



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΕ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ

Πτυχιακή Εργασία της
Λυδίας-Ευγενίας Οικονομοπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής : Κ. Ιωάννης Καπαγερίδης

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2.1 Τα χαρακτηριστικά του μαρμάρου	6
2.2 Ιστορικά στοιχεία	9
2.3 Το μάρμαρο στην Ελλάδα	14
2.4 Η εξόρυξη του μαρμάρου.....	16
ΕΡΕΥΝΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΜΑΡΜΑΡΩΝ.....	19
3.1 Γενικά στοιχεία.....	19
3.2 Επιφανειακές αξιολογήσεις	20
3.2.1 Η Σεισμική μέθοδος.....	20
3.2.2 Η μέθοδος ηλεκτρικής αγωγιμότητας	21
3.2.3 Μαγνητική ανίχνευση	22
3.3 Γεωτρήσεις	24
3.3.1 Ερευνητικές γεωτρήσεις.....	25
3.3.2 Γεωτρήσεις αναζήτησης	26
3.3.3 Γεωτρήσεις αναγνώρισης	26
3.4 Γεωλογικοί χάρτες	29
ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ.....	35
4.1 Η ιδιαιτερότητα του μαρμάρου	35
4.2 Συλλογή και χειρισμός δεδομένων	36
4.3 Μέθοδος παρεμβολής σε μπλοκ.....	37
4.4 Η μέθοδος Kriging	40
ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΑΡΤΕΚ VULCAN QUARRY MODELLER.....	43
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ	47
6.1 Τύπος Μαρμάρου.....	49
6.2 Αισθητική - Χρώμα	49
6.3 Ελαττώματα Όγκου (Ραγίσματα, Ανοιχτά Νερά, Σπαθιές)	49
6.4 Τοπογραφικά Δεδομένα.....	50
6.5 Γεωτρήσεις και Τομές.....	51
6.6 Ογκομετρικό Μοντέλο Λατομείου	51
6.7 Μεθοδολογία Εκτίμησης.....	52

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58

Κεφάλαιο 1

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία ερευνάται η εκτίμηση αποθεμάτων ενός λατομείου μαρμάρου με χρήση ποιοτικών δεικτών. Αρχικά γίνεται μία ιστορική αναδρομή και βιβλιογραφική μελέτη για διάφορες μεθόδους εκτίμησης των αποθεμάτων και στη συνέχεια εφαρμόζεται πρακτικά η μέθοδος με τη χρήση του λογισμικού Vulcan Quarry Modeller.

Η Πτυχιακή Εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια τα οποία αναλύονται συνοπτικά παρακάτω.

Στο 2ο κεφάλαιο της ΠΕ γίνεται μία εισαγωγή στα μάρμαρα και τις ιδιότητες των μαρμάρων καθώς και μία ιστορική αναδρομή από την πρώτη εμφάνιση του μαρμάρου στα αρχαία χρόνια μέχρι και σήμερα. Επιπλέον αναφέρονται οι διαφορετικές χρήσεις του μαρμάρου.

Το 3ο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην έρευνα κοιτασμάτων μαρμάρων. Εδώ περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να βρεθεί η θέση των ορυχείων, όπως οι γεωτρήσεις επιφανειακές αξιολογήσεις, και άλλες δειγματοληπτικές μέθοδοι. Επιπρόσθετα, συμπεριλαμβάνονται και αναλύονται γεωλογικοί χάρτες της Ελλάδας και της Ευρώπης.

Στο 4ο κεφάλαιο αναλύονται οι διαφορετικές μέθοδοι εκτίμησης αποθεμάτων μαρμάρου με χρήση ποιοτικών δεικτών. Περιγράφονται τα βήματα που ακολουθούνται, ο τρόπος χειρισμού δεδομένων και υπολογισμός των δεικτών, ενώ αναλύεται περισσότερο η μέθοδος παρεμβολής σε μπλοκ και γίνεται μία αναφορά στη μέθοδο Kriging.

Στο 5ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η εισαγωγή στο λογισμικό Vulcan Quarry Modeller, που είναι το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ενός λατομείου και τον υπολογισμό των προαναφερθέντων δεικτών.

Στο 6ο κεφάλαιο δίνεται ένα παράδειγμα εκτίμησης των αποθεμάτων μαρμάρου σε λατομείου με χρήση του λογισμικού.

Η Πτυχιακή Εργασία ολοκληρώνεται με το 6ο κεφάλαιο, όπου συνοψίζονται όλα τα ευρήματα και συμπεράσματα της ΠΕ και γίνονται προτάσεις για μελλοντική συνέχισή της. Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές και παραρτήματα.

Κεφάλαιο 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 Τα χαρακτηριστικά του μαρμάρου

2.1.1 Η διαδικασία σχηματισμού του μαρμάρου

Το μάρμαρο κατηγοριοποιείται ως μεταμορφωμένος ασβεστόλιθος. Επεξηγηματικά πρόκειται για ασβεστόλιθο που έχει ανακρυσταλλωθεί και έχει υποστεί σκλήρυνση λόγω τις υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, συνθήκες που μπορεί να επικρατούν στα υποστρώματα του εδάφους[1]. Ο ασβεστόλιθος είναι ένα ορυκτό που αποτελείται κυρίως από ασβέστιο και άνθρακα, που προκύπτει φυσικά στο υπέδαφος. Η κύρια ένωση που περιέχεται στο μάρμαρο είναι το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Μερικές μορφές ασβεστόλιθου μπορεί να περιέχουν μικροποσότητες πυριτίου, γραφίτη και οξείδια άλλων μετάλλων όπως σίδηρο ή μαγνήσιο, κάτι που εξαρτάται από τα συστατικά του εδάφους όπου δημιουργήθηκε το μάρμαρο. Τα συστατικά αυτά προσδίδουν ιδιαίτερο χρώμα στο μάρμαρο (Εικόνα 2.1), ενώ τα μάρμαρα που αποτελούνται από 100% ανθρακικό ασβέστιο είναι λευκά[2].



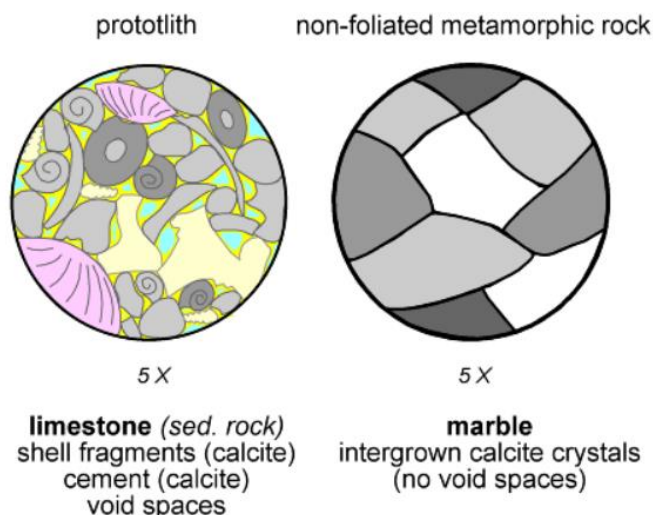
Εικόνα 2.1 Μάρμαρο ερυθρού χρώματος

Πηγή: flexiblelearning.auckland.ac.nz/

Ο σχηματισμός του ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να γίνει με 2 τρόπους, οργανικά και ανόργανα. Τα περισσότερα αποθέματα που έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα έχουν παραχθεί με την οργανική μέθοδο. Οργανισμοί που παράγουν αυτό το άλας για να παράγουν το σκελετό τους, όπως για παράδειγμα τα γαστρόποδα, βραχιόποδα, οστρακοειδή, υπήρχαν από την αρχή της ιστορίας της γης. Οι περισσότεροι από αυτούς τους οργανισμούς ζουν στις θάλασσες και γενικότερα σε υγρό στοιχείο, γι' αυτό τα μεγαλύτερα αποθέματα μαρμάρου σχηματίστηκαν στις θάλασσες και οι οποίες τη σημερινή εποχή μπορεί να είναι βουνά, αλλά και κοντά σε ποτάμια ή λίμνες[3]. Ο ανόργανος σχηματισμός του ανθρακικού ασβεστίου προκύπτει από την χημική αντίδραση ασβεστίου με διοξείδιο του άνθρακα. Και στις δύο περιπτώσεις το άλας παράγεται σε μορφή ιζήματος, το οποίο μετατρέπεται σε ενιαίο πέτρωμα με την πάροδο του χρόνου[4].

Τα αποθέματα ασβεστόλιθου καλύπτουν περίπου το 10% της επιφάνειας της γης και βρίσκονται σε πολλές χώρες, με το περισσότερο να βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος με εύρος 60 μοιρών με κέντρο τον ισημερινό. Ο σχηματισμός ευνοείται από μικρές βροχοπτώσεις ή οποίες μειώνουν την ποσότητα χώματος που αφαιρείται από την επιφάνεια του εδάφους, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια όπου παράγεται ο ασβεστόλιθος[5].

Ο ασβεστόλιθος εξορύσσεται σε διάφορα σημεία παγκοσμίως καθώς αποτελεί βασική πρώτη ύλη για πολλές βιομηχανίες. Κατηγοριοποιείται ανάλογα με την προέλευση, τη χημική σύσταση και τη δομή. Το μάρμαρο θεωρείται μία υψηλής ποιότητας κατηγορία ασβεστόλιθου, λόγω των χαρακτηριστικών του.



Εικόνα 2.2 Κρυσταλλοδομή Ασβεστόλιθου (αριστερά και μαρμάρου (δεξιά)

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το μάρμαρο είναι από τις σκληρότερες μορφές ασβεστόλιθου, καθώς έχει υποστεί μεγάλη συμπίεση, ενώ άλλες μορφές όπως η κιμωλία είναι πολύ πιο μαλακά και πορώδη[6]. Κατά τη διαδικασία μεταμόρφωσης αλλάζει η δομή των κρυστάλλων και έτσι αλλάζει η υφή του πετρώματος. Κατά τα αρχικά στάδια μεταμόρφωσης, οι κρύσταλλοι του άλατος είναι αρκετά μικροί και σπάνε πολύ εύκολα. Καθώς η μεταμόρφωση προχωρά οι κρύσταλλοι μεγαλώνουν και ενώνονται μεταξύ του σχηματίζοντας τα μεγάλα ενιαία πετρώματα που βρίσκουμε τη σημερινή εποχή[7]. Η αλλαγή της κρυσταλλοδομής φαίνεται σχηματικά στην *Εικόνα 2.2*

Άλλες κατηγορίες ασβεστόλιθου περιλαμβάνουν τους βιοσπαρίτες, που είναι η κατηγορία ασβεστόλιθων που απαντάται πιο συχνά, και αποτελούνται από κομμάτι σκελετών ζώων, τους υφάλους, τους οολιθικούς ασβεστόλιθους που αποτελούνται από πολύ μικρούς κόκκους (1 mm), τους δολομίτες που περιέχουν σημαντική ποσότητα ασβεστίου, και την κιμωλία[8]

2.1.2 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά

- Το χρώμα του μαρμάρου, όπως συζητήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξαρτάται από την καθαρότητα του πετρώματος σε ανθρακικό ασβέστιο. Οι προσμίξεις συνήθως έχουν χρώμα μαύρο ή ανοιχτό γκρι, ενώ το σίδηρο και το μαγγάνιο δίνουν κίτρινο και κόκκινο χρώμα[9].
- Το άρωμα του μαρμάρου συνήθως είναι παρόμοιο με το άρωμα του εδάφους.
- Η υφή του γενικά ποικίλει, αλλά το καθαρό μάρμαρο συνήθως είναι πολύ λείο.
- Το μοριακό βάρος του ανθρακικού ασβεστίου είναι 100.09.
- Η αραιότητα της ύλης, με άλλα λόγια η συχνότητα εμφάνισης των πόρων είναι περίπου 0,1% για το μάρμαρο, ενώ μπορεί να φτάσει μέχρι και το 40% για την κιμωλία [10].

- Το μάρμαρο θεωρείται ισχυρό υλικό, απαιτώντας δύναμη περίπου 40 MN/m²[11] για να συνθλιβεί, ενώ η σκληρότητα του είναι κοντά στο 4 στην κλίμακα Mohs[12].
- Η θερμική αγωγιμότητα του είναι σχετικά χαμηλή και εκτιμάται σε εύρος 0.005 – 0.0077 cal*cm/cm²*sec*°C [13].
- Ο ήχος ταξιδεύει μέσα στο μάρμαρο με ταχύτητα 3810 m/s[14].
- Τα μάρμαρα αντιδρούν έντονα με τα οξέα, εκπέμποντας θερμότητα 18,8 kJ/mol [10]. Το αποτέλεσμα είναι η διάβρωση. Ένας από τους λόγους που τα μαρμάρια έργα τέχνης φυλάσσονται συνήθως σε εσωτερικούς χώρους είναι για να προστατεύονται από την όξινη βροχή.
- Αν τα άλατα που περιέχονται στα μάρμαρα διαλυθούν στο νερό, δίνουν pH μεταξύ 8 και 9. Φυσικά η διαλυτότητα τους είναι πολύ μικρή, κατά προσέγγιση 14 mg ανά λίτρο νερού[14].

2.2 Ιστορικά στοιχεία

Ιστορικά, το μάρμαρο έκανε την πρώτη επίσημη εμφάνιση του περίπου τον 6^ο αιώνα προ Χριστού στην αρχαία Ελλάδα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλά αρχαιολογικά ευρήματα από μάρμαρο πριν από εκείνη την εποχή. Αρχαιολόγοι έχουν βρει αγαλματίδια από μάρμαρο τα οποία χρονολογούνται την παλαιολιθική εποχή. Ένα από τα πιο γνωστά είναι η «Αφροδίτη του Willendorf» που βρέθηκε στη Νότια Αυστρία [15] και απεικονίζεται στην *Εικόνα 2.3*. Στην αρχαία Αίγυπτο υπήρχαν ορυχεία ασβεστόλιθου, από τον οποίο κατασκευάστηκαν οι πυραμίδες στη Γκίζα. Οι μικρές ποσότητες μαρμάρου που είχαν εξορυχθεί χρησιμοποιήθηκαν για τη διακόσμηση των τάφων των φαραώ και άλλων υψηλών αξιωματικών. Συγκεκριμένα, τα όργανα τους τοποθετούνταν σε μαρμάρια δοχεία, όπως αυτά που φαίνονται στην *Εικόνα 2.4*, πάνω στα οποία σκαλίζονταν σχήματα ιερών ζώων και συχνά διακοσμούσαν με χρυσό[16].

Τα πρώτα λατομεία αποκλειστικά για μάρμαρο εντοπίζονται στο νησί της Πάρου, ενώ το ορυκτό είχε πολύ μεγάλη ζήτηση εκείνη την εποχή λόγω της εμφάνισης του. Καθώς η ζήτηση μεγάλωνε, ήταν απαραίτητο οι εργάτες των



Εικόνα 2.3 Η Αφροδίτη του Willendorf

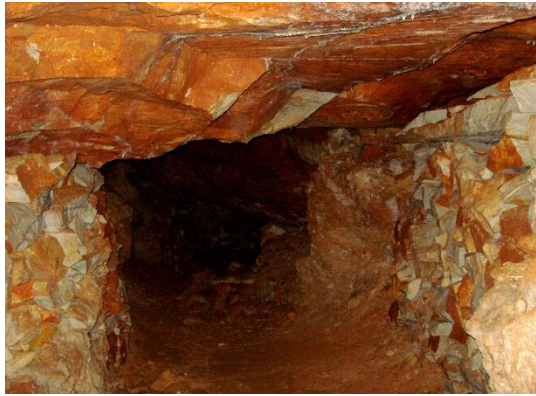
Πηγή: Rohleder, 2001 [16]

Εικόνα 2.4 Μαρμάρινα δοχεία από την αρχαία Αίγυπτο

Πηγή: egyptcentrecollectionblog.blogspot.com/



ορυχείων να σκάβουν όλο και πιο βαθιά στη γη, εκεί που δεν έφτανε φυσικό φως. Έτσι αναγκάζονταν να χρησιμοποιούν λυχνίες, κι έτσι το μάρμαρο εκείνη την εποχή αποκαλούνταν λυχνίτης[17]. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται μία σύγχρονη φωτογραφία από το λατομείο αυτό. Εκτός από την Πάρο, ένα από τα πιο γνωστά λατομεία μαρμάρου στην αρχαία Ελλάδα ήταν στο βουνό της Πεντέλης στην Αττική.



Εικόνα 2.5 Το λατομείο μαρμάρου της Πάρου

Πηγή: commons.wikimedia.org

Καθώς το μάρμαρο ήταν ήδη διαθέσιμο σε μικρά κομμάτια, ήταν ιδανικό για τους καλλιτέχνες για να το σκαλίσουν και να δημιουργήσουν αγάλματα. Πολλά από αυτά είναι παγκοσμίως γνωστά, όπως ο Ερμής του Πραξιτέλους, η Νίκη της Σαμοθράκης και η Αφροδίτη της Μήλου, που σήμερα βρίσκεται στο μουσείο του Λούβρου[18]. Επιπρόσθετα, στην αρχαία Ελλάδα το μάρμαρο χρησιμοποιήθηκε πολύ για την κατασκευή μνημείων, κυρίως ναών, όπως ο Παρθενώνας στην Ακρόπολη και ο ναός του Δία στην Αρχαία Ολυμπία (Εικόνα 2.6), αλλά και θεάτρων, όπως αυτό της Επιδαύρου. Ήταν επίσης δομικό υλικό για τα σπίτια των εύπορων και για τα έπιπλα τους [19].



Εικόνα 2.6 Ο Ναός του Δία στην Αρχαία Ολυμπία

Πηγή: [wikiwand.com](https://www.wikiwand.com)

Η μεταφορά του μαρμάρου ήταν δύσκολο έργο στην αρχαία Ελλάδα. Συνήθως μεταφερόταν σε μικρότερα κομμάτια πάνω σε ξύλινους τροχούς, ή σε κάρα που σερνόταν από ζώα όπως αυτά που φαίνονται στην Εικόνα 2.7. Κατά τα Αλεξανδρινά χρόνια, ο Μέγας Αλέξανδρος και οι ηγέτες που ακολούθησαν,

εντυπωσιασμένοι από τις εξωτικές πέτρες που μετέφεραν τα μάρμαρα για μεγάλες αποστάσεις, ενώ χρησιμοποιούσαν κυρίως μονολιθικές κατασκευές, κάτι που απαιτούσε τη μεταφορά μεγάλων κομματιών μαρμάρου[20].



Εικόνα 2.7 Κάρα μεταφοράς μαρμάρου στα αρχαία χρόνια

Πηγή: Rohleder, 2001 [16]

Η εξόρυξη του μαρμάρου συνεχίστηκε και στη Ρωμαϊκή εποχή. Η ζήτηση παρέμεινε πολύ υψηλή καθώς η Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν το μάρμαρο όπως και οι Αρχαίοι Έλληνες για κατασκευή ναών και άλλων μνημείων (όπως το Κολοσσαίο της Ρώμης), αγαλμάτων, αλλά και δρόμων. Λόγω της ζήτησης τα αποθέματα μαρμάρου εξαντλούνταν γρήγορα, κάτι που οδήγησε τους Ρωμαίους να αναζητούν νέα λατομεία. Δυστυχώς, λίγα πράγματα είναι γνωστά για τις τεχνικές αναζήτησης που εφαρμόστηκαν εκείνα τα χρόνια, καθώς οι επιστήμη της γεωλογίας αναπτύχθηκε κυρίως το 18^ο αιώνα, αλλά πιθανότατα χρησιμοποιούσαν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους για να εκτιμήσουν την ύπαρξη ή όχι μαρμάρου. Βέβαια, ο σημαντικότερος παράγοντας ήταν η τύχη [21].

Τα πρώτα χρόνια μετά τη γέννηση του Χριστού τα λατομεία τέθηκαν υπό κρατικό έλεγχο ώστε να ρυθμίζεται η παραγωγή και μέχρι τις αρχές του δεύτερου αιώνα, η ημερήσια παραγωγή ξεπερνούσε τη ζήτηση. Το σύστημα αυτό άρχισε να καραρρέει τον 4^ο αιώνα εξαιτίας εσωτερικών συγκρούσεων στη Ρωμαϊκή αυτοκρατορία [22]. Κατά τους πολέμους που ακολούθησαν η διάλυση παλαιών μαρμάρινων κατασκευών και η μεταφορά των μαρμάρων ήταν συχνό φαινόμενο. Οι Βενετοί, κατά την 4^η σταυροφορία (12^{ος} αιώνας) κατασκεύασαν

πολλά από τα μνημεία τους από μάρμαρα που ανήκαν παλιότερα στη Βυζαντινή Αυτοκρατορία, και οι Οθωμανοί ακολούθησαν αντίστοιχη πρακτική κατά την κατασκευή αρκετών ναών (τζαμιά).

Η εξέλιξη για την χρήση του μαρμάρου ήρθε στη Βόρεια Ευρώπη μετά το συνέδριο της Βιέννης το 1814. Η μεγαλύτερη παραγωγή ήταν στο ορυχείο της Καρράρα (σημερινή βόρεια Ιταλία) με την ετήσια παραγωγή να αγγίζει τους 140 χιλιάδες τόνους. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας βοήθησε ιδιαίτερα το εμπόριο μαρμάρου, ιδιαίτερα στο κομμάτι της μεταφοράς, με την ανακάλυψη των ατμομηχανών για πλοία και τρένα[15]. Ατμομηχανές χρησιμοποιούνταν και στο χώρο των λατομείων για τη μεταφορά των μαρμάρων, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.8*.



Εικόνα 2.8 Μεταφορά μαρμάρων με ατμομηχανή

Πηγή: commons.wikimedia.org

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ζήτηση έπεσε κατά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο. Η ζήτηση άρχισε να επανέρχεται μέχρι το 1926, μέχρι να πέσει πάλι στο δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο οι ατμομηχανές στα λατομεία άρχισαν να αντικαθίστανται από μηχανές diesel.

Τα σημερινά χρόνια, η χώρα με τη μεγαλύτερη παραγωγή μαρμάρου είναι η Τουρκία, παράγοντας περίπου 40% της παγκόσμιας παραγωγής, ακολουθούμενη από την Ιταλία που παράγει το 18% και την Ελλάδα με 10%, ενώ η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής, εισάγοντας περίπου 64% της παγκόσμιας παραγωγής μαρμάρου [23].

2.3 Το μάρμαρο στην Ελλάδα

Το μάρμαρο, ένα από τα πιο σημαντικά υλικά του ορυκτού μας πλούτου βρίσκεται διασκοπρισμένο σχεδόν σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο. Οι επιχειρήσεις του κλάδου παρουσιάζουν έντονη γεωγραφική συγκέντρωση στην Κεντροανατολική Μακεδονία και στην Αττική. Βασική αιτία της υψηλής αυτής συγκέντρωσης είναι το ότι οι περισσότεροι χώροι λατόμευσης βρίσκονται στη Β. Ελλάδα (Δράμα, Θάσο, Κοζάνη και Βέροια) και κατά συνέπεια τα κόστη μεταφοράς είναι μειωμένα. Η συνολική ετήσια παραγωγή όγκων μαρμάρου στη Ζώνη αυτή εκτιμάται σε 50.000 m³ και πλέον. Το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής κατεργάζεται σε σύγχρονα εργοστάσια της περιοχής.

Δράμα – Καβάλα

Το σημαντικότερο κέντρο εξόρυξης και κατεργασίας του μαρμάρου στην Ελλάδα αποτελεί σήμερα η ευρύτερη περιοχή της Δράμας – Καβάλας. Η περιοχή συγκεντρώνει το 38% των ενεργών λατομείων της χώρας, απο τα οποία προέρχεται πάνω από το 50% της συνολικής παραγωγής πρώτης ύλης. Το 2003 λειτούργησαν σε αυτή 84 λατομεία και παρήγαγαν 701.354 τόνους μαρμάρου. Στα βουνά της περιοχής υπάρχουν τεράστια αποθέματα λευκών και ημίλευκων μαρμάρων όπως τα Λευκά της Θάσου, η Κρυσταλλίνα της Θάσου, του Βώλακα, του Άριστον, του Νέστου, των Πηγών, το ημίλευκο της Καβάλας κ.α. τα οποία λόγω της εξαιρετικής τους ποιότητας είναι ιδιαίτερα γνωστά στη διεθνή αγορά και κυρίως στην Ευρώπη, στις Αραβικές Χώρες και στις ΗΠΑ.

Πελοπόννησος

Στην Πελοπόννησο βρίσκονται περιοχές πλούσιες σε κοιτάσματα μαρμάρου, με κυρίαρχο το νομό Αργολίδας όπου εξορύσσονται κυρίως μάρμαρα απαλών χρωματισμών. Η συνολική ετήσια πρωτογενής παραγωγή μαρμάρου στην Πελοπόννησο το 2003 ανήλθε σε 120.397 τόνους το 2003 προερχόμενους από 26 λατομεία.

Κοζάνη – Ημαθία

Στην περιοχή της Κοζάνης, της Ημαθίας και της Βέροιας εντοπίζονται αξιόλογα κοιτάσματα λευκού και ημίλευκου μαρμάρου με πολύ καλές φυσικοχημικές ιδιότητες. Το 2003 η Κοζάνη και στην Ημαθία η συνολική παραγωγή μαρμάρου ανήλθε στους 67.953 τόνους απο 21 λατομεία.

Μαγνησία

Στη περιοχή του Βόλου-Πηλίου εξορύσσονται μάρμαρα σε ιδιαίτερους χρωματισμούς. Ειδικότερα στην περιοχή της Λάρισας παράγεται το πράσινο μάρμαρο το γνωστό με την ονομασία «Πράσινος Θεσσαλικός». Η παραγωγή μαρμάρου το 2003 έφτασε τους 37.404 τόνους και προήλθε από 8 λατομεία.

Ιωάννινα

Η περιοχή των Ιωαννίνων όπως και η περιοχή της Αργολίδας είναι γνωστή κυρίως για τα μπεζ μάρμαρα τα οποία αξιοποιούνται στην εγχώρια αγορά. Ο αριθμός των λατομείων ήταν 22 από τα οποία παράχθηκαν 23.880 τόνοι.

Αττική

Η ευρύτερη περιοχή της Αττικής αποτελεί ένα από τα αρχαιότερα κέντρα εξόρυξης και επεξεργασίας του μαρμάρου στην Ελλάδα και διεθνώς, καθώς σημαντικό μέρος της παραγωγής εξάγεται σε όλο τον κόσμο.

Στην περιοχή της Αττικής εξορύσσεται το φημισμένου λευκό μάρμαρο Διονύσου-Πεντέλης. Μέχρι το 1976, όταν απαγορεύτηκε για περιβαλλοντικούς λόγους η εκμετάλλευση του πεντελικού μαρμάρου, η παραγωγή όγκων μαρμάρου στην περιοχή έφτανε τα 50.000 m³. Τα Πεντελικά μάρμαρα παρουσιάζουν σχιστότητα, η οποία είναι ιδιότητα που διευκολύνει την όρυξη ογκόλιθων και γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή κατά τη μηχανική επεξεργασία του πετρώματος. Τα μάρμαρα της Πεντέλης έχουν χρώμα λευκό, λεπτό ιστό μεγάλης καθαρότητας χωρίς διάστιξη και διεσπαρμένες φλέβες. Η πρωτογενής παραγωγή προέρχεται από 6 λατομεία και αγγίζει τους 249.274 τόνους.

Κυκλάδες

Σημαντική εξορυκτική δραστηριότητα παρουσιάζεται στις Κυκλάδες με γνωστότερα τα μάρμαρα της Νάξου, της Τήνου και της Πάρου. Η πρωτογενής παραγωγή σε μάρμαρα το 2003 ήταν 15.000 m³ και προήλθε από 17 ενεργά λατομεία.

Μικρότερα κέντρα παραγωγής υπάρχουν στους νομούς Ευβοίας, Μαγνησίας, Βοιωτίας, Αρκαδίας και Ημαθίας.

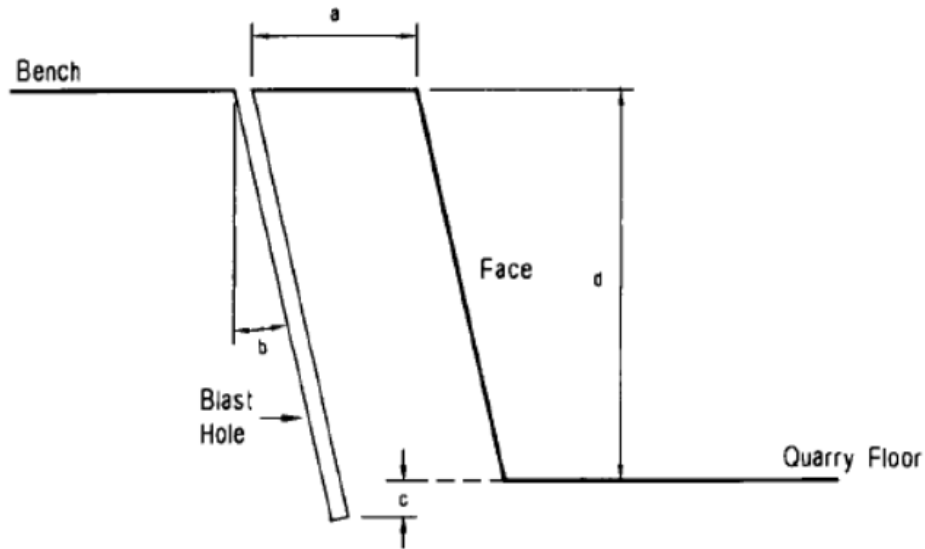
2.4 Η εξόρυξη του μαρμάρου

Η τεχνική εξόρυξης του μαρμάρου είναι παρόμοια με τις τεχνικές που εφαρμόζονται για πολλά άλλα πετρώματα. Η εξόρυξη μπορεί να γίνει τόσο από επιφανειακά κοιτάσματα, όσο κι από λατομεία που βρίσκονται βαθιά στη γη[24]. Συνήθως η επιφανειακή εξόρυξη είναι πιο οικονομική και δίνει μεγαλύτερες ποσότητες μαρμάρου [25].

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία εξόρυξης, είναι απαραίτητο να προηγηθεί ο κατάλληλος σχεδιασμός. Κατά το σχεδιασμό, γίνεται συλλογή γεωλογικών δεδομένων ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος χώρος. Στη συνέχεια γίνεται η εκτίμηση των αποθεμάτων σε σχέση με τον προσδοκώμενο χρόνο ζωής του λατομείου[26]. Οι διαδικασίες αυτές περιγράφονται με λεπτομέρεια στα κεφάλαια 3 και 4.

Το πρώτο βήμα είναι η αφαίρεση του εδάφους που καλύπτει το μάρμαρο. Το πάχος του εδάφους μπορεί να είναι λιγότερο από ένα μέτρο για επιφανειακά λατομεία, μέχρι δεκάδες μέτρα για τα υπόγεια λατομεία. Το πρώτο στρώμα εδάφους αποθηκεύεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρηθεί η γονιμότητα του και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά αφού κλείσει το λατομείο. Στις περισσότερες χώρες προτιμάται η αφαίρεση αυτή να γίνεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που το χώμα είναι ξερό και επομένως ευκολότερα διαχειρίσιμο [27].

Μετά την αφαίρεση του εδάφους ακολουθεί η γεώτρηση. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η γεώτρηση εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος. Οι τοίχοι των οπών συνήθως έχουν μία ελαφριά κλίση, έως 20 μοίρες, για να είναι πιο σταθεροί. Για λόγους ασφαλείας, το μέγιστο ύψος είναι θεμιτό να μην ξεπερνά τα 15 μέτρα, ενώ η διάμετρος κυμαίνεται από 100 ως 150 χιλιοστά [28]. Η γεωμετρία της οπής φαίνεται στην *Εικόνα 2.9*.



Εικόνα 2.9 Γεωμετρία γεώτρησης

Πηγή: Oates, 1998 [7]

Το επόμενο βήμα είναι η τοπική ανατίναξη με χρήση εκρηκτικών. Κατά την ανατίναξη, η έκρηξη περιορίζεται εντός της οπής με χρήση πυρίμαχων πετρών. Σε περίπτωση που κάποιες πέτρες δεν σπάσουν από την αρχική έκρηξη μπορούν να ακολουθήσουν περισσότερες, στοχευμένες εκρήξεις, ή θλίψη με υδραυλικό σφυρί [29].

Το μάρμαρο αφαιρείται από τα τοιχώματα του λατομείου με χρήση υδραυλικών εκσκαφών, όπως αυτός που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10. Για να λειτουργήσουν σωστά οι εκσκαφείς χρειάζεται το μάρμαρο να είναι κομματιασμένο και το έδαφος να είναι σταθερό, γι αυτό και η σωστή εκτέλεση των προηγούμενων βημάτων είναι κρίσιμη. Η μεταφορά του μαρμάρου εκτός του λατομείου για μετέπειτα επεξεργασία γίνεται με χρήση ανατρεπόμενων φορτηγών.



Εικόνα 2.10 Υδραυλικός Εκσκαφέας

Πηγή: hoeoman.com

Μετά την εξόρυξη το μάρμαρο υπόκειται σε επεξεργασία, όπως θλίψη, κοπή, λείανση ή βαφή ώστε να πάρει την απαιτούμενη μορφή για να διατεθεί στο εμπόριο [30].

Κεφάλαιο 3

ΕΡΕΥΝΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΜΑΡΜΑΡΩΝ

3.1 Γενικά στοιχεία

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την έρευνα κοιτασμάτων μαρμάρου είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για πολλά άλλα πετρώματα. Το μάρμαρο, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να εξάγεται τόσο από επιφανειακά λατομεία όσο κι από υπόγεια ορυχεία. Η πλειοψηφία ωστόσο γίνεται από επιφανειακά λατομεία κυρίως για οικονομικούς λόγους.

Το πρώτο κομμάτι της έρευνας είναι ο σχεδιασμός. Είναι απαραίτητο να καθοριστεί το ελάχιστο αποδεκτό μέγεθος καθώς και η ποιότητα των αποθεμάτων. Αυτό εξαρτάται από τον αναμενόμενο ρυθμό εξόρυξης του μαρμάρου αλλά και τον αναμενόμενο χρόνο ζωής του λατομείου και το συνδυασμό αυτών των δύο που θα μεγιστοποιήσει τα κέρδη των επενδυτών [7]. Κατά την εκτίμηση του ρυθμού εξόρυξης του μαρμάρου πρέπει να δοθεί η απαραίτητη ελαστικότητα για τις απώλειες υλικού που ενδεχομένως να προκύψουν κατά την εξαγωγή και την επεξεργασία του. Σε περίπτωση που δεν απαιτείται μεγάλη αρχική επένδυση, μικροί χρόνοι ζωής είναι δυνατό να γίνουν αποδεκτοί, ενώ για μία μεγάλη αρχική επένδυση ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του λατομείου είναι σκόπιμο να είναι μεγαλύτερος από 30 χρόνια [31].

Στη συνέχεια γίνεται η συλλογή γεωλογικών δεδομένων και άλλων χρήσιμων πληροφοριών που υπάρχουν διαθέσιμες. Οι περισσότερες χώρες έχουν κάποιας μορφής γεωλογική υπηρεσία, της οποίας οι γεωλόγοι έχουν συγκεντρωμένα αρκετά δεδομένα όσον αφορά τα αποθέματα μαρμάρου της χώρας, ενώ συνήθως έχουν στη διάθεση τους γεωλογικούς χάρτες αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες. Φυσικά πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε επέμβαση στο έδαφος χρειάζεται να ελεγχθούν οι κανονισμοί της χώρας και να αποκτηθούν οι απαραίτητες άδειες [24].

Για να είναι ελκυστική μία τοποθεσία λατομείου, χρειάζεται να είναι κοντά σε κάποιο μεγάλο αστικό κέντρο, ή να είναι δυνατή η μετακίνηση με σχετικά χαμηλό κόστος.

Κατά κανόνα, η διαδικασία που ακολουθείται για την έρευνα κοιτασμάτων ακολουθεί τα παρακάτω βήματα

- 1) Αναζήτηση δημοσιευμένων τεχνικών αναφορών και σχετικής βιβλιογραφίας
- 2) Μελέτη διαθέσιμων γεωλογικών κι επιφανειακών χαρτών
- 3) Μελέτη αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων
- 4) Προετοιμασία φωτογεωλογικού χάρτη από τις παραπάνω πληροφορίες
- 5) Πραγματοποίηση γεωφυσικής μελέτης της περιοχής από ψηλά
- 6) Εγκατάσταση της βάσης και οργάνωση τοπικών ερευνών
- 7) Πραγματοποίηση γεωλογικών, γεωφυσικών και γεωχημικών ερευνών
- 8) Συλλογή και ανάλυση των ανωτέρω δεδομένων

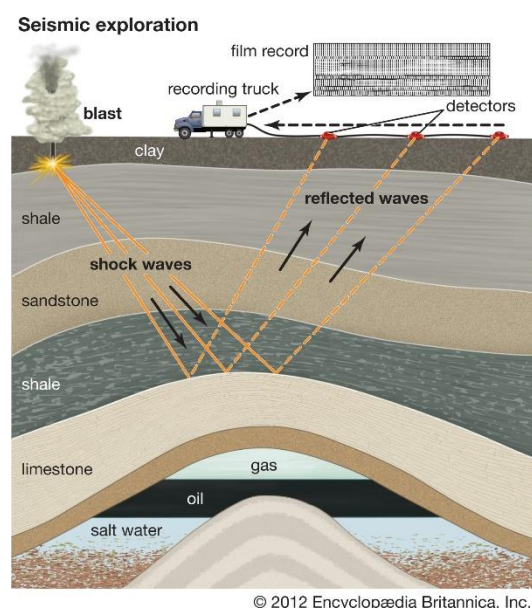
3.2 Επιφανειακές αξιολογήσεις

Η γεωλογική ανάλυση εφαρμόζει επιστημονικές γνώσεις πάνω στη γέννηση και το σχηματισμό των διάφορων πετρωμάτων. Είναι η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται στις έρευνες και όλοι οι μέθοδοι αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται μετά στηρίζονται σε αυτή. Με την εφαρμογή της οι γεωλόγοι μπορούν να αξιολογήσουν τη σύνθεση, την κατανομή και την ηλικία του κάθε εδάφους [32]. Γνωρίζοντας τη διαδικασία και τις συνθήκες οι οποίες χρειάζεται να επικρατούν για το σχηματισμό ενός πετρώματος, οι γεωλόγοι μπορούν να βγάλουν συμπεράσματα για την πιθανότητα ύπαρξης μαρμάρου στην υπό έρευνα περιοχή [33].

3.2.1 Η Σεισμική μέθοδος

Στη σεισμική μέθοδο γίνεται χρήση ενός ελαστικού παλμού ή μίας πιο εκτενούς ελαστικής δόνησης που παράγεται στην επιφάνεια, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.1*. Η δόνηση που προκαλείται από τον παλμό αυτό σε διάφορα σημεία του εδάφους, καταγράφεται από τα μικρά σεισμόμετρα [34]. Καθώς το έδαφος δεν

είναι ομογενές, η ταχύτητα με την οποία μεταδίδεται ο παλμός διαφέρει τόσο κατά μήκος, όσο και κατά βάθος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των ιδιοτήτων του [35]. Η σεισμική μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση αποθεμάτων που βρίσκονται σε βάθος αρκετών χιλιομέτρων, ενώ χρησιμοποιείται συνηθέστερα για την ανίχνευση πετρελαίου ή αερίων και σπανιότερα για πετρώματα όπως το μάρμαρο.

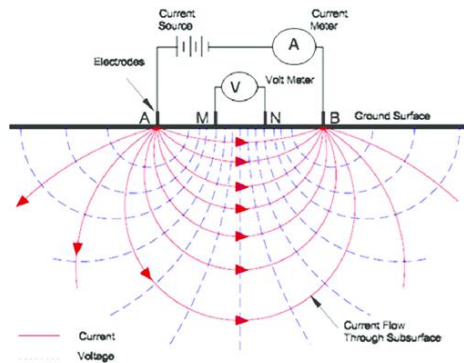


Εικόνα 3.1 Σεισμική μέθοδος

Πηγή: britannica.com

3.2.2 Η μέθοδος ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος με αγωγή, με τη χρήση ηλεκτροδίων (Εικόνα 3.2) είναι δυνατή η άντληση πληροφοριών για τη σύνθεση του εδάφους [36]. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε διαφοροποίηση στην αγωγιμότητα του ρεύματος αλλάζει τη ροή του μέσα από το έδαφος κι αυτό με τη σειρά του επηρεάζει την κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού. Η αγωγιμότητα του εδάφους εξαρτάται μερικώς από το μέγεθος, το σχήμα, την θέση και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των υποστρωμάτων του [37].



Εικόνα 3.2 Μέθοδος ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Πηγή: Muchingami et al., 2012 [36]

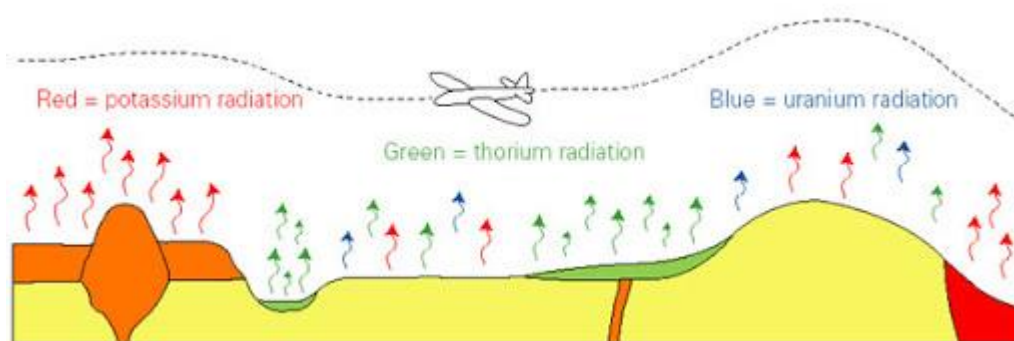
Με εξαίρεση τα κεραμικά και τα μέταλλα, το ρεύμα διέρχεται από τα πετρώματα μέσω του νερού που αυτά περιέχουν στους πόρους τους, καθώς το πέτρωμα αυτό καθαυτό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Η αγωγιμότητα λοιπόν ενός πετρώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο πορώδες είναι [38]. Η έρευνα με τη μέθοδο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας γίνεται συνήθως σε μικρά βάθη, καθώς ο εξοπλισμός για τη μέτρηση του ηλεκτρικού δυναμικού σε μεγαλύτερα βάθη έχει μεγάλο κόστος [39].

3.2.3 Μαγνητική ανίχνευση

Τα πετρώματα περιέχουν μικροποσότητες μετάλλων τα οποία τους προσδίδουν μαγνητικές ιδιότητες. Στα μεταμορφωτικά πετρώματα όπως το μάρμαρο αυτά είναι συνήθως οξειδία του σιδήρου ή του τιτανίου. Με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, είναι δυνατή η παραγωγή ενός μαγνητικού πεδίου και η ανίχνευση του σε διαφορετικό σημείο [40]. Η διαφορά στην ένταση μεταξύ του παραγόμενου και του ανιχνευόμενου πεδίου οφείλεται στις παραμαγνητικές ιδιότητες των μετάλλων που αναφέρθηκαν παραπάνω και εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και τον προσανατολισμό του ορυκτού που ανιχνεύεται [41]. Δυστυχώς, η διαφορά αυτή δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, οπότε η μαγνητική ανίχνευση κατηγοριοποιείται ως ποιοτική μέθοδος.

3.2.4 Ανίχνευση εξ αποστάσεως

Πέρα από διαφορές στην αγωγιμότητα και τα παραμαγνητικά στοιχεία, τα πετρώματα διαφέρουν και ως προς την συγκέντρωση στα ραδιενεργά στοιχεία. Η τελευταία διαφορά δίνει τη δυνατότητα για μία ακόμα μέθοδο επιφανειακής αξιολόγησης των πετρωμάτων. Τα ραδιενεργά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι το ουράνιο, το θόριο και το ισότοπο του καλίου ^{40}K . Τα ισότοπα αυτά κατά τη μεταστοιχείωση τους εκπέμπουν μεταξύ άλλων και ακτινοβολία γάμα χαρακτηριστικής συχνότητας η οποία μπορεί να ανιχνευθεί με χρήση ενός σπεκτρόμετρου και να δώσει πληροφορίες για τη σύσταση του υπεδάφους [42]. Η ανίχνευση των ραδιενεργών στοιχείων μπορεί να γίνει στο επίπεδο του εδάφους με φορητό εξοπλισμό, αλλά και από αέρος καθώς η ακτινοβολία γάμα έχει αρκετά μεγάλη εμβέλεια. Έτσι είναι δυνατή η κάλυψη μεγάλης επιφάνειας εδάφους σε μικρότερο χρόνο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.3*



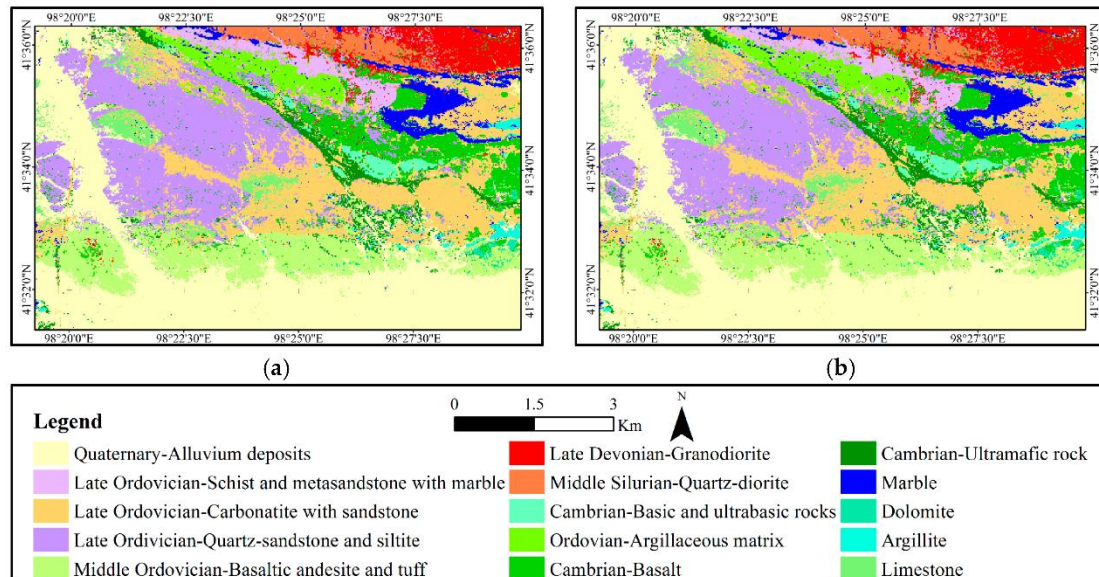
Εικόνα 3.3 Ραδιομετρική έρευνα από αέρος

Πηγή: earthsci.org

Οι ραδιομετρικές τεχνικές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση πετρωμάτων σε βάθος μεγαλύτερο του ενός μέτρου και θεωρείται ημι-ποσοτική μέθοδος, καθώς η ανιχνευόμενη ακτινοβολία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος.

Παρόμοια με την από αέρος ραδιομετρική ανίχνευση, μπορεί να γίνεται και χρήση μίας ειδικής κάμερας για την καταγραφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε συνδυασμό με τις αεροφωτογραφίες [43].

Οι τεχνικές ανίχνευσης εξ αποστάσεως είναι οικονομικές και μπορούν να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις εδάφους. Η σύνθεση των πληροφοριών από τις διάφορες τεχνικές σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με χρήση τεχνικών μηχανικής εκμάθησης προσφέρει ποιοτικές πληροφορίες για τη σύνθεση του εδάφους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4 Γεωλογική χαρτογράφηση από αέρος

Πηγή: Ge et al., 2018 [43]

3.3 Γεωτρήσεις

Οι γεώτρηση είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την έρευνα κοιτασμάτων μαρμάρων, αφού είναι η μόνη από την οποία μπορούν να συλλέγονται απευθείας δείγματα. Από την άλλη πλευρά όμως, κάθε δειγματοληψία κοστίζει αρκετά τόσο σε χρόνο όσο και σε χρήματα, κι έτσι δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν μεγάλες εκτάσεις, όπως μπορεί να γίνει με μεθόδους που περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επομένως, είναι η τελευταία μέθοδος έρευνας που χρησιμοποιείται αφού πρώτα έχει βρεθεί ικανοποιητικός αριθμός στοιχείων που επιβεβαιώνει την ύπαρξη του μαρμάρου από προηγούμενες μεθόδους [44].

Σκοπός των γεωτρήσεων είναι η αναγνώριση και έρευνα των πετρωμάτων που βρίσκονται στο βάθος, η γεωλογική και τεκτονική δομή αυτών, καθώς και η αναζήτηση και αναγνώριση κοιτασμάτων πρώτων υλών. Ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο τις χρησιμοποιούμε διακρίνουμε ερευνητικές γεωτρήσεις, γεωτρήσεις αναζήτησης και γεωτρήσεις αναγνώρισης. Με τη γεώτρηση μπορούμε να ερευνήσουμε το υπέδαφος μέχρι και 2.000 μέτρα βάθος για κοιτάσματα μεταλλεύματος και 7.500 μέτρα βάθος για κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αν και η μέθοδο των γεωτρήσεων είναι η ακριβότερη όλων των μεθόδων αναζήτησης, συμφέρει γιατί αφενός συχνά είναι η μοναδική μέθοδος με την οποία μπορούμε να ερευνήσουμε το υπέδαφος και αφετέρου με τη γεώτρηση είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια τη γεωλογία και τεκτονική, τη γεωμετρία μεταλλοφόρων σωμάτων καθώς και τη χημική σύστασή τους και συνεπώς την ποιότητα, αλλά και τη ποσότητα της μεταλλοφορίας. Η τοποθέτηση των γεωτρήσεων γίνεται συνήθως με ένα δίκτυο σημείων γεωτρήσεων.

3.3.1 Ερευνητικές γεωτρήσεις

Ερευνητικές είναι οι γεωτρήσεις, οι οποίες μας βοηθούν στην εξήγηση βασικών προβλημάτων της γεωλογικής δομής του υπεδάφους σε περιοχές οι οποίες έχουν ερευνηθεί λίγο ή δεν έχουν ερευνηθεί καθόλου. Ανάλογα μας βοηθούν οι ερευνητικές γεωτρήσεις στην έρευνα:

- 1) Των πετρολογικών και λιθοφασικών ομοιομορφιών του υπεδάφους στο οποίο γίνονται οι γεωτρήσεις.
- 2) Των τεκτονικών συνθηκών που επικρατούν.
- 3) Περιοχών μεταλλοφορίας ή περιοχές όπου υπάρχουν προϋποθέσεις για τον σχηματισμό μεταλλοφορίας.
- 4) Της ορυκτολογικής σύστασης και παραγένεσης της μεταλλοφορίας καθώς και τον γενετικό τύπο αυτής.

Ανάλογα με το αντικείμενο για το οποίο γίνονται οι ερευνητικές γεωτρήσεις και το βάθος μέχρι το οποίο θα φθάσουν αυτές, διακρίνουμε:

- 1) Βασικές γεωτρήσεις.
- 2) Γεωτρήσεις χαρτογράφησης.
- 3) Γεωτρήσεις δομής.

3.3.2 Γεωτρήσεις αναζήτησης

Γεωτρήσεις αναζήτησης είναι οι γεωτρήσεις εκείνες με τις οποίες μπορούν να εντοπισθούν και να αποδειχθούν σε μια περιοχή έρευνας, εκμεταλλεύσιμες συγκεντρώσεις στερεών ή υγρών ορυκτών υλών. Πολλές φορές επιτυγχάνεται ήδη με τις ερευνητικές γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις αναζήτησης βασίζονται κατά κανόνα σε προγράμματα αναζήτησης, τα οποία ανάλογα με την τεχνικοοικονομική κατάσταση (συνθήκες) καθορίζουν τη θέση, τον αριθμό των γεωτρήσεων καθώς και το βάθος αυτών.

Ανάλογα με το σκοπό που έχει η γεώτρηση αναζήτησης είναι και το βάθος μέχρι το οποίο μπορεί να φθάσει. Η περιγραφή του πυρήνα και γενικά οι παρατηρήσεις και η έρευνα σε μια γεώτρηση είναι αναλυτικότερες όσο πιο κοντά βρίσκεται κανείς στο μεταλλοφόρο σχηματισμό. Εδώ γίνεται και συστηματική πλέον δειγματοληψία για τη λεπτομερή εξακρίβωση της ορυκτολογικής και χημικής σύστασης της μεταλλοφορίας.

3.3.3 Γεωτρήσεις αναγνώρισης

Οι γεωτρήσεις αναγνώρισης είναι γεωτρήσεις, με τις οποίες γίνεται λεπτομερής έρευνα μιας μεταλλοφορίας η οποία έχει ήδη αποδειχθεί κατά την αναζήτηση. Η λεπτομερής έρευνα περιλαμβάνει:

- 1) Την κύρια οριοθέτηση του κοιτάσματος.
- 2) Την εσωτερική δομή και ποιότητά του.
- 3) Τις μεταβολές του πάχους και της περιεκτικότητάς του.
- 4) Την εξήγηση των βασικών τεχνικών προβλημάτων.

Οι γεωτρήσεις αναγνώρισης τοποθετούνται στα πλαίσια βασικών γεωλογικών και τεχνικο-οικονομικών προγραμμάτων. Από τα προγράμματα αυτά εξαρτάται και η θέση, ο αριθμός και το βάθος των γεωτρήσεων καθώς επίσης εάν θα χρησιμοποιηθούν γεωτρήσεις με ολική απόληψη πυρήνα ή όχι.

Ανάλογα με το σκοπό γεώτρησης, ισχύει ότι η γεωτρήσεις αναγνώρισης αποτελούν ταυτόχρονα και γεωτρήσεις αξιοποίησης. Ακόμα είναι δυνατό κατά την διεξαγωγή μιας γεώτρησης να αλλάξει ο αρχικός σκοπός που τοποθετείται. Π.χ. να αξιολογηθεί μια γεώτρηση αναγνώρισης ένα ορισμένο βάθος σαν ερευνητική γεώτρηση, ενώ αντίθετα μια επιτυχής ερευνητική γεώτρηση να αξιολογηθεί αυτόματα σαν γεώτρηση αναζήτησης ή αναγνώρισης. Ένα βασικό ρόλο για την τοποθέτηση γεωτρήσεων παίζει παράλληλα με την επιτυχίας αυτής και το κόστος της γεώτρησης.

Για τη λύση του προβλήματος των γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται στην αναζήτηση και αναγνώριση από την πλευρά της τεχνικής γεωτρήσεως μεγάλου βάθους μια σειρά δοκιμασμένων μεθόδων, μηχανημάτων και εγκαταστάσεων. Οι σημαντικότερες από τις μεθόδους αυτές είναι η μέθοδος γεωτρήσεων Crealuis από το 1.887. Χρησιμοποιούνται κυρίως οι μέθοδοι με περιστροφικά, κρουστικά και κοχλιωτά γεωτρήματα. Για κάθε μια από τις μεθόδους αυτές και ανάλογα και με το βάθος έχουν αναπτυχθεί ανάλογα εξαρτήματα π.χ. πύργοι γεώτρησης, σμίλες, κλπ. Ποια από όλες τις μεθόδους θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται ιδιαίτερα από:

- 1) Το βάθος.
- 2) Τη κατάσταση του γεωλογικού σχηματισμού.
- 3) Τον τρόπο και μέγεθος των δειγμάτων.
- 4) Γεωγραφικούς, κλιματικούς παράγοντες.

Το κόστος μιας γεώτρησης εξαρτάται ιδιαίτερα από:

- 1) Τους γεωγραφικούς παράγοντες (βατότητα ή όχι της περιοχής).
- 2) Γεωλογικούς παράγοντες (βάθος, κατάσταση του γεωλογικού σχηματισμού).
- 3) Τεχνικούς παράγοντες (μέθοδος γεώτρησης, τύπος μηχανήματος).

- 4) Κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες (ρύθμιση χρόνου εργασίας, μισθοί, ειδικότητα των γεωτροπανιστών).

Για να κρατηθεί το κόστος σε λογικά πλαίσια ή να είναι λιγότερα πρέπει να προσεχθούν τα ακόλουθα:

- 1) Χρήση γεωτρητικών μηχανημάτων με μικρή διάμετρο πυρήνα και ψηλό αριθμό περιστροφών.
- 2) Γεώτρηση χωρίς πυρήνα.
- 3) Χρήση διευθυνόμενων γεωτρήσεων.

Οι γεωτρήσεις είναι η περισσότερο διαδεδομένη μορφή τεχνική διάνοιξης για την αναζήτηση και αναγνώριση κοιτασμάτων, γιατί παρουσιάζουν περισσότερα προτερήματα σε σχέση με τις άλλες μεταλλευτικές μεθόδους. Κάποια κύρια προτερήματα από αυτά βρίσκονται:

- 1) Στο βαθμό μηχανοποίησης και αυτοματισμού και την έτσι επίτευξη υψηλής παραγωγικότητας.
- 2) Στο ότι για την αναζήτηση και αναγνώριση μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά γεωτρήματα ταυτόχρονα.
- 3) Οι γεωτρήσεις είναι δυνατές σε περιοχές στις οποίες δεν μπορούν να εφαρμοσθούν άλλες μεταλλευτικές μέθοδοι.

Η διαδικασία της γεώτρησης είναι όμοια με αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.3. Κατά τη διαδικασία της γεώτρησης συλλέγονται γεωλογικά δείγματα που χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση του μαρμάρου στο εργαστήριο. Η γεώτρηση επίσης επιτρέπει τις μετρήσεις *in situ*, με άλλα λόγια απευθείας στα υποστρώματα του εδάφους [45].

Η διάμετρος της οπής μπορεί να είναι από 2.5 μέχρι και 4 ίντσες, ανάλογα με το μέγεθος του απαιτούμενου δείγματος. Η δειγματοληψία γίνεται συνήθως ανά 1 μέτρο. Είναι σκόπιμο να ληφθούν δείγματα από την επιφάνεια του εδάφους και από αρκετά ενδιάμεσα βάθη μέχρι και το επιθυμητό [46].

Η ποιότητα των δειγμάτων επηρεάζεται αρκετά από τα χαρακτηριστικά του εργαλείου που πραγματοποιεί τη δειγματοληψία, ή αλλιώς δειγματολήπτη. Ένας δειγματολήπτης φαίνεται στην *Εικόνα 3.5* [47]. Για παράδειγμα ένα μεγάλο

πάχος τοιχωμάτων, που υποδηλώνει μεγάλη εξωτερική διάμετρο σε σχέση με την εσωτερική μπορεί να προκαλέσει παραμορφώσεις από τη μετατόπιση υλικού. Παραμορφώσεις μπορούν να προκληθούν επιπλέον κι από παραμορφωμένες ή λυγισμένες κοπτικές ακμές και σκόνη ή σκουριά που προκαλεί εσωτερική τριβή [48].



Εικόνα 3.5 Δειγματολήπτης

Πηγή: Timoney et al., 2020 [47]

Μετά τη συλλογή του δείγματος είναι σημαντικό να καταγραφεί αμέσως η ακριβής τοποθεσία από την οποία συλλέχθηκε καθώς, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται συλλογή δειγμάτων από αρκετά σημεία. Κατά τη μεταφορά του στο εργαστήριο το δείγμα πρέπει να προστατεύεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και να μην αφηθεί να ξεραθεί, επειδή κάτι τέτοιο μπορεί να αλλοιώσει τα χαρακτηριστικά του [49].

3.4 Γεωλογικοί χάρτες

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα στο κεφάλαιο, οι γεωλογικοί χάρτες είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο με το οποίο μπορούν να εντοπιστούν τα πιθανά μέρη όπου υπάρχει μάρμαρο, αλλά και πολλά άλλα υλικά του υπεδάφους. Η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει την αρκετά λεπτομερή καταγραφή του υπεδάφους και τη γρήγορη πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων [50].

Ο γεωλογικός χάρτης αποτελεί ένα σύνθετο χαρτογραφικό προϊόν που αποτυπώνει τη γεωλογική δομή/εικόνα μιας περιοχής μελέτης σε τέσσερις διαστάσεις (x, y, z και χρόνος) σε συνδυασμό με το τοπογραφικό υπόβαθρό της. Η εκπόνηση ενός γεωλογικού χάρτη ξεκινά με τη χαρτογράφηση πεδίου και τη λήψη δειγμάτων και ολοκληρώνεται με την επεξεργασία των δεδομένων και τη χαρτογραφική απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον. Ο έλεγχος και η συνακόλουθη εκτίμηση της ποιότητας ενός γεωλογικού χάρτη αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο της χαρτογραφικής παραγωγής και πρέπει να πραγματοποιείται ενδελεχώς από εξειδικευμένους επιστήμονες, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αρτιότητα, η ορθότητα και η λειτουργικότητα του τελικού χαρτογραφικού προϊόντος, πριν την έκδοση και τη διάθεσή του στο κοινό. Ο αξιολογητής ή οιαξιολογητές, αν πρόκειται για ομάδα ειδικών, οφείλουν να μελετήσουν λεπτομερώς τον γεωλογικό χάρτη και να εντοπίσουν τυχόν σφάλματα ή παραλείψεις που άπτονται αφενός της γεωλογικής ερμηνείας του χώρου και του χρόνου (π.χ. η λιθοστρωματογραφική ακολουθία των εμφανιζομένων σχηματισμών, η θέση ή το είδος ενός ρήγματος) και αφετέρου της χαρτογραφικής σύνθεσης και της τήρησης των αρχών της χαρτογραφίας (περιεχόμενο, ορθότητα, πληρότητα, επιλογή χρωμάτων – συμβολισμών, ονοματολογία, ευκρίνεια, οπτική ισορροπία, ιεραρχική οργάνωση κλπ.).

Η κατασκευή ενός γεωλογικού χάρτη απαιτεί τη συνεργασία πολλών διαφορετικών ειδικοτήτων της επιστήμης της γεωλογίας όπως χαρτογράφοι υπαίθρου, παλαιοντολόγοι (βιοχρονολογήσεις), ιζηματολόγοι, γεωχρονολόγοι (ισοτοπική γεωλογία), ορυκτολόγοι, πετρογράφοι, κοιτασματολόγοι, ειδικοί στην γεωπληροφορική (GIS, ψηφιακή χαρτογραφία, τηλεπισκόπηση κλπ) κλπ. Η συνολική διαδικασία από τη χαρτογράφηση πεδίου μέχρι και την έκδοση περιλαμβάνει πολλά επιμέρους στάδια με κύρια εξ αυτών τη βιβλιογραφική ενημέρωση, τη γεωλογική – τεκτονική χαρτογράφηση πεδίου, τη δειγματοληψία, τις εργαστηριακές αναλύσεις, τη σύνθεση της χειρόγραφης μακέτας, την ψηφιακή χαρτοσύνθεση και έκδοση του τελικού προϊόντος. Ένας τυπικός γεωλογικός χάρτης αποτελείται από παρακάτω βασικά δομικά στοιχεία:

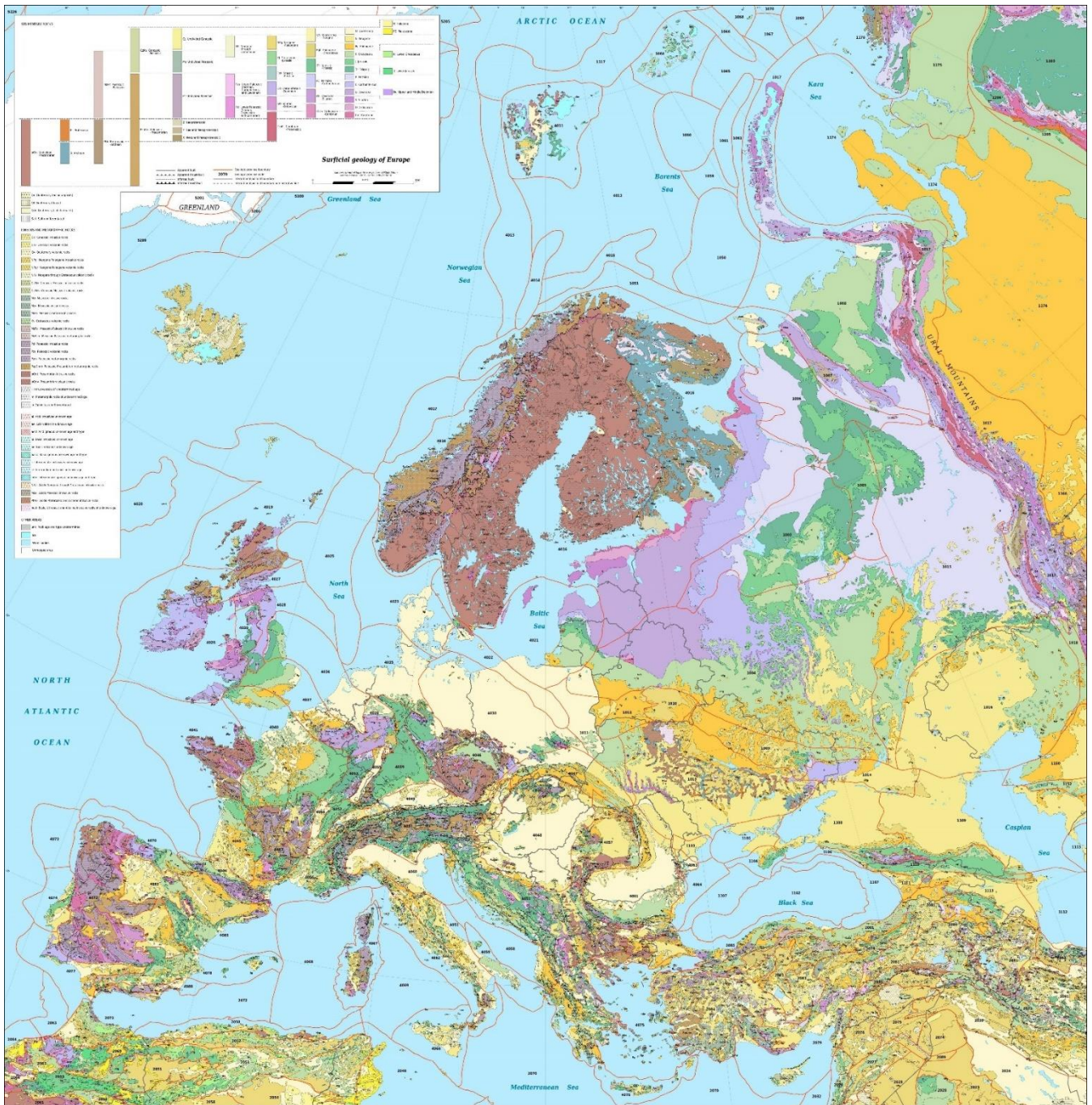
- 1) Κύριο σώμα/θέμα χάρτη - περιοχή χαρτογράφησης: Περιλαμβάνει τη χαρτογραφούμενη περιοχή (εντός πλαισίου συντεταγμένων) επί του τοπογραφικού υποβάθρου με το σύνολο των σημειακών, γραμμικών και επιφανειακών γεωλογικών στοιχείων.
- 2) Γεωλογική/ες τομή/ες: Αποτελεί τη γραφική απεικόνιση της τρίτης διάστασης, δηλαδή της γεωλογικής δομής στο βάθος. Συνήθως επιλέγεται η σχηματική απόδοση της εγκάρσιας γεωλογικής τομής στη διεύθυνση της γεωλογικής/τεκτονικής δομής υπό την κλίμακα του χάρτη, για την αποτύπωση των πραγματικών γεωλογικών συνθηκών κατά την κατακόρυφη έννοια.
- 3) Λιθοστρωματογραφική/ές στήλη/ες: Αποτελεί τη γραφική απεικόνιση της αλληλουχίας των γεωλογικών σχηματισμών (λιθολογικά, ιζηματολογικά και δομικά στοιχεία, μέγιστοπάχος, απολιθώματα κλπ).
- 4) Γεωλογικό υπόμνημα: Περιγράφονται αναλυτικά τα ορυκτολογικά, πετρογραφικά, ιζηματολογικά, στρωματογραφικά, γεωμορφολογικά, τεκτονικά κλπ στοιχεία των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στον χάρτη, η ηλικία, το πάχος και τα απολιθώματα που φέρουν οι επιμέρους σχηματισμοί. Δίπλα στο αναλυτικό κείμενο τοποθετείται ο εκάστοτε συμβολισμός του γεωλογικού σχηματισμού («κουτάκι» συμβόλου με χρώμα ή/και μοτίβο – legend box). Επίσης, περιγράφονται συνοπτικά τα γραμμικά και σημειακά στοιχεία που απαντώνται στον χάρτη δηλαδή γεωλογικά όρια, επωθήσεις, τεκτονικές επαφές, ρήγματα, άξονες πτυχών, διεύθυνση και κλίση στρωμάτων, μεταλλεία κλπ. Δίπλα στο συνοπτικό κείμενο τοποθετείται το εκάστοτε γραμμικό ή σημειακό σύμβολο για κάθε γραμμική ή σημειακή γραμμική οντότητα του χάρτη.
- 5) Κλίμακα: Ο σταθερός λόγος των οριζόντιων αποστάσεων μετρούμενων στο φύλλο του χάρτη και των αντίστοιχων στην επιφάνεια της Γης. Συνήθως επιλέγεται η γραφική και η αριθμητική απεικόνιση της κλίμακας του χάρτη.
- 6) Προβολικό σύστημα συντεταγμένων: Αναφέρεται το χρησιμοποιούμενο σύστημα συντεταγμένων.
- 7) Χάρτης αναφοράς: Απεικονίζει σχηματικά τον χώρο που πραγματεύεται ο γεωλογικός χάρτης σε σχέση με μία ευρύτερη και περισσότερο αναγνωρίσιμη περιοχή.
- 8) Συντάκτες και λοιπές πληροφορίες: Αναφέρονται τα ονόματα της ομάδας των επιστημόνων που συμμετείχαν στην χαρτογράφηση πεδίου, την ανάλυση των δεδομένων, την ψηφιακή έκδοση του χάρτη και λοιπά στοιχεία, όπως η χρονική περίοδος χαρτογράφησης, το έτος έκδοσης, η χρηματοδότηση κλπ.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα γεωλογικών χαρτών. Η *Εικόνα 3.6* απεικονίζει έναν παγκόσμιο χάρτη, όπου τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν σημαντική παρουσία αποθεμάτων μαρμάρου. Η *Εικόνα 3.7* απεικονίζει έναν γεωλογικό χάρτη της Ευρώπης, ενώ στην *Εικόνα 3.8* φαίνεται ένας γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας [51].



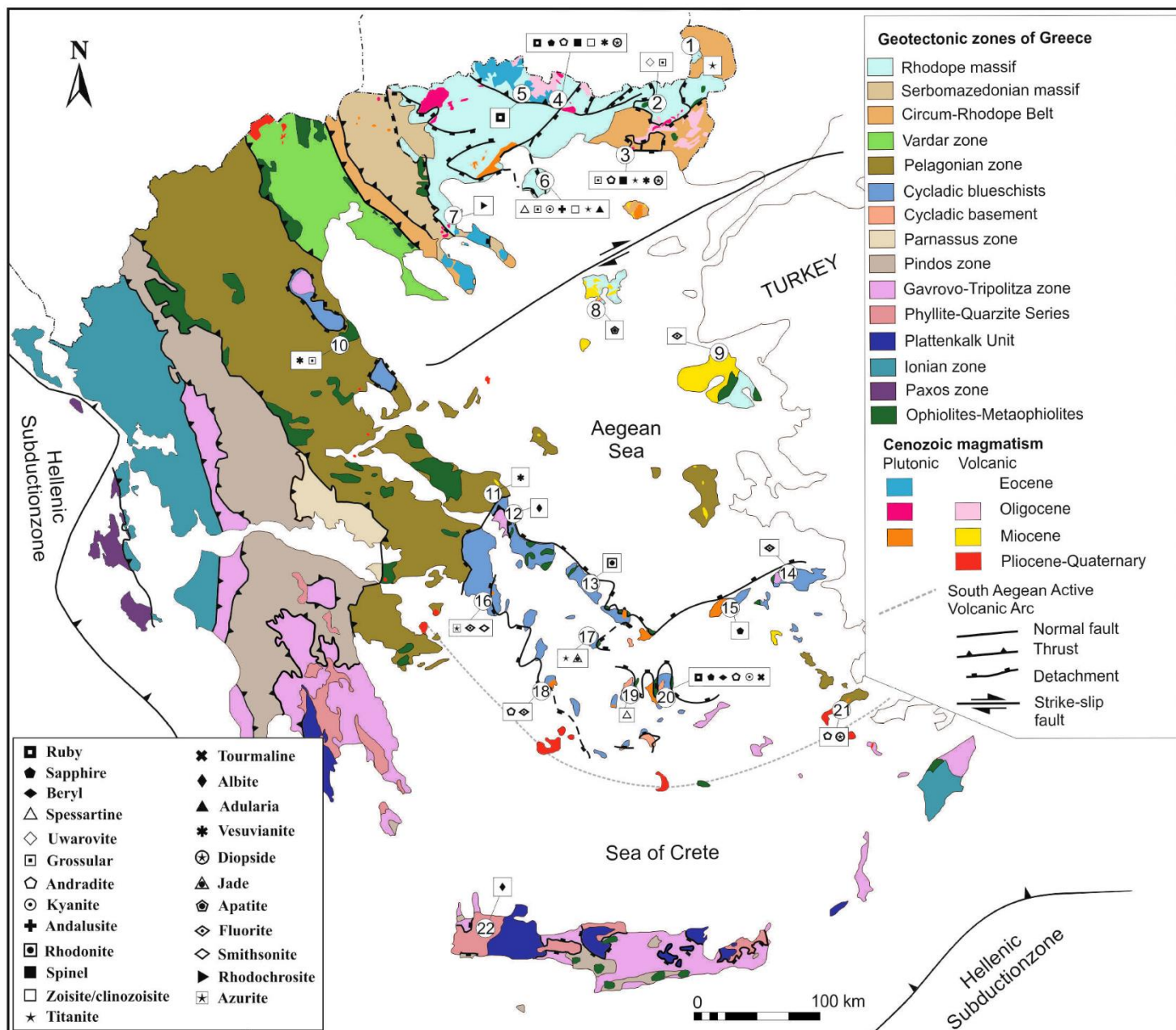
Εικόνα 3.6 Παγκόσμιος Χάρτης Μαρμάρων

Πηγή: *shutterstock.com*



Εικόνα 3.7 Γεωλογικός Χάρτης Ευρώπης

Πηγή: wikipedia.org



Εικόνα 3.7 Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας

Πηγή: Voudouris et al., 2019 [51]

Κεφάλαιο 4

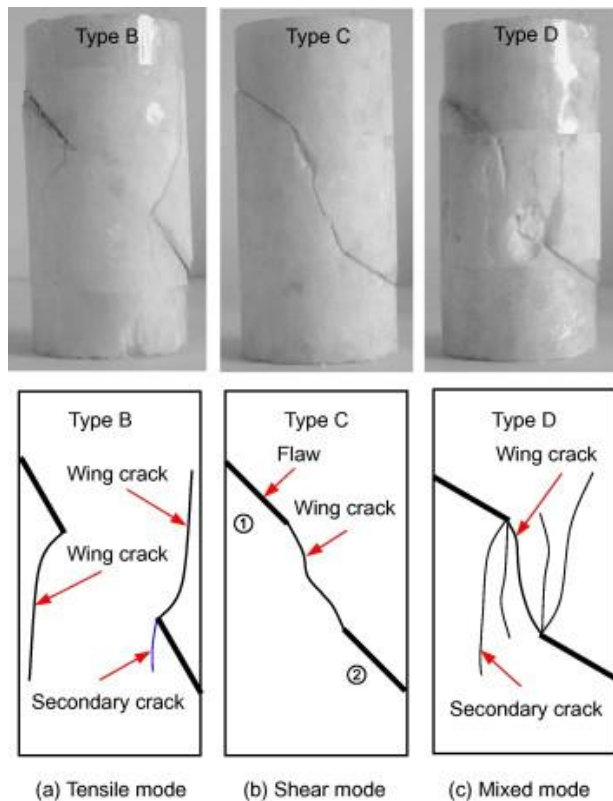
ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ

4.1 Η ιδιαιτερότητα του μαρμάρου

Στα περισσότερα ορυκτά, ο όρος αποθέματα χρησιμοποιείται για την περιγραφή του συνολικού βάρους του ορυκτού που βρίσκεται στο λατομείο, του οποίου η αξία είναι μεγαλύτερη από το κόστος που απαιτείται για να εξορυχθεί. Όπως είναι αναμενόμενο, ο υπολογισμός των αποθεμάτων είναι ζωτικής σημασίας για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής του λατομείου, αλλά και της οικονομικής του βιωσιμότητας [52].

Καθώς το μάρμαρο αποτελεί κυρίως διακοσμητικό υλικό, η αξία του καθορίζεται από την παρουσία ή απουσία οπτικών ελαττωμάτων και σε μικρότερο βαθμό από τις φυσικές ιδιότητες του, όπως η σκληρότητα και η αντοχή σε θλίψη [53]. Ένα παράδειγμα οπτικών ελαττωμάτων που μπορεί να έχει το μάρμαρο είναι η εμφάνιση ρωγμών, όπως αυτές που φαίνονται στην *Εικόνα 4.1*. Ακριβώς επειδή η αισθητική ποιότητα των αποθεμάτων είναι δύσκολο να διαπιστωθεί πριν αυτό εξορυχθεί, δεν υπάρχει μία παγκοσμίως αποδεκτή μέθοδος για τον ορισμό των αποθεμάτων ενός λατομείου [54].

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν τα απαραίτητα δεδομένα και οι διαδικασίες που απαιτείται για την εφαρμογή των πιο διαδεδομένων μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τα λατομεία μαρμάρου, με ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο παρεμβολής σε μπλοκ.



Εικόνα 4.1 Ρωγμές εντός του μαρμάρου

Πηγή: Yang et al., 2008 [53]

4.2 Συλλογή και χειρισμός δεδομένων

Τα δεδομένα που χρειάζεται να συλλεχθούν χρειάζεται να είναι σε τρισδιάστατη μορφή, με άλλα λόγια σε έναν πίνακα όπου θα φαίνεται η κατανομή τους στο χώρο. Επιπλέον, θεωρείται αυτονόητο ότι αν χρησιμοποιούνται δεδομένα από αρχαιότερες πηγές, είναι απαραίτητη η ψηφιοποίηση τους. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται αεροφωτογραφίες, αυτές μπορούν να ψηφιοποιηθούν με τη χρήση ενός σαρωτή (scanner) και ενός λογισμικού αναγνώρισης και επεξεργασίας εικόνων. Με τη χρήση σύγχρονης τεχνολογίας και φορητών υπολογιστών γίνεται δυνατή η αυτόματη αποθήκευση των δεδομένων από τις μεθόδους ανίχνευσης αποθεμάτων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 απευθείας σε ψηφιακή μορφή, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα όργανα ανίχνευσης, που μπορούν να ανιχνεύσουν παράλληλα με τις επιθυμητές ιδιότητες και τη θέση του δείκτη [55].

Στην περίπτωση του μαρμάρου, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προκύπτουν κυρίως από τις γεωτρήσεις και από ανάλυση των ορατών επιφανειών του λατομείου, καθώς και από τοπογραφικά δεδομένα. Με βάση

αυτά δημιουργείται μία βάση δεδομένων, η οποία περιέχει πεδία που υποδεικνύουν το είδος και την ποιότητα του μαρμάρου. Τέτοια πεδία μπορεί να αφορούν το αρχικό χρώμα, την υφή και τις ρωγμές του μαρμάρου. Επίσης είναι απαραίτητο να εισαχθούν στοιχεία για τη θέση από την οποία λήφθηκε το κάθε δείγμα [56].

4.3 Μέθοδος παρεμβολής σε μπλοκ

Για την εφαρμογή της μεθόδου παρεμβολής σε μπλοκ, ο συνολικός όγκος του λατομείου διαιρείται σε στοιχειώδη τμήματα ίσου μεγέθους σε σχήμα κύβου, ή σε πιο σπάνιες περιπτώσεις ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Σε κάθε ένα από αυτά τα στοιχειώδη τμήματα καταχωρείται μια τιμή για όλους τους επιθυμητούς δείκτες (χρώμα, υφή, ρωγμές) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί [57] με τη μέθοδο της παρεμβολής. Με άλλα λόγια, οι τιμές που είναι διαθέσιμες για συγκεκριμένα σημεία του λατομείου, τόσο αυτά που βρίσκονται στην επιφάνεια του λατομείου όσο και αυτά που έγιναν διαθέσιμα μέσω από τις απαραίτητες γεωτρήσεις, χρησιμοποιούνται για να γίνει μία προσέγγιση των τιμών των υπολοίπων σημείων του λατομείου. Η διαδικασία αυτή εκτελείται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές, με χρήση των απαραίτητων αλγόριθμων [58].

Η ποιότητα των μπλοκ είναι ένα θέμα που επηρεάζει την επιλογή της διαδικασίας επεξεργασίας:

- 1) Οι ασυνέχειες (ρωγμές) μπορούν να είναι ορατές ή κρυμμένες μέσα στον όγκο του μπλοκ. Όταν το υλικό είναι βαριά ρωγματωμένο, είναι δύσκολο να παραχθούν εμπορεύσιμα τελικά προϊόντα σε ικανοποιητικές ποσότητες. Η γραμμή επεξεργασίας μπορεί βέβαια να διαθέτει μέσα που να επιδιορθώνουν τις ρωγμές, όπως ο εξοπλισμός για την συγκόλληση και ενίσχυση των πλακών.
- 2) Κοιλότητες, μικρό ή μεγάλο πορώδες είναι επίσης δυνατό να υπάρχουν στο πέτρωμα. Τέτοιου είδους προβλήματα μπορούν επίσης να διορθωθούν με στοκάρισμα και ενίσχυση των πλακών.

- 3) Οι χημικές αλλοιώσεις, όπως η οξείδωση των εγκλεισμάτων, μπορούν να οδηγήσουν στην παραγωγή προϊόντων χαμηλής αξίας.
- 4) Η γεωμετρία (ομαλότητα επιφανειών, τραχύτητα, ανώμαλο σχήμα). Η διαδικασία επεξεργασίας διαθέτει τα τεχνικά μέσα για την διόρθωση της γεωμετρίας (ορθογωνισμό) των μπλοκ, όπως η συρματοκοπή ή τα πριόνια λεπίδων ή δίσκων.

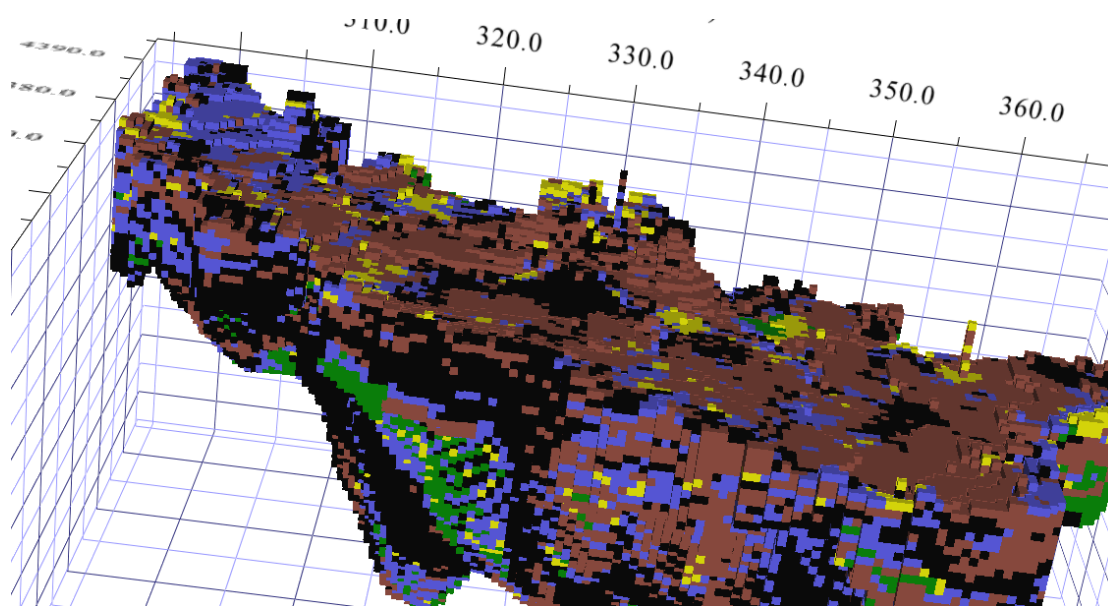
Ο κλάδος της επεξεργασίας μαρμάρου περιλαμβάνει ένα πλήθος μηχανών και εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία της πρώτης ύλης. Τα στάδια της επεξεργασίας των μπλοκ μαρμάρου είναι τα εξής:

- 1) Ορθογωνισμός των όγκων και σχίσσιμο των μπλοκ σε μικρότερα τεμάχια με χρήση μονόλαμου (κοπή με μονή λεπίδα), και συρματοκοπής. Κατά τη διαδικασία κοπής με κάθε μία από αυτές τις παραπάνω μεθόδους, είναι απαραίτητη η ψύξη των κοπτικών μέσων και των επιφανειών κοπής, γεγονός που επιτυγχάνεται με καταιονισμό νερού.
- 2) Κοπή των πλακών, των λωρίδων και των μικρών μπλοκ με λάμες σε μονόλαμο ή πολλαπλών λεπίδων τελάρο, με περιστρεφόμενο αδαμαντοφόρο δίσκο (πριόνι) και με συρματοκοπή. Τα τελάρα είναι μηχανήματα που διαθέτουν παράλληλες αδαμαντοφόρες λάμες (κοπτικά σώματα) στις κατάλληλες αποστάσεις ώστε κατά την κοπή να προκύπτουν πλάκες 2 ή 3 cm. Η κίνηση σωμάτων είναι παλινδρομική προσομοιάζοντας την κίνηση ενός πριονιού. Η ψύξη των κοπτικών στοιχείων και η απαγωγή της σκόνης γίνεται με χρήση νερού.
- 3) Επεξεργασία επιφανειών αποτελεί προαιρετική τελική διαδικασία μέσω της οποίας τροποποιείται η υφή της επιφάνειας, η μορφή και το χρώμα αυτής. Περιλαμβάνει διαδικασίες όπως η στίλβωση επιφανειών, η εξομάλυνση των ακμών, η αμμοβολή και η χάραξη. Στο στάδιο της τελικής λείανσης και στίλβωσης, τονίζεται η απόχρωση και το χρώμα του πετρώματος για να προσλάβει η επιφάνεια του τη δέουσα στιλπνότητα και διαφάνεια.

Τόσο το πλήθος, όσο και οι διαστάσεις των μπλοκ που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες. Χωρίζοντας το χώρο σε περισσότερα μπλοκ μπορεί να γίνει αναλυτικότερη εκτίμηση των διαθέσιμων

αποθεμάτων. Επιπλέον, για να είναι αποτελεσματικός ο χωρισμός σε μεγάλο αριθμό μπλοκ απαιτείται και μεγάλος αριθμός πληροφοριών για το εσωτερικό του λατομείου, κάτι που αυτόματα ισοδυναμεί με μεγαλύτερο κόστος [59].

Μετά τον ορισμό τιμών σε κάθε μεμονωμένο μπλοκ, το λατομείο μπορεί να απεικονισθεί χρωματικά με χρήση λογισμικού σχεδιασμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Χρωματική απεικόνιση αποθεμάτων σε στοιχειώδη μπλοκ ενός λατομείου

Πηγή: Μόδης, Σταματάκη, 2015 [55]

Η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του κάθε μπλοκ, μπορεί να γίνει με συμβατικές μεθόδους, ή με χρήση γεωστατιστικής. Αν υπάρχουν ακριβή δεδομένα για κάποιο σημείο του μπλοκ, λόγω χάριν από γεώτρηση, τότε τα γνωστά χαρακτηριστικά αποδίδονται σε ολόκληρο το μπλοκ. Όσο για τα υπόλοιπα μπλοκ, τα χαρακτηριστικά τους καθορίζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά των γειτονικών μπλοκ, χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας. Σύμφωνα με τις συμβατικές μεθόδους, οι συντελεστές βαρύτητας είναι αντιστρόφως ανάλογοι της απόστασης μεταξύ των μπλοκ, υψωμένη σε κάποια δύναμη.

Ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας γεωστατιστική [60]. Καθώς υπάρχουν δεδομένα από διάφορα λατομεία ανά τον κόσμο, αυτά μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη πρόβλεψη της κατανομής του μαρμάρου στο εσωτερικό ενός νέου λατομείου. Για το σκοπό αυτό μπορεί συνήθως γίνεται χρήση γειτονικών λατομείων, ή λατομείων με παρόμοια χαρακτηριστικά με το προς μελέτη λατομείο. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές απόδοσης συντελεστών βαρύτητας [61]. Η πιο ευρέως διαδεδομένη είναι η μέθοδος Kriging, που περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

4.4 Η μέθοδος Kriging

Το πρόβλημα με τους υπολογισμούς των συντελεστών βαρύτητας για τον ορισμό τιμών στα μπλοκ για τα οποία δεν υπάρχουν πληροφορίες είναι ότι υπόκειται σε μεγάλο βαθμό στην κρίση του ανθρώπου που πραγματοποιεί τον υπολογισμό. Ως εκ τούτου, διαφορετικοί άνθρωποι μπορεί να καταλήξουν σε εντελώς διαφορετικά συμπεράσματα για το ίδιο λατομείο. Η μέθοδος Kriging προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει αυτές τις διαφορές, με τον ορισμό αντικειμενικών συντελεστών.

Οι αρχές που συνδέουν τη γεωστατιστική με τη χωρική παρεμβολή αναπτύχθηκαν από τον Matheron (1971, 1981) ως «θεωρία των περιφερειοποιημένων μεταβλητών (regionalized variables)» και από τον Krige τη δεκαετία του '50, ως μια βέλτιστη μέθοδος παρεμβολής για την εκτίμηση των αποθεμάτων ενός λατομείου, από τον οποίο προέκυψε και το όνομα αυτής της κατηγορίας.

Οι μέθοδοι Kriging βασίζονται σε μια εννοιολογική προσέγγιση διαφόρων συναρτήσεων, όπου το τελικό αποτέλεσμα είναι η μετουσίωση μιας συνάρτησης συγκεκριμένης χωρικής συνδιασποράς. Σημαντικό βήμα στη διαδικασία των μεθόδων αυτών είναι η εκτίμηση του βαθμού μεταβολής της χωρικής διασποράς των σημείων. Αυτό εκφράζεται μέσω του βαριογράμματος, το οποίο δείχνει την μεταβολή της μέσης διαφοράς των τιμών των σημείων, συναρτήσει της απόστασης.

Το πειραματικό βαριόγραμμα, μπορεί να προσδιοριστεί από ένα μοντέλο (π.χ. σφαιρικό, εκθετικό, κανονικό ή μοντέλο Gauss, μοντέλο Bessel κ.λπ.) στο οποίο οι παράμετροι των εξισώσεων βελτιστοποιούνται για την καλύτερη προσέγγιση του βαριογράμματος. Κατά την ανάπτυξη των μεθόδων Kriging είναι αναγκαίο να γίνουν ορισμένες υποθέσεις σχετικά με τη φύση της παρατηρούμενης διασποράς στην επιφάνεια (την ύπαρξη τάσης στα δεδομένα), καθώς θα πρέπει η επιφάνεια που έχει υποστεί χωρική παρεμβολή να κατασκευαστεί με στατιστικές συνθήκες που θα χαρακτηρίζονται από «έλλειψη χωρικής εξάρτησης» και ελάχιστη διασπορά.

Οι διάφορες παραλλαγές της μεθόδου που έχουν αναπτυχθεί, ενισχύουν την ετελιξία που παρουσιάζει και το εύρος της εφαρμοσιμότητάς της. Για παράδειγμα, η μέθοδος co-kriging περιλαμβάνει πληροφορίες για τις συσχετίσεις δύο ή περισσότερων μεγεθών, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η χωρική παρεμβολή, ενώ η «διαζευκτική μέθοδος Kriging» (disjunctive Kriging) χρησιμοποιείται για εφαρμογές στις οποίες ενδιαφέρει η υπέρβαση ή μη, ενός συγκεκριμένου κατωφλίου, από την τιμή μιας μετρούμενης πιθανότητας.

Οι προσεγγίσεις που αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου σε χωροχρονικές διαστάσεις, αντανακλούν διαφορετική συμπεριφορά του προσομοιωμένου φαινομένου στη διάσταση του χρόνου. Ο χρόνος αντιμετωπίζεται είτε ως μια πρόσθετη διάσταση με γεωμετρική ή ζωνώδη ανισοτροπία, είτε ως ένας συνδυασμός μεταξύ των συναρτήσεων συσχέτισης χώρου και χρόνου με τη χωροχρονική υπόθεση στασιμότητας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου Kriging είναι:

- Η στατιστική ποιότητα των προβλέψεων της (π.χ. έλλειψη εξαρτήσεων)
- Η ικανότητά της να προβλέπει τη χωρική κατανομή της αβεβαιότητας

Χρησιμοποιείται βέβαια κυρίως σε εφαρμογές της βιομηχανίας πετρελαίου, στη γεωχημεία, στην εδαφολογία, σε περιβαλλοντικές εφαρμογές και γενικότερα σε πεδία των οποίων οι στατιστικές ιδιότητες έχουν μεγάλη σημασία.

Αντιθέτως, είναι λιγότερο επιτυχής σε περιπτώσεις όπου η τοπική γεωμετρία και η ομαλότητα της επιφάνειας αποτελούν κομβικά σημεία, με αποτέλεσμα άλλες μέθοδοι να θεωρούνται ανταγωνιστικότερες ή ακόμα και αποτελεσματικότερες. Ένα άλλο πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο είναι οι υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις για μεγάλες βάσεις δεδομένων, που συχνά οδηγεί σε δύσκολα εκτιμώμενα βαριογράμματα, και απαιτεί αρκετή εμπειρία από το χρήστη για να πραγματοποιήσει κρίσιμες και σημαντικές υποθέσεις για τη στατιστική φύση της διακύμανσης. Έτσι τα αποτελέσματα αυτής της τεχνικής δεν είναι ποτέ απόλυτα.

Η μέθοδος Kriging χρησιμοποιεί αρκετά σύνθετα μαθηματικά, τα οποία δεν είναι θεμιτό να περιγραφούν με λεπτομέρεια στην παρούσα εργασία. Αντ' αυτού δίνεται μία απλοποιημένη περιγραφή, ενώ η λεπτομερής άλγεβρα περιγράφεται με λεπτομέρειες στην σχετική βιβλιογραφία [55], [59].

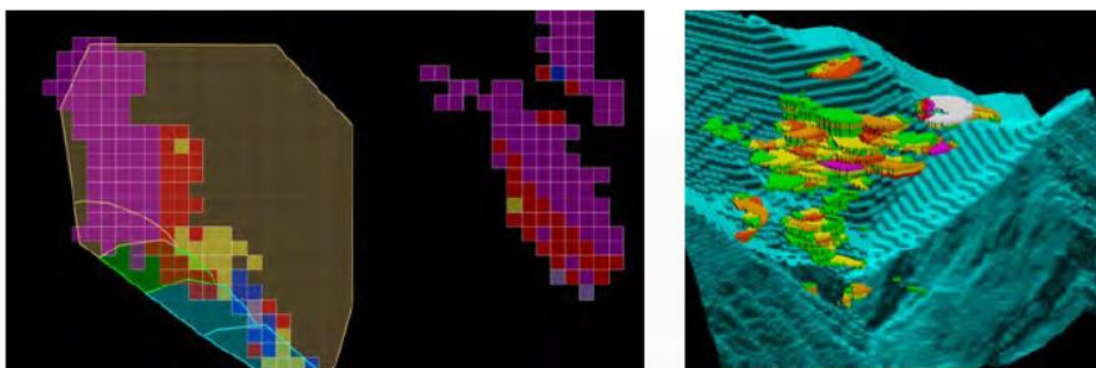
Για να πραγματοποιηθεί αυτό, ορίζεται μία τυχαία συνάρτηση, με πλήθος τιμών τόσες όσα και τα δεδομένα που είναι γνωστά από τις γεωτρήσεις. Η μέση τιμή της τυχαίας συνάρτησης θεωρείται γνωστή, και μπορεί να υπολογιστεί εύκολα. Σε κάθε ορισμένη τιμή αποδίδεται ένας συντελεστής, με τη συνθήκη ότι το άθροισμα όλων των συντελεστών είναι ίσο με τη μονάδα. Αυτή είναι η συνθήκη αντικειμενικότητας. Επιπλέον, η μέση τιμή των της νέας συνάρτησης, πολλαπλασιασμένης με τους αντίστοιχους συντελεστές θα πρέπει να είναι ίση με την μέση τιμή της αρχικής τυχαίας συνάρτησης, που θεωρείται γνωστή. Με χρήση διαφορικής άλγεβρας μπορεί να υπολογιστεί η απόκλιση των δύο αυτών συναρτήσεων σε κάθε διακριτό σημείο, κι έτσι είναι δυνατόν να αποδοθούν τιμές σε όλα τα μπλοκ, οι οποίες θα αποτελούν καλή εκτίμηση, αλλά θα είναι ταυτόχρονα και αντικειμενικές.

Κεφάλαιο 5

ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MAPTEK VULCAN QUARRY MODELLER

Το λογισμικό Maptek Vulcan Quarry Modeller είναι ένα πολύ χρήσιμο λογισμικό που επιτρέπει τη μοντελοποίηση και ανάλυση των γεωλογικών αποθεμάτων, αλλά και για το σχεδιασμό των λατομείων [62]. Επιτρέπει τη δοκιμή πολλών διαφορετικών σεναρίων, αλλά και την εισαγωγή αναφορών προόδου, ώστε να βελτιστοποιηθεί η παραγωγή. Χρησιμοποιείται ευρέως κατά την εξόρυξη πετρωμάτων, καθώς έχει ενσωματωμένους αλγόριθμους για κάθε στάδιο της εξόρυξης, από την ανίχνευση της τοποθεσίας μέχρι το κλείσιμο του λατομείου.

Κατά το στάδιο έρευνας κοιτασμάτων παρέχει μία τρισδιάστατη επιφάνεια εργασίας όπου ο χρήστης μπορεί να συνδυάσει όλα τα δεδομένα που έχει συλλέξει, από παλαιότερες γεωλογικές έρευνες, αεροφωτογραφίες, ιστορικά δεδομένα και γεωτρήσεις. Ο χρήστης μπορεί επίσης να προσομοιώσει διαφορετικά σενάρια, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη κατανομή του πλήθους και της θέσης των γεωτρήσεων. Παρέχονται ακόμη ανάλυση των δεδομένων με γεωστατιστική, και ανάλυση των δεδομένων με μέθοδο παρεμβολής σε μπλοκ. Τα αποτελέσματα μπορούν να οπτικοποιηθούν όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.1*.



Εικόνα 5.1 Απεικόνιση αποθεμάτων με χρήση του λογισμικού Maptek Vulcan Quarry Modeller

Πηγή: maptek.com

Όσο για το στάδιο σχεδιασμού και ανάπτυξης του ορυχείου, ο χρήστης μπορεί να κάνει προσομοίωση της κατανομής του μηχανικού εξοπλισμού και του σχεδιασμού δρομολογίων, αναλύοντας διάφορα σενάρια παραγωγής πριν ξεκινήσει η εξόρυξη. Κατά τη λειτουργία του λατομείου, τα νέα δεδομένα εισάγονται στα μοντέλα με μπλοκ που είχαν δημιουργηθεί στο προηγούμενο στάδιο, ώστε οι προβλέψεις να έρχονται πιο κοντά στην πραγματικότητα επιτρέποντας μία ρεαλιστική εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής και η βέλτιστη χρήση του μηχανικού εξοπλισμού.

Καθ' όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας του λατομείου, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των διαθέσιμων αποθεμάτων με στόχο το χρονικό σχεδιασμό της εξόρυξης με τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται το κέρδος. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή ημερησίων αναφορών παραγωγής αλλά και χρήσης εξοπλισμού καθώς και προσομοίωσης των εκρήξεων και γεωτρήσεων πριν αυτές πραγματοποιηθούν. Με χρήση των δεδομένων εκτίμησης αποθεμάτων μπορεί να βρεθεί και η επόμενη θέση εκμετάλλευσης.

Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα ασχολείται με:

1) Σχεδιασμό λατομείων

- Εργαλεία για πολλαπλά κεκλιμένα, λεπτομερή λειτουργικά σχέδια κοιλωμάτων
- Σχεδιασμός πολλαπλών φάσεων σε λάκκους και χωματερές
- Χρήση παρεμβολής βαθμού με αντίστροφη μέθοδο απόστασης για μοντέλα πόρων
- Προσδιορισμός των όγκων και της χωρητικότητας για τη γρήγορη αξιολόγηση σχεδίων για οικονομικούς, ποσοτικούς ή ογκομετρικούς παράγοντες
- Εργαλείο γρήγορου σχεδίου κοιλωμάτων για τη στρατηγική αξιολόγηση σχεδίου ορυχείων

2) Μοντελοποίηση μπλοκ

- Αποθήκευση και χρήση πληροφοριών μέσω κανονικών κυττάρων ή γεωμετριών υποκυττάρων
- Διεξαγωγή αντίστροφης εκτίμησης βαθμού απόστασης
- Υποστήριξη μεγάλου αριθμού μπλοκ - προσθήκη, διαγραφή ή τροποποίηση μεταβλητών σε πραγματικό χρόνο
- Δημιουργία προσαρμοσμένων αναφορών, συμπεριλαμβανομένων χωρητικότητας βαθμού

3) Γεωλογία

- Διαχείριση και επικύρωση δεδομένων τρυπανιών, γεωφυσικών, λιθολογικών και αναλυτικών δεδομένων στο Vulcan ή διασύνδεσης με τρίτες βάσεις δεδομένων
- Τρισδιάστατη επίδειξη/ανάλυση των στοιχείων τρυπανιών
- Γεωλογική ερμηνεία
- Βοηθητικά προγράμματα σύνθεσης

4) Τριγωνισμό

- Δημιουργία/επεξεργασία τρισδιάστατης επιφάνειας και στερεών τριγωνιμοποιήσεων, όπως ο σχεδιασμός κοιλωμάτων λατομείων και τα πρότυπα εδάφους
- Δημιουργία περιγράμματος
- Καταχώρηση εικόνων με τριγωνοποιήσεις για καλύτερη απεικόνιση
- Κατασκευή/επεξεργασία επιφανειών και στερεών μοντέλων, όπως μοντελοποίηση εδάφους, σχέδια λατομείων και γεωλογική μοντελοποίηση

5) Vulcan 3D CAD

- Σχεδιασμός και ψηφιοποίηση γραμμών, πολυγώνων, σημείων και κειμένου
- Προβολή, ανάλυση, αλληλεπιδραστική επεξεργασία δεδομένων 3D

6) Μεταφορά δεδομένων

- Εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων μεταξύ Vulcan και άλλων εφαρμογών CAD
- Σύνδεση ODBC με τον SQL Server™, την Oracle® και την Ms Access™

7) Σχεδίαση

- Ρύθμιση παραμέτρων φύλλων στυλ σχεδίασης που ορίζονται από το χρήστη με μπλοκ τίτλου και ερωτήσεις χρήστη
- Επεξεργασία και αναδημιουργία αρχείων σχεδίασης
- Ρύθμιση και δημιουργία μεμονωμένων παρατηρητηρίων με χρήση διασύνδεσης στυλ οδηγού
- Δημιουργία πολλών παρατηρητηρίων με διασύνδεση τύπου δέσμης χρησιμοποιώντας υπάρχουσες προδιαγραφές δεδομένων

Τέλος, όταν έρθει η ώρα για το κλείσιμο του ορυχείου, το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη του καταλληλότερου σχεδίου επαναφοράς του εδάφους στην προηγούμενη κατάσταση, κάτι που συνήθως απαιτείται από τη νομοθεσία. Αυτό γίνεται και πάλι με χρήση τρισδιάστατης οπτικοποίησης, όπου ο χρήστης μπορεί ελεύθερα να μετακινεί όγκους χώματος, ώστε να κατανεμηθούν καλύτερα οι θέσεις απόρριψης του χώματος προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αποστάσεις μετακίνησης χωρίς όμως να εμποδίζεται η παραγωγή όσο το λατομείο είναι λειτουργικό [63].

Κεφάλαιο 6

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

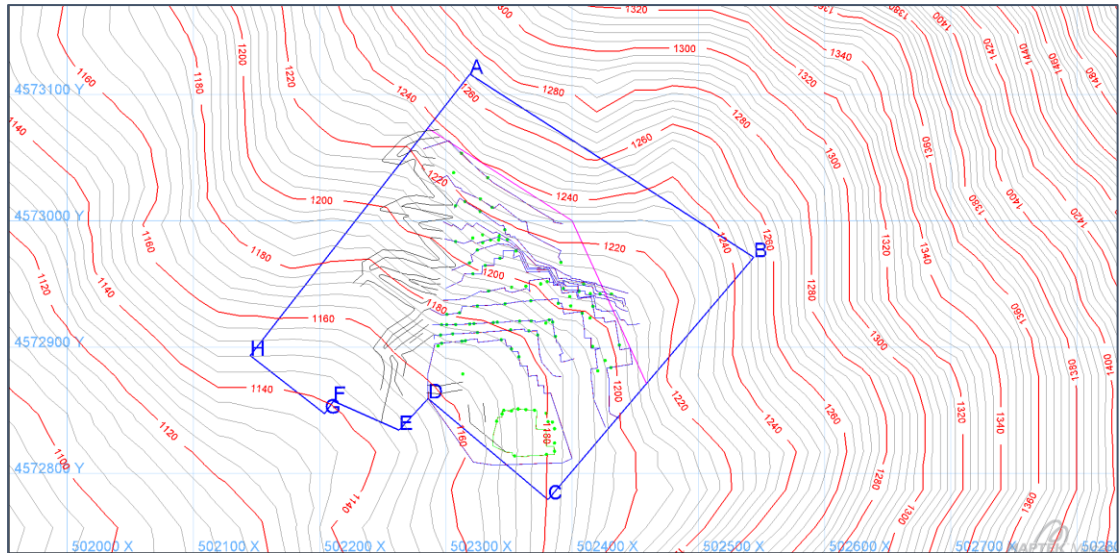
Το κοίτασμα του παραδείγματος εφαρμογής βρίσκεται στον Ν. Δράμας, περίπου (Σχήμα 6.1). Η προσπέλαση του χώρου γίνεται με υπάρχοντα δασικό δρόμο (1800m) που ξεκινάει από την Ε.Ο. Δράμας – Χιονοδρομικού Κέντρου Φαλακρού, περίπου 2 Km μετά τη διασταύρωση προς Βύλακα.



Εικόνα 6.1: Θέση λατομείου στο Νομό Δράμας.

Η έκταση του λατομικού χώρου είναι 68.411 m². Ο λατομικός χώρος βρίσκεται στο όρος Φαλακρό και εκτείνεται από το υψόμετρο των 1140m έως τα 1260m (Εικόνα 6.2). Στην περιοχή παρατηρείται έντονη λατομική δραστηριότητα καθώς πλησίον του λατομείου λειτουργούν άλλα 6 λατομεία μαρμάρου ενώ στην ευρύτερη περιοχή του Βύλακα επιπλέον άλλα 3.

Στην περιοχή του λατομικού χώρου συναντώνται οι ακόλουθοι γεωλογικοί σχηματισμοί: Ασβεστιτικά μάρμαρα, Δολομιτικά μάρμαρα, Αλουβιακές αποθέσεις. Τα μάρμαρα παρουσιάζονται συμπαγή και επιτρέπουν την λήψη μεγάλων και υγιών όγκων. Επιφανειακά το μαρμαροφόρο κοίτασμα καλύπτεται από διαβρωμένο στρώμα μαρμάρου πάχους 1-2 μέτρα περίπου το οποίο έχει χαμηλό συντελεστή απόληψης εμπορεύσιμου μαρμάρου.



Εικόνα 6.2: χάρτης λατομείου.

Τα ογκομάρμαρα που εξορύσσονται από τα λατομεία της περιοχής είναι γνωστά ως «Λευκά Δράμας» και χαρακτηρίζονται ως λεπτόκοκκο δολομιτικό μάρμαρο λευκού χρώματος με εναλλασσόμενες γκρίζες και ερυθρωπές ταινίες (Εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.3: παράδειγμα μαρμάρου κοιτάσματος μελέτης.

Ο ποιοτικός χαρακτηρισμός των ογκομαρμάρων γίνεται από τους λατόμους σε κάθε λατομείο σύμφωνα με τις παρακάτω προδιαγραφές που έχει ορίσει η εταιρεία για κάθε είδος μαρμάρου και αφορούν τις χρωματικές διαφορές, τις ποιοτικές και λοιπές διαφοροποιήσεις.

6.1 Τύπος Μαρμάρου

Η ποιοτική διαλογή ενός ογκομαρμάρου χαρακτηρίζεται αρχικά ως προς τον τύπο (είδος) του μαρμάρου σε: Λουλουδάτα (τύπου calacata – statouario) με κωδικό Λ ή σε Διαγώνια με κωδικό Δ.

6.2 Αισθητική - Χρώμα

Ως προς την αισθητική του μαρμάρου κάθε μια από τις κατηγορίες ανάλογα με τα χρωματικά χαρακτηριστικά της έχει 3 διαβαθμίσεις ως ακολούθως:

	ΛΟΥΛΟΥΔΑΤΑ	ΔΙΑΓΩΝΙΑ
1	Ομοιόχρωμα ανοιχτόχρωμα λουλουδάτα χωρίς διάσπαρτο γυαλί.	Ανοιχτόχρωμα με λεπτές όμοια κατανεμημένες διαγώνιες βένες
2	Ανομοιόχρωμα ανοιχτόχρωμα ή ομοιόχρωμα σκουρότερα ή ως 1 με διάσπαρτο γυαλί	Ανοιχτόχρωμα με χονδρές επικεντρωμένες διαγώνιες βένες
3	Σκούρα λουλουδάτα ή με πολλή γυαλί ή γραμμές ασβεστίτη	Σκουρόχρωμα με χονδρές επικεντρωμένες διαγώνιες βένες

6.3 Ελαττώματα Όγκου (Ραγίσματα, Ανοιχτά Νερά, Σπαθιές)

Σε σχέση με τα ελαττώματα (ραγίσματα/ανοιχτά νερά/σπαθιές) κάθε όγκος έχει 3 διαβαθμίσεις ως ακολούθως:

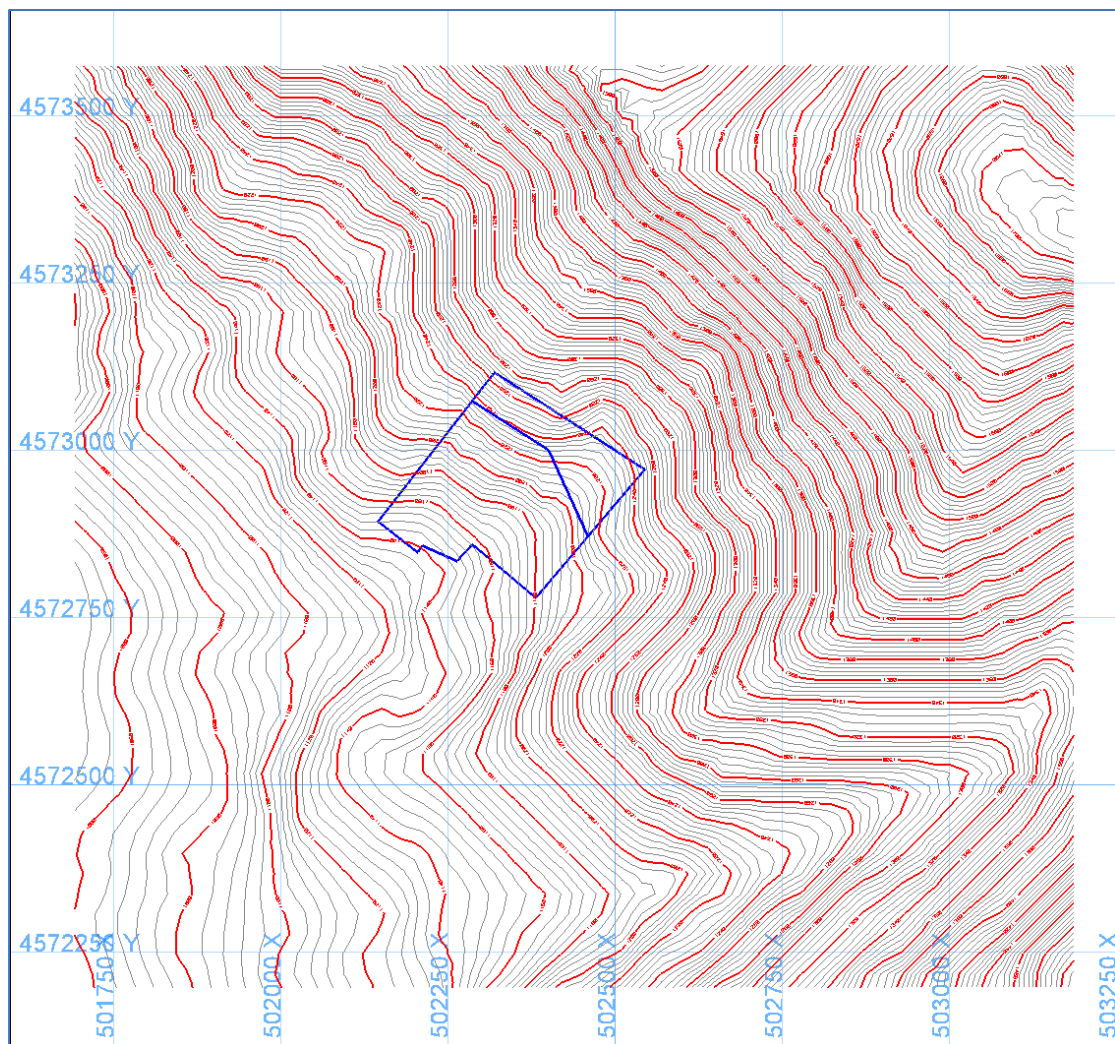
	Ελαττώματα (ραγίσματα, ανοιχτά νερά, σπαθιές)
1	Γερός όγκος χωρίς εμφανή ελαττώματα ή ελαττώματα σε ποσοστό ως 10% της κάθε πλάκας που αντιμετωπίζεται με έκπτωση -3% ή -6%.
2	Ένα – δυο ελαττώματα (ραγίσματα/σπαθιές) σε ποσοστό ως 25% της κάθε πλάκας ή εμφανή ανοιχτά νερά.
3	Ελαττώματα (ραγίσματα/σπαθιές) σε ποσοστό ως 45% της κάθε πλάκας

Η ποιότητα του όγκου αποδίδεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΣΜΕΝΟΙ ΜΕΓΑΛΟΙ (ΜΗΚΟΣ >180, ΥΨΟΣ > 120)	ΧΩΡΙΣ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ	ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ 10% -25% ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΠΛΑΚΑΣ	ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ 25% -45% ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΠΛΑΚΑΣ
ΧΡΩΜΑ 1	1-1=A1	1-2=A2	1-3=AB
ΧΡΩΜΑ 2	2-1=A2	2-2=AB	2-3=B
ΧΡΩΜΑ 3	3-1=AB	3-2=B	3-3=BB

6.4 Τοπογραφικά Δεδομένα

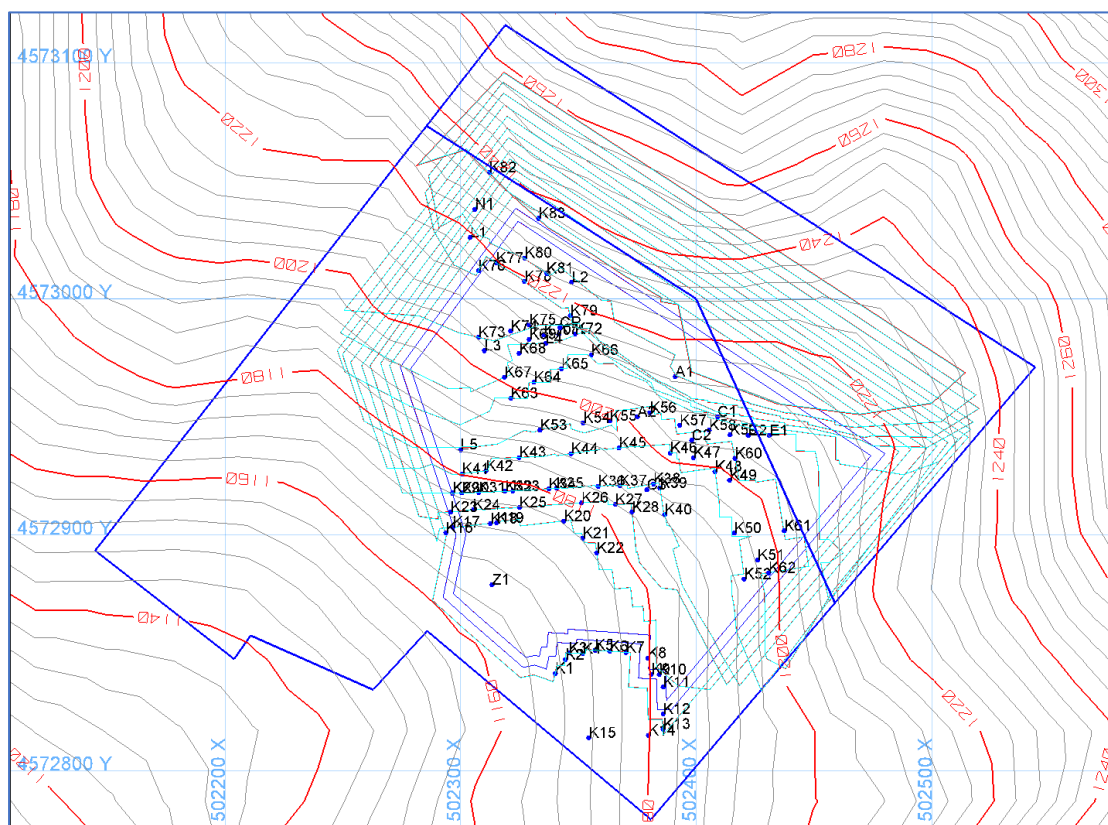
Για το λατομείο δόθηκε ένα στρώμα ισοϋψών (CONTOUR_LINES) με τις δευτερεύουσες και κύριες ισοϋψείς ανά 4 και ανά 20 μέτρα αντίστοιχα. Επίσης δόθηκαν τα όρια εκμετάλλευσης ως ξεχωριστό στρώμα (ORIA_TOPOGRAFΙΚΟΥ) όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι ισοϋψείς κάλυπταν περιοχή πολύ μεγαλύτερη του λατομικού χώρου και είχαν πολύ καλή λεπτομέρεια, κατάλληλου επιπέδου για τον υπολογισμό αποθεμάτων.



Εικόνα 6.4: τοπογραφικά δεδομένα λατομείου Βώλακα.

6.5 Γεωτρήσεις και Τομές

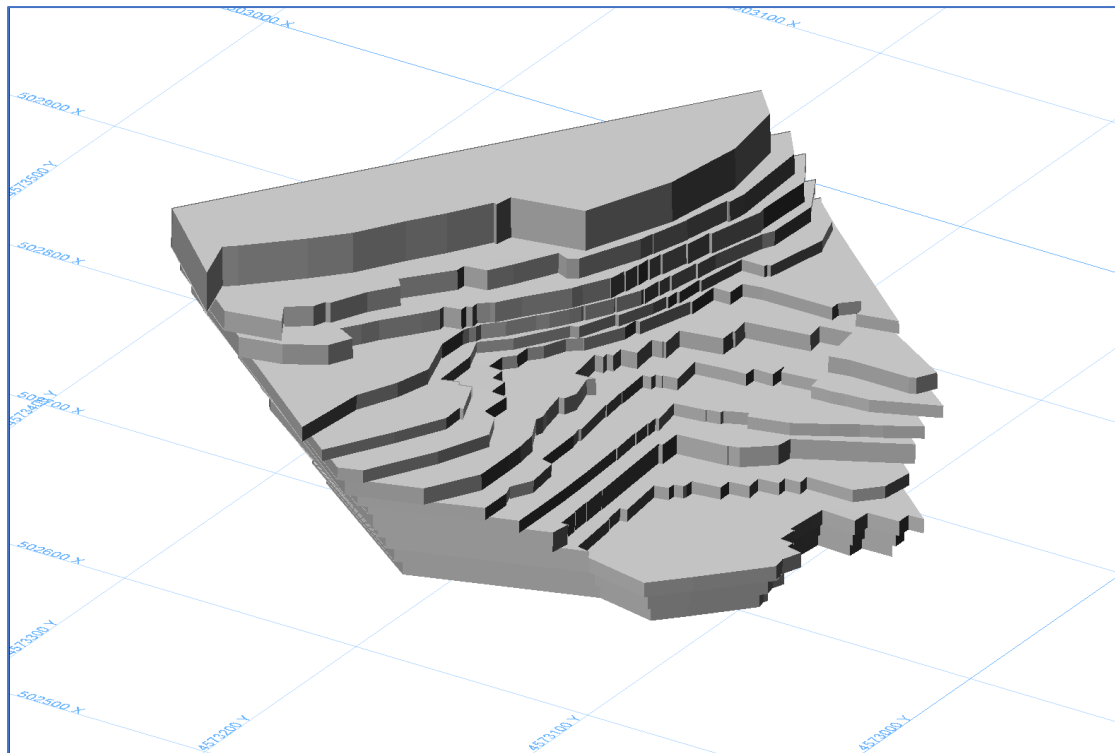
Συνολικά δόθηκαν 98 γεωτρήσεις και τομές για το λατομείο (83 τομές και 15 γεωτρήσεις), από τις οποίες προέρχονται τα 1.010 δείγματα ενός μέτρου που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση των αποθεμάτων του λατομείου. Τα δεδομένα αυτά καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό το χώρο της τελικής εκσκαφής που εκτιμάται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα δεδομένα ελέγχθηκαν ως προς την εγκυρότητα τους μέσω του λογισμικού (αρχείο drills.dhd.isis).



Εικόνα 6.5: χάρτης θέσεων γεωτρήσεων.

6.6 Ογκομετρικό Μοντέλο Λατομείου

Ο προς εκτίμηση όγκος της τελικής εκσκαφής σχεδιάστηκε ανά επίπεδο (βαθμίδα) με σημείο εκκίνησης την τρέχουσα μορφολογία του λατομείου. Το σχέδιο της κάθε μιας από τις 14 βαθμίδες μετατράπηκε σε στερεό μοντέλο τριγωνισμού το οποίο χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς των αποθεμάτων (Εικόνα 6.6). Τα στερεά αυτά μοντέλα ελέγχθηκαν οπτικά και ως προς την εγκυρότητα τους μέσω του λογισμικού.



Εικόνα 6.6: ογκομετρικό μοντέλο εκσκαφής λατομείου.

6.7 Μεθοδολογία Εκτίμησης

Η βάση δεδομένων με τα γεωτρητικά δείγματα καθώς και τις τομές στα μέτωπα του λατομείου διαμορφώθηκε με επιπλέον πεδία για να επιτραπεί η παρεμβολή αριθμητικών τιμών στο χώρο. Συγκεκριμένα, προστέθηκαν πεδία που αφορούν τις διάφορες ποιότητες μαρμάρου με βάση τα αρχικά πεδία χρώματος, αισθητικής, ραγισμάτων και τεκτονισμού. Τα πεδία αυτά λαμβάνουν δύο τιμές, 0 και 1, ανάλογα με το αν το εκάστοτε δείγμα ανήκει ή όχι στη συγκεκριμένη ποιότητα (Εικόνα 6.7), το οποίο καθορίζεται με κριτήρια που είναι ειδικά για κάθε λατομείο.

A1_PR	A2_PR	AB_PR	B_PR	BB_PR	W_PR
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000

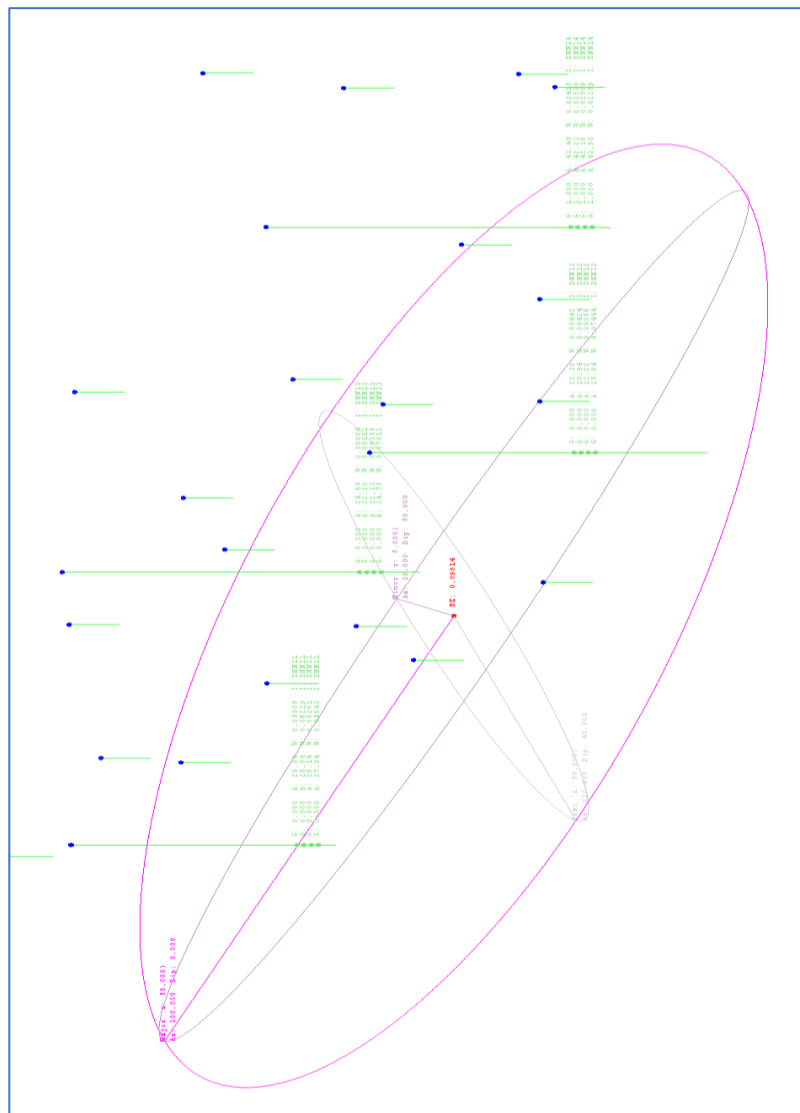
Εικόνα 6.7: πεδία πιθανοτήτων ποιοτήτων μαρμάρου.

Μετά τον υπολογισμό των πεδίων ποιοτήτων και κατηγοριών τεκτονισμού, γίνεται μια δευτερεύουσα επεξεργασία της βάσης δεδομένων με στόχο τον υπολογισμό της θέσης του κάθε δείγματος ξεχωριστά (συντεταγμένες XYZ στο κέντρο του δείγματος) καθώς και την απόδοση ενός συντελεστή βάρους στα δείγματα. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει την τιμή 1 εάν το δείγμα προέρχεται από τομή σε μέτωπο του λατομείου, και την τιμή 0,5 εάν το δείγμα προέρχεται από γεώτρηση. Ουσιαστικά δίνεται περισσότερο βάρος στα μέτωπα καθώς η ποιοτική αξιολόγηση τους γίνεται σε επιφάνεια μεγαλύτερη αυτής των γεωτρήσεων και επομένως προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική ποιότητα που έχει το μάρμαρο στη συγκεκριμένη θέση. Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται ως επιπλέον παράγοντας ζύγισης των δειγμάτων κατά την παρεμβολή.

Για την παρεμβολή των τιμών των πεδίων ποιότητας και τεκτονισμού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αντιστρόφου αποστάσεως στο τετράγωνο μέσω του λογισμικού Maptek Vulcan Quarry Modeller και στη βάση ενός μοντέλου μπλοκ. Ο εκτιμώμενος όγκος διαιρείται σε μπλοκ (ορθογώνια παραλληλεπίπεδα), γενικά ίδιου μεγέθους. Η μέση τιμή ενός μπλοκ εκτιμάται από έναν ζυγισμένο γραμμικό συνδυασμό γειτονικών δειγμάτων. Οι παράγοντες βαρύτητας δίνουν περισσότερο βάρος στα κοντινότερα δείγματα βάσει της εξίσωσης:

$$\lambda_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}}$$

όπου d_i είναι η απόσταση του δείγματος i από το κέντρο του μπλοκ που υπολογίζεται. Μόνο δείγματα εντός μιας δοσμένης 'ζώνης επιρροής' χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση (ελλειψοειδές). Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι για ένα μπλοκ μαρμάρου θα χρησιμοποιηθούν 16 δείγματα από 4 γειτονικές γεωτρήσεις και τομές όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 6.8: παράδειγμα εκτίμησης μπλοκ από γειτονικά δείγματα.

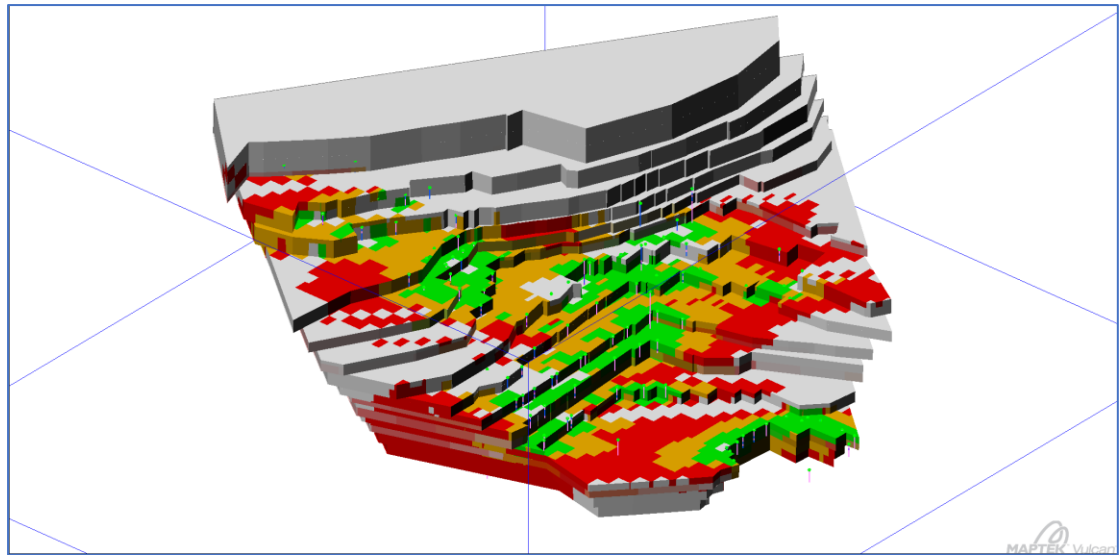
Με βάση την απόσταση του κάθε δείγματος από το κέντρο βάρους του μπλοκ που εκτιμάται και έπειτα από μια κανονικοποίηση των αποστάσεων με βάση τις αναλογίες των αξόνων του ελλειψοειδούς, υπολογίζονται τα βάρη των δειγμάτων όπως δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Γεώτρηση	X	Y	Z	Τιμή Δείγματος	Απόσταση Δείγματος - Μπλοκ	Βάρος	Βάρος x Τιμή
DNN12	555390.0	4553471.0	633.5	0	20.936	0.0942423	0.0000000
DNN13	555377.0	4553500.1	618.5	0	22.196	0.0881097	0.0000000
DNN12	555390.0	4553471.0	632.5	0	22.224	0.0906610	0.0000000
DNN13	555377.0	4553500.1	617.5	0	22.230	0.0835457	0.0000000
DNN12	555390.0	4553471.0	634.5	0	22.381	0.0844214	0.0000000
DNN13	555377.0	4553500.1	619.5	0	24.684	0.0800399	0.0000000
DNN13	555377.0	4553500.1	616.5	0	24.777	0.0701145	0.0000000
DNN12	555390.0	4553471.0	631.5	0	25.840	0.0744357	0.0000000
DNN11	555350.0	4553495.0	632.5	0	26.140	0.0626136	0.0000000
DNN11	555350.0	4553495.0	633.5	0	26.537	0.0621904	0.0000000
DNN11	555350.0	4553495.0	631.5	0	27.940	0.0564342	0.0000000
DNN11	555350.0	4553495.0	634.5	0	29.040	0.0550514	0.0000000
DNN14	555412.0	4553484.0	615.5	1	42.226	0.0253024	0.0253024
DNN14	555412.0	4553484.0	614.5	1	42.379	0.0250932	0.0250932
DNN14	555412.0	4553484.0	616.5	1	43.454	0.0241548	0.0241548
DNN14	555412.0	4553484.0	613.5	1	43.898	0.0235897	0.0235897

Αποτέλεσμα 0.0981401

Δηλαδή, για το συγκεκριμένο μπλοκ και δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες τιμές δείγματος αφορούσαν την ποιότητα Α, θεωρούμε ότι περιέχει 9.8% υλικό Α ποιότητας. Τα ποσοστά των άλλων ποιοτήτων εκτιμώνται αναλόγως και στη συνέχεια γίνεται μια διόρθωση ώστε το άθροισμα των ποσοστών να είναι ίσο με 100%.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτίμησης, ήταν δυνατός ο υπολογισμός των αποθεμάτων μαρμάρου και η γραφική προβολή των αποτελεσμάτων της εκτίμησης.



Εικόνα 6.9: ογκομετρικό μοντέλο λατομείου χρωματισμένο κατά κατηγορία ταξινόμησης αποθεμάτων.

Κεφάλαιο 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία μελετήθηκε η εκτίμηση των αποθεμάτων λατομείου μαρμάρου με χρήση ποιοτικών δεικτών. Αρχικά δόθηκαν ιστορικά στοιχεία από την πρώτη εξόρυξη μαρμάρου μέχρι και τη σημερινή εποχή. Αναφέρθηκαν επίσης και πιο συγκεκριμένα περιοχές στην Ελλάδα στις οποίες βρίσκεται το μάρμαρο.

Αφού πραγματοποιήθηκε μία περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μίας νέας τοποθεσίας λατομείου, ακολούθησε η ανάλυση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των αποθεμάτων ενός ενεργού λατομείου.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Martek Vulcan Quarry Modeller, που δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών σεναρίων χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα. Συμπερηλήφθηκαν όλες οι δυνατότητες του προγράμματος και σε ποιές άλλες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. E. Tucker, Ed., *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*, 3 edition. Wiley-Blackwell, 2013.
- [2] Y. Gubler, J. P. Bertrand, L. Mattavelli, A. Rizzini, and R. Passega, "Chapter 3 Petrology and Petrography of Carbonate Rocks," in *Developments in Sedimentology*, vol. 9, G. V. Chilingar, H. J. Bissell, and R. W. Fairbridge, Eds. Elsevier, 1967, pp. 51–86.
- [3] M. E. Tucker and V. P. Wright, *Carbonate Sedimentology*, 1 edition. Oxford England ; Boston : Brookline Village, Mass: Wiley-Blackwell, 1991.
- [4] T. P. Scoffin, *An Introduction to Carbonate Sediments and Rocks*. Glasgow : New York: Chapman & Hall, 1986.
- [5] J. L. Wilson, *Carbonate Facies in Geologic History*. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [6] A. B. Searle, *LIMESTONE & ITS PRODUCTS: Their Nature, Production, and Uses*, 1st Edition edition. Ernest Benn Limited, 1935.
- [7] J. A. H. Oates, *Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses*, 1 edition. Weinheim: Wiley-VCH, 1998.
- [8] R. S. Boynton, *Chemistry and technology of lime and limestone*, 2d ed. New York: Wiley, 1980.
- [9] N. V. S. Knibbs, *Lime and Magnesia: the Chemistry, Manufacture and Uses of the Oxides, Hydroxides and Carbonates of Calcium and Magnesium*. Ernest Benn, 1924.
- [10] F. Schwarzkopf, *Lime Burning Technology: A Manual for Line Plant Operators*. Kennedy Van Saun Corporation, 1974.
- [11] F. Birch, J. F. Schairer, and H. C. Spicer, Eds., *Handbook of Physical Constants*, 1st Ed. edition. Geological Society of America, 1942.
- [12] T. P. Smith, "FGD chemistry and analytical methods handbook. Volume 1. Process chemistry - sampling, measurement, and laboratory guidelines. Final report. [Contains glossary]," Radian Corp., Austin, TX (USA), EPRI-CS-3612-Vol.1, Jul. 1984. Accessed: Apr. 20, 2020. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/6718354-fgd-chemistry-analytical-methods-handbook-volume-process-chemistry-sampling-measurement-laboratory-guidelines-final-report-contains-glossary>.
- [13] G. W. C. Kaye, *Tables of Physical and Chemical Constants: And Some Mathematical Functions*. Franklin Classics, 2018.
- [14] W. M. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 2011.
- [15] J. Rohleder, "Marble and limestone," in *Calcium Carbonate: From the Cretaceous Period into the 21st Century*, F. W. Tegethoff, Ed. Basel: Birkhäuser, 2001, pp. 69–135.
- [16] E. A. W. Budge, *The Mummy: A Handbook of Egyptian Funerary Archaeology*. Kessinger Publishing, LLC, 2010.
- [17] J. Pollini, N. Herz, K. Polikreti, and Y. Maniatis, "Parian lychnites and the Prima Porta statue: new scientific tests and the symbolic value of the marble," *J. Roman Archaeol.*, vol. 11, pp. 275–284, ed 1998, doi: 10.1017/S1047759400017311.
- [18] G. Van Steen, "The Venus de Milo," in *Liberating Hellenism from the Ottoman Empire: Comte de Marcellus and the Last of the Classics*, G. Van Steen, Ed. New York: Palgrave Macmillan US, 2010, pp. 17–66.
- [19] D. Andrianou, *The Furniture and Furnishings of Ancient Greek Houses and Tombs*, Cambridge University Press, 2009. .
- [20] M. Waelkens, P. De Paepe, and L. Moens, "Quarries and the Marble Trade in Antiquity," in *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, N. Herz and M. Waelkens, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988, pp. 11–28.

- [21] J. C. Fant, Ed., *Ancient marble quarrying and trade: Papers from a colloquium held at the Annual Meeting of the Archaeological Institute of America, San Antonio, Texas, December 1986*. Oxford, England: B.A.R, 1988.
- [22] M. Greenhalgh, *Marble Past, Monumental Present: Building with Antiquities in the Mediaeval Mediterranean*. Brill, 2009.
- [23] “United Nations Statistics Division - Commodity Trade Statistics Database (COMTRADE).” <https://comtrade.un.org/db/ce/ceSnapshot.aspx?px=H2&cc=2515> (accessed Apr. 20, 2020).
- [24] B. A. Kennedy, Ed., *Surface Mining*, 2nd Revised edition edition. Littleton, Colo: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1990.
- [25] A. W. Hatheway, “QUARRYING,” in *Encyclopedia of Geology*, R. C. Selley, L. R. M. Cocks, and I. R. Plimer, Eds. Oxford: Elsevier, 2005, pp. 399–405.
- [26] H. L. Hartman and J. M. Mutmanský, *Introductory Mining Engineering*, 2 edition. Hoboken, N.J: Wiley, 2002.
- [27] C. Oggeri, T. M. Fenoglio, A. Godio, and R. Vinai, “Overburden management in open pits: options and limits in large limestone quarries,” *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 2, pp. 217–228, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijmst.2018.06.011.
- [28] Z.-X. Zhang, “Chapter 18 - Rock Blasting in Open Pit Mining,” in *Rock Fracture and Blasting*, Z.-X. Zhang, Ed. Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 355–371.
- [29] B. Csöke, S. Pethö, J. Földesi, and L. Mészáros, “Optimization of stone-quarry technologies,” in *Comminution 1994*, K. S. E. Forssberg and K. Schönert, Eds. Amsterdam: Elsevier, 1996, pp. 447–459.
- [30] A. Gazi, G. Skevis, and M. A. Founti, “Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant,” *J. Clean. Prod.*, vol. 32, pp. 10–21, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.007.
- [31] M. Kužvart, Ed., “11 - Geophysical Methods of Prospecting and Exploration of Deposits by Industrial Raw Materials,” in *Developments in Economic Geology*, vol. 18, Elsevier, 1984, pp. 372–397.
- [32] R. E. Hunt, *Geotechnical Investigation Methods: A Field Guide for Geotechnical Engineers*, 1 edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- [33] D. H. Griffiths, *Applied Geophysics for Geologists and Engineers: The Elements of Geophysical Prospecting*, 2 edition. Oxford ; New York: Pergamon Pr, 1981.
- [34] B. S. Evenden, N. A. Anstey, and D. R. Stone, *Seismic Prospecting Instruments*. Gebruder Borntraeger, 1970.
- [35] R. McQuillin, M. Bacon, W. Barclay, and R. E. Sheriff, *An Introduction to Seismic Interpretation*, 2 edition. Houston: Gulf Pub Co, 1985.
- [36] I. Muchingami, D. Hlatywayo, J. Nel, and C. Chuma, “Electrical resistivity survey for groundwater investigations and shallow subsurface evaluation of the basaltic-greenstone formation of the urban Bulawayo aquifer,” *Phys. Chem. Earth*, vol. 50–52, pp. 44–52, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.pce.2012.08.014.
- [37] P. K. Bhattacharya, P. K. Bhattacharya, H. P. Patra, and P. K. Patra, *Direct Current Geoelectric Sounding: Principles and Interpretation*. Elsevier Publishing Company, 1968.
- [38] G. Kunetz, *Principles of Direct Current Resistivity Prospecting*. Gebr. Borntraeger, 1966.
- [39] A. Roy and A. Apparao, “Depth of investigation in direct current methods,” *GEOPHYSICS*, vol. 36, no. 5, pp. 943–959, Oct. 1971, doi: 10.1190/1.1440226.
- [40] W. J. Hinze, *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*. Society of Exploration Geophysicists, 1985.
- [41] D. H. Tarling, *Principles and applications of palaeomagnetism*. London: Chapman and Hall, 1971.

- [42] S. M. Davis *et al.*, “Remote sensing: The quantitative approach,” *N. Y. McGraw-Hill Int. Book Co 1978 405 P*, 1978, Accessed: Jul. 10, 2020. [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1978mhi..book.....D>.
- [43] W. Ge, Q. Cheng, Y. Tang, L. Jing, and C. Gao, “Lithological Classification Using Sentinel-2A Data in the Shibanzing Ophiolite Complex in Inner Mongolia, China,” *Remote Sens.*, vol. 10, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/rs10040638.
- [44] N. Le Boutillier, *MINERAL EXPLORATION: DRILLING, SAMPLING AND DATA QUALITY ASSURANCE MANUAL*. 2014.
- [45] O. Bowles, *The Technology of Marble Quarrying*. U.S. Government Printing Office, 1916.
- [46] “Geotechnical Drilling and Sampling.” <https://www.nationaldriller.com/articles/86244-geotechnical-drilling-and-sampling> (accessed Jul. 10, 2020).
- [47] R. Timoney *et al.*, “A low resource subglacial bedrock sampler: The percussive rapid access isotope drill (P-RAID),” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 177, p. 103113, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.coldregions.2020.103113.
- [48] H. Tanaka, P. Sharma, T. Tsuchida, and M. Tanaka, “Comparative Study on Sample Quality Using Several Types of Samplers,” *Soils Found.*, vol. 36, no. 2, pp. 57–68, Jun. 1996, doi: 10.3208/sandf.36.2_57.
- [49] E. National Academies of Sciences, *Manual on Subsurface Investigations*. 2019.
- [50] A. Maltman, *Geological maps: An Introduction*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [51] P. Voudouris *et al.*, “Gemstones of Greece: Geology and Crystallizing Environments,” *Minerals*, vol. 9, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2019, doi: 10.3390/min9080461.
- [52] K. F. Lane, *The Economic Definition of Ore: Cut-off Grades in Theory and Practice*. COMET Strategy Pty Ltd, 2016.
- [53] S. Q. Yang, Y. Z. Jiang, W. Y. Xu, and X. Q. Chen, “Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 45, no. 17, pp. 4796–4819, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.04.023.
- [54] G. Exadaktylos and G. Saratsis, “Methodology for the Estimation and Classification of White Marble Reserves,” *Min. Metall. Explor.*, May 2020, doi: 10.1007/s42461-020-00228-3.
- [55] K. Μόδης and Σ. Σταματάκη, *Εισαγωγή στη Μεταλλευτική Έρευνα*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015.
- [56] G. Forlani and L. Pinto, “Monitoring marble extraction in open cast quarries,” vol. 33 B4, pp. 283–288, 2000.
- [57] I. Kapageridis and C. Albanopoulos, “Resource and Reserve estimation for a marble quarry using quality indicators,” *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, vol. 118, no. 1, pp. 39–45, Jan. 2018, doi: 10.17159/2411-9717/2018/v118n1a5.
- [58] A. C. Edwards, *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation - the AusIMM Guide to Good Practice: Monograph 23*. Carlton, Vic: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2001.
- [59] A. G. Journel and C. J. Huijbregts, *Mining Geostatistics*. Caldwell, N.J: The Blackburn Press, 2004.
- [60] K. Modis, S. Stavrou, N. Terezopoulos, and D. Vattis, “Geostatistics versus inverse distance squares in ore reserves estimation: comparative case study in copper ore body in Cyprus,” *Min. Technol.*, vol. 117, no. 1, pp. 48–52, Mar. 2008, doi: 10.1179/174328607X228866.
- [61] J.-P. Chilès and P. Delfiner, “Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty,” *Wiley Ser. Probab. Stat.*, Jan. 2012, doi: 10.1002/9781118136188.

- [62] “Maptek - Quarry mining software for modelling & analysis - Vulcan.”
https://www.maptek.com/products/vulcan/quarrymodeller_bundle.html (accessed Jul. 10, 2020).
- [63] Maptek, “Maptek Vulcan Brochure.” 2018, [Online]. Available:
https://www.maptek.com/pdf/vulcan/Maptek_Vulcan_brochure.pdf.