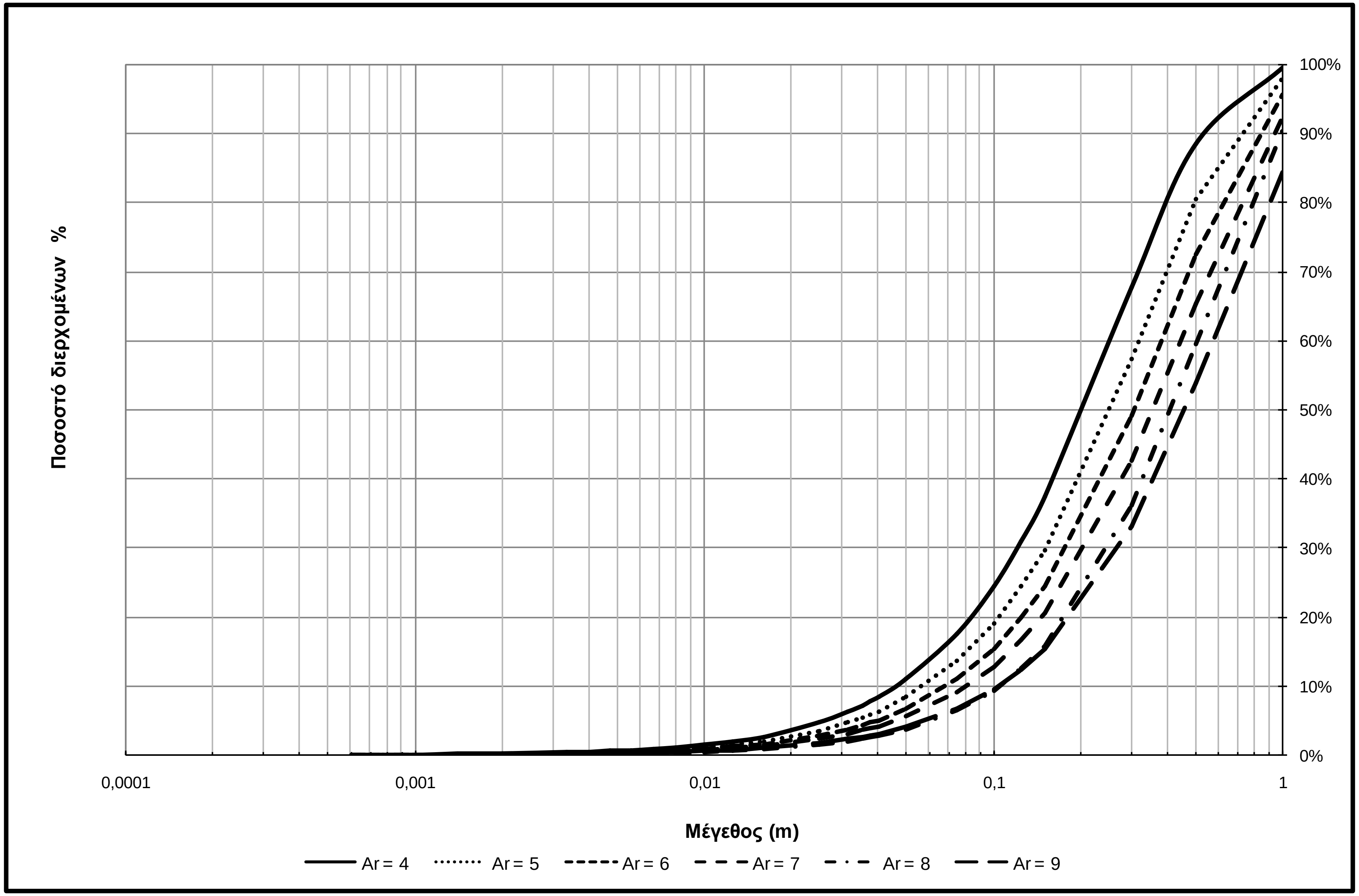
Παράμετροι ανατίναξης		
Διάταξη διατρημάτων	1	
Διάμετρος διατρήματος d	165	mm
Μήκος γομούμενου τμήματος h_t	11	m
Φορτίο B	4.8	m
Απόσταση S	4.8	m
Τυπ.απόκλ. παρέκκλισης διατρ. ω	0.2	m
Ύψος βαθμίδας H_b	15	m
Κλίση μετώπου βαθμίδας φ	17	°
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.198	kg/tn
Ειδική κατανάλωση ΕΥ	0.544	kg/m^3
Βάρος ΕΥ ανά διάτρημα	188.2	kg/διάτρημα

Διάταξη διατρημάτων:
Τετράγωνη = 1
Εναλλασσόμενη = 1,1

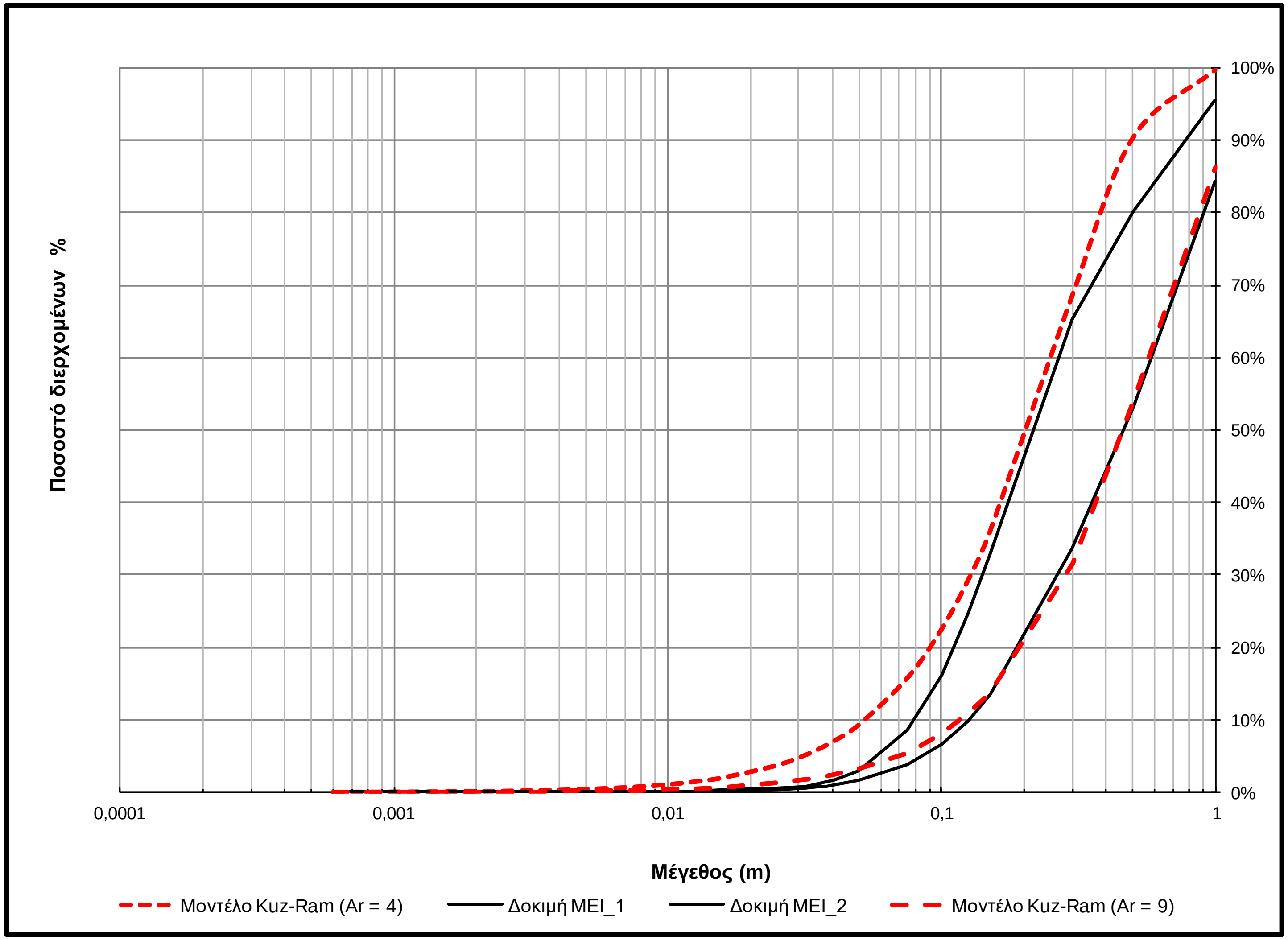
Συντελεστής εξορυξιμότητας A_r	**9.00**	
Μέσο μέγεθος τεμαχίων x_{50}	**45.9**	cm
Συντελεστής ομοιομορφίας n	**1.27**	
Χαρακτηριστικό μέγεθος κατανομής x_c	0.61	m

% κ.β. μικρότερου	**Μέγεθος (m)**	**Μέγεθος (mm)**
0.0%	0.0006	0.6
0.0%	0.00085	0.85
0.0%	0.001	1
0.0%	0.0014	1.4
0.1%	0.002	2
0.1%	0.00335	3.35
0.2%	0.004	4
0.2%	0.00475	4.75
0.3%	0.0056	5.6
0.3%	0.0067	6.7
0.4%	0.008	8
0.5%	0.01	10
0.7%	0.0125	12.5
1.0%	0.016	16
1.7%	0.025	25
2.3%	0.0315	31.5
2.6%	0.0355	35.5
2.8%	0.0375	37.5
3.1%	0.04	40
4.0%	0.05	50
6.7%	0.075	75
9.5%	0.1	100
12.4%	0.125	125
15.4%	0.15	150
33.2%	0.3	300
53.8%	0.5	500
84.5%	1	1000

Εικόνα 19. Υπολογισμοί κοκκομετρικής κατανομής μοντέλου Kuz-Ram για Ar =9



Εικόνα 20. Καμπύλες κοκκομετρικών κατανομών μοντέλων Kuz-Ram (Ar = 4-9)



Εικόνα 21. Σύγκριση κοκκομετρίας φωτο-αναλύσεων και μοντέλου Kuz-Ram (Ar =4, 9)

Πίνακας 5. Σύνοψη θρυμματισμού - κοκκομετρίας βάσει μοντέλου Kuz-Ram

Περιγραφή	Μέγεθος	Εύρος (% κβ)	Μέση Τιμή (% κβ)
Ογκόλιθοι	> 300 mm	32,3 – 66,8	49,6
Κροκάλες	75 – 300 mm	26,5 – 50,1	38,3
Χάλικες	< 75mm	6,7 – 17,6	12,2

Συνήθως, με τη μέθοδο της φωτο-ανάλυσης δεν αποτυπώνονται τα λεπτόκοκκα υλικά μιας ανατίναξης. Βάσει στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων των Πινάκων 1 και 2, μία μέση κοκκομετρία αυτών των υλικών σε μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη δίνεται στον Πίνακα 6. Παρατηρείται ότι από τα μικρότερα των 3" (75 mm) κλάσματα, ένα 55% πρόκειται για χάλικες, ένα περίπου 30% για αμμώδη υλικά και ένα 15% για λεπτόκοκκα. Και στα τρία υλικά, παρατηρείται ένας συντελεστής μεταβλητότητας (coefficient of variation) της τάξης του 20%. Επομένως συνδυάζοντας τις πληροφορίες των Πινάκων 4 έως 6, δύναται να γίνει μια συνολική εκτίμηση της κοκκομετρίας των προϊόντων μιας τυπικής ανατίναξης στα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη, η οποία και δίνεται στον Πίνακα 7. Όλες οι περιγραφές και τα αντίστοιχα μεγέθη γίνονται με βάση το σύστημα κατάταξης USCS.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών κατάταξης

Περιγραφή (μέγεθος, mm)	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελ. μεταβλητότητας (%)	Αριθμός δοκιμών
Χάλικες (4,75 – 75)	55,3	9,2	17	12
Άμμος (0,075 – 4,75)	29,2	6,3	22	12
Λεπτόκοκκα (< 0,075)	15,6	3,3	21	12

Πίνακας 7. Ενδεικτική εκτιμώμενη κοκκομετρία ασβεστολιθικών στείρων

Περιγραφή	Μέγεθος (mm)	Εκτιμώμενο κ.β. %
Ογκόλιθοι	>300	50 ± 20
Κροκάλες	75 – 300	40 ± 15
Χάλικες	4,75 – 75	5 ± 3
Άμμος	0,075 – 4,75	3 ± 2
Λεπτόκοκκα	< 0,075	2 ± 2

7.2.2 Διαπερατότητα

Λόγω του ιδιαιτέρως χονδρόκοκκου υλικού από το οποίο αποτελούνται, η διαπερατότητα των ασβεστολιθικών εξορυκτικών υλικών των Μεταλλείων Αγίου Ιωάννη χαρακτηρίζεται από μέση έως υψηλή και η αποστράγγιση από καλή έως πολύ καλή. Βάσει και του Πίνακα 8, ο συντελεστής διαπερατότητας k των εν λόγω υλικών εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 10^{-3} έως 10^{-6} m/sec, ενώ στους κατώτερους ορίζοντες εκτιμάται ότι αυξάνεται σε 10^{0} έως 10^{-2} m/sec λόγω της παρουσίας πολύ υψηλού ποσοστού κροκαλών και ογκολίθων. Γενικά, η παρατηρούμενη υψηλή διαπερατότητα των αποθέσεων εξορυκτικών υλικών ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ανάπτυξης υψηλής πιεζομετρικής επιφάνειας υπογείων υδάτων στο σώμα των αποθέσεων.

Σημειώνεται ότι η παραπάνω εκτιμώμενη διαπερατότητα για τα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα των σωρών απόθεσης (< 75mm), επιβεβαιώνεται και από την ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπειρική σχέση του Hazen (1911), σύμφωνα με την οποία:

$$k = C \times d_{10}^2$$

όπου k ο συντελεστής διαπερατότητας σε m/s, C μία σταθερά και d_{10} το ενεργό μέγεθος κόκκων σε mm. Σύμφωνα με τους Holtz & Kovacs (1981), η παραπάνω σχέση έχει εφαρμογή σε εδάφη με διαπερατότητα πάνω από 10^{-5} m/s, ενώ η σταθερά C λαμβάνει τιμές από 0,004 έως 0,015 με μέση τιμή C = 0,010. Εφαρμόζοντας τη σχέση για τα δείγματα του Πίνακα 1, προκύπτουν οι συντελεστές διαπερατότητας του Πίνακα 9. Άρα, σύμφωνα με τη σχέση του Hazen, ένας μέσος συντελεστής διαπερατότητας των λεπτόκοκκων κλάσματα των σωρών απόθεσης (<75mm) είναι της τάξης του 10^{-5} m/sec.

Πίνακας 8. Τυπικές τιμές συντελεστών διαπερατότητας (Barnes 2005)

	Συντελεστής Διαπερατότητας k m/s	Είδος εδάφους	Χαρακτηριστικά αποστράγγισης	Συντελεστής Διαπερατότητας k cm/s
	10	Χονδρό χαλίκι, κροκάλες, λατύπες	Πολύ καλή	1000
Εύρος αναμενόμενων τιμών	1			100
	10^{-1}	Καθαρά χαλίκια		10
	10^{-2}			1
	10^{-3}	Καθαρές άμμοι, καθαρά μίγματα αμμοχάλικου	Καλή	10^{-1}
	10^{-4}			10^{-2}
	10^{-5}			10^{-3}
	10^{-6}	Πολύ λεπτές άμμοι, ιλυώδεις άμμοι ιλύες, στρωματοποιημένα αποθέματα αργίλου/ιλύος		10^{-4}
	10^{-7}		Μικρή	10^{-5}
	10^{-8}			10^{-6}
	10^{-9}		Πρακτικά αδιαπέρατο	10^{-7}
	$< 10^{-9}$	Μη αποσαθρωμένες, αρηγμάτωτες, ομογενείς άργιλοι		$< 10^{-7}$

Πίνακας 9. Συντελεστές διαπερατότητας λεπτόκοκκων κλασμάτων ασβεστολιθικών εξορυκτικών αποθέσεων βάσει σχέσης Hazen

Δείγμα	Μέγ. διάμ. κόκκου στο 10% διερχομένου	Συντελεστής διαπερατότητας k	
	d_{10} (mm)	m/s	cm/s
ΒΔ1	0,020	$0{,}400\times10^{-5}$	$4{,}0\times10^{-4}$
ΒΔ2	0,042	$1{,}760\times10^{-5}$	$1{,}8\times10^{-3}$
ΒΔ3	0,013	$0{,}169\times10^{-5}$	$1{,}7\times10^{-4}$
ΒΔ4	0,011	$0{,}121\times10^{-5}$	$1{,}2\times10^{-4}$
ΒΔ5	0,086	$7{,}400\times10^{-5}$	$7{,}4\times10^{-3}$
ΒΔ6	0,018	$0{,}324\times10^{-5}$	$3{,}2\times10^{-4}$
ΒΔ7	0,025	$0{,}625\times10^{-5}$	$6{,}3\times10^{-4}$
ΒΔ8	0,034	$1{,}160\times10^{-5}$	$1{,}2\times10^{-3}$
ΒΔ9	0,022	$0{,}484\times10^{-5}$	$4{,}8\times10^{-4}$
ΒΔ10	0,030	$0{,}900\times10^{-5}$	$9{,}0\times10^{-4}$
	Μέσος Όρος	$1{,}33\times10^{-5}$	$1{,}33\times10^{-3}$

7.2.3 Άλλα Φυσικά Χαρακτηριστικά

Στον Πίνακα 10 δίνεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της φυσικής υγρασίας και των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας, όπως αυτά προσδιορίστηκαν εργαστηριακά (βλ. Πίνακες 1 και 2). Σημειώνεται ότι σύμφωνα και με τις αντίστοιχες προδιαγραφές, τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας έχουν πραγματοποιηθεί σε υλικά που διέρχονται από κόσκινο No. 40 (0,425mm), ενώ οι δοκιμές κατά τροποποιημένη Proctor σε υλικό που διέρχεται από κόσκινο 19mm. Δηλαδή, οι δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε υλικό του οποίου το κλάσμα αποτελεί ένα μικρό ποσοστό % κ.β. του πραγματικού υλικού. Στον Πίνακα 11 δίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπύκνωσης κατά Proctor, ενώ τέλος, στον Πίνακα 12 δίνονται οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων των επί τόπου δοκιμών με τη μέθοδο των ραδιοϊσοτόπων. Σύμφωνα με τις δοκιμές, ο βαθμός συμπύκνωσης που μετρήθηκε στη στέψη των σωρών είναι της τάξης του 95% και χαρακτηρίζεται υψηλός. Επίσης, η υγρασία που μετρήθηκε επί τόπου ήταν ελαφρώς μικρότερη (3,5%) σε σχέση με την εργαστηριακή (5,4%), λόγω του ότι οι επιτόπου μετρήσεις έγιναν επιφανειακά και με ηλιοφάνεια ενώ τα δείγματα ελήφθησαν σε μεγαλύτερο βάθος.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών ορίων Atterberg

Ιδιότητα	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελ. Μεταβλητότητας (%)	Αριθμός δοκιμών
Φυσική Υγρασία w_{lab} (%)	6,4	2,0	31%	10
Όριο Υδαρότητας LL (%)	22,0	3,4	16%	12
Όριο Πλαστικότητας PL (%)	13,7	1,5	11%	12
Δείκτης Πλαστικότητας PI (%)	8,3	2,6	31%	12

Πίνακας 11. Αποτελέσματα δοκιμών συμπύκνωσης κατά τροποποιημένη Proctor

Ιδιότητα	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελ. Μεταβλητότητας (%)	Αριθμός δοκιμών
Μέγιστη ξηρή πυκνότητα γ_{dmax} (kN/m^3)	23,8	0,0	0%	2
Βέλτιστη υγρασία w_{opt} (%)	6,6	0,1	1%	2

Πίνακας 12. Αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών με τη μέθοδο των ραδιοϊσοτόπων

Ιδιότητα	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελ. Μεταβλητότητας (%)	Αριθμός δοκιμών
Υγρή πυκνότητα γ_s (kN/m^3)	23,9	1,2	5%	10
Ξηρή πυκνότητα γ_d (kN/m^3)	22,9	1,2	5%	10
Φυσική υγρασία w_{insitu} (%)	4,3	0,8	19%	10
Βαθμός συμπύκνωσης (%)	96,4	4,7	5%	10

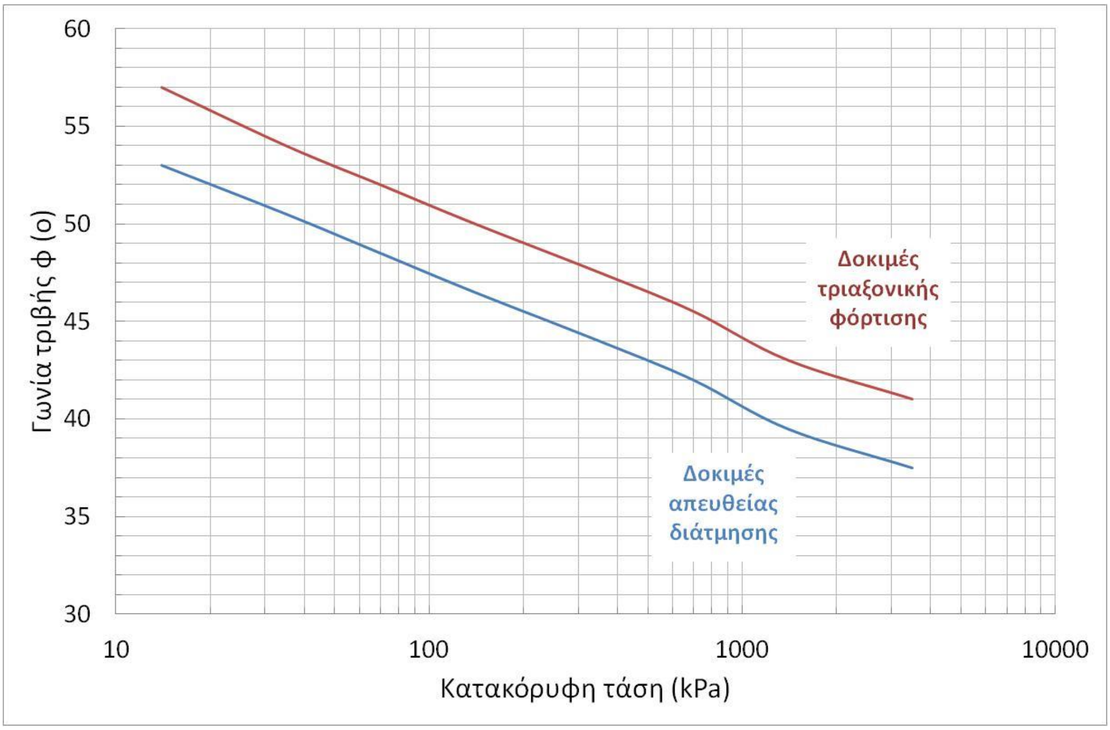
7.3 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

7.3.1 Γενικά

Η παρουσία εξαιρετικά υψηλού ποσοστού τεμαχίων μεγάλου μεγέθους (κροκαλών, χαλίκων και ογκολίθων) στους ασβεστολιθικούς σωρούς απόθεσης καθιστά πρακτικά αδύνατη την εκτέλεση επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών αντοχής (π.χ. πρότυπες δοκιμές διείσδυσης - SPT, τριαξονικές δοκιμές ή δοκιμές διάτμησης, δοκιμές στερεοποίησης κλπ). Είναι όμως γνωστό ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χονδρόκοκκων υλικών (όπως τα υπό εξέταση) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των τεμαχίων τους, δηλαδή την κοκκομετρία τους. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο έχει το επίπεδο των ασκούμενων τάσεων, το γωνιώδες των επιφανειών των τεμαχίων (surface roughness), αλλά και η αντοχή του μητρικού πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (Leps 1970, Barton 1982).

7.3.2 Διατμητική Αντοχή: Γωνία Τριβής – Συνοχή

Λόγω της φύσης των υλικών, είναι προφανές ότι από τις δύο παραμέτρους διατμητικής αντοχής, κρίσιμη είναι η γωνία τριβής. Η συνοχή αναμένεται να είναι χαμηλή, της τάξης των 0 - 5 kPa, και σε κάθε περίπτωση δεν επηρεάζει ουσιαστικά την ευστάθεια των ασβεστολιθικών σωρών απόθεσης. Όσον αφορά στη γωνία τριβής, για υλικά παρόμοιας φύσης και κοκκομετρίας όπως αυτά που προκύπτουν από τις ανατινάξεις επί των ασβεστόλιθων των μεταλλείων Αγίου Ιωάννη, η βιβλιογραφία αναφέρεται σε τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 45° και 65°. Για παράδειγμα, οι Herle et al. (2009) μετά από πειράματα σε θραυσμένο ασβεστόλιθο, αναφέρουν γωνίες τριβής του υλικού από 54° έως 63°. Παρόλα αυτά, η αυθαίρετη υιοθέτηση μιας τόσο υψηλής τιμής εγκυμονεί κινδύνους. Ο λόγος είναι ότι, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τα παραπάνω υλικά εμφανίζουν γραμμική μείωση της γωνίας τριβής τους με το λογάριθμο της κατακόρυφης ενεργής τάσης. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 9, το οποίο βασίζεται σε εργαστηριακά δεδομένα τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών απευθείας διάτμησης. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η υιοθέτηση μιας πολύ υψηλής τιμής, μονοσήμαντα ορισμένης, για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής κατά το σχεδιασμό μεγάλων σωρών απόθεσης (waste dumps) μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα όσον αφορά στην ευστάθεια των πρανών (Barton 1982). Κι αυτό διότι οι γωνίες τριβής λαμβάνουν πολύ υψηλότερες τιμές στις περιοχές που οι τάσεις είναι μειωμένες (όπως για παράδειγμα στον πόδα ή στο φρύδι του πρανούς). Επομένως, ενδείξεις άριστης επιφανειακής (αβαθούς) ευστάθειας ενός σωρού απόθεσης, καθώς και επίτευξη πάρα πολύ απότομων γωνιών (π.χ. άνω των 50°) σε μεσαίου ύψους πρανή, μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα. Μερικές δεκάδες μέτρα βαθύτερα από την επιφάνεια του σωρού, η διαθέσιμη διατμητική αντοχή ενδέχεται να είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με την επιφάνεια ή τον πόδα.



Εικόνα 22. Μεταβολή γωνίας τριβής υλικών λιθορριπής με την τάση υπερκειμένων (βάσει δεδομένων από Lepps, 1970 και ICOLD, 1993)

Λαμβάνοντας υπόψη το παραπάνω διάγραμμα και σε συνάρτηση με τις αναμενόμενες μέγιστες κατακόρυφες τάσεις, εκτιμάται ότι μία μάλλον συντηρητική τιμή για την εσωτερική γωνία τριβής του υλικού είναι της τάξης των 40°. Στην πραγματικότητα, η τιμή αυτή αναμένεται να είναι υψηλότερη.

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω, στην ουσία επιβεβαιώνονται και από την υπάρχουσα κατάσταση των σωρών απόθεσης (πολλοί από τους οποίους φθάνουν σε ύψος πολλές δεκάδες μέτρα). Η κλίση των πρανών των σωρών διαμορφώνεται από την ελεύθερη θέση που λαμβάνουν τα υλικά κατά την ανατροπή της καρότσας του φορτηγού και συχνά φθάνει, ανάλογα και με τη μορφολογία του φυσικού εδάφους, τις 35° έως 40°. Από άποψη ευστάθειας οι παραπάνω σωροί απόθεσης χαρακτηρίζονται ως ασφαλείς, αφού στα σχεδόν 50 χρόνια ιστορίας των Μεταλλείων δεν έχουν σημειωθεί σοβαρές αστοχίες. Επομένως, και μόνο λαμβάνοντας υπόψη την κλίση των πρανών των σωρών απόθεσης, συμπεραίνεται ότι η γωνία τριβής του υλικού φθάνει τουλάχιστον τις 35° – 40°. Όμως η υιοθέτηση μιας τιμής π.χ. 35° ως χαρακτηριστική γωνία τριβής για ενδεχόμενους υπολογισμούς ευστάθειας κρίνεται πολύ συντηρητική, δεδομένου ότι η γωνία απόθεσης αφορά κατάσταση πολύ χαλαρής διάταξης χονδρόκοκκων υλικών (Holtz & Kovacs, 1981). Στην περίπτωση της δημιουργίας των σωρών απόθεσης πραγματοποιείται συμπύκνωση, λόγω της κίνησης στη στέψη αυτών χωματουργικών αυτοκινήτων (φορτηγών) βάρους 65 (κενών) έως 150 tn (έμφορτων).

7.3.3 Συμπιεστότητα

Η συμπιεστότητα προϊόντων ανατίναξης επί ασβεστολιθικών πετρωμάτων με κοκκομετρία ανάλογη των υπό εξέταση δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθεί με συμβατικά εργαστηριακά μέσα. Επιπλέον, επί τόπου δοκιμές (όπως για παράδειγμα η δοκιμή φόρτισης πλάκας) αναμένεται να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα, καθώς το βάθος για το οποίο βρίσκουν εφαρμογή είναι πολύ μικρό (της τάξης του 1 - 2 m). Σε κάθε περίπτωση όμως, σύμφωνα και με τη διεθνή βιβλιογραφία, η συμπιεστότητα των υπό εξέταση υλικών αναμένεται χαμηλή, με ένα εκτιμώμενο εύρος μέτρου συμπιεστότητας E_s της τάξης των 50 – 150 MPa.

8. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ασβεστολιθικά απόβλητα των εξορυκτικών δραστηριοτήτων στα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη της ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ αποτελούν προϊόντα ανατίναξης με εκρηκτικές ύλες επί των ανωκρητιδικών ασβεστολίθων της περιοχής. Αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μίγμα ογκολίθων, κροκαλών και χαλίκων, καθώς και ένα μικρό κατά βάρος ποσοστό λεπτότερων υλικών. Πρόκειται δηλαδή για ιδιαιτέρως χονδρόκοκκα υλικά, των οποίων η γεωτεχνική συμπεριφορά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κοκκομετρία τους. Δεδομένου του κοινού μητρικού πετρώματος και του κοινού σχεδιασμού ανατινάξεων, ο θρυμματισμός που επιτυγχάνεται είναι παρόμοιος σε όλα τα εργοτάξια. Επομένως, η γεωτεχνική συμπεριφορά των συγκεκριμένων αποθέσεων είναι η ίδια για όλα τα εργοτάξια. Συγκεκριμένα: Ως προς την κοκκομετρία τους, εκτιμάται ότι ένα ποσοστό της τάξης του 90% κ.β. αποτελείται από τεμάχη μεγέθους κροκαλών και λίθων ή ογκολίθων, ενώ ένα 10% από τεμάχη μεγέθους χαλίκων και λεπτότερου κλάσματος (κυρίως μεγέθους άμμου). Η διαπερατότητα τους χαρακτηρίζεται από μέση έως υψηλή και η αποστράγγιση από καλή έως πολύ καλή. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής διαπερατότητας k των εν λόγω υλικών εκτιμάται από 10^{-3} έως 10^{-6} m/sec, ενώ στους κατώτερους ορίζοντες των σωρών απόθεσης εκτιμάται ότι αυξάνεται σε 10^{0} έως 10^{-2} m/sec λόγω της παρουσίας πολύ υψηλού ποσοστού κροκαλών και ογκολίθων. Γενικά, η παρατηρούμενη υψηλή διαπερατότητα των αποθέσεων ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ανάπτυξης υψηλής πιεζομετρικής επιφάνειας υπογείων υδάτων στο σώμα των αποθέσεων. Ως προς τη φυσική υγρασία, εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 4% έως 9%, ανάλογα το βάθος εντός του σωρού απόθεσης στο οποίο αναφέρεται. Το υγρό φαινόμενο ειδικό βάρος είναι της τάξης των 23 kN/m^3, ενώ ο βαθμός συμπύκνωσης στη στέψη των σωρών είναι περίπου 95% και χαρακτηρίζεται υψηλός. Τέλος, η γωνία εσωτερικής τριβής φ' εκτιμάται στις 40°, η συνοχή c' από 0 έως 5 kPa και το μέτρο συμπιεστότητας E_s από 50 έως 150 MPa.

9. EXTENDED SUMMARY

INTRODUCTION

Thesis Subject

This thesis describes the determination of the mechanical and physical characteristics of the external limestone waste dumps of Agios Ioannis Mines. These characteristics (such as grading, permeability, Atterberg limits, density, grade of compaction, shear strength, compressibility) contribute to the securement of the waste dumps' stability, to align with the Greek legislation. Thus, this will secure the public health and environmental aspects of the broader area.

The external limestone waste dumps and also the results of the geotechnical evaluation of these are of the following Mines:

- *«Magoula»* (Municipality of Orchomenos, Viotia Prefecture)
- *«Nisi»* (Municipality of Orchomenos, Viotia Prefecture)
- *«Binia»* (Municipality of Orchomenos, Viotia Prefecture)
- *«Tsouka»* (Municipality of Lokron, Fthiotida Prefecture).

Location of Agios Ioannis Mines

The Agios Ioannis Mines are located in the eastern borders of the Viotia – Fthiotida Prefectures, 115 km north of Athens. They have been subject to exploitation due to the FeNi deposits and they are owned by GMM SA LARCO.

Mining method

The traits of the mineralization, and especially the disperse of the Ni metal content and the quantity both horizontally and vertically, the limited ore thickness and the low up to average Ni content, makes the open pit with vertical benches the only plausible and viable method for the exploitation of the deposit.

According to this method, the exploitation of the ore is succeeded by the removal of the overburden Cretaceous limestone through explosives and the extraction of the overburden is conducted by phase to phase, for the extracted ore to be sufficient for the production needs. The hauling of the overburden is done by dump trucks and is gathered in the external waste dump of each mine.

GEOLOGY

The morphology, hydrology, and geology of the area are stated below.

Morphological features

The area of Agios Ioannis is located at the southeast edge of the Fthiotida Prefecture and the north - northeast edge of the Viotia Prefecture. The landscape could be characterized as a semi-mountainous area of a smooth surface with little to average surface inclinations.

Hydrology features

The area of Agios Ioannis belongs hydrologically in the Viotikos Kifissos river basin; with a total expansion of 2.720 km^2. This river basin is divided into 3 basins.

Geological features

The area of the Agios Ioannis Mines is located geologically in the Sub – Pelagonian geotectonic unit. The Sub – Pelagonian geotectonic unit's most significant traits are the existence of the ophiolite complex and the existence of the nickel-iron deposits.

The rock formations that consist the wider area are the following: (from the oldest to the newest)

Upper Triassic – Jurassic: crystal-like limestones, dolomites, dolomitic limestones, alteration formation of schist, chert, and limestone intrusions and ophiolite.

Cretaceous: the base of the Cretaceous consists of a formation of limestone and ophiolite cobbles, it continues with yellowish brecciated limestones, yellowish marl limestones, and micro brecciated limestones. At the base of the Upper Cretaceous, the Ni – iron mineralization is present, which is mainly appeared in three forms. The pissolithic (lower part) and the compact and the silica form (upper part),

Eocene: the Eocene consists of the typical flysch formation (clays, marl, sandstone deposits, and occasionally limestones)

Neogene: the Neogene consists of conglomerates, sandstones, marls, and marl limestones

Quaternary: the quaternary is located mainly in the upper layers of the sediments in the Kopaida basin. It consists mainly of clays, marls, and occasionally lignite intrusions.

FRAGMENTATION PREDICTION BY BLASTING IN OPEN PITS

The fragmentation degree of the blasted material is considered the most significant aspect of the open pits, due to the direct effect on the production line and the cost of drilling, loading, hauling, and crushing of the material.

In general, the cost of the loading, hauling, and crushing is reduced and the cost of the drilling and blasting is increased by the increase of the fragmentation of the blasted material.

Mackenzie (1966, 1967) determined cost curves vs fragmentation, which can be seen in Picture 1, and determined a certain range of fragmentation that attributes to the optimum cost (last diagram of Picture 1).

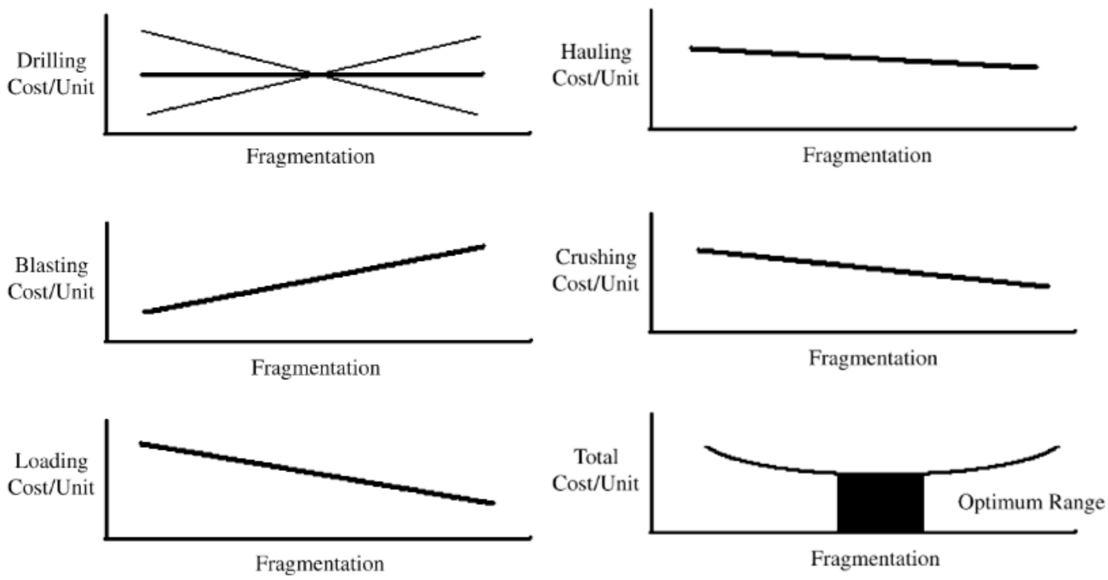


Figure 1. Fragmentation effect on each and overall cost

Based on the above, a prediction of the degree of the muck pile fragmentation is required, and many models have been suggested such as Kuz – Ram model.

Kuz-Ram model

The Kuz-Ram model is the most widely used model for the prediction of the degree of fragmentation up today. The Kuz-Ram model consists of 4 equations:

- 1st equation: The percentage passing curve *P(x)* (Kuznetzov 1973):

$$\boldsymbol{P(x) = 1 - e^{-ln2\cdot\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^{n}}} \qquad [1]$$

Where:

P(x): percentage passing sieve with mesh *x*,

x: fragment size,

x_{50}: average fragment size x_{50} produced by the blasting

n: uniformity index n.

- 2nd equation: Average fragment size x_{50} (in cm) defined as:

$$\boldsymbol{x_{50} = A_r \cdot q^{-0,8} \cdot Q_t^{1/6} \cdot \left(\frac{E}{115}\right)^{-19/30}} \qquad [2]$$

Where:

x_{50}: average fragment size (cm)

A_r: Rock mass factor

q: specific charge (kg/m^3)

Q_t: Total amount of explosive material in blast hole (kg)

E: strength of explosive used,% ANFO

- 3rd equation: Rock mass factor A_r (Lilly 1986):

$$\boldsymbol{A_r = 0,06 \cdot (RMD + RDI + HF)} \qquad [3]$$

Where:

RMD	Rock mass description	10, if friable JF, if joints are vertical 50, if rock mass is massive

JF: Joint Factor = JPS +JPA

JPS	Joint plane spacing	10, if average joint spacing Sj<0.1m 20 if Sj<Xo oversize fragment 50 if Sj<Xo oversize fragment
JPA	Joint plane angle	20, if joints dip out of the face 30, if strike perpendicular to face 40, if joints dip into the face
RDI	Rock density influence	(0.025*p)-50 (kg/m^3)

- <u>4th equation: Uniformity index n</u>

$$\boldsymbol{n} = \left(\mathbf{2{,}2} - \mathbf{14}\cdot\frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{d}}\right)\cdot\left(\sqrt{\frac{\mathbf{1}+\frac{\boldsymbol{S}}{\boldsymbol{B}}}{\mathbf{2}}}\right)\cdot\left(\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{\omega}}{\boldsymbol{B}}\right)\cdot\left(\frac{|\boldsymbol{h_b}-\boldsymbol{h_c}|}{\boldsymbol{h_t}}+\mathbf{0{,}1}\right)^{\mathbf{0{,}1}}\cdot\left(\frac{\boldsymbol{h_t}}{\boldsymbol{H_b}}\right) \qquad [4]$$

όπου:

B: Burden (m)

d: drillhole diameter (mm)

S: Spacing (m)

ω: drilling accuracy standard deviation (m)

h_b: bottom charge length

h_c: column charge length

h_t: total charge length

H_b: bench height

PHOTO ANALYSIS PHOTOGRAMMETRY

The most reliable method for the evaluation of the muck pile grading would be the sieving of all the pile or at least a representative sample of it. But this procedure is impossible, so photo – analysis is a method that can provide a representative grading through digital images. This method has a lot of advantages (Maerz and Zhou, 1998), a lot of disadvantages as well and errors can occur easily.

CURRENT STATE OF THE MINES

The waste material of the studied mines (Binia, Magoula, Nisi, and Tsouka) is been manipulated by explosives and microscopically can be described as pebbles or stones with gravels.

Some of the external waste dumps can reach up to 100m height and the hauling is continuous by dump trucks, forming a physical slope of 35° - 40°.

During the falling of the material, the coarser aggregate ends up at the foot of the deposit and compaction is occurring by the dump trucks' weight.

Due to the concentration of the coarser aggregate to the lower parts of the waste dumps, unconfined movement of the water inside the body of the waste dump is occurring.

EXECUTED TASKS

The external limestone waste material is a product of blasting (patterned mostly from 4,5m×4,5m up to 5m×5m drill grid) and they are a mixture of boulders, cobbles, and gravels. That being said, it is a highly coarse material whose geotechnical behavior (physical and mechanical characteristics) depends on the grading (Holtz & Kovacs 1981).

Grading – Fragmentation analysis

Two photos have been processed (with the Wipfrag software) of 2 blasts at Magoula mine. The results are shown in Picture 2.

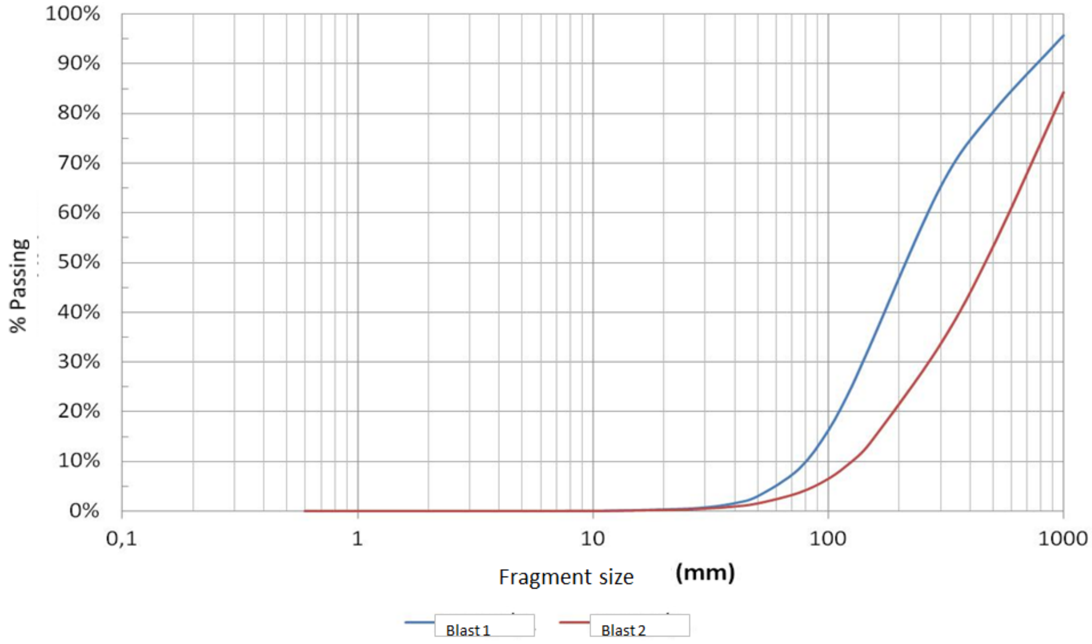


Figure 2. Grading curves of the external waste of Magoula mine

Laboratory testings

There are 10 samples (BD1 – BD10) collected (50 kg each) from the top floor of the waste dump deposits, which are tested in situ through the Troxler device for compaction and water content. In addition, 2 aggregated samples were taken from 10 above mentioned (sample 1 from BD1 – BD5 and sample 2 from BD6 – BD10). All of the samples were tested for grading, Atterberg Limits, and moisture. The results are shown in the tables below.

Table 1. Results of the in situ sample testing.

Sample	Max lab. dry density	Water content	Wet density	Dry density	Grade of compaction
	$\rho_{d\ max}$ (kN/m^3)	w (%)	ρ_{wet} (kN/m^3)	ρ_{dry} (kN/m^3)	(%)
BD1	23,81	3,7	25,50	24,59	103,3
BD2	23,81	4	25,45	24,46	102,7
BD3	23,81	4,1	24,50	23,53	98,8
BD4	23,81	3,5	22,92	22,15	93
BD5	23,81	3,8	22,47	21,65	93,2
BD6	23,78	5,2	24,39	23,19	97,5
BD7	23,78	5,2	23,77	22,60	95
BD8	23,78	5,9	22,24	20,99	88,3
BD9	23,78	4,2	24,51	23,53	98,9
BD10	23,78	3,5	22,90	22,12	93

Table 2. Samples classification results (< 3'').

Sample	moisture (%)	Atterberg limits (%)			Grading - Passing (%)														Classifica tion
	w	LL	PL	PI	3''	2''	1 1/2''	1''	3/4''	1/2''	3/8''	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	gravel	sand	fines	USCS
BD1	5	24,1	13	10,9	100	83	76	69	62	54	51	44	36	24	16	56	28	16	GC
BD2	4,8	25,2	13	12	100	97	88	71	63	53	48	40	33	20	13	60	27	13	GC
BD3	6,5	22,5	13	10	100	98	94	83	75	67	61	49	38	25	17	51	32	17	GC
BD4	8,9	23,2	14	9,6	90	84	81	71	67	60	56	48	39	27	19	52	29	19	GC
BD5	4,3	19,2	13	5,9	93	86	78	64	54	46	42	35	27	16	10	65	25	10	GC-GM
BD6	9,7	28,2	18	10,7	91	83	80	65	60	54	50	41	33	22	16	59	25	16	GC
BD7	6,3	24,7	15	10	100	84	74	65	57	46	42	30	23	15	12	70	18	12	GC
BD8	5,3	18,1	13	4,8	93	90	90	78	70	59	53	43	34	22	14	57	29	14	GC-GM
BD9	8,6	23,7	15	8,4	93	86	78	71	66	56	51	43	33	22	15	57	28	15	GC
BD10	4,4	19,3	13	6,7	100	100	86	76	70	60	54	42	31	20	14	58	28	14	GC-GM

Table 3. Cumulative samples classification results and testing of mod. Proctor (< 1 ½").

Sample	Atterberg limits(%)			Grading - Passing (%)												Mod. Proctor		Classification
	LL	PL	PI	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	gravel	sand	fines	γ_{dmax}	w_{opt}	USCS
mix 1	17	12,5	4,5	100	99	93	81	75	63	50	32	21	37	42	21	23,81	6,5	GC
mix 2	19	13	6	-	100	92	80	73	59	45	29	20	41	39	20	23,78	6,6	GC

mix 1: BD1, BD2, BD3, BD4, BD5

mix 2: BD6, BD7, BD8, BD9, BD10

Geotechnical evaluation

Physical characteristics - Grading

By the comparison of the 2 photo – analyzed images (2 blasts at Magoula mine) and the calculation of the Kuz – Ram model for 6 different Rock mass factors A_r (ranging from 4 up to 9), the results can be shown in Picture 3, and it can be stated that the results of the prediction of the Kuz – Ram model is close to those of the photo – analysis.

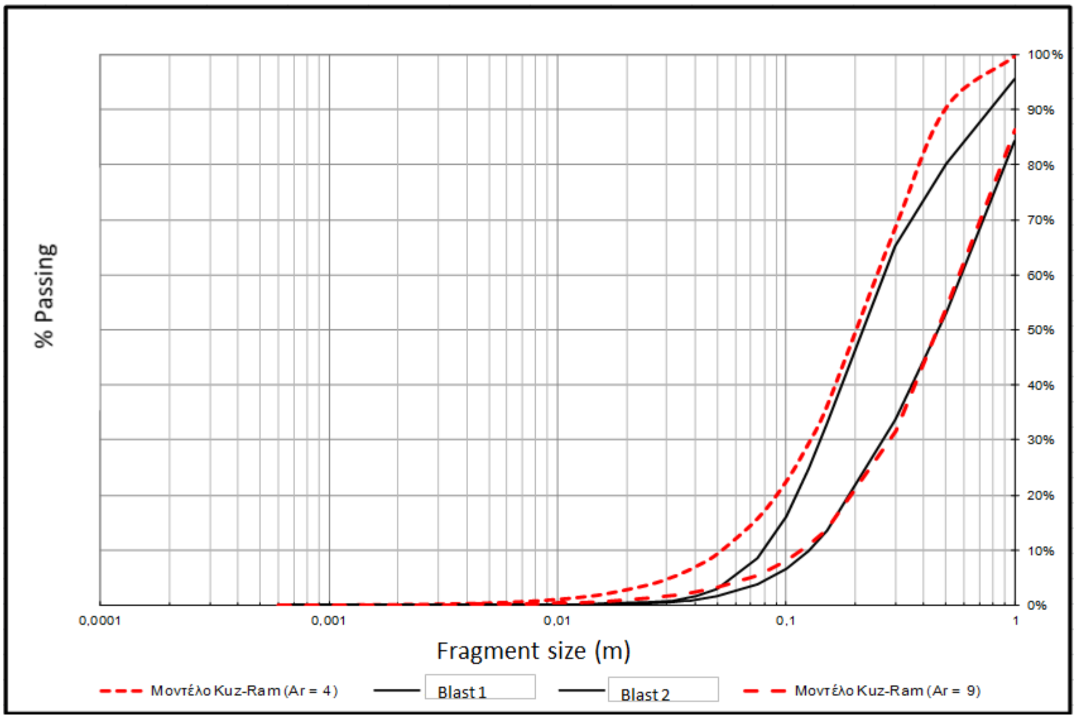


Figure 3. Comparative grading curves of the external waste

Permeability

Due to the coarse material the waste dumps are consist of, the permeability coefficient k is expected between 10^{-3} - 10^{-6} m/sec for the material that is considered pure sands – mixes of sand and gravel. For the lower parts of the waste dumps (cobbles and boulders), the permeability coefficient k is expected between 10^{0} - 10^{-2} m/sec. For the finer parts of the waste dumps, the permeability k is defined by the Hazen empirical formula (1911) which: $k = C \times d_{10}^2$

Where C is between 0.004 and 0.015 with an average figure of C = 0.010. And d_{10} the effective grain size in mm. According to the Hazen formula, an average figure of 10^{-5} m/sec is considered representative of the finer parts of the waste dumps.

MECHANICAL properties

General

The high presence of the coarser aggregate (cobbles, gravels, boulders) in the waste dumps, leads to the fact that the grading is the foremost factor of the mechanical properties of the waste dumps. Also, the surface roughness, the facet of the pressure-induced and the UCS of the intact rock play a major role. (Leps 1970, Barton 1982).

Compressibility

The grading of the waste dumps material cannot be considered a reliable factor to measure the compressibility or to be determined by laboratory means. Therefore, according to the literature, a range of E_s from 50 up to 150 MPa is considered safe.

CONCLUSIONS

The external limestone waste dump material of Agios Ioannis mines is a mixture of boulders and cobbles (90 % b.w.) and gravels and sands (10 % b.w.).

They are considered as highly coarse materials and their geotechnical behavior depends mainly on the grading.

The permeability is moderate to good ranging from 10^{-3} up to 10^{-6} m/sec and for the lower parts is increased from 10^{0} up to 10^{-2} m/sec.

The moisture is ranging between from 4% up to 9%, depending on the depth,

The degree of compaction achieved by the hauling of the dump trucks is app 95%.

The wet apparent density is 23 kN/m^3.

The compressibility E_s ranges from 50 p to 150 MPa.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κουμαντάκης, Ι. (1968). Συμβολή εις την γνώσιν της γεωλογίας της επαρχίας Θηβών. Γεωλ. Χρον. Ελλ. Χωρών. Τ. 21 σ. 35-106, Αθήναι
2. Μαρίνος, Γ. (1958). Περί της κατά γεωτεκτονικάς ζώνας διαιρέσεως της Ανατολικής Ελλάδος. Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Ετ. Τ. ΙΙΙ σ. 73-82 Αθήναι
3. Παρασκευαΐδης, Η. (1972). Η γεωλογία της περιοχής των Βοιοτικών λιμνών, Παραλίμνης και Υλίκης με επισκόπισιν παλαιών και νέων απόψεων. Τεχνικά Χρονικά, τεύχος 3 Αθήναι
4. Τάταρης , Α. – Χριστοδούλου, Γ. – Κούνης, Γ. – Μαραγκουδάκης, Ν. (1970).Η γεωλογική ενότης των προνεογενών – μεσοζωικών σχηματισμών Αττικής – Βοιωτίας – Λοκρίδος και τμήματα της ΒΑκης Πελοποννήσου. Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Ετ. Τ. VII σ. 137-154.
5. Τσουτρέλης, Χ.Ε. (2001). Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων – Τόμος 2: Τεχνική των Ανατινάξεων.
6. Barnes, G.E. (2005). Εδαφομηχανική: Αρχές και Εφαρμογές. Εκδόσεις Κλειδάριθμος (2^{η} αγγλική έκδοση).
7. Barton, N. (1982). Shear strength investigations for surface mining. Third International Conference On Stability In Surface Mining, ed. C.O. Brawner, Vancouver, Canada, June 1981, Volume 3, pp. 171-196.
8. Cunningham, C.V.B. (1983). The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting. First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, pp. 438-453.
9. Cunningham, C.V.B. (2005). The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. Brighton Conference Proceedings 2005, R. Holmberg et al, European Federation of Explosives Engineers.
10. Hazen, A. (1911). Discussion of "Dams on Sand Foundations" by A.C.Koenig, Transactions, ASCE, 73:199-203.
11. Herle, I., Wehr, J., Arnold, M. (2009). Soil improvement with vibrated stone columns – influence of pressure level and relative density on friction angle. In: Geotechnics of Soft Soils – Focus on Ground Improvement – Karstunen & Leoni (eds.).
12. Holtz, R.D., Kovacs, W.D. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall.
13. ICOLD (1993). Rockfill Materials for Rockfill Dams. Bulletin 92, International Commission on Large Dams, Paris.

14. Kuznetzov, V.M. (1973). The Mean Diameter of the Fragments Formed by Blasting Rock. Soviet Mining Science, 2:39-43.
15. Leps, T.M. (1970). Review of shearing strength of rockfill. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 96(4): 1159-1170.
16. Lilly, P.A. (1986). An empirical method of assessing rock mass blastability. The AusIMM/IE Aust Newman Combined Group, large Open Pit Mining Conference, October 1986, pp. 89-92.
17. Mackenzie, A.S. (1966), Cost of explosives – do you evaluate it properly? Mining Congress Journal 52 (5), 32-41.
18. Mackenzie, A.S. (1967), Optimum Blasting. In: Proceedings of the 28th annual Minnesota mining symposium. Duluth MN. pp. 181-88.
19. Maerz, N H., Zhou, W., (1998), Optical digital fragmentation measuring systems – Inherent sources of error. Fragblast, The International Journal for Blasting and Fragmentation, Vol. 2, No. 4 pp 415-431