



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων**

**ΜΟΝΤΕΛΟ ΛΙΘΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ  
ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΑΠΟ ΠΥΡΗΝΟΛΗΠΤΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ**

Μεταπτυχιακή διατριβή

M.Sc Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον

Μπάϊερ Ναταλία-Βασιλική

**Εξεταστική Επιτροπή**

Ξηρουδάκης Γεώργιος, Επίκ Καθηγητής (Επιβλέπων)

Εξαδάκτυλος Γεώργιος, Καθηγητής (ΕΜΠ)

Σαράτσης Γεώργιος, ΕΔΙΠ

**Ιούλιος 2022**

Δηλώνω ρητά ότι, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Επίσης σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία υποβάλλεται σε αξιολόγηση και οι απόψεις που περιέχονται σε αυτήν αφορούν τον συγγραφέα και δεν εκφράζουν την εξεταστική τριμελή επιτροπή.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή με τίτλο «Μοντέλο λιθολογίας και ασυνεχειών κοιτάσματος μαρμάρου από πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις» εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μελέτης & Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων του Πολυτεχνείου της Κρήτης. Η μελέτη έγινε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Ξηρουδάκη Γεώργιο και τον κ.Εξαδάκτυλλο Γεώργιο που εισηγήθηκε την μεταπτυχιακή διατριβή, για την εμπιστοσύνη τους να μου αναθέσουν αυτό το έργο και την χρήσιμη καθοδήγηση τους στην διεκπεραίωση του. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ.Σαράτση Γεώργιο για την ενεργή συμμετοχή του, για την χρήσιμη συμβουλή του.

Θερμές ευχαριστίες αποδίδω στον κ.Χατζηπαναγή Ιωάννη, Δρ. Γεωλόγος της ΕΑΓΜΕ για την πολύτιμη βοήθεια του, στην ανεύρεση των πρωτογενή πειραματικών δεδομένων καθώς και την καθοδήγηση του στην γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την αγάπη τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κλάδος των διακοσμητικών πετρωμάτων διατηρεί τις παραγωγικές επιδόσεις σε όλα σχεδόν τα ενεργά λατομικά κέντρα μαρμάρου. Τα καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά (χρώμα, φυσικοχημικές ιδιότητες) αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα για τις εξαγωγικές δραστηριότητες κάθε χώρας. Στην αξιοποίηση των μαρμαροφόρων περιοχών υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που καθορίζουν το αν είναι συμφέρουσα η εκμετάλλευση. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες είναι η τιμή και η ζήτηση της αγοράς του διακοσμητικού πετρώματος, ο δείκτης όγκου απολήψιμων μαρμάρων (recovery ratio, RR), ο δείκτης όγκου στείρων (stripping ratio, SR), η τοπογραφία, το ανάγλυφο της περιοχής, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια καθώς και η γεωμετρία του μεταλλείου.

Η εκμετάλλευση μιας μαρμαροφόρου περιοχής καθορίζεται από την αποληψιμότητα των ογκομαρμάρων και από τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Ο προσδιορισμός των αποθεμάτων και της αξιοπιστίας τους γίνεται μέσω ερευνών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Οι γεωτρήσεις δειγματοληψίας χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έκτασης και της συνέχειας του μαρμαροφόρου κοιτάσματος. Η τεκτονική του κοιτάσματος και η χαρτογράφηση των ασυνεχειών του πετρώματος προσδιορίζουν τα τελικά αποθέματα.

Στόχος της έρευνας είναι η δημιουργία ενός μαθηματικού λιθολογικού μοντέλου και ενός μοντέλου ασυνεχειών του κοιτάσματος μαρμάρου. Συγκεκριμένα, δημιουργείται μια μέθοδος προσδιορισμού των αποθεμάτων που μπορούν να εκμεταλλευτούν σε μια μαρμαροφόρο περιοχή. Πρόκειται για την εκτίμηση του όγκου των απολήψιμων μαρμάρων και την εκτίμηση της κατανομής των ογκομαρμάρων, με βάση δεδομένα από την ανάλυση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων μαρμάρων της περιοχής του Οχυρού Δράμας. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η λευκότητα (Wht %) και ο αριθμός ασυνεχειών ανά μέτρο δείγματος ( $FF\ m^{-1}$ ), έγινε γεωστατιστική ανάλυση και ο προσδιορισμός του ογκομετρικού μοντέλου μέσω των τεχνικών του ογκικού (Block) Kriging. Τέλος, προσδιορίζεται το ποσοστό αποληψιμότητας των εμπορεύσιμων μαρμάρων μέσω του σχεδιασμού της τελικής μορφής εκμετάλλευσης η οποία έγινε μέσω των απαραίτητων περιορισμών (constraints) και γίνεται η εκτίμηση της στατιστικής κατανομής του αριθμού ασυνεχειών FF.

## **ABSTRACT**

Decorative stones are the main production performance in almost all active marble quarrying deposits. The positive quality & characteristics (color, physicochemical properties) is a significant advantage of the export activities in each country. In the exploitation of marble deposits there are some factors that determine the marble reserves. These factors are decorative stone market price and demand, Recovery ratio (RR), Stripping ratio (SR), topography, the surface, geometrical characteristics, environmental and social criteria.

Marble exploitation is determined by the extractability of the marble blocks and their quality characteristics. Core drillings and the drilling's samples are used to determine the extent and continuity of the marble deposit. The tectonics of the deposit and the mapping of the rock discontinuities are crucial to be researched.

The aim of the research is a mathematical lithological model and discontinuities of a marble deposit. The method determines the marble reserves from the marble resources and estimates the distribution of the marbles. The data analysis is derived from the marble drillings in Oxiro Dramas. The coloring characteristics whiteness (Wht %) and marble discontinuities (FF m-1) are the data of the characterization. The mathematical model, geostatistical analysis, and the determination of the volumetric model through Block Kriging techniques was performed. Finally, the percentage of retrievability of marble reserves and the evaluation of the distribution are determined through the design of the final form of exploitation which was constructed under constraints.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Στόχος.....	1
1.2 Παραγωγές διακοσμητικών πετρωμάτων στην Ελλάδα .....	1
1.3 Τα λατομικά κέντρα της Ανατολικής Μακεδονίας .....	2
1.4 Παράγοντες που χαρακτηρίζουν την εμπορικότητα των μαρμάρων.....	4
1.4.1 Η Χημική – Ορυκτολογική σύσταση .....	4
1.4.2 Η Κοκκομετρία .....	4
1.4.3 Ο Χρωματισμός.....	4
1.4.4 Η Τεκτονική παραμόρφωση .....	5
1.4.5 Οι Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις .....	6
1.4.6 Οι Φυσικομηχανικές ιδιότητες .....	6
1.4.7 Οι ασυνέχειες.....	6
1.4.8 Τεχνικές κατεργασίες.....	9
1.5 Αποθέματα και εκμετάλλευση .....	9
2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΦΑΛΑΚΡΟΥ .....	14
2.1 Λιθολογία-λιθοστρωματογραφία.....	14
2.2 Μαγματισμός.....	20
2.3 Τεκτονική .....	22
2.3.1 Η πλαστική τεκτονική.....	22
2.3.2 Η Ρηξιγενής τεκτονική.....	23
2.3.3 Τα ρήγματα .....	24
2.3.4 Οι διακλάσεις και ρωγματώσεις.....	25
2.4 Γεωλογική-κοιτασματολογική μελέτη μαρμαροφόρων περιοχών.....	26
2.5 Ορυκτολογική σύσταση των μαρμάρων της περιοχής Φαλακρού .....	28
3 ΕΠΕΞΕΡΑΣΙΑ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΥΡΗΝΟΛΗΠΤΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	30
3.1 Ανάλυση δειγμάτων πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων, προσδιορισμός χρωματισμού (Wht %) και ασυνεχειών μαρμάρων ( $FF\ m^{-1}$ ).....	30

3.2	Ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης και η δημιουργία βάσης δεδομένων από πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις.....	37
3.3	Γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων, προσδιορισμός παραμέτρων βαριογραμμάτων .....	40
3.4	Ογκομετρικό μοντέλο (Block Model)-Υπολογισμός Wht-FF centroid blocks μέσω αλγορίθμου Kriging	43
3.5	Σχεδιασμός τελικής μορφής εκμετάλλευσης και προσδιορισμός μεταλλευτικών αποθεμάτων	47
3.6	Η εκτίμηση της χωρικής κατανομής των εκμεταλλεύσιμων blocks .....	49
4	Συμπεράσματα-Προτάσεις .....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		64

Εικόνα 1-1: Οι εισαγωγές και εξαγωγές μαρμάρων και διακοσμητικών λίθων τα έτη 2000-2014 (ΥΠΕΚΑ, 2015). ....	2
Εικόνα 1-2: Ενεργά Λατομικά κέντρα μαρμάρου Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (ΥΠΕΚΑ, 2015). ....	2
Εικόνα 1-3: Γεωλογικός χάρτης λατομικών κέντρων Αν. Μακεδονίας (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007). ....	3
Εικόνα 1-4: Κατανομή παραγωγής ογκομαρμάρων (%) Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (ΥΠΕΚΑ, 2015). ....	3
Εικόνα 1-5: Γεωμετρικές ιδιότητες ασυνεχειών (Harrison, 1997) .....	7
Εικόνα 1-6: Υπαίθρια εκμετάλλευση μαρμάρου (Γρανίτης Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991). ....	10
Εικόνα 1-7: Υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου (Βώλακας Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991). ....	11
Εικόνα 1-8: Πυρήνες γεώτρησης σε δολομιτικό μάρμαρο (Βώλακας Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991). ...	12
Εικόνα 2-1: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Δυτικής Ροδόπης στον οποίο φαίνεται ο χώρος έρευνας (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007). ....	14
Εικόνα 2-2: Γεωτεκτονικό σκαρίφημα του Φαλακρού Όρους (Chatzipanagis, 1989). ....	17
Εικόνα 2-3: Λιθοστρωματογραφική στήλη Φαλακρού όρους (Chatzipanagis, 1989) .....	18
Εικόνα 2-4: Λεπτοπλακώδη ταινιωτά-σιπολινικά μάρμαρα (Φαλακρό) (Χατζηπαναγής, 1991). ....	19
Εικόνα 2-5: Δολομιτικά μάρμαρα (Φαλακρό) (Χατζηπαναγής, 1991). ....	19
Εικόνα 2-6: Χονδροπλακώδη ασβεστιτικά μάρμαρα (Φαλακρό) (Χατζηπαναγής, 1991). ....	20
Εικόνα 2-7: Ισοκλινείς πτυχές σε ταινιωτά-σιπολινικά μάρμαρα (Χατζηπαναγής, 1991). ....	23
Εικόνα 2-8: Κατακόρυφα ρήγματα σε ασβεστιτικά μάρμαρα (Χατζηπαναγής, 1991). ....	25
Εικόνα 2-9: Γεωλογικός-κοιτασματολογικός χάρτης (Οχυρό Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991). ....	27
Εικόνα 2-10: Γεωλογική κοιτασματολογική τομή Ι-Ι' (Χατζηπαναγής, 1991). ....	28
Εικόνα 2-11: Μικροφωτο-2α : Παρατηρούνται μικροδιακλάσεις να διασχίζουν την υπελεπτόκοκκη δολομιτική μάζα του πετρώματος, Nicols //, μεγέθυνση X12,5 (Χατζηπαναγής, 1991). ....	29
Εικόνα 2-12: Μικροφωτο-2δ : Παρατηρείται οξειδωμένος κόκκος σιδηρούχου ορυκτού, Nicols //, μεγέθυνση X200 (Χατζηπαναγής, 1991). ....	29
Εικόνα 3-1: Μηκοτομή Γεώτρησης K4 (1-20m). ....	32
Εικόνα 3-2: Υπόμνημα λευκότητας και ασυνεχειών μαρμάρων. ....	33
Εικόνα 3-3: Τρισδιάστατη χρωματική απεικόνιση CIELAB (Sappi, 2013). ....	34
Εικόνα 3-4: Γεώτρηση K4 (0-1 m) Matlab's Colour Threshold. ....	35
Εικόνα 3-5: Γεώτρηση K4 (1-2 m) Matlab's Colour Threshold. ....	35
Εικόνα 3-6: Στερεογραφική προβολή μέσω μεγάλων κύκλων οικογενειών ασυνεχειών (Dips-Rocscience). ....	36
Εικόνα 3-7: Τοπογραφική κάτοψη της εκμετάλλευσης. ....	37



Εικόνα 3-8: Τοπογραφική κάτοψη της εκμετάλλευσης.....	38
Εικόνα 3-9: Τρισδιάστατη τοπογραφική απεικόνιση εκμετάλλευσης. ....	38
Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά εμπορικότητας μαρμάρων (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007).....	8
Πίνακας 1-2: Χαρακτηριστικά εμπορικότητας μαρμάρων (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007).....	9
Πίνακας 3-1: Τάξεις ποιότητας λευκότητας μαρμάρων (I-IV). ....	31
Πίνακας 3-2: Οικογένειες ασυνεχειών δειγμάτων μαρμάρων (Στερεογραφικής προβολής). ....	36
Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά ημι-βαριογραμμάτων (Wht %) και $(FF\ m - 1)$ μαρμάρων.....	43
Πίνακας 3-4: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου γεωλογικών πόρων (recourses). ....	46
Πίνακας 3-5: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου γεωλογικών πόρων (recourses). ....	46
Πίνακας 3-6: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου μεταλλευτικών αποθεμάτων (reserves). ....	48
Πίνακας 3-7: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου μεταλλευτικών αποθεμάτων (reserves). ....	49

## **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Στόχος**

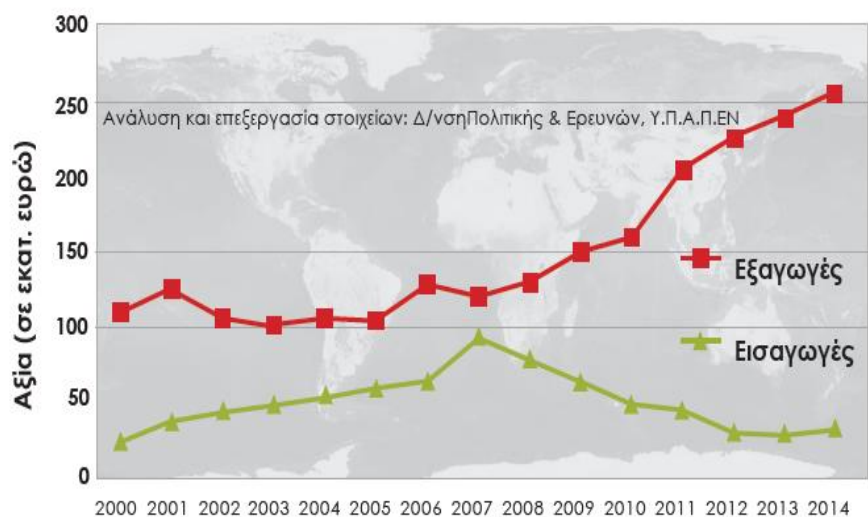
Στόχος της έρευνας είναι η δημιουργία ενός μαθηματικού λιθολογικού μοντέλου και ενός μοντέλου ασυνεχειών του κοιτάσματος μαρμάρου. Συγκεκριμένα, δημιουργείται μια μέθοδος προσδιορισμού των αποθεμάτων που μπορούν να εκμεταλλευτούν σε μια μαρμαροφόρο περιοχή.

### **1.2 Παραγωγές διακοσμητικών πετρωμάτων στην Ελλάδα**

Με τον πετρολογικό όρο, μάρμαρο θεωρείται κάθε ανθρακικό πέτρωμα το οποίο έχει κρυσταλλωθεί σε συνθήκες περιοδικής μεταμόρφωσης. Με τον εμπορικό όρο μάρμαρο θεωρείται κάθε πέτρωμα το οποίο μπορεί να κοπεί και να λειανθεί, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δομική και τη διακοσμητική.

Στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια ο κλάδος των διακοσμητικών πετρωμάτων διατηρεί τις παραγωγικές επιδόσεις σε όλα σχεδόν τα ενεργά λατομικά κέντρα μαρμάρου. Αυτό οφείλεται στα καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά (χρώμα, φυσικοχημικές ιδιότητες) και αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τις εξαγωγικές δραστηριότητες. Η Ελλάδα, δραστηριοποιείται στις εξαγωγές διακοσμητικών πετρωμάτων (όγκοι, πλάκες, κατεργασμένα προϊόντα), στις χώρες Η.Π.Α., Γερμανία, Ιταλία, Ιαπωνία, Άπω ή Μέση Ανατολή, Ανατολική Ευρώπη, κ.λπ., Παρά την ανταγωνιστικότητα στη διεθνή αγορά εξαιτίας της επιθετικής πολιτικής των ανταγωνιστριών χωρών, και λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής (Κίνα, Τουρκία, κ.ά.) η εκμετάλλευση διακοσμητικών πετρωμάτων αντιπροσωπεύει περίπου το 1,1% του συνόλου των ελληνικών εξαγωγών. (Λασκαρίδης & Πατρώνης, 2005)

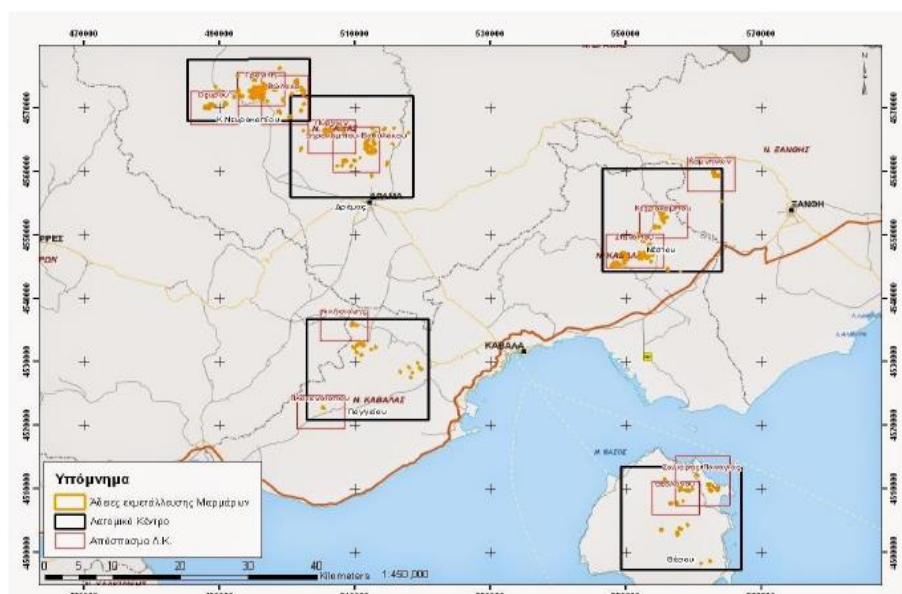
Οι εισαγωγές και εξαγωγές μαρμάρων και διακοσμητικών λίθων τα έτη 2000-2014 (*Εικόνα 1-1*). Οι εξαγωγές των μαρμάρων και των φυσικών λίθων σύμφωνα με τα στοιχεία Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛ.ΣΤΑΤ) και την Δ/ση Πολιτικής και Ερευνών του ΥΠΕΝ, ήταν για τα έτη 2013 και 2014 στο επίπεδο παραγωγής 840-860 χιλ τον και συνολικής αξίας 240-260 εκατ. ευρώ (ΥΠΕΚΑ, 2015).



Εικόνα 1-1: Οι εισαγωγές και εξαγωγές μαρμάρων και διακοσμητικών λίθων τα έτη 2000-2014 (ΥΠΕΚΑ, 2015).

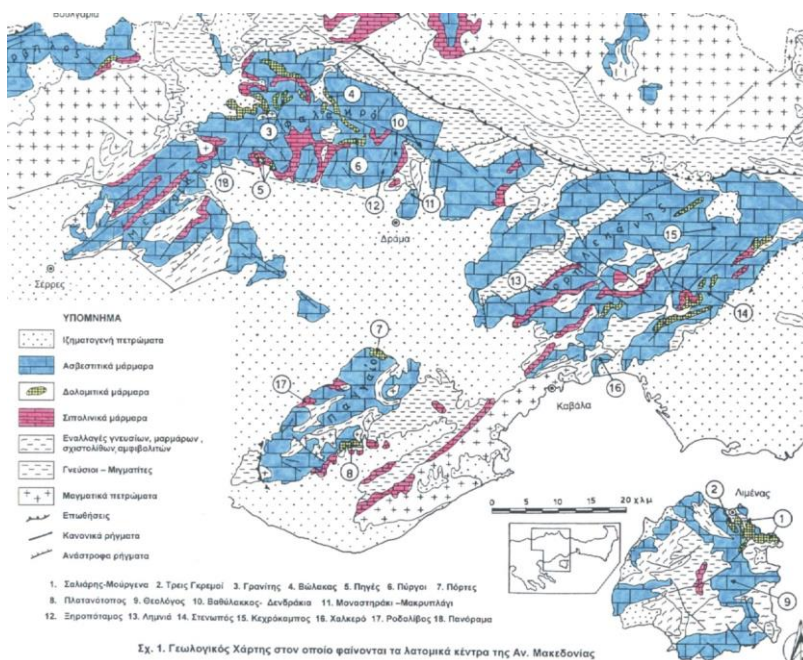
### 1.3 Τα λατομικά κέντρα της Ανατολικής Μακεδονίας

Στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, υπάρχουν πέντε ενεργά λατομικά κέντρα μαρμάρου (Εικόνα 1-2) όπου λειτουργούν περισσότερα από 135 λατομεία καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής και των εξαγωγών στη χώρα (ΥΠΕΚΑ, 2015).

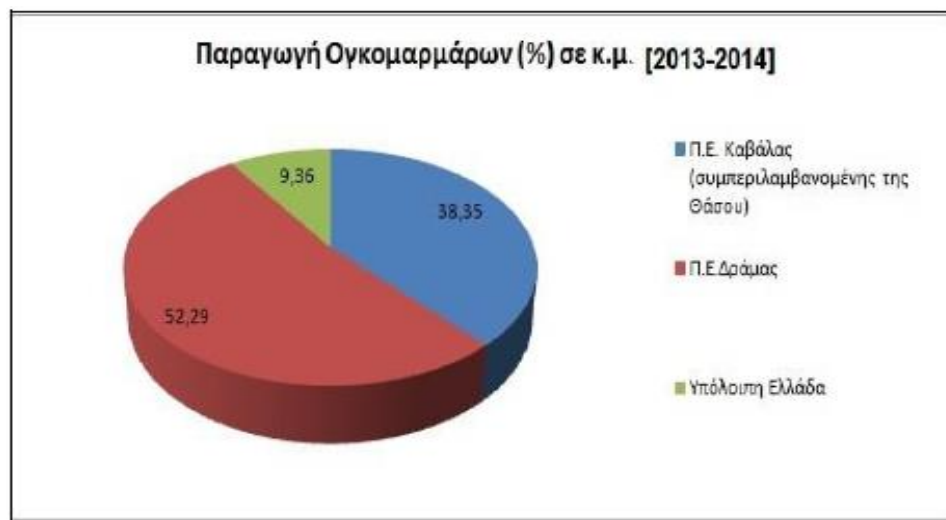


Εικόνα 1-2: Ενεργά Λατομικά κέντρα μαρμάρου Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (ΥΠΕΚΑ, 2015).

Στην Ελληνική Επικράτεια, όπως παρουσιάζεται και στον γεωλογικό χάρτη των λατομικών κέντρων της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (Εικόνα 1-3) έχει το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής (>90%) και ειδικότερα οι νομοί Δράμας και Καβάλας. Επίσης, το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής ογκομαρμάρων το διαθέτει η Δράμα (52.29 %) και ύστερα η Καβάλα (38.35 %) (Εικόνα 1-4).



Εικόνα 1-3: Γεωλογικός χάρτης λατομικών κέντρων Αν. Μακεδονίας (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007).



Εικόνα 1-4: Κατανομή παραγωγής ογκομαρμάρων (%) Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (ΥΠΕΚΑ, 2015).

## **1.4 Παράγοντες που χαρακτηρίζουν την εμπορικότητα των μαρμάρων**

Η εμπορική αξία των φυσικών πετρωμάτων αποτυπώνεται στην υψηλή αισθητική και στις φυσικομηχανικές φυσικομηχανικές ιδιότητες. Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την εμπορικότητα είναι: η χημική – ορυκτολογική σύσταση, η κοκκομετρία του πετρώματος, ο χρωματισμός του, τεκτονικές δομές, υδροθερμικές εξαλλοιώσεις και οι φυσικομηχανικές του ιδιότητες. Επίσης, οι τεχνικές στη μεταποίηση, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τα μέτρια χαρακτηριστικά διαφόρων μαρμάρων (Λασκαρίδης & Πατρώνης, 2005).

### **1.4.1 Η Χημική – Ορυκτολογική σύσταση**

Η χημική – ορυκτολογική σύσταση αποτελεί παράμετρο που καθορίζει την εμπορικότητα των μαρμάρων, ανάλογα με τη σύσταση δημιουργείται διαφορετική αισθητική αλλά και διαφορετικές φυσικομηχανικές ιδιότητες. Στην Αν. Μακεδονία διαμορφώνονται τρεις τύποι ανθρακικών πετρωμάτων: δολομιτικά μάρμαρα, ασβεστιτικά μάρμαρα και σιπολινικά μάρμαρα. Συνήθως, η περιεκτικότητα σε ποσοστά γραφίτη και μεταλλικών ορυκτών με τη μορφή ταινιών, νησίδων ή διάσπαρτα στο πέτρωμα, διαμορφώνει τους διαφορετικούς εμπορικούς τύπους (Λασκαρίδης & Πατρώνης, 2005).

### **1.4.2 Η Κοκκομετρία**

Η κοκκομετρία των μαρμάρων του όρους Φαλακρού ποικίλει από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με το βαθμό μεταμόρφωσης και το ρυθμό ανακρυστάλλωσης του πετρώματος. Με βάση το μέγεθος των κόκκων των ανθρακικών ορυκτών (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2001) τα μάρμαρα διακρίνονται σε: υπερχονδρόκοκκα, με μέγεθος κόκκων  $>1,5\text{mm}$ , χονδρόκοκκα με κόκκους μεταξύ  $0,8-1,5\text{mm}$ , μεσόκοκκα με μέγεθος κόκκων  $0,2-0,8\text{mm}$ , λεπτόκοκκα με μέγεθος κόκκων μεταξύ  $0,08-0,2\text{mm}$  και υπερλεπτόκοκκα, όπου οι κόκκοι δεν ξεπερνούν τα  $0,08\text{mm}$ . (Λασκαρίδης & Πατρώνης, 2005).

### **1.4.3 Ο Χρωματισμός**

Ο χρωματισμός των λευκών μαρμάρων τα καθιστούν συνήθως ως «καθαρά» και κυμαίνεται ανάλογα με το ποσοστό των περιεχόμενων μη ανθρακικών ορυκτών. Τα συνήθη χρώματα των μαρμάρων του Φαλακρού όρους είναι: γαλακτόχροα, λευκά, ημίλευκα, γκριζόλευκα ταινιωτά ή ριγωτά, σκουρόχρωμα ταινιωτά, τεφρόχροα, και με μικρότερη εμφάνιση

ποικιλόχρωμα. Γενικά τα λευκά μάρμαρα στην περιοχή έχουν δολομιτική σύσταση, τα ημίλευκα, γκριζόχρωμα και σκουρόχρωμα ασβεστιτική, ενώ τα σιπολινικά παρουσιάζουν ποικιλίες χρωμάτων.

Τα δολομιτικά μάρμαρα της περιοχής Φαλακρού είναι κυρίως γαλακτόχροα μάρμαρα όπου αυτά εμφανίζονται «καθαρά». Το χαρακτηριστικό χρώμα τους οφείλεται στην ανάκλαση του φωτός σε επιφάνειες ασυνέχειας, οι οποίες βρίσκονται σε βαθύτερα σημεία στη μάζα του μαρμάρου (Τσιραμπίδης, 2000).

Τα ασβεστιτικά μάρμαρα εμφανίζονται από λευκά έως σκουρόχρωμα, με όλες τις ενδιάμεσες δυνατές αποχρώσεις ανάλογα με το περιεχόμενο ποσοστό γραφίτη στο πέτρωμα (Χατζηπαναγής, 1991). Οι ερυθρωπές ταινίες που παρουσιάζονται σε ορισμένους εμπορικούς τύπους της περιοχής Γρανίτη – Βόλακα, οφείλουν το χρωματισμό τους στην παρουσία οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου τα οποία εμποτίζουν το υπερλεπτόκοκκο (μυλωνίτης) δολομιτικό υλικό (Χατζηπαναγής & Βουγιούκας, 2004). Τέλος, η ποικιλοχρωμία των σιπολινικών μαρμάρων οφείλεται στην παρουσία ορυκτών όπως: μοσχοβίτης, φλογοπίτης, χλωρίτης, τρεμολίτης, γραφίτης, χαλαζίας και μεταλλικά ορυκτά.

#### **1.4.4 Η Τεκτονική παραμόρφωση**

Η αποτύπωση των τεκτονικών δομών διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του μαρμάρου και το είδος της παραμόρφωσης, παρόλο που τα ανθρακικά πετρώματα έχουν υποστεί την ίδια τεκτονική παραμόρφωση με τα υπόλοιπα μεταμορφωμένα πετρώματα της Ροδόπης. Έτσι ορισμένες παραμορφωτικές δομές όπως πτυχές, boundinage, s-c τύπου μυλωνίτες, αποτυπώνονται με ευκρίνεια σε μάρμαρα με ταινίες διαφορετικού χρώματος ή με διαφορετική χημική – ορυκτολογική σύσταση, ενώ διακρίνονται ελάχιστα ή καθόλου σε μονόμικτα ασβεστιτικά ή δολομιτικά μάρμαρα. Οι δομές αυτές, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν επηρεάζουν τη συνοχή του πετρώματος, αλλά αντίθετα δημιουργούν νέους εμπορικούς τύπους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο τύπος “Galaxy” ο οποίος διαμορφώνεται από πτυχωμένες ποικιλόχρωμες ταινίες που εναλλάσσονται με λευκό δολομιτικό υλικό, και ο τύπος “Αμβροσία” ο οποίος είναι ένα τεκτονικό ψευδοκροκαλοπαγές δολομιτικό πέτρωμα. (Χατζηπαναγής & Βουγιούκας, 2004)

#### 1.4.5 Οι Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις

Παρατηρούνται φαινόμενα υδροθερμικών εξαλλοιώσεων τα οποία έχουν διαμορφώσει εμπορικούς τύπους μαρμάρων από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι περιπτώσεις του Green Star, του Pink Lais και του ταινιωτού Βόλακα.

#### 1.4.6 Οι Φυσικομηχανικές ιδιότητες

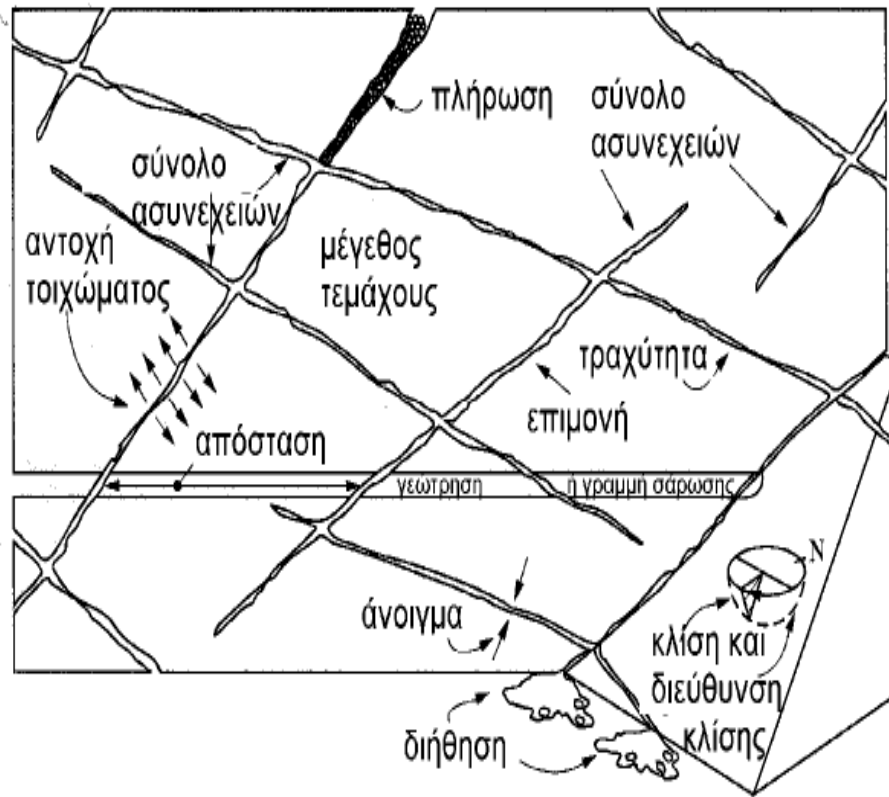
Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες αποτελούν σημαντική παράμετρο κυρίως στη μεταποίηση και τη χρήση των διακοσμητικών πετρωμάτων και διαφέρουν από πέτρωμα σε πέτρωμα. Στα μάρμαρα του Φαλακρού οι διαφορές είναι ελάχιστες και μικρές. Ο συντελεστής απορροφητικότητας στα ασβεστίτικα μάρμαρα είναι ~0,08wt%, ενώ στα δολομιτικά μάρμαρα κυμαίνεται μεταξύ 0,14-0,24wt%, (Χατζηπαναγής & Βουγιούκας, 2004). Η αντοχή στη θλίψη για τα ασβεστίτικα μάρμαρα είναι 50-90Nmm<sup>2</sup> και για τα δολομιτικά 100-174 Nmm<sup>2</sup>. Η αντοχή στην κάμψη, η αντοχή στη φθορά από τριβή και η αντοχή στην πρόσκρουση είναι σχεδόν ίδιες τόσο για τα δολομιτικά όσο και για τα ασβεστίτικα μάρμαρα (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2001). Στη συνέχεια δίνονται οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των πλέον χαρακτηριστικών μαρμάρων του όρους Φαλακρού (*Πίνακας 1-1-Πίνακας 1-2*).

#### 1.4.7 Οι ασυνέχειες

Οι ασυνέχειες των πετρωμάτων αποτελούν ένα από τους βασικούς παράγοντες εκμετάλλευσης των αποθεμάτων μαρμάρων και καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης. Η ασυνέχεια (discontinuity) αποτελεί κάθε επιφάνειά του πετρώματος η οποία το διαχωρίζει. Στην εκμετάλλευση του πετρώματος και κατά την διάρκεια μηχανικών διεργασιών για την παραγωγή του, οι ασυνέχειες αποδίδουν μηδενική εφελκυστική αντοχή.

Για τον σωστό προσδιορισμό των ασυνεχειών έχουν οριστεί κάποιες βασικές παράμετροι προσδιορισμού οι οποίες είναι (*Εικόνα 1-5*): 1. Προσανατολισμός: Διεύθυνση κλίσης ή αζιμούθιο επιπέδου ασυνέχειας. 2. Ορθή απόσταση: Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών. 3. Η εμμονή: Το μήκος ίχνους της ασυνέχειας 4. Αριθμός οικογενειών: Αριθμός διαφορετικών ειδών ασυνεχειών. 5. Μέγεθος τεμαχιδίων: Αποτελεί το μέγεθος των βραχώδη τεμαχιδίων τα οποία δημιουργούνται από τα σύνολα ασυνεχειών. 6. Τραχύτητα: Κύμανση της επιφάνειας της ασυνέχειας. 7. Αντοχή των τοιχωμάτων: Θλιπτική αντοχή πετρώματος στα τοιχώματα της

ασυνέχειας. 8. Άνοιγμα: Κενή απόσταση μεταξύ γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας. 9. Πλήρωση: Υλικό με το οποίο πληρώνονται τα γειτονικά τοιχώματα της ασυνέχειας. 10. Διήθηση: Υγρασίας και ποσοστό νερού είτε συνολικά στη βραχομάζα είτε επιμέρους.



Εικόνα 1-5: Γεωμετρικές ιδιότητες ασυνεχειών (Harrison, 1997).

Στα υπόγεια έργα η πυκνότητα των ασυνεχειών αποτελεί ένα δυνατό κριτήριο γιατί ανάλογα με τον αριθμό των ασυνεχειών κρίνεται η ευστάθεια του έργου. Συγκεκριμένα, μια ασυνέχεια δεν άγει εφελκυστικές τάσεις κάθετα στην επιφάνεια της και επίσης η διατμητική αντοχή κατά μήκος της ασυνέχειας είναι μικρή σε σχέση με αυτή του ακέραιου πετρώματος (Αγιουτάντης, 2019).



Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά εμπορικότητας μαρμάρων (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007)

ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ (ΕΝ 12440 2000)	ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (%wt)				
	ΑΣΒΕΣΤΙΤΗΣ	ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ	ΧΑΛΑΖΙΑΣ	ΜΑΡΜΑΡΥΓΙΕΣ	ΑΣΤΡΙΟΙ
ΛΕΥΚΟΠΗΓΩΝ	75	92,5	-	-	-
ΛΕΥΚΟ ΒΩΛΑΚΑ	8	92	-	-	-
ΛΕΥΚΟ ΓΡΑΝΙΤΗ (ΑΡΙΣΤΟ)	8	92	-	-	-
ΛΕΥΚΟ ΠΥΡΓΩΝ	3	97	-	-	-
ΛΕΥΚΟ ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	99	-	-	-	-
ΗΜΙΛΕΥΚΟ ΒΑΘΥΛΑΚΚΟΥ	98	0,8	0,2	0,2	-
ΓΚΡΟΖΟΧΡΩΜΟ ΒΑΘΥΛΑΚΚΟΥ	98	0,8	0,2	0,2	-
ΓΚΡΙΖΟ ΚΟΚΚΙΝΟΓΕΙΩΝ	20	80	-	-	-
ΡΟΖ ΚΟΚΚΙΝΟΓΕΙΩΝ	20	80	-	-	-
ΠΡΑΣΙΝΟ ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	99	-	-	-	-

Πίνακας 1-2: Χαρακτηριστικά εμπορικότητας μαρμάρων (Βουγιούκας &amp; Χατζηπαναγής, 2007).

ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ (ΕΝ 12440 2000)	ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ								
	ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (Kg/m <sup>2</sup> )	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ (%vol)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (%wt)	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (MPa)	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ (MPa)	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΥΚΛΟΥΣ ΨΥΞΗΣ/ ΑΠΟΨΥΞΗΣ (MPa)	ΦΘΟΡΑ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΡΙΒΗ (mm)	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ
ΛΕΥΚΟΠΗΓΩΝ	2840	0,63	0,19	38	158	16	101	2,45	41
ΛΕΥΚΟ ΒΩΛΑΚΑ	2825	0,64	0,19	35	139	10	103	2,20	59
ΛΕΥΚΟ ΓΡΑΝΙΤΗ (ΑΡΙΣΤΟ)	2840	0,64	0,20	20	114	6	98	4,47	51
ΛΕΥΚΟ ΠΥΡΓΩΝ	2846	0,49	0,17	30	125	14	66	3,51	55
ΛΕΥΚΟ ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	2700	0,19	0,07	19	85	18	80	2,76	40
ΗΜΙΛΕΥΚΟ ΒΑΘΥΛΑΚΚΟΥ	2698	0,26	0,09	19	60	10	35	3,38	39
ΓΚΡΟΖΟΧΡΩΜΟ ΒΑΘΥΛΑΚΚΟΥ	2711	0,21	0,08	23	89	18	72	2,26	41
ΓΚΡΙΖΟ ΚΟΚΚΙΝΟΓΕΙΩΝ	2825	0,46	0,17	24	141	14	169	2,23	36
ΡΟΖ ΚΟΚΚΙΝΟΓΕΙΩΝ	2827	0,51	0,18	33	174	16	192	2,14	40
ΠΡΑΣΙΝΟ ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	2694	0,25	0,09	28	72	17	57	3,43	33

### 1.4.8 Τεχνικές κατεργασίες

Οι τεχνικές κατεργασίες χαρακτηρίζουν το πόσο αξίζει η εκμετάλλευση ορισμένων μαρμάρων, που χωρίς αυτές θα ήταν αδύνατη η αξιοποίηση τους. Πρόκειται κυρίως για χημικές διεργασίες (Πομάκης, 2000) όπως: α) ρητινάρισμα, όπου η πλάκα του μαρμάρου εμποτίζεται με συστήματα ρητινών τα οποία διεισδύουν σε όλες τις ρωγμές, οπές, σκασίματα πληρώνοντας τα κενά και συγκολλώντας τα σαθρά τμήματα, β) ενίσχυση, η οποία συνίσταται στο συνδυασμό ρητίνης με υαλοϋφασμα ή υαλόπλεγμα στην οπίσθια πλευρά της πλάκας ώστε να την καταστήσει πιο ανθεκτική, γ) στοκάρισμα, όπου πληρώνονται μικρές ή μεγάλες οπές που παρουσιάζει το πέτρωμα, με χημικά προϊόντα.

### 1.5 Αποθέματα και εκμετάλλευση

Η αξία ενός κοιτάσματος μαρμάρου προσδιορίζεται εκτός από τη δυναμική της παγκόσμιας και εγχώριας αγοράς, ενώ το κόστος εξόρυξης από την ποιότητα και την ποσότητα του κοιτάσματος. Τα αποθέματα μιας μαρμαροφόρου περιοχής είναι από τα πιο χρήσιμα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν. Η περιεκτικότητα ενός μεταλλοφόρου κοιτάσματος σε μέταλλευμα προσδιορίζεται με το συντελεστή αποληψιμότητας κοιτάσματος μαρμάρου. Ο συντελεστής αποληψιμότητας εξαρτάται από τη φύση του

πετρώματος, την ύπαρξη και την πυκνότητα των μεσοσκοπικών δομών και την μέθοδο εξόρυξης. Ο συντελεστής αποληψιμότητας των ελληνικών λατομείων μαρμάρων κυμαίνεται από 10-20%. Για τους τραβερτίνες ανέρχεται >50%. Ο συντελεστής αποληψιμότητας 15% σημαίνει ότι από 100m<sup>3</sup> μαρμάρου εξορύσσονται 15m<sup>3</sup> υγιή ογκομάρμαρα.



*Εικόνα 1-6: Υπαίθρια εκμετάλλευση μαρμάρου (Γρανίτης Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991).*

Η μέθοδος εκμετάλλευσης μια μαρμαροφόρου περιοχής δηλαδή η επιλογή μεθόδου (υπόγεια ή υπαίθρια), ο τρόπος ανάπτυξης των εργασιών (προσπελάσεις, προπαρασκευές) και η επιλογή κατάλληλη μηχανολογικού εξοπλισμού επηρεάζεται από ορισμένους παράγοντες. Η εκμετάλλευση καθώς και οι παράγοντες που κρίνουν αν είναι συμφέρουσα είναι ο λόγος των στείρων υλικών αποκάλυψης προς τα εμπορεύσιμα ογκομάρμαρα. Η σχέση αυτή επηρεάζεται από το πάχος των υπερκείμενων στείρων, το πάχος του μαρμάρου, τη κλίση τη διεύθυνση και τη παράταξη του μεταλλεύματος. Επίσης, άλλος παράγοντας επιλογής της μεθόδου εκμετάλλευσης είναι η έκταση του κοιτάσματος σε βάθος, η τεκτονική μορφή του και η τοπογραφία της μεταλλοφόρου περιοχής (Μοσκοφόγλου, 1991). Στη συνέχεια, απεικονίζονται ενδεικτικά η υπαίθρια και η υπόγεια εκμετάλλευση μαρμαροφόρου περιοχής στις περιοχές του Γρανίτη (*Εικόνα 1-6*) και του Βόλακα Δράμας (*Εικόνα 1-7*).



*Εικόνα 1-7: Υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου (Βώλακας Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991).*

Οι γεωτρήσεις δειγματοληψίας (*Εικόνα 1-8*) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έκτασης και της συνέχειας του μαρμαροφόρου κοιτάσματος. Το πάχος του μαρμαροφόρου κοιτάσματος αποτελεί σημαντικό παράγοντα της γεωμετρίας καθώς παρατηρείται μεταβολή του χαρακτήρα του πετρώματος από στρώμα σε στρώμα. Αυτό οφείλεται στην μεταβολή του χρόνου απόθεσης του ασβεστολιθικού υλικού κατά την ιζηματογένεση. Ο προσδιορισμός του μεγέθους (μήκος πλάκας μαρμάρου  $X$ ) των μαρμάρων αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο για τον προσδιορισμό του όγκου των μαρμάρων που μπορούν να εξορυχθούν, κάτι που εξαρτάται από την τεκτονική του κοιτάσματος. Η χαρτογράφηση των ρηγμάτων, και ρωγματώσεων του πετρώματος καθώς και η εκτέλεση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων σε δύο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους αλλά και προς τους κωμούς γίνεται για τον προσδιορισμό των αιτιών που μπορούν να περιορίσουν το μέγεθος των όγκων των μαρμάρων (Μοσκοφόγλου, 1991).





Εικόνα 1-8: Πυρήνες γεώτρησης σε δολομιτικό μάρμαρο (Βόλακας Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991).

Η επιλογή ενός φυσικού διακοσμητικού υλικού γίνεται μέσω κάποιο κριτηρίων τα οποία είναι (Λασκαρίδη, 2005):

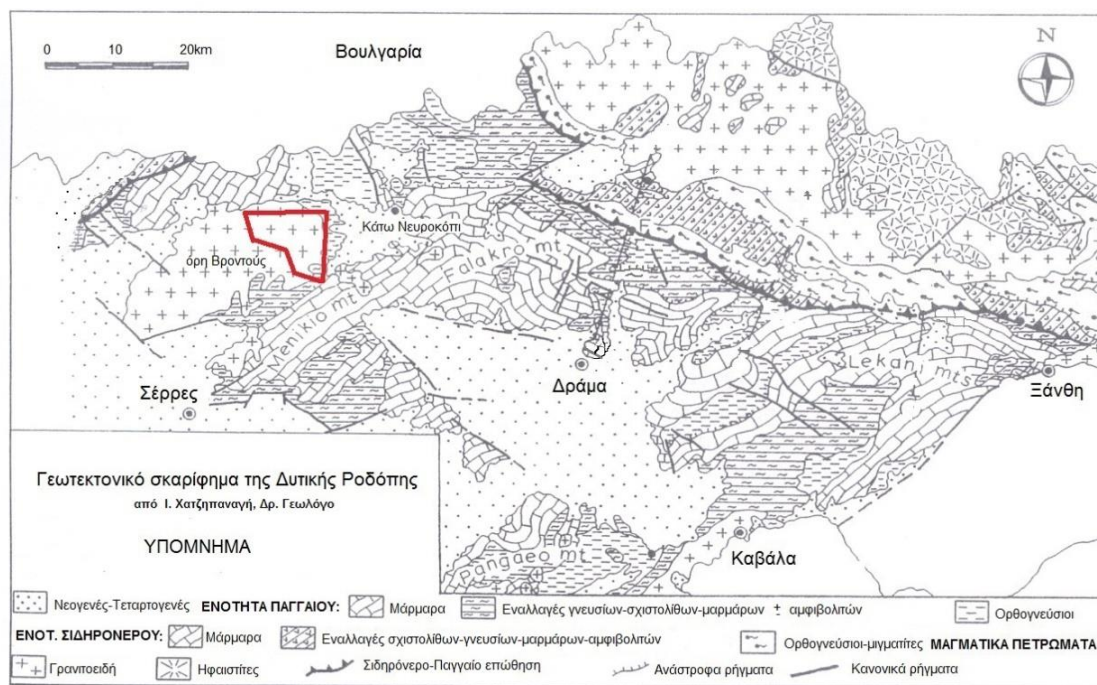
- Η κατάλληλη εφαρμογή της τεχνολογίας επεξεργασίας του υλικού που είναι χρήσιμη για να επιτευχθεί η κατάλληλη επιφάνεια στο επιλεγθέν υλικό καθώς και η διαθεσιμότητα της εφαρμογής αυτής. Ο προσδιορισμός των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηρισμών του υλικού που είναι απαραίτητα για το ανάλογο έργο εφαρμογής.
- Οι χημικές και φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος οι οποίες θα πρέπει να είναι έτσι ώστε να μην υπάρξει μελλοντική αρνητική επιρροή από τις κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής.

Η πιστοποίηση των υλικών γίνεται μετά από τον προσδιορισμό των φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών και κυρίως ενδιαφέρει η ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται στις μηχανικές καταπονήσεις που μπορεί να υποστεί στο εκάστοτε έργο. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω πλήρους εργαστηριακής έρευνας. Οι εξετάσεις αυτές γίνονταν με βάση τα διεθνή πρότυπα ATSM, DIN,

UNI σχετικά με τα διακοσμητικά υλικά. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN για τους φυσικούς λίθους από τις Τεχνικές Επιτροπές CEN/TC 246, 128,178 της Ε.Ε. (Λασκαρίδη, 2005).

## 2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΦΑΛΑΚΡΟΥ

Ο χώρος έρευνας βρίσκεται στη ευρύτερη περιοχή του όρους Φαλακρού και γεωλογικά ανήκει στην Τεκτονική Ενότητα Παγγαίου της Ζώνης της Ροδόπης (*Εικόνα 2-1*) η οποία δομείται κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα, πρασινοσχιστολιθικής φάσης, μέσα στα οποία διείσδυσαν όξινα μαγματικά σώματα (Mposkos et al, 1989).



*Εικόνα 2-1: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Δυτικής Ροδόπης στον οποίο φαίνεται ο χώρος έρευνας (Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007).*

### 2.1 Λιθολογία-λιθοστρωματογραφία

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες λιθολογικές ενότητες . (Chatzipanagis et al, 1983) (Χατζηπαναγής, 1991).

#### Ενότητα γνευσίων

Πρόκειται για τους παλαιότερους λιθολογικούς σχηματισμούς οι οποίοι αποτελούν το προαλπικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο αναπτύχθηκε η ηφαιστειοϊζηματογενής αλπική λεκάνη της Ροδόπης. Στην πλειοψηφία τους, πρόκειται για ορθογνεύσιους παλαιοζωικής ηλικίας (Χατζηπαναγής, 1991).

#### Ενότητα εναλλαγών γνευσίων, σχιστολίθων, μαρμάρων

Αντιπροσωπεύουν το κατώτερο τμήμα της αλπικής ροδοπικής λεκάνης, που στη βάση τους αποτελούνται από ρυθμικά εναλλασσόμενους γνεύσιους και σχιστόλιθους, ηφαιστειοϊζηματογενούς προέλευσης, ενώ στα ανώτερα τμήματα παρεμβάλλονται πάγκοι ή φακοί ανθρακικών πετρωμάτων. Κατά θέσεις εμφανίζονται στρωματομόρφοι ή συμπαγείς αμφιβολίτες.

### **Ενότητα μαρμάρων**

Αποτελούν την ανώτερη λιθολογική ενότητα της αλπικής ροδοπικής λεκάνης, καλύπτοντας πλέον των 650 km<sup>2</sup> επιφανειακής έκτασης στην ευρύτερη περιοχή του όρους Φαλακρού. Με βάση τη χημική – ορυκτολογική σύσταση ή ενότητα μπορεί να χωριστεί σε τρεις σειρές, οι οποίες από τα κατώτερα προς τα ανώτερα είναι:

#### **α) Σειρά ταινιωτών – σιπολινικών μαρμάρων**

Πρόκειται για λεπτοπλακώδη ασβεστιτικά μάρμαρα που αποτελούνται από ασβεστίτη (88 – 90%), χαλαζία (7 – 9%), δολομίτη (2 – 3%) και γραφίτη (1 – 2%). Το μέγιστο πάχος της σειράς είναι περίπου 200 m.

#### **β) Σειρά δολομιτικών μαρμάρων**

Έχουν περιορισμένη έκταση σε σχέση με τις άλλες δυο σειρές ανθρακικών πετρωμάτων και αναπτύσσονται στο δυτικό τμήμα του όρους Φαλακρού (Πύργους, Βώλακα, Γρανίτη, Οχυρό) και στη νήσο Θάσο, υπό μορφή μικρών έως τεράστιων φακών, με μέγιστο πάχος 300 m. Παρά το γεγονός ότι τα δολομιτικά σώματα εμφανίζονται αποκομμένα μεταξύ τους, λόγω έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης (πτυχές, boundinage κ. λ. π.) αλλά και λόγω πιθανών αρχικών ιζηματογενών δομών (πλευρικές αποσφηνώσεις, ετεροπία φάσης), αποτελούν ένα σαφώς καθορισμένο λιθοστρωματογραφικό σχηματισμό (Χατζηπαναγής, 1991).

Συνήθως, το πέτρωμα αποτελείται κατά 90% από δολομίτη και 10% από ασβεστίτη, με ισοκοκκώδη γρανοβλαστικό - πολυγωνικό ιστό και συμπαγή υφή. Το χρώμα του είναι λευκό γαλακτώδες. Οι βλάστες του δολομίτη έχουν μέγεθος μεταξύ 0,06 mm και 0,2 mm.

#### **γ) Σειρά ασβεστιτικών μαρμάρων (τύπου Φαλακρού)**

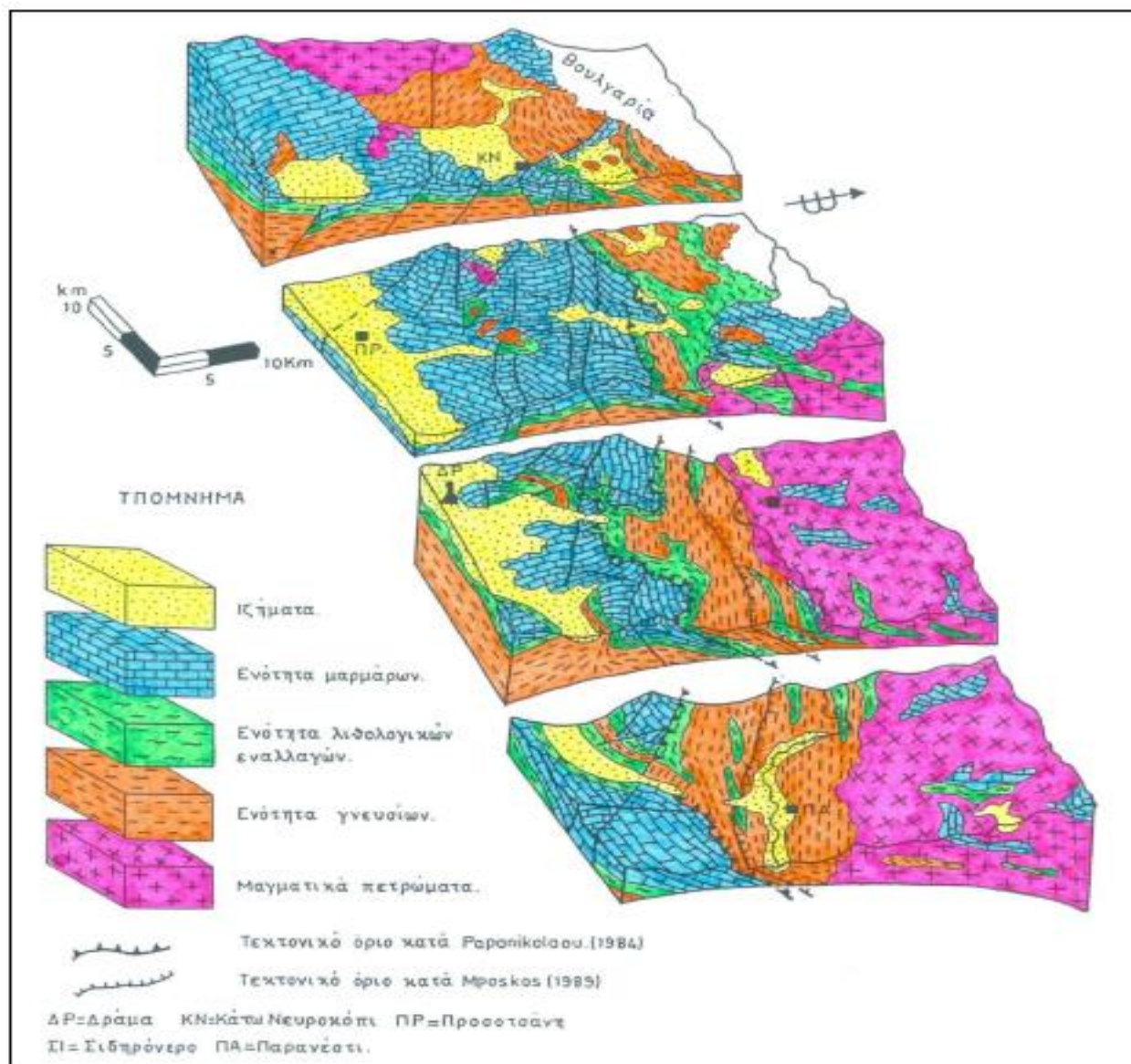
Η σειρά καλύπτει την περισσότερη έκταση των ανθρακικών πετρωμάτων της Δυτικής Ροδόπης και αναπτύσσεται στις περιοχές του όρους Φαλακρού, του όρους Όρβηλος, του



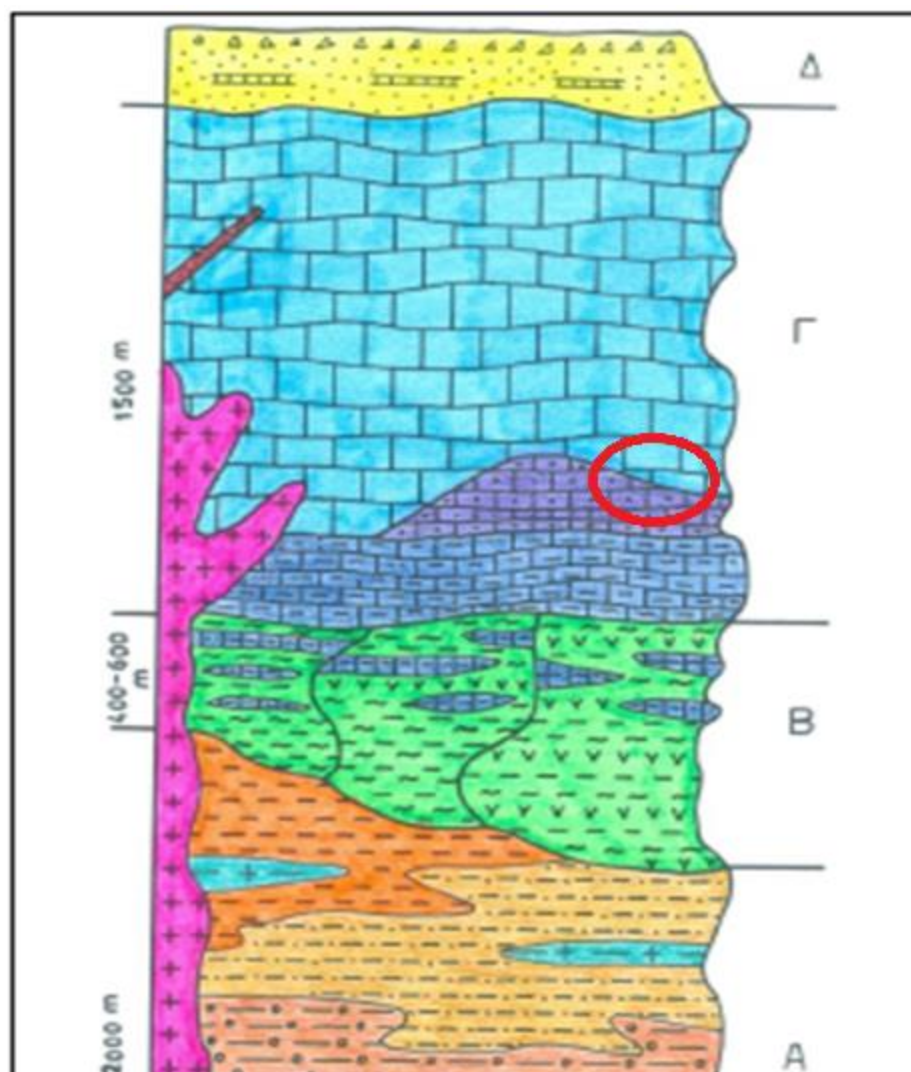
όρους Μενοίκιο, του όρους Παγγαίου και των ορέων Λεκάνης. Το πραγματικό μέγιστο πάχος της δεν ξεπερνά τα 1.000 m, ενώ το φαινόμενο πάχος είναι πολλαπλάσιο λόγω πολυπτυχώσεων και επιπτεύσεων. Πρόκειται για χοντροπλακώδη αδρόκοκκα ασβεστιτικά μάρμαρα με χρώμα που ποικίλει από γκριζόλευκο έως τεφρόφαιο, ανάλογα με το ποσοστό του περιεχομένου γραφίτη. Συνήθως περιέχουν μικρές ποσότητες διάσπαρτου δολομιτικού υλικού (2 – 3%).

Το Όρος Φαλακρού βρίσκεται στην Ανατολική Μακεδονία και έχει έκταση περίπου 1.800 km<sup>2</sup>. Από γεωλογική χαρτογράφηση, γεωλογική και τεκτονική ανάλυση το Όρος Φαλακρού αποτελείται από τις ακόλουθες λιθολογικές ενότητες μεταμορφωμένων πετρωμάτων οι οποίες είναι (Χατζηπαναγής, 1991) (*Εικόνα 2-2, Εικόνα 2-3*):

- **Ενότητα των γνευσίων (Α)** του υποβάθρου (πάχος > των 2.000m) που αποτελείται από λευκοκρατικούς μοσχοβιτικούς γνεύσιους, σκουρόχρωμους βιωτιτικούς γνεύσιους, οφθαλμογνεύσιους και μιγματίτες.
- **Ενότητα λιθολογικών εναλλαγών (Β)** (πάχος 300-600m) που αποτελείται από τη σειρά εναλλαγών γνευσίων σχιστολίθων μαρμάρων, τη σειρά εναλλαγών γνευσίων σχιστολιθικών μαρμάρων με παρελβολές αμφιβολιτών και τη σειρά εναλλαγών σχιστολίθων γνεύσιων αμφιβολιτών μαρμάτων με παρεμβολές σερπεντινιτών και εκλογιτών.
- **Ενότητα μαρμάρων (Γ)** (πάχους 1.500m) που αποτελείται από ταινιωτά-σιπολινικά μάρμαρα, δολομιτικά μάρμαρα και ασβεστιτικά μάρμαρα.
- **Ενότητα ιζημάτων (Δ)** που αποτελείται από τα κατώτερα στα ανώτερα στρώματα από ένα υπόβαθρο μαρμάρων, σειρά από κροκαλοπαγή (μαρμάρων), σειρά λιμναίων αποθέσεων μαργαϊκών ασβεστόλιθων, σειρά τελματικών αποθέσεων (ιλύες, άργιλοι), σειρά αλουβιακών αποθέσεων (άργιλοι-ιλύες, άμμοι κροκάλες) και τέλος από τη σειρά χερσαίων και ποτάμιων αποθέσεων (άμμοι, πηλοί, κροκάλες).
- Ενότητα μαγματικών πετρωμάτων με πλήθος πλουτώνειων και υποηφαιστιακών φλεβών με πετρώματα ασβεσταλκαλικής σύστασης.



Εικόνα 2-2:Γεωτεκτονικό σκαρίφημα του Φαλακρού Όρους (Chatzipanagis, 1989).



Εικόνα 2-3: Λιθοστρωματογραφική στήλη Φαλακρού όρους (Chatzipanagis, 1989)

Στη συνέχεια, απεικονίζονται τα είδη των μαρμάρων στο πεδίο και συγκεκριμένα τα λεπτοπλακώδη ταινιωτά-σιπολινικά μάρμαρα (Εικόνα 2-4), τα δολομιτικά μάρμαρα (Εικόνα 2-5) και τα χονδροπλακώδη ασβεστίτικα μάρμαρα (Εικόνα 2-6) του όρους Φαλακρού.





*Εικόνα 2-4: Λεπτοπλακώδη ταινιωτά-σιπολινικά μάρμαρα (Φαλακρό) (Χατζηπαναγής, 1991).*



*Εικόνα 2-5: Δολομιτικά μάρμαρα (Φαλακρό) (Χατζηπαναγής, 1991).*





Εικόνα 2-6: Χονδροπλακώδη ασβεστιτικά μάρμαρα (Φαλακρό) (Χατζηπαναγής, 1991).

## 2.2 Μαγματισμός

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Δυτικής Ροδόπης διαπερνώνται από πλήθος πλουτώνειων σωμάτων και υποηφαιστειακών φλεβών, ενώ μεγάλες εκτάσεις καλύπτονται από ηφαιστειακά πετρώματα (Ynev et al, 1989).

### Πλουτωνίτες

Οι πλουτωνίτες που διείσδυσαν γενικά στους μεταμορφίτες της Δυτικής Ροδόπης χαρακτηρίζονται από μάγματα ασβεσταλκαλικού τύπου και με βάση την ηλικία τους μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- α) στους προαλπικούς (ερκύνιους) και
- β) στους αλπικούς.

Στους προαλπικούς πλουτωνίτες θα μπορούσαν να ταξινομηθούν τα σώματα της Ρίλα, του Σπάντσεβο και της Καβάλας (Zagorčev, 1992). Πρόκειται για πλουτώνια σώματα παλαιοζωικής ηλικίας (Fischer, 1964) με γρανιτική-γρανοδιοριτική σύσταση. Οι πλουτωνίτες αυτοί

παρουσιάζουν την ίδια παραμόρφωση με τα μεταμορφωμένα πετρώματα, ενώ στις επαφές τους με αυτά δεν παρατηρούνται φαινόμενα μεταμόρφωσης εξ επαφής (Meyer, 1968).

Οι πλουτωνίτες που συνδέονται με τον αλπικό ορογενετικό κύκλο μπορούν να χωρισθούν με τη σειρά τους σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την ηλικία διείσδυσής τους και τη θέση τους σε σχέση με το μέτωπο της υποβυθιζόμενης πλάκας του ροδοπικού ορογενούς.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι πλουτωνίτες του βορείου Πιρίν, του Bezboğ (Zagorčev, 1992), της Δυτικής Ροδόπης (Ynev et al, 1989), του Μπαρουτίν-Μπουίνοβο, της Σκαλωτής (Meyer, 1968), (Sklavounos, 1981), (Soldatos & Christofides, 1986). Οι πλουτωνίτες αυτοί βρίσκονται στην εσωτερική ζώνη του μαγματικού τόξου της Ροδόπης, έχουν ηλικία ανω-ηωκαινική/κατω-ολιγοκαινική και συνδέονται με την ταυτόχρονη ανύψωση του αλπικού ορογενούς της Ροδόπης. Το ασβεσταλκαλικής σύστασης μάγμα των συγκινηματικών αυτών πλουτωνιτών προέρχεται εξ ολοκλήρου από την τήξη πετρωμάτων του φλοιού (Kotopouli et al, 1982), (Kotopouli & Pe-Piper, 1989) (Baker, 1989) ή μέρος μόνο αυτού προέρχεται από το φλοιό, αφού σημαντική ποσότητα προέρχεται από τον ανώτερο μανδύα (Baker, 1989). Οι πλουτωνίτες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν - τουλάχιστον τοπικά - έντονο προσανατολισμό των ορυκτών τους.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα πλουτωνία σώματα του νοτίου Πιρίν (Ynev et al, 1989) της Βροντούς (Marakis, 1969), (Παπαδάκης, 1965), (Kolokotroni et al, 1991), του Πανοράματος (Meyer, 1968), του Γρανίτη (Παπαδάκης, 1965), (Meyer, 1968) των Κρηνίδων και της Ξάνθης (Meyer, 1968), (Liati, 1986) και (Kiriakopoulos, 1987), (Baker, 1989). Πρόκειται για τα διαφοροποιημένα σώματα αποτελούμενα από γρανίτες, γρανοδιορίτες, χαλαζιακούς μονζονίτες και λιγοστούς γάββρους. Η ηλικία τους είναι ανω-ολιγοκαινική και ως εκ τούτου χαρακτηρίζονται σαν υστεροκινηματικοί (Kotopouli & Pe-Piper, 1989). Οι πλουτωνίτες της κατηγορίας αυτής βρίσκονται διατεταγμένοι στην ενδιάμεση ζώνη του μαγματικού τόξου της Ροδόπης.

Στην εξωτερική ζώνη βρίσκονται οι πλουτωνίτες της τρίτης κατηγορίας, τους οποίους αποτελούν τα μικρά σώματα, ανω-μειοκαινικής ηλικίας, όπως αυτό της Μεσολακκιάς (Meyer, 1968), του ΒΑ τμήματος του γρανοδιορίτη της Καβάλας και της Σαμοθράκης (Kiriakopoulos, 1987).

## Ηφαιστίτες

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στις ιζηματογενείς λεκάνες της Ανατολικής Ροδόπης αρχίζει κατά το Ανω Ηώκαινο (Fitikas et al, 1984), ενώ στο ΒΑ τμήμα της Δυτικής Ροδόπης η ηφαιστειότητα αρχίζει λίγο αργότερα. Στις μικρές ενδοηπειρωτικές λεκάνες της Δυτικής Ροδόπης αναπτύσσεται κατά το Ολιγόκαινο μια ηφαιστειότητα με πυροκλαστικά και ηφαιστειακούς τόφφους, ενώ μεγάλες χερσαίες εκτάσεις καλύπτονται από ηφαιστειακά πετρώματα τραχειτικής, ανδεσιτικής και ρυολιθικής σύστασης.

## 2.3 Τεκτονική

Οι μεταμορφωμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού, όπως άλλωστε και της Δυτικής Ροδόπης χαρακτηρίζονται από έντονη πτυχωσιγενή και ρηξιγενή τεκτονική (Papanikolaou & Panagopoulos, 1981), (Dimadis & Zachos, 1989), (Gocev & Matova, 1989), (Patras et al, 1989), (Χατζηπαναγής, 1991).

Στα σχιστολιθικά και γνευσιακά πετρώματα, καθώς επίσης και στα ταινιωτά – σιπολινικά μάρμαρα, τα τεκτονικά στοιχεία της πλαστικής παραμόρφωσης αποτυπώθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό, ενώ στα δολομιτικά μάρμαρα και στα μάρμαρα της σειράς Φαλακρού η αποτύπωση αυτή διαπιστώνεται πολύ δύσκολα λόγω της ομοιογένειας και ομοιοχρωμίας που παρουσιάζουν. Αντίθετα, στα τελευταία αυτά πετρώματα αποτυπώνεται έντονα τη ριξηγενή τεκτονική, η οποία αντιπροσωπεύεται από πλήθος ρηγμάτων και διακλάσεων και ρωγματώσεων.

Στα μαγματικά πετρώματα, πλην ελαχίστων, όπως ο γρανίτης του Συμβόλου (προκίνηματικός), ο γρανίτης του Ελαιώνα (συνκίνηματικός), μέρος του γρανίτη της Σκαλωτής (συνκίνηματικός), δεν εμφανίζονται τα φαινόμενα της πλαστικής και ημιπλαστικής παραμόρφωσης. Αντίθετα εμφανίζονται μόνο ρηξηγενείς τεκτονικές δομές, οι φάσεις των οποίων προσδιορίζονται ανάλογα με την ηλικία στερεοποίησής τους.

### 2.3.1 Η πλαστική τεκτονική

Αναγνωρίστηκαν τουλάχιστον τρία συστήματα πτυχών. Το καθένα από τα συστήματα αυτά αποτελεί ξεχωριστή πτυχογόνο φάση που συνοδεύεται ή όχι από μεταμόρφωση. Η πρώτη πτυχογόνο φάση  $\Phi_1$ , που φαίνεται, να είναι η παλαιότερη, αντιπροσωπεύεται από λιγοστές κλειστές πτυχές που έχουν χαρακτήρα υπολειμματικό. Η δεύτερη  $\Phi_2$  φάση αποτελείται από

πλήθος κωνικών ισοκλινών πτυχών κάμψης και ολίσθησης που έχουν περιοχική εξάπλωση, ενώ η τρίτη  $\Phi_3$  φάση είναι νεότερη και παρουσιάζεται με ανοιχτές πτυχές κάμψης (Χατζηπαναγής, 1991).

Συχνά η πτύχωση συνοδεύεται από θραύση και ολίσθηση παράλληλα προς τις αξονικές επιφάνειες, δημιουργώντας δομές transposition. Έτσι ένας ενιαίος αρχικά ορίζοντας μπορεί να επαναληφθεί ακόμη και 10 φορές. Παράλληλα με την πτύχωση δημιουργούνται εκτεταμένες αλλεπάλληλες ζώνες μυλωνιτίωσης, με βλαστομυλωνίτες, οι οποίοι διαμορφώνουν ταυτόχρονα και τη σχιστότητα των πετρωμάτων. Κατά θέσεις, όπου οι συνθήκες είναι λιγότερο πλαστικές ή ημιπλαστικές, δημιουργούνται s – c τύπου μυλωνίτες, οι οποίοι και αποτελούν τις πρώιμες ρηξιγενείς τάσεις. Στην συνέχεια, απεικονίζονται οι ισοκλινείς πτυχές σε ταινιωτά- σιπολινικά μάρμαρα (Εικόνα 2-7).



Εικόνα 2-7: Ισοκλινείς πτυχές σε ταινιωτά- σιπολινικά μάρμαρα (Χατζηπαναγής, 1991).

### 2.3.2 Η Ρηξιγενής τεκτονική

Η ρηξιγενής τεκτονική αντιπροσωπεύεται από τρία παραμορφωτικά γεγονότα,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  που δημιουργούν πλήθος ρηγμάτων διακλάσεων και ρωγματώσεων. Ανάλογα με τη δυναμική των



τάσεων που προκάλεσε τη διάρρηξη, τα ρήγματα αυτά μπορούν να διακριθούν σε κανονικά ρήγματα εφελκυσμού και σε συμπιεστικού τύπου εφιππευτικά ρήγματα.

### 2.3.3 Τα ρήγματα

Οι παλαιότερες  $P_1$  ρηξιγενείς δομές που αναγνωρίστηκαν, είναι αυτές που συνδέονται με τεκτονική βάθους και μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν το εξελικτικό στάδιο της  $\Phi_2$  παραμορφωτικής φάσης συμπιεστικού τύπου. Πρόκειται για ανάστροφα ρήγματα με τεκτονικά λατυποπαγή και S – C τύπου μυλωνίτες. Τα ρήγματα αυτά έχουν μικρές κλίσεις ( $20^\circ - 50^\circ$ ) και δημιουργούνται κατά μήκος των επιφανειών επωθήσεων και εφιππεύσεων (πτυχωσιγενή ρήγματα).

Η νεότερη ρηξιγενής τεκτονική  $P_2$  ακολουθεί την εφελκυστικού τύπου  $\Phi_3$  παραμόρφωση και αντιπροσωπεύεται από μια διαρρηξιγόνο τεκτονική με τη δημιουργία τεκτονικών εξάρσεων και τεκτονικών βυθισμάτων, με δύο συστήματα κανονικών κατακόρυφων ρηγμάτων (ρήγματα εφελκυσμού) που έχουν διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και ΒΑ – ΝΔ αντίστοιχα (Χατζηπαναγής, 1991).

Συνήθως τα ρήγματα αυτά παρουσιάζουν κατοπτρική επιφάνεια, αλλά κατά θέσεις έχουν μεγάλο εύρος (από 10 cm έως 1 m.) και παρουσιάζουν τεκτονικά λατυποπαγή, ή παραμένουν κενά και πληρώνονται δευτερογενώς με ερυθροπηλό και κορήματα. Σε ορισμένες περιοχές εντοπίζονται κατακόρυφα ρήγματα με διεύθυνση Α – Δ που άλλοτε εμφανίζονται με κατοπτρική επιφάνεια και άλλοτε με τεκτονικά λατυποπαγή. Τα ρήγματα αυτά πιθανά ανήκουν στα τελευταία στάδια της  $P_2$  ρηξιγενούς τεκτονικής και συνδέονται με την δημιουργία των Horst και Graben στο χώρο της Ροδόπης.

Η  $P_3$  ρηξιγενής παραμόρφωση συνδέεται με κατακόρυφες ανω-πλειστοκαινικές κινήσεις και αποτελείται από ένα σύστημα διάρρηξης το οποίο παραμορφώνει τόσο τα μεταμορφωμένα και τα μαγματικά πετρώματα της Δυτικής Ροδόπης όσο και τους ιζηματογενείς σχηματισμούς του Μέσου Πλειστόκαινου. Η  $P_3$  έχει τοπικό χαρακτήρα και αποτυπώνεται με μικρές κατακόρυφες διακλάσεις και ρωγματώσεις που έχουν διεύθυνση Β – Ν. Στα ασβεστιτικά παρατηρούνται κατακόρυφα ρήγματα (*Εικόνα 2-8*).



*Εικόνα 2-8: Κατακόρυφα ρήγματα σε ασβεστιτικά μάρμαρα (Χατζηπαναγής, 1991).*

#### **2.3.4 Οι διακλάσεις και ρωγματώσεις**

Οι διακλάσεις, κατά κανόνα, ακολουθούν τα κύρια συστήματα διάρρηξης καθώς είναι σύγχρονες με αυτά, είτε αναπτύσσονται παράλληλα με τις υπάρχουσες τάσεις. Η συχνότητα εμφάνισης και η έντασή τους ποικίλει από θέση σε θέση.

Οι πιο εμφανείς είναι οι διεισδυτικές διακλάσεις, οι οποίες συνήθως παρουσιάζονται ανοιχτές, με κατοπτρική επιφάνεια, έχουν μεγάλη συχνότητα (10 – 15 διακλάσεις ανά μέτρο), κλίση από  $85^{\circ}$  –  $60^{\circ}$ , και μπορούν να συνεχίζουν για αρκετά μέτρα βάθος. Οι διεισδυτικές διακλάσεις έχουν συνήθως ΒΑ – ΝΔ ή ΒΔ – ΝΑ διεύθυνση και ανήκουν στην  $P_2$  ρηξιγενή φάση.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι διακλάσεις δεν παρουσιάζουν διάκενα μεταξύ των δύο επιφανειών που δημιουργεί η διάρρηξη. Συχνά όμως, οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους. Η απόσταση αυτή ποικίλει από 0,1mm έως και 2 – 3 cm δημιουργώντας έτσι ρωγματώσεις ποικίλου μήκους και εύρους. Οι ρωγματώσεις τις περισσότερες φορές είναι κενές, αλλά όχι σπάνια είναι πληρωμένες με δευτερογενή χαλαζία ή ασβεστίτη (Χατζηπαναγής, 1991).

## 2.4 Γεωλογική-κοιτασματολογική μελέτη μαρμαροφόρων περιοχών

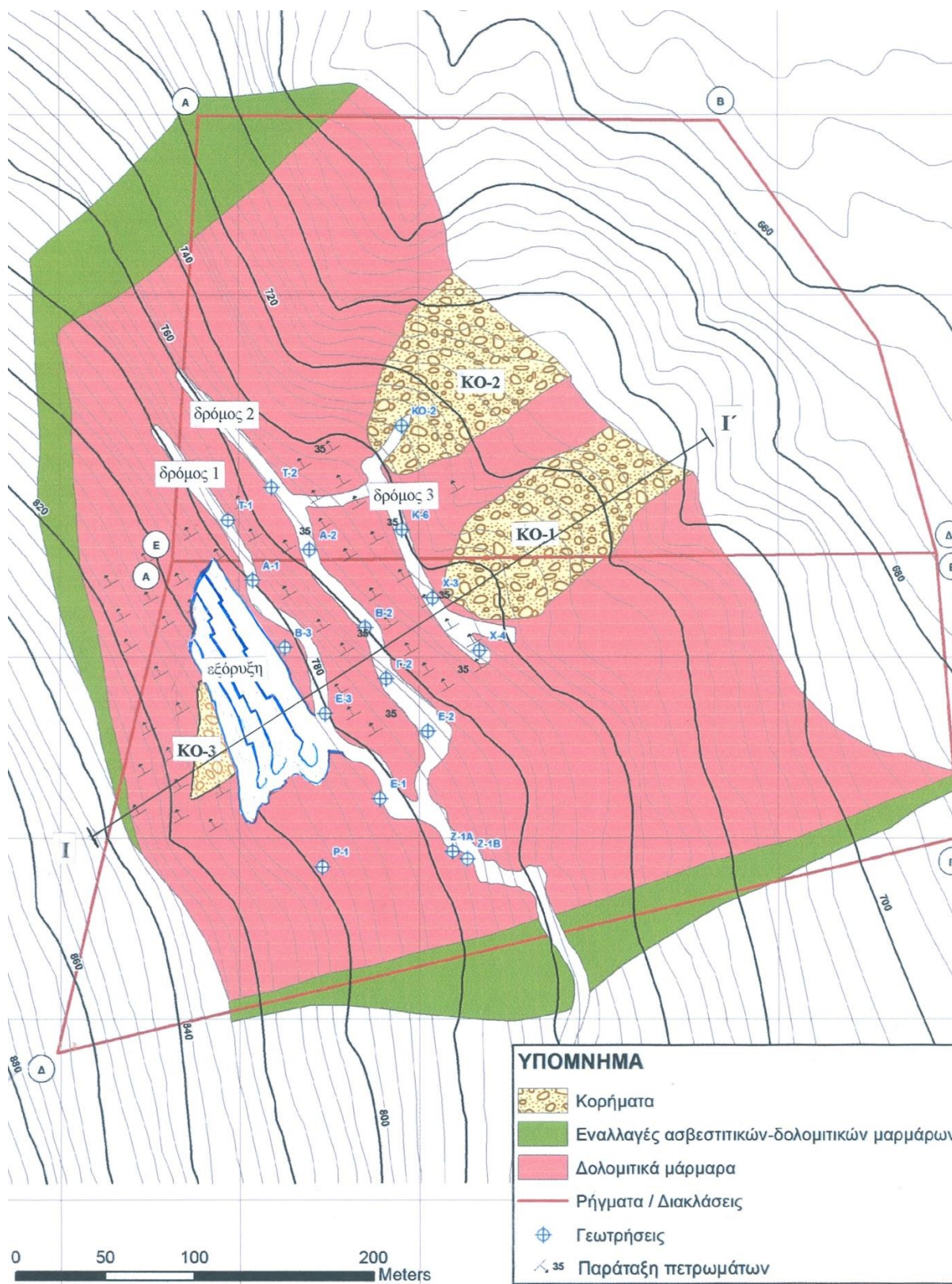
Ο σωστός σχεδιασμός και η μελέτη ενός λατομείου μαρμάρου αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την βιώσιμη ενέργεια και ανάπτυξη μιας μαρμαροφόρου περιοχής. Η γεωλογική και κοιτασματολογική μελέτη μιας μαρμαροφόρου περιοχής κατανέμετε στα εξής στάδια:

1. Προσδιορισμός και ανάλυση μορφολογικού ανάγλυφου (οριζόντια-κατακόρυφα) μαρμαροφόρου περιοχής.
2. Γεωλογική χαρτογράφηση μαρμαροφόρου περιοχής σε ανάλογη κλίμακα ανάλογα με τον όγκο του κοιτάσματος.
3. Στρωματογραφική ανάλυση και προσδιορισμός θέσης μαρμάρου για τον καλύτερο εντοπισμό του είδους του μαρμάρου που αναζητάτε.
4. Πετρογραφική ανάλυση μαρμάρου και προσδιορισμός είδους, μεγέθους των ορυκτών κόκκων, ιστού και υφής.
5. Χημική ανάλυση μαρμάρου για τον προσδιορισμό της σύστασης.

Ο προσδιορισμός της θέσης ενός μετώπου εξόρυξης μαρμάρου απαιτεί μικροτεκτονική και μακροτεκτονική ανάλυση. Η μικροτεκτονική μελέτη αποτελεί τον προσδιορισμό των μεσοσκοπικών δομών γιατί αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την εξόρυξη. Μεσοσκοπικές δομές αποτελούν οι διακλάσεις (joints), η σχιστότητα (schistosity), η φυλλοδομή (foliation), η γραμμοϋφή (lineation) και η στρώση (stratification). Η μακροτεκτονική μελέτη αποτελεί τον προσδιορισμό των ρηγμάτων και πτυχώσεων και τον ρόλο που παίζουν στην εξόρυξη. Συγκεκριμένα, εκατέρωθεν της επιφάνειάς ενός ρήγματος καθώς και σε ενεργά τεκτονικά μέτωπα απαγορεύεται η κάθε είδους εξόρυξη. Επίσης, η εκμετάλλευση εκατέρωθεν του αντικλίνου των πτυχών αποφεύγεται επειδή υπάρχει μεγάλο ποσοστό διάρρηξης λόγω της ακαμψίας.

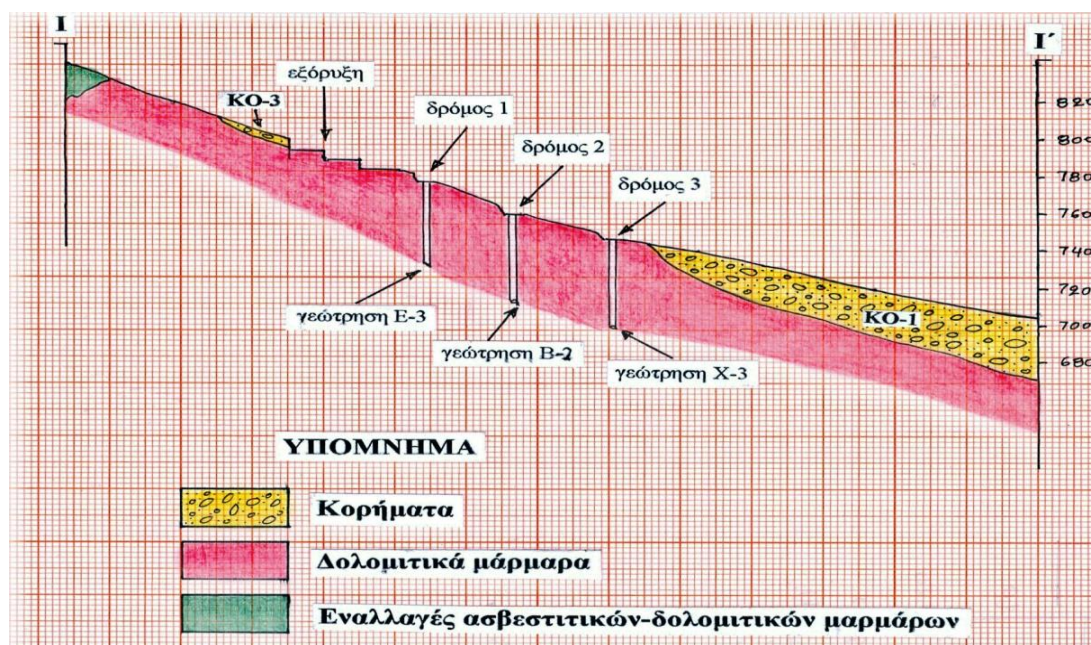
Στη συνέχεια απεικονίζεται ο γεωλογικός-κοιτασματολογικός (Εικόνα 2-9) χάρτης και η γεωλογική-κοιτασματολογική τομή (Εικόνα 2-10) του Οχυρού Δράμας που απεικονίζονται συγκεκριμένα τα κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας. Συγκεκριμένα, η μαρμαροφόρος περιοχή αποτελείται κυρίως από δολομιτικά μάρμαρα.





Εικόνα 2-9: Γεωλογικός-κοιτασματολογικός χάρτης (Οχυρό Δράμας) (Χατζηπαναγής, 1991).





Εικόνα 2-10: Γεωλογική κοιτασματολογική τομή I-I' (Χατζηπαναγής, 1991).

## 2.5 Ορυκτολογική σύσταση των μαρμάρων της περιοχής Φαλακρού

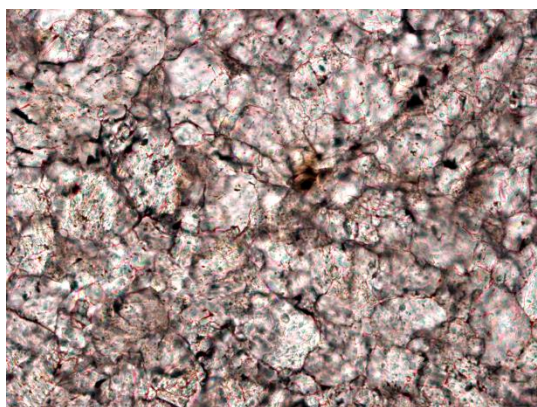
Τα μάρμαρα αποτελούν γεωλογικούς σχηματισμούς μεταμορφωμένων ανθρακικών ιζημάτων. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα προκύπτουν από την ανακρυστάλλωση των ιζηματογενών πετρωμάτων σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, στο στερεό φλοιό της Γης. Σαν μάρμαρο χαρακτηρίζεται κάθε συμπαγές πέτρωμα με σκληρότητα 3-4 το οποίο μπορεί να κοπεί και να λειανθεί για να χρησιμοποιηθεί σαν δομικό ή διακοσμητικό υλικό. Στη φύση υπάρχουν 60 ορυκτά που περιέχουν την ανθρακική ρίζα ( $\text{CO}_3$ ). Τα πιο συνηθισμένα είναι ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ), ο αραγωνίτης, ο μαγνησιούχος ασβεστίτης ( $\text{MgCO}_3 < 4\%$ ) και ο δολομίτης ( $(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$  ( $\text{MgO} \sim 20\%$ )) (Χατζηπαναγής, 1991). Το χρώμα τους κυμαίνεται από λευκό έως τεφρό και σπάνια υπάρχουν και κιτρινωποί ή ερυθρωποί τύποι μαρμάρων.

Τα μάρμαρα ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση διακρίνονται σε ασβεστιτικά και δολομιτικά μάρμαρα. Τα ασβεστιτικά μάρμαρα αποτελούν το 90% των ανθρακικών πετρωμάτων. Το χρώμα τους ποικίλει ανάλογα με την σύσταση του περιεχόμενου γραφίτη από φαιόλευκο έως σκούρο. Αποτελούνται από ασβεστίτη ( $\sim 90\%$ ) και περιέχουν μικρό ποσοστό δολομίτη (7-8%). Συμμετέχουν ακόμη και ο χαλαζίας, μοσχοβίτης, σερκίτης, φλογοπίτης, τρεμολίτης, επίδοτο, άστριοι, καολινίτης, τάλκης και μεταλλικά ορυκτά. Τα δολομιτικά μάρμαρα αποτελούν το υπόλοιπο 10% των ανθρακικών πετρωμάτων και βρίσκονται υπό μορφή

φακών μέσα στα ασβεστιτικά μάρμαρα. Αποτελούν καθαρά πετρώματα με χρώμα λευκό έως χιονόλευκο με μικρές προσμίξεις ορυκτών όπως χαλαζίας, φυλλώδη και μεταλλικά ορυκτά. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι μικροφωτογραφίες (*Εικόνα 2-11, Εικόνα 2-12*) των δειγμάτων μαρμάρων από το μικροσκόπιο, όπου φαίνονται συγκεκριμένα οι ορυκτολογική σύσταση και τα πετρογραφικά τους χαρακτηριστικά.



*Εικόνα 2-11: Μικροφωτο-2α : Παρατηρούνται μικροδιακλάσεις να διασχίζουν την υπελεπτόκοκκη δολομιτική μάζα του πετρώματος, Nicols //, μεγέθυνση X12,5 (Χατζηπαναγής, 1991).*



*Εικόνα 2-12: Μικροφωτο-2δ : Παρατηρείται οξειδωμένος κόκκος σιδηρούχου ορυκτού, Nicols //, μεγέθυνση X200 (Χατζηπαναγής, 1991).*

### 3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΥΡΗΝΟΛΗΠΤΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Στην παρούσα εργασία στόχος είναι η υλοποίηση μιας μεθόδου για τον προσδιορισμό των αποθεμάτων μιας μαρμαροφόρου περιοχής. Βασικός παράγοντας για την υλοποίηση της εκμετάλλευσης μιας μαρμαροφόρου περιοχής είναι ο προσδιορισμός του ποσοστού του μεταλλεύματος που αξίζει να εκμεταλλευτεί. Η εκμετάλλευση κρίνεται από την γεωλογία, την τοπογραφία, το σχεδιασμό και τον ποσοτικό προσδιορισμό των αποθεμάτων. Η εμπορική αξία ενός όγκου μαρμάρου καθορίζεται από τη λευκότητα και την πυκνότητα των ασυνεχειών, κάτι που καθορίζει το μέγεθος των απολήψιμων ογκομαρμάρων. Συνεπώς, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η αποληψιμότητα των μαρμάρων η οποία γίνεται μέσω της μεθοδολογίας, που αποτελείται από ακόλουθα στάδια:

- 1) Ανάλυση των δειγμάτων από τις πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις, ο προσδιορισμός της λευκότητας (Wht %) και του αριθμού ασυνεχειών των μαρμάρων ( $\text{FF m}^{-1}$ ).
- 2) Σχεδιασμός εκμετάλλευσης και η δημιουργία βάσης δεδομένων από πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις.
- 3) Γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων, προσδιορισμός παραμέτρων βαριογραμμάτων.
- 4) Ογκομετρικό μοντέλο (Block Model).
- 5) Υπολογισμός Wht-FF στα κ.β. των ‘μπλοκ’ (centroid blocks) μέσω αλγορίθμου Kriging.
- 6) Σχεδιασμός τελικής μορφής εκμετάλλευσης.
- 7) προσδιορισμός μεταλλευτικών αποθεμάτων βάση συγκεκριμένων περιορισμών NSD-Wht-FF.
- 8) Η εκτίμηση της χωρικής κατανομής των εκμεταλλεύσιμων μπλοκ.

#### 3.1 Ανάλυση δειγμάτων πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων, προσδιορισμός χρωματισμού (Wht %) και ασυνεχειών μαρμάρων ( $\text{FF m}^{-1}$ )

Τα δεδομένα των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων τα οποία αναλύθηκαν στη παρούσα ερευνητική εργασία λήφθηκαν από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΕΑΓΜΕ). Η περιοχή μελέτης όπως έχει αναφερθεί είναι το Οχυρό Δράμας και συγκεκριμένα λήφθηκαν καρότα μαρμάρου από 8 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις μήκους 20m και 2 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις μήκους 15m. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες φωτοανάλυσης των δειγμάτων των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων ήταν σε συνθήκες φωτός D65 που αποτελεί τη

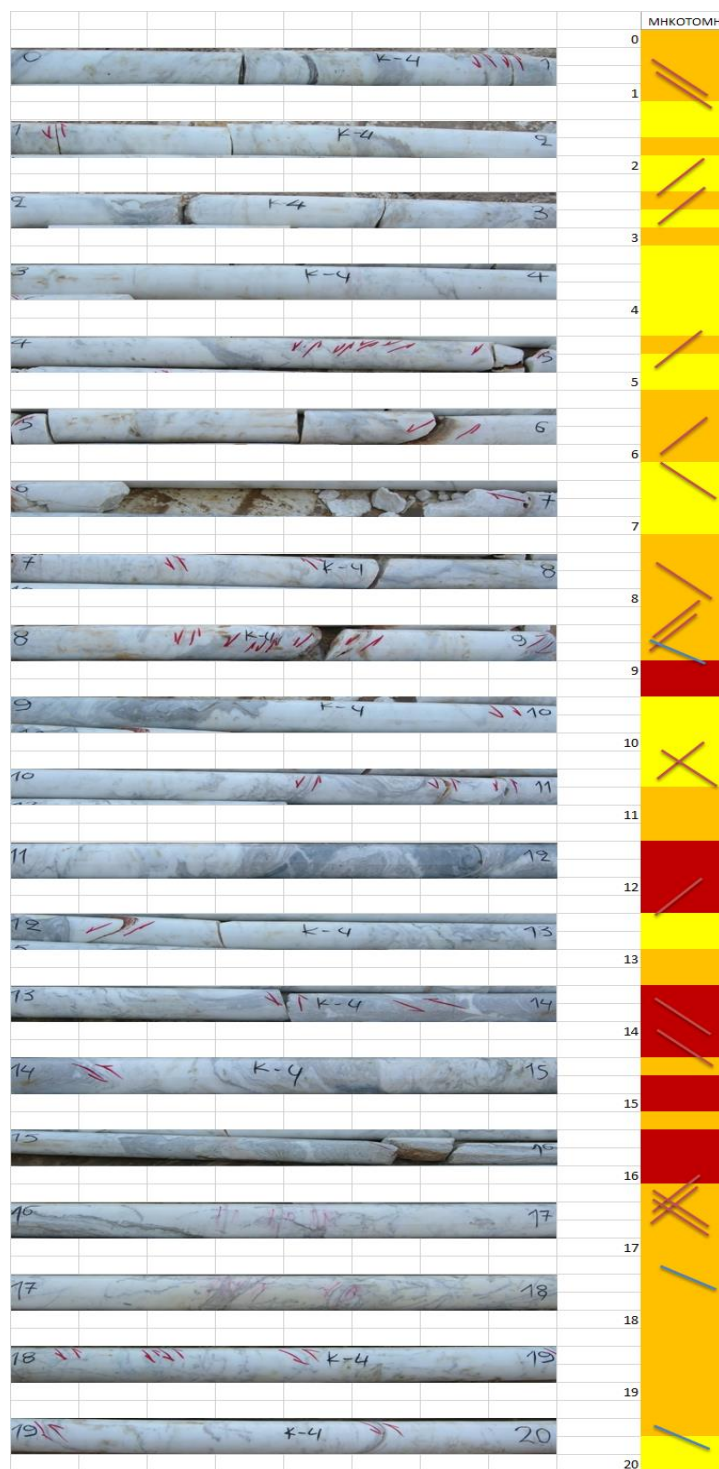
μέση τιμή φωτός της ημέρας, παρόλα αυτά αυτό δεν είναι απόλυτο οπότε μπορεί να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις ως προς αυτό το χαρακτηριστικό. Αρχικά, από τα δείγματα εικόνων πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων έγινε ο διαχωρισμός και ο προσδιορισμός της λευκότητας και των ασυνεχειών ανά μέτρο γεώτρησης. Μέσω αυτού του χαρακτηρισμού δημιουργήθηκε μια μηκοτομή η οποία προσδιορίζει αναλυτικά τον χρωματισμό και τις ασυνέχειες ανά μέτρο κάθε γεώτρησης. Συγκεκριμένα, έγινε ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός χαρακτηρισμού λευκότητας σύμφωνα με τις τέσσερις κλάσεις χρωματισμού I-IV (*Πίνακας 3*) καθώς και ποιοτικός και ποσοτικός χαρακτηρισμός ασυνεχειών ανάλογα με το είδος και τον προσανατολισμό της κάθε διάκλασης ξεχωριστά.

*Πίνακας 3-1: Τάξεις ποιότητας λευκότητας μαρμάρων (I-IV).*

Κλάση Χρωματισμού	Λευκότητα (%)	Περιγραφή Δολομιτικού μαρμάρου
I	$\geq 90$	Λευκό
II	90-70	Λευκόφοντο με αραιές ερυθρωπές ταινίες
III	70-50	Σκουρόφοντο με πυκνές αρυθρωπές ταινίες
IV	$< 50$	Σκουρόφοντο

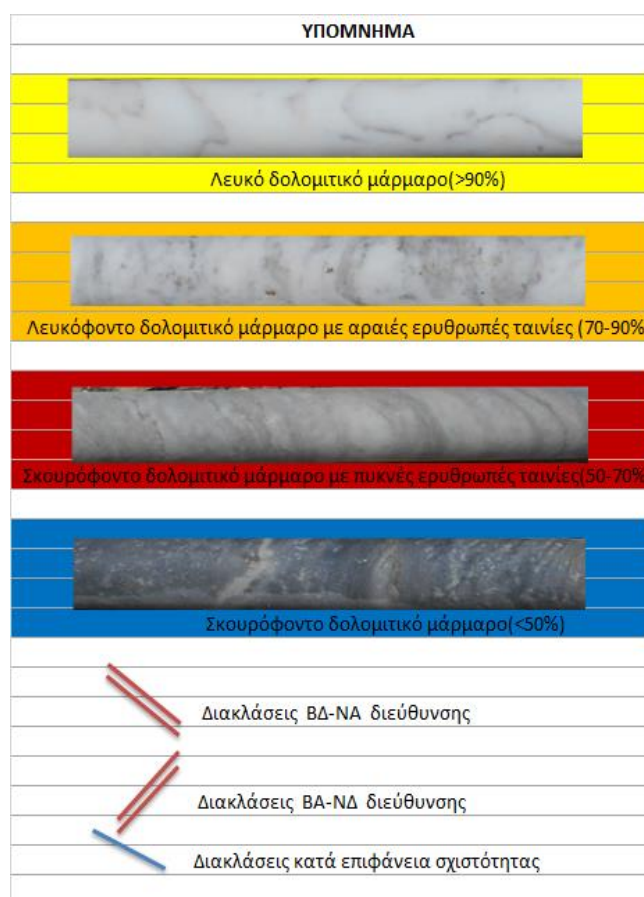
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα δείγματα πυρήνων της γεώτρησης K4 (1-20m) και η αντίστοιχη μηκοτομή του χρωματισμού και των ασυνεχειών (*Εικόνα 3-1*).





Εικόνα 3-1: Μηκοτομή Γεώτρησης K4 (1-20m).

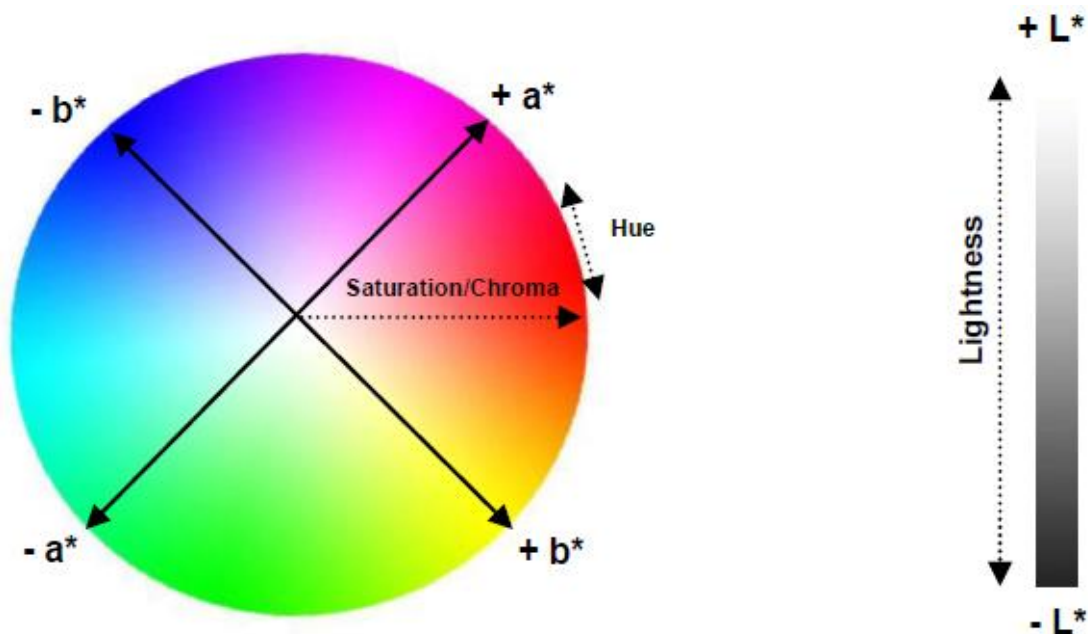
Όλες οι γεωτρήσεις αναλύθηκαν σε πρώτο στάδιο κατά αυτόν τον τρόπο και σύμφωνα με το υπόμνημα (*Εικόνα 3-2*) που αναγράφει την χρωματική διάκριση ανάλογα με την απόχρωση, τα είδη των ασυνεχειών, με την κατεύθυνση και τις ιδιότητες έγινε η ταξινόμηση των δειγμάτων για την λευκότητα και τις ασυνέχειες που τα χαρακτηρίζουν.



Εικόνα 3-2:Υπόμνημα λευκότητας και ασυνεχειών μαρμάρων.

Με στόχο την πιο τεκμηριωμένη ανάλυση χρωματισμού των δειγμάτων και λόγω του ότι αποτελεί βασικό κριτήριο εμπορικότητάς των μαρμάρων, έγινε επίσης ποσοτική εκτίμηση του χρωματισμού μέσω του συστήματος χρωματικού προσδιορισμού CIELAB (CIELAB color space) (*Εικόνα 3-3*). Ο καθορισμός του χρώματος προσδιορίζεται επιστημονικά μέσω τριών παραμέτρων οι οποίες είναι η απόχρωση (hue), η ένταση του χρώματος (saturation) και η φωτεινότητα (lightness) (Sappi, 2013).

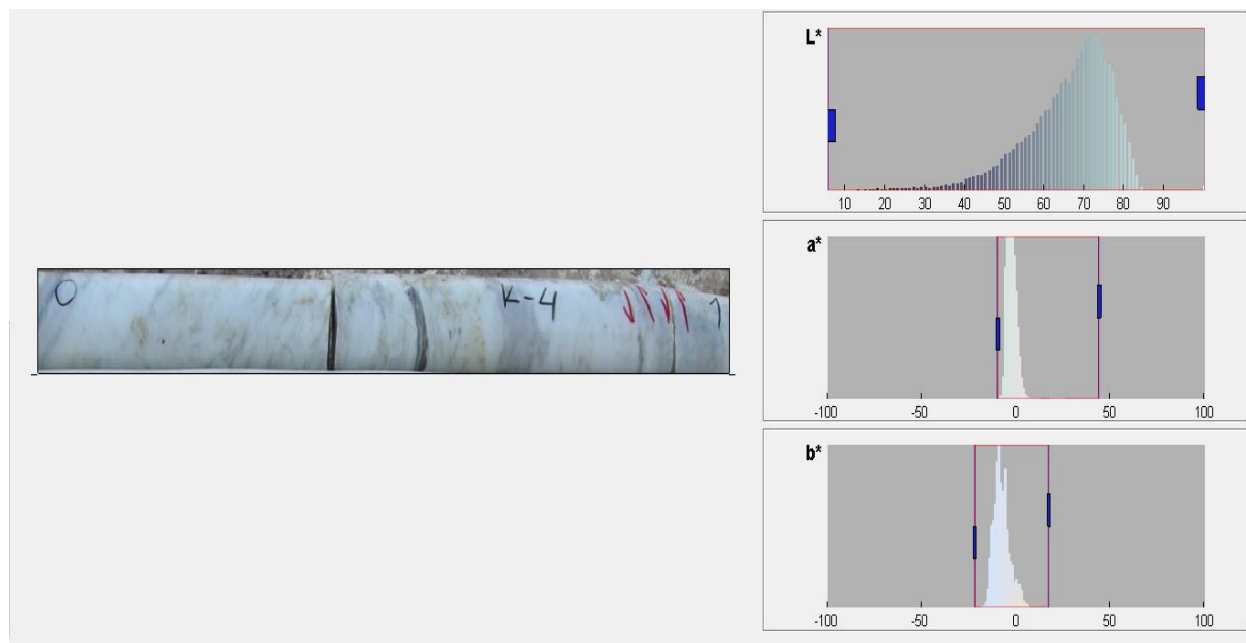
Οι παράμετροι αυτοί καθορίζονται από τρεις δείκτες οι οποίες είναι το  $L^*$  με τιμές για μαύρο ( $L=0$ ) και λευκό ( $L=100$ ), το  $a^*$  με πράσινο (-) και κόκκινο (+) και  $b^*$  με μπλε (-) και κόκκινο (+) κατανέμεται η κλάση χρώματος.



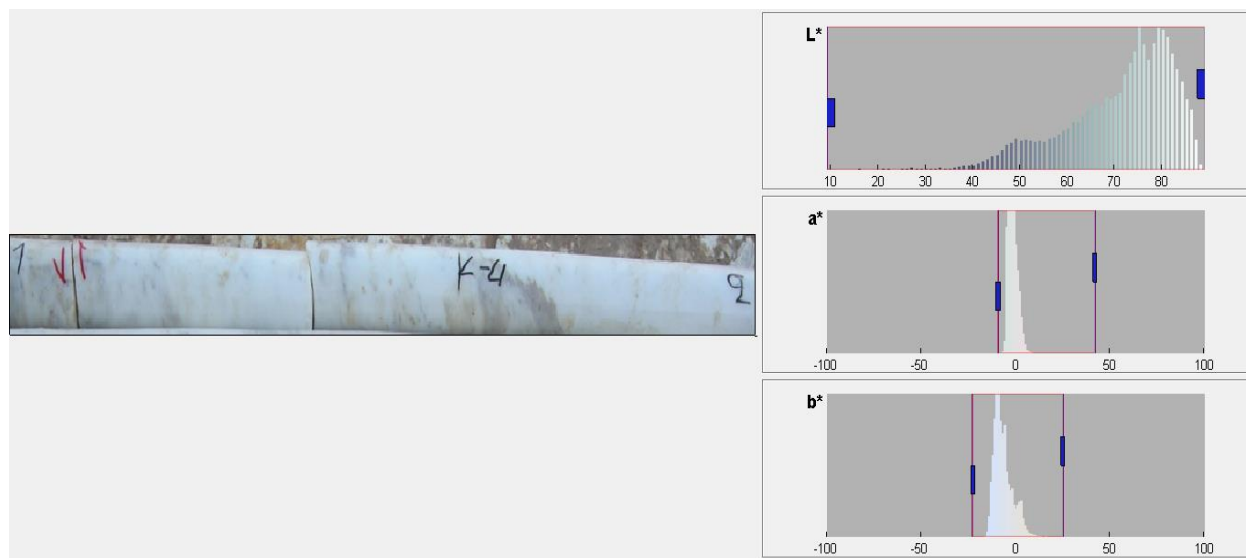
Εικόνα 3-3: Τρισδιάστατη χρωματική απεικόνιση CIELAB (Sapri, 2013).

ααΜέσω του εργαλείου ανάλυσης εικόνων της Matlab: Image Analysis (Matlab's Colour Threshold) έγινε η ανάλυση της λευκότητας μέσω μόνο του δείκτη  $L^*$  (οριζόντιος άξονας), ο οποίος προσδιορίστηκε για κάθε μέτρο γεώτρησης. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών χρωματισμού  $L^*$ ,  $a^*$  και  $b^*$  της Γεώτρησης K4 (0-1m) (Εικόνα 3-4) με λευκότητα  $L = 73\%$ . Επίσης, παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών χρωματισμού  $L^*$ ,  $a^*$  και  $b^*$  της Γεώτρησης K4 (1-2m) (Εικόνα 3-5) με λευκότητα μεταξύ  $76\%-79$  και μέση τιμή  $L = 0.5 \cdot 76\% + 0.5 \cdot 79\% = 78\%$ . Αντίστοιχα, έγινε ο προσδιορισμός της φωτεινότητας (κατακόρυφος άξονας) για κάθε μέτρο όλων των γεωτρήσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το δολομιτικό μάρμαρο είναι λευκό αλλά όχι καθαρό λευκό. Λόγω παρουσίας σκούρων γκρίζων φλεβών κυμαίνεται η λευκότητα του. Αυτό μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την παράμετρο  $L^*$  (λευκότητα). Το μάρμαρο παρουσιάζει συχνά κόκκινο χρώμα λόγω παρουσίας αιματίτη (σιδηρούχο οξείδιο) ή κίτρινο λόγω παρουσίας λεμονίτη (σιδηροοξείδιο) για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται κάποιες μικρές διακυμάνσεις στο χρωματισμό οι οποίες διακρίνονται.



Εικόνα 3-4: Γεώτρηση K4 (0-1 m) Matlab's Colour Thresholder.



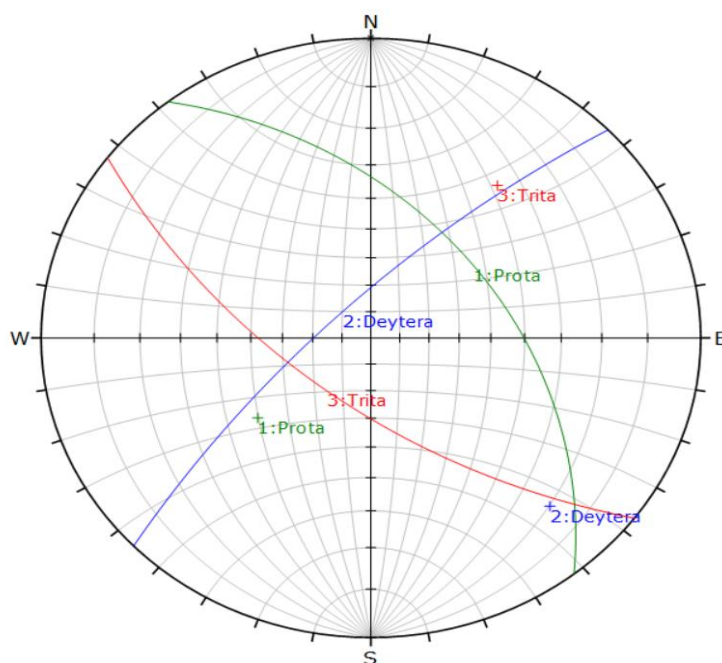
Εικόνα 3-5: Γεώτρηση K4 (1-2 m) Matlab's Colour Thresholder.

Για τον προσδιορισμό των συστημάτων-οικογενειών ασυνεχειών που κατανέμονται στα πετρώματα μαρμάρων έγινε η δημιουργία της στερεογραφικής προβολής των ασυνεχειών με την χρήση του προγράμματος Dips της Rocscience (Inc.Rocscience, 1989 - 2002). Τα χαρακτηριστικά που αναγνωρίστηκαν και μας είναι χρήσιμα για την κατανομή των ασυνεχειών εντός της περιοχής είναι η κλίση και η διεύθυνση κλίσης της κάθε ασυνέχειας. Για να μπορέσει να γίνει ο προσδιορισμός των εκμεταλλεύσιμων όγκων μαρμάρων εντός της περιοχής μελέτης

έγινε ο διαχωρισμός των ασυνεχειών σε τρεις οικογένειες από τις οποίες η μία αποτελεί αυτή που είναι παράλληλη με την επιφάνεια σχιστότητας των μαρμάρων (1<sup>η</sup> οικογένεια) (Εικόνα 3-6). Αρχικά, έγινε ο προσδιορισμός της κάθε οικογένειας ασυνέχειας ανά μέτρο γεώτρησης και ύστερα το άθροισμα των ασυνεχειών ανά μέτρο γεώτρησης για την εκτίμηση του μεγέθους του μπλοκ. Ο προσανατολισμός των οικογενειών των ασυνεχειών λαμβάνονται σημαντικά υπόψιν για τον χωρικό προσδιορισμό των ογκομαρμάρων καθώς και για τον προσανατολισμό του ελλειψοειδούς της μεθόδου παρεμβολής Kriging που θα αναλυθεί στη συνέχεια. Στον Πίνακα 3-2 αναφέρονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριών οικογενειών.

Πίνακας 3-2: Οικογένειες ασυνεχειών δειγμάτων μαρμάρων (Στερεογραφικής προβολής).

Οικογένεια Ασυνεχειών	Κλίση(°)	Διεύθυνση Κλίσης(°)
1 <sup>η</sup> οικογένεια (Prota)	47	52
2 <sup>η</sup> οικογένεια (Deytera)	76	316 (BA-NA)
3 <sup>η</sup> οικογένεια (Trita)	65	217 (BA-NA)

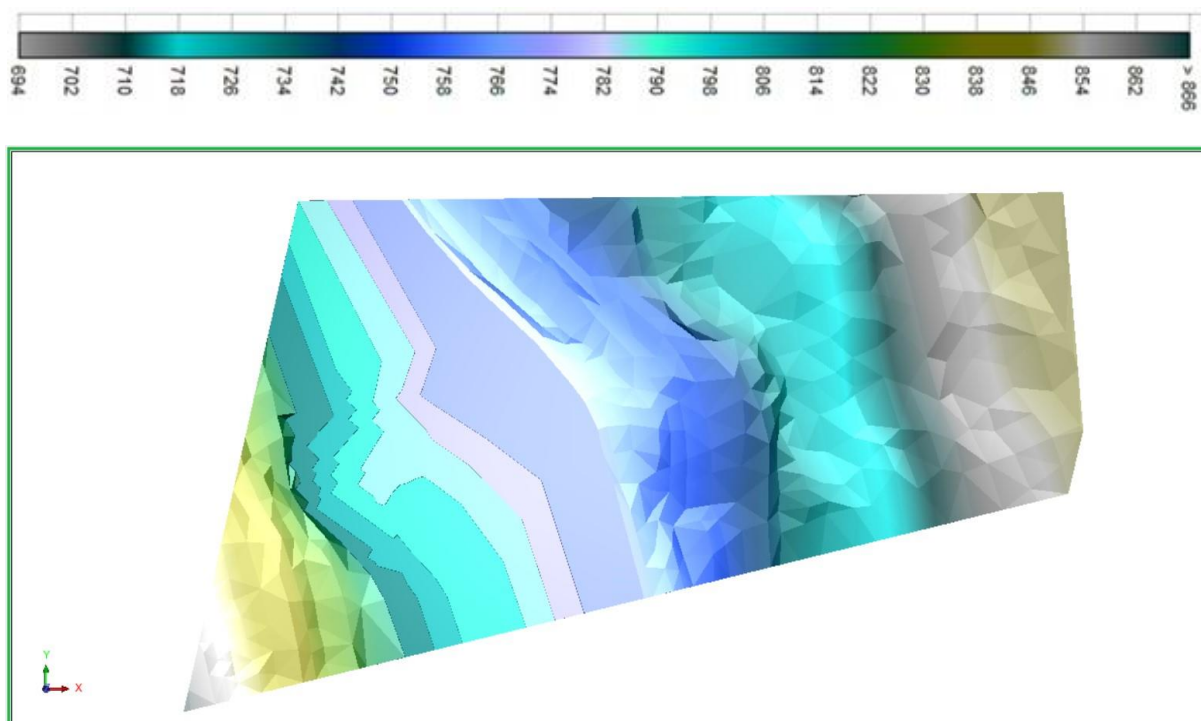


Εικόνα 3-6: Στερεογραφική προβολή μέσω των μεγάλων κύκλων οικογενειών ασυνεχειών (Dips- Rocscience) (Inc.Rocscience, 1989 - 2002).

### 3.2 Ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης και η δημιουργία βάσης δεδομένων από πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις

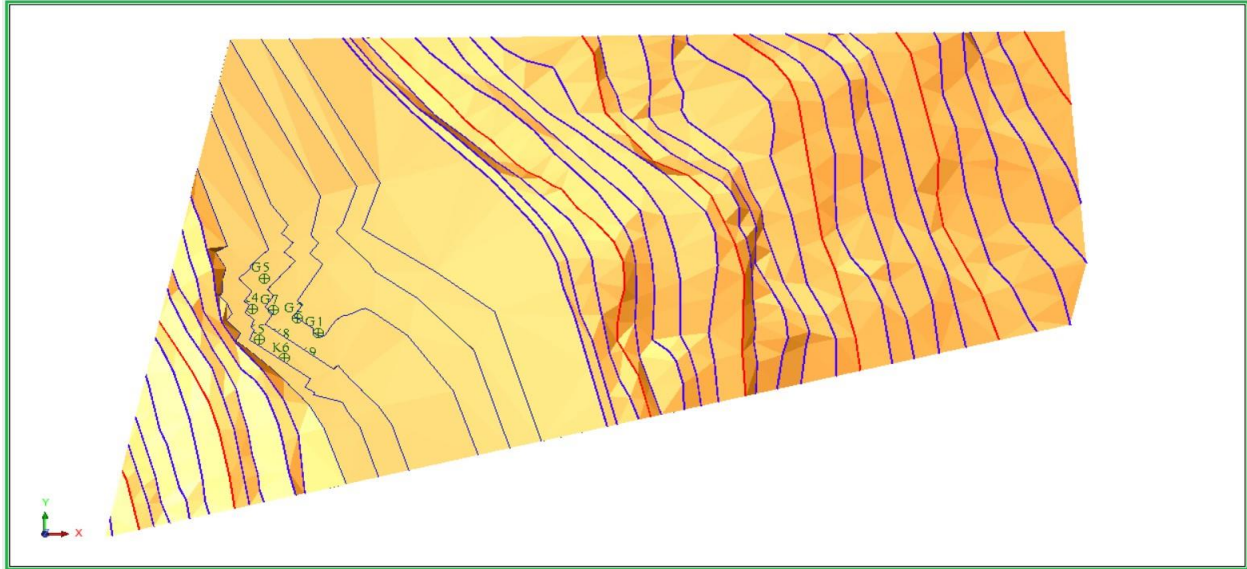
Από τα χαρακτηριστικά αυτά των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων στο Excel™ με τα απαραίτητα δεδομένα των ασυνεχειών και του χρωματισμού των δειγμάτων που θα χρειαστούν για την ανάλυση. Συγκεκριμένα, έγινε ο ποσοστιαίος διαχωρισμός της λευκότητας και ο αριθμητικός διαχωρισμός εμφάνισης των ασυνεχειών ανά μέτρο γεώτρησης.

Η ψηφιοποίηση της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε αρχικά μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος Autocad. Από τον τοπογραφικό χάρτη απεικόνισης της περιοχής μελέτης και τις συντεταγμένες των γεωτρήσεων που λήφθηκαν από την ΕΑΓΜΕ έγινε η απεικόνιση της περιοχής μελέτης στο χώρο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης (Εικόνα 3-7) (Εικόνα 3-8) και η τρισδιάστατη απεικόνιση (Εικόνα 3-9) των γεωτρήσεων και των βαθμίδων της περιοχής μελέτης.

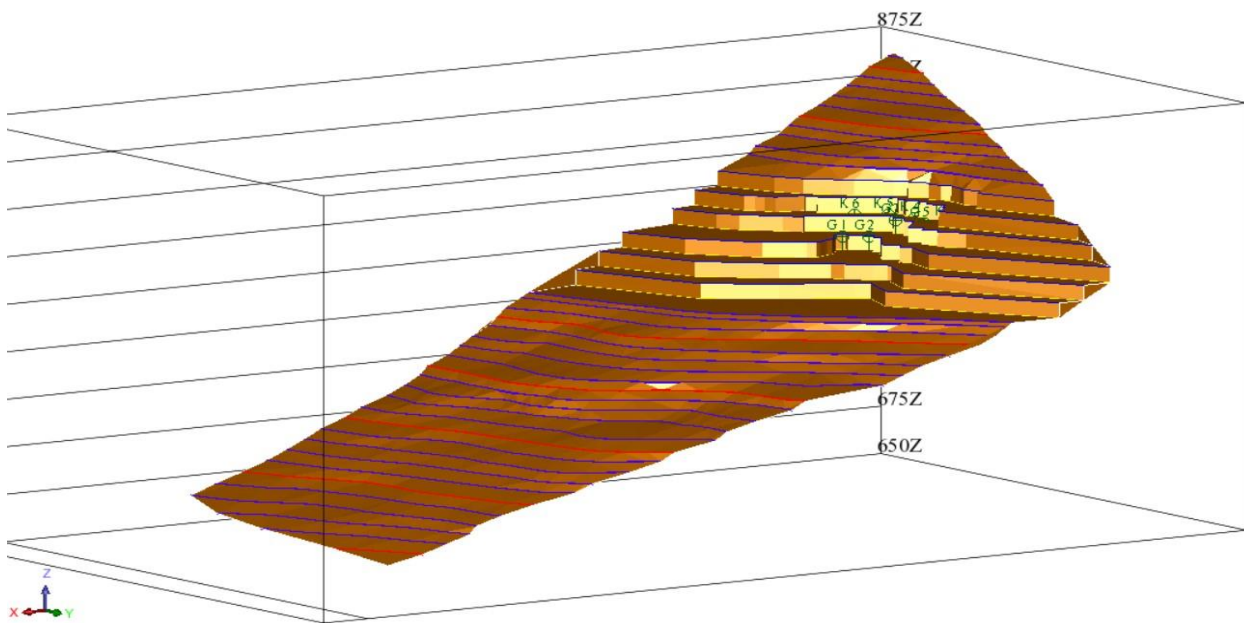


Εικόνα 3-7: Τοπογραφική κάτοψη της εκμετάλλευσης.





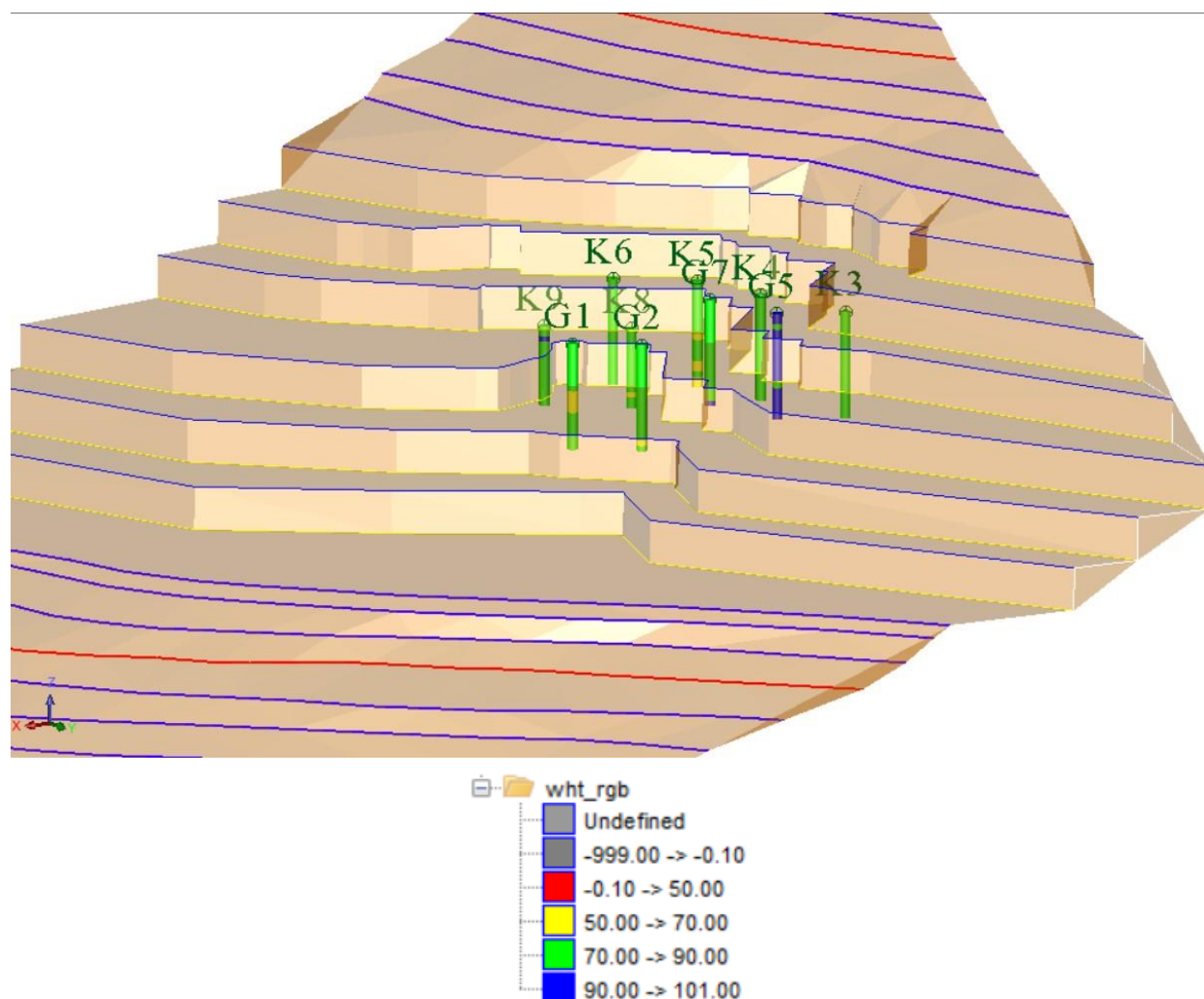
Εικόνα 3-8: Τοπογραφική κάτοψη της εκμετάλλευσης.



Εικόνα 3-9: Τρισδιάστατη τοπογραφική απεικόνιση εκμετάλλευσης.

Στη συνέχεια η βάση δεδομένων του Excel μεταφέρθηκε στο πρόγραμμα Geovia Surpac™ και που αποτελεί λογισμικό προσομοίωσης και μελέτης γεωλογικών και μεταλλευτικών ερευνών έγινε η 3D απεικόνισή της λευκότητας (Wht) (Εικόνα 3-10) των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

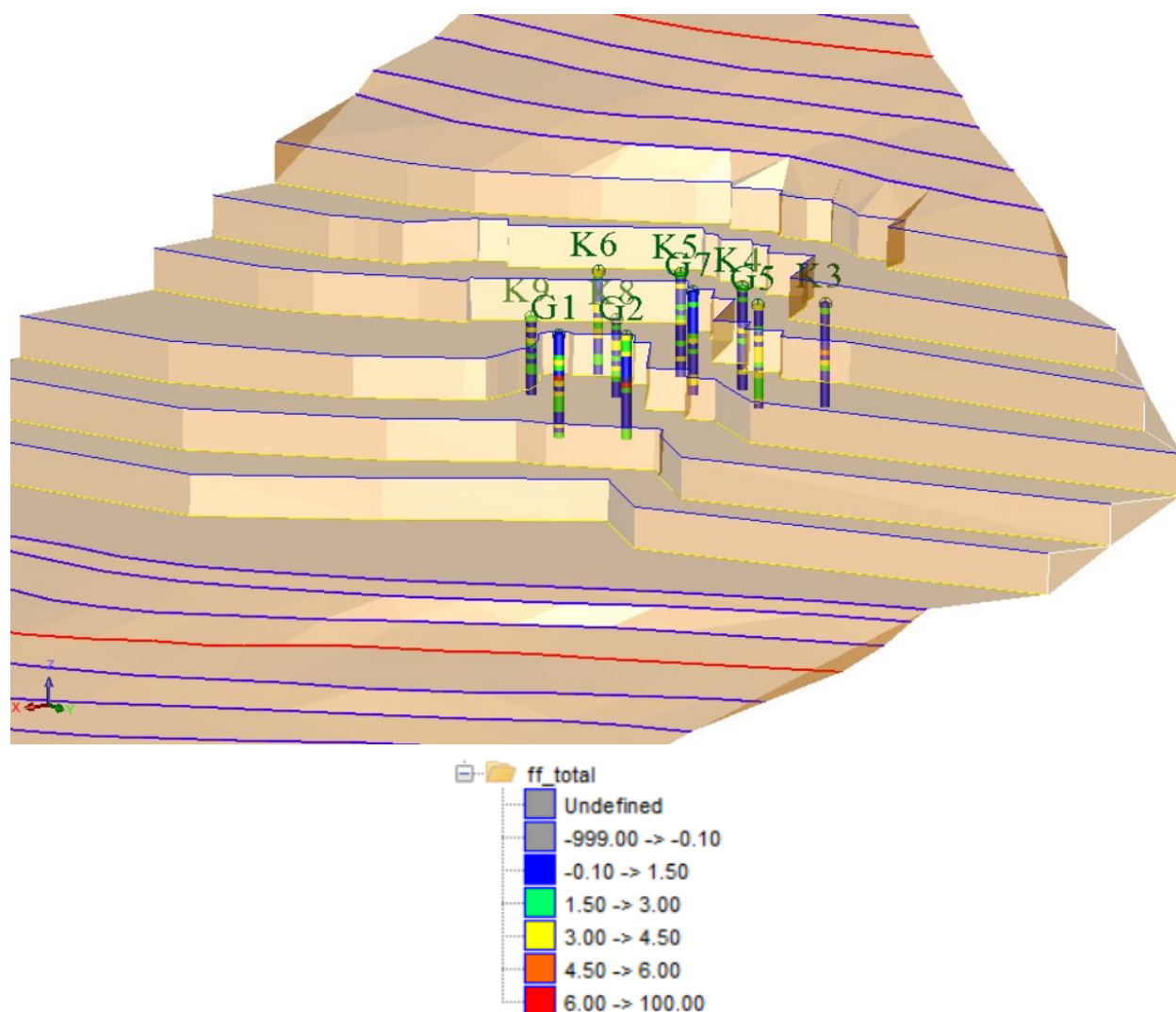
Τα μάρμαρα με τιμές λευκότητας  $Wht > 70\%$  θεωρούνται ότι είναι εμπορεύσιμα και αξίζει να εκμεταλλευτούν ενώ οι υπόλοιπες τιμές θεωρούνται μη εκμεταλλεύσιμες. Από τις τιμές των κλάσεων τις λευκότητας (Πίνακας 3-3) και σαν πρώτη εκτίμηση η λευκότητα των δειγμάτων των γεωτρήσεων είναι  $Wht=70-90\%$ . Τα δείγματα των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων από γεωλογικής σκοπιάς αποτελούν εμπορεύσιμα λευκόφοντα δολομιτικά μάρμαρα με αραιές ερυθρωπές ταινίες.



Εικόνα 3-10: Τρισδιάστατη απεικόνιση λευκότητας ( $Wht \%$ ) δειγμάτων.

Ύστερα, όπως και με το χρωματισμό έγινε τρισδιάστατη απεικόνιση των ασυνεχειών  $FF(m^{-1})$  των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Εικόνα 3-11). Όταν η συχνότητα ασυνεχειών  $FF(m^{-1})$  ανήκει στην κλάση όπου  $FF > 6m^{-1}$  πρόκειται για ελαττωματικές μαρμαροφόρες ζώνες.

Η συχνότητα των ασυνεχειών  $FF$  ( $m^{-1}$ ) μαρμάρων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων ανήκει στην κλάση  $0 \div 1.5 m^{-1}$  καθώς και πολλά ανήκουν στην κλάση  $1.5 \div 3 m^{-1}$  και αυτό υποδεικνύει σαν πρώτη εκτίμηση ότι τα δείγματα μαρμάρων είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμα.



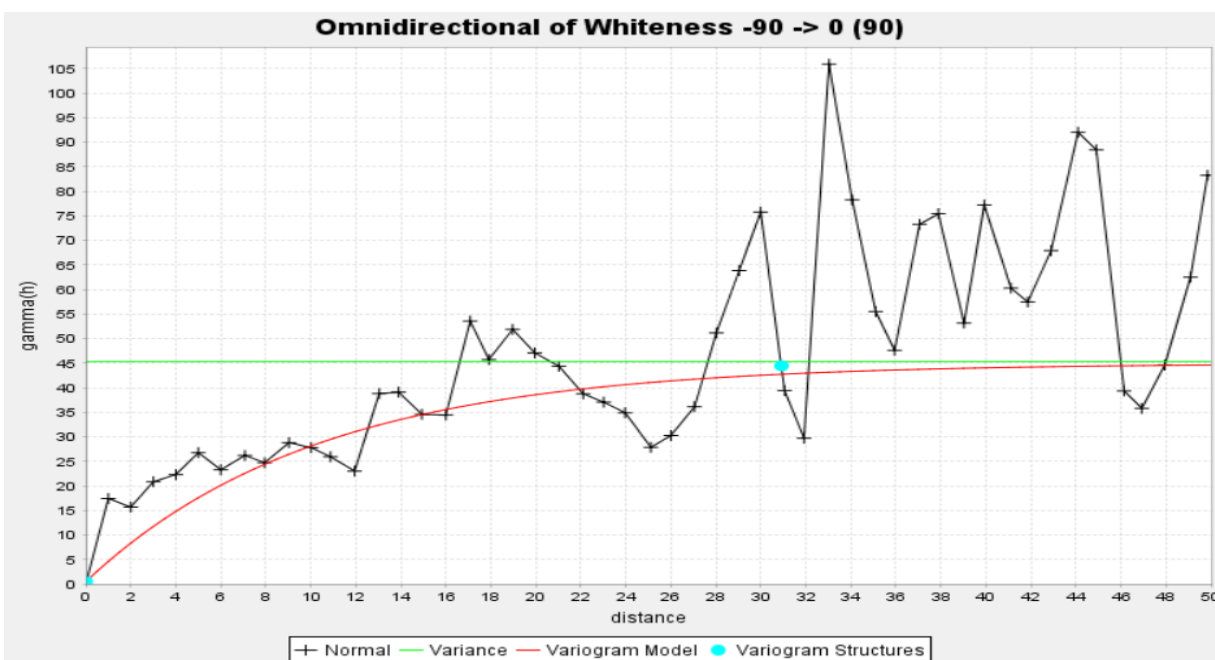
Εικόνα 3-11: 3D απεικόνιση ασυνεχειών  $FF(m)$  δειγμάτων.

### 3.3 Γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων, προσδιορισμός παραμέτρων βαριογραμμμάτων

Για την στατιστική ανάλυση των δεδομένων γίνεται η δημιουργία βαριογραμμμάτων μέσω των οποίων γίνεται ο προσδιορισμός της ανισοτροπίας των δειγμάτων. Όσα δείγματα έχουν μεγάλη απόκλιση εξαλείφονται από την αναλυτική διαδικασία. Τα μοντέλα βαριογραμμμάτων της ανάλυσης βελτιστοποιούνται και εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά του ελληνοειδούς της

ανισοτροπίας και γίνεται ο τελικός προσδιορισμός της λευκότητας (Wht %) και των ασυνέχειών ( $FF\ m^{-1}$ ) για κάθε block.

Οι γεωστατιστικοί μέθοδοι περιλαμβάνουν την αυτόσυσχέτιση των χωρομεταβλητών που αναλύονται. Όσο η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων είναι μικρή, τόσο η αυτόσυσχέτιση των μετρήσεων είναι μεγάλη, και το αντίθετο (Νίκος Ανδρουλακάκης, 2012). Επίσης, παρέχουν στοιχεία για την ακρίβεια της πρόβλεψης καθώς και προβλέπουν τιμές για την δημιουργία μιας επιφάνειας όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικής. Συγκεκριμένα, από την πραγματική τιμή μιας μεταβλητής ενός ικανοποιητικού αριθμού σημείων στο χώρο μπορεί να γίνει η πρόβλεψη της μεταβλητής σε αλλά περιβάλλοντα σημεία. Η μέθοδος γεωστατιστικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη έρευνα είναι αυτή της γεωστατιστικής μεθόδου Kriging. Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η απόσταση και η διεύθυνση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας αντανakλά μια χωρική συσχέτιση, η οποία χρησιμοποιείται για να εξηγήσει την μεταβολή στον χώρο.



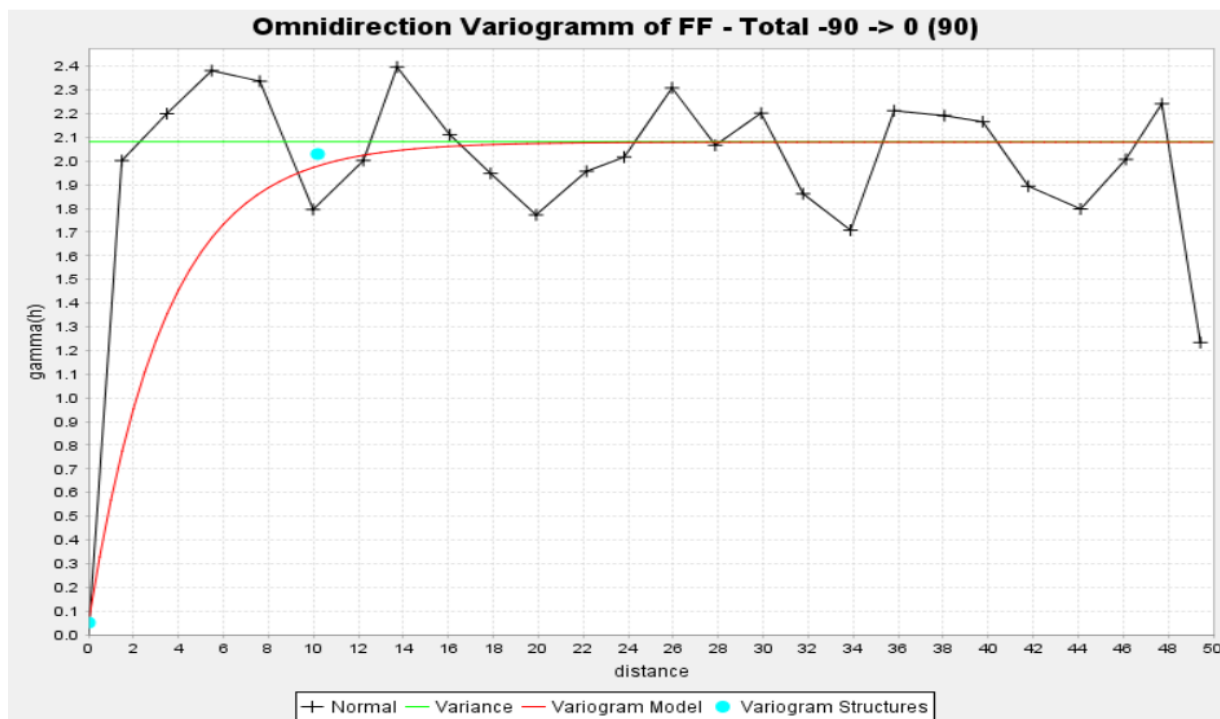
Εικόνα 3-12: Ημυ-βαριόγραμμα λευκότητας (Wht %) μαρμάρων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αρχικά γίνεται μια στατιστική ανάλυση και έπειτα δημιουργείται ένα μοντέλο βαριογράμματος μέσω του οποίου δημιουργείται μια επιφάνεια μεταβολών. Η κύρια εφαρμογή της μεθόδου Kriging είναι η αξιόπιστη πρόβλεψη τιμών σε θέσεις όπου δεν υπάρχουν δείγματα. Έτσι, η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι να δημιουργηθούν βαριογράμματα σε



διαφορετικές διευθύνσεις. Το ημι-βαριόγραμμα αποτελεί μια απεικόνιση του ρυθμού μεταβολής ενός χαρακτηριστικού σε σχέση με την απόσταση. Επίσης, διευκρινίζει την συμβολή του κάθε σημείου στην πρόβλεψη της τοποθεσίας που δεν υπάρχει τιμή δειγματοληψίας. Η μοντελοποίηση ενός βαριογράμματος είναι σημαντική για την δημιουργία της χωρικής επιφάνειας.

Από τα ημι-βαριόγραμμα (*Εικόνα 3-12-Εικόνα 3-13*) και από τα χαρακτηριστικά τους (*Πίνακας 3-3*) παρατηρείται ότι τα σημεία δειγματοληψίας που οι αποστάσεις τους είναι μικρότερες από την ακτίνα επιρροής (range) συσχετίζονται χωρικά. Εάν η απόσταση που χωρίζει την άγνωστή θέση από τη δεδομένη θέση είναι μεγαλύτερη από το εύρος τότε η δεδομένη τιμή δεν συνεισφέρει στην παρεμβολή. Η ακτίνα επιρροής (range) της συχνότητας των ασυνεχειών ( $FF\ m^{-1}$ ) λήφθηκε ίση με τιμή 10.190 έχοντας σχετικές πληροφορίες από άλλα λατομεία της ευρύτερης περιοχής. Η οριακή τιμή (sill) αποτελεί την σταθεροποίηση των τιμών του ημιβαριογράμματος. Η επίδραση του φαινομένου κόκκου (nugget effect) αποτελεί τη τιμή των σφαλμάτων που αποδίδονται στην δειγματοληψία δηλαδή στον ανθρώπινο παράγοντα (Κουτσόπουλος & Ανδρουλακάκης, 2003) (Dimadis & Zachos, 1989).



Εικόνα 3-13: Ημι-βαριόγραμμα της συχνότητας των ασυνεχειών ( $FF\ m^{-1}$ ) των δειγμάτων.

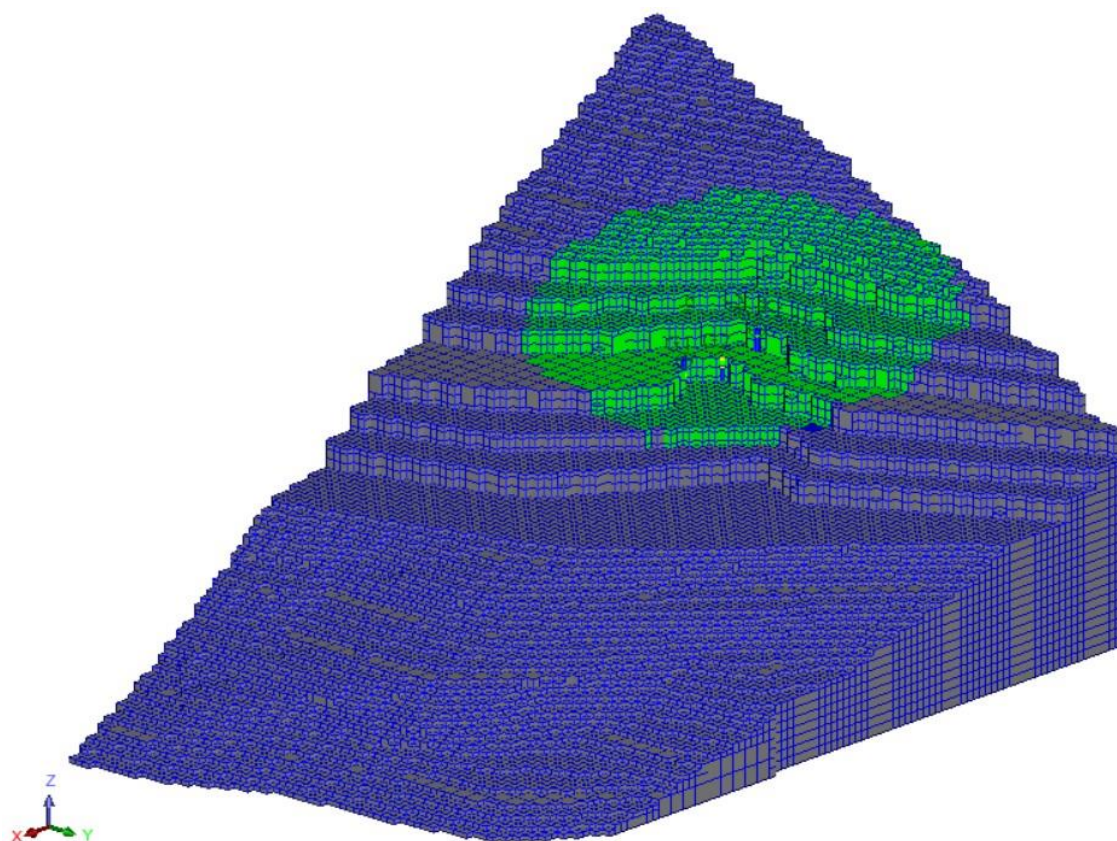


Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά ημι-βαριογραμμάτων (Wht %) και (FF  $m^{-1}$ ) μαρμάρων

Index	Nugget	Sill	Range
(Wht %)	0.493	44.444	30.916
(FF $m^{-1}$ )	0.050	2.029	10.190

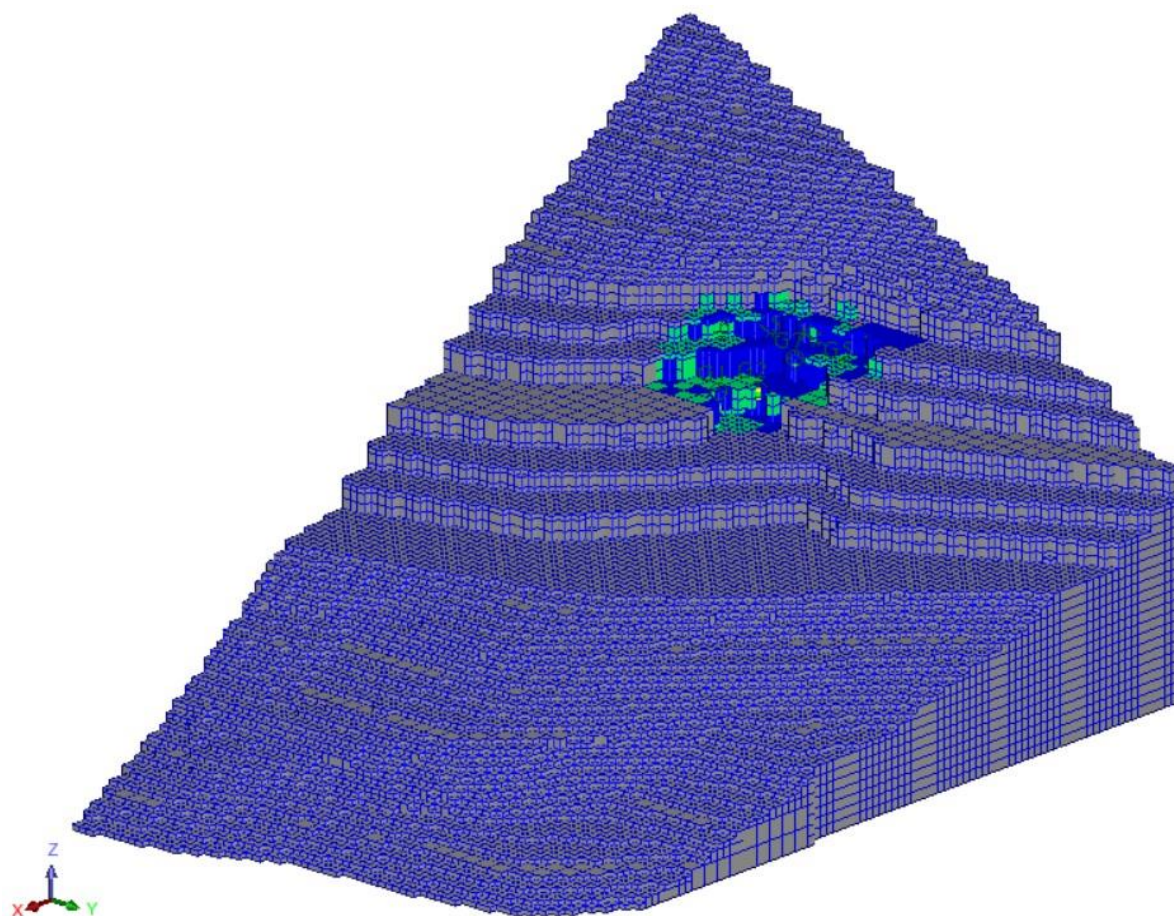
### 3.4 Ογκομετρικό μοντέλο (Block Model)-Υπολογισμός Wht-FF centroid blocks μέσω αλγορίθμου Kriging

Για την εκτίμηση της παραγωγής μιας μαρμαροφόρου περιοχής και του προσδιορισμού των ογκομαρμάρων, δημιουργείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο που αποτελείται από μπλοκ με ορθογώνιο πρισματικό σχήμα (Block Model). Δημιουργείται ένα μοντέλο που προσαρμόζεται στις πραγματικές συνθήκες μέσω τοπογραφικών και κοιτασματολογικών περιορισμών. Γίνεται η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της περιοχής που θα καλύπτει το μοντέλο ογκομαρμάρων (Block model), η κατάτμηση του κοιτάσματος σε blocks και η ετίμηση της περιεκτικότητας κάθε block ξεχωριστά. Οι διαστάσεις του κάθε μπλοκ είναι 6m x 6m x 7m με όγκο και συνολικά το τρισδιάστατο μοντέλο αποτελείται από 15046 μπλοκ. Μέσω της τεχνικής χωρικής παρεβολής (Block Kriging), προσδιορίζεται για κάθε μπλοκ της μαρμαροφόρου περιοχής η λευκότητα (Wht %) και ο αριθμός ασυνεχειών (FF  $m^{-1}$ ).



Εικόνα 3-14: Ογκομετρικό μοντέλο λευκότητας (Wht %).

Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή ο αριθμός των δειγμάτων είναι σχετικά μικρή δεν μπορεί να υπάρχει απόλυτη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά σε συνδυασμό με τις πληροφορίες της γεωλογίας και της τεκτονικής της περιοχής μελέτης, τα συμπεράσματα καθίστανται αξιόπιστα. Οι χωρικές επιφάνειες κατανομής της λευκότητας (Wht %) και της συχνότητας των ασυνέχειών ( $FF\ m^{-1}$ ) με τα κριτήρια που καθιστούν τους πόρους μαρμάρων  $Wht > 50\%$ ,  $FF < 6\ m^{-1}$ ,  $\alpha \leq 0.2$  για κάθε μπλοκ παρουσιάζονται στη συνέχεια (Εικόνα 3-14, Εικόνα 3-15). Στο Παράρτημα Α απεικονίζονται το ογκομετρικό μοντέλο (block model) των γεωλογικών πόρων μαρμάρων για κάθε βαθμίδα καθώς και τα συνολικά  $m^3$  των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων για κάθε βαθμίδα (Πίνακας 3-5). Στο μοντέλο γίνεται και η εκτίμηση των μπλοκ τα οποία θεωρούμε μη μετρήσιμα με τιμές  $-999.0 \rightarrow -1.0$  και δεν συνυπολογίζονται στα τελικά αποτελέσματα. Από τα ογκομετρικά δεδομένα του μοντέλου έχουμε ότι οι γεωλογικοί πόροι μαρμάρων χωρίς τις τιμές  $-999.0 \rightarrow -1.0$  είναι  $789202\ m^3$  (Πίνακας 3-4).



Εικόνα 3-15: Ογκομετρικό μοντέλο ασυνεχειών  $FF(m^{-1})$ .

Η ταξινόμηση των πόρων μαρμάρου (resources) για να χαρακτηριστούν ως μετρήσιμες βασίζονται όπως αναφέρθηκε στην απόσταση των μπλοκ από τις γειτονικές γεωτρήσεις και την εμβέλεια των βαριογραμμμάτων. Αυτό κάποιες φορές μπορεί να έχει ένα ρίσκο και μια αβεβαιότητα τις εκτίμησης λόγω της μικρή ποσότητας μετρούμενων δεδομένων. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η εκτίμηση των γεωλογικών πόρων (resources) να μην είναι αντιπροσωπευτική και συνήθως γίνεται μια αυξανόμενη εκτίμηση από την πραγματική. Αν θέλουμε να αυξήσουμε τους εκτιμώμενους πόρους βασική προϋπόθεση είναι να υπάρχουν περισσότερες γεωτρήσεις έτσι ώστε το πλέγμα να είναι μεγαλύτερο. Για να αποφευχθεί αυτό το ρίσκο προσδιορίζεται για κάθε μπλοκ η τυπική απόκλιση NSD (Normal Standard Deviation) [εξ \(3.1\)](#). Στη στατιστική η Κανονική κατανομή (Standard Deviation) λεγόμενη ως και Γκαουσιανή είναι μια συνεχή κατανομή πιθανότητας για μια τυχαία μεταβλητή πραγματικής αξίας. Η εκτιμώμενη τιμή του (Whit %)  $FF(m^{-1})$  ορίζεται ως η εκτίμηση  $Z^*$  με αντίστοιχη τιμή διακύμανση  $\sigma^2$ .

$$NSD = a = \sqrt{\frac{\sigma^2}{Z^*}} \quad (3.1)$$

Όταν η παράμετρος  $a$  αυξάνεται τότε και αριθμός των εκτιμώμενων τιμών μπλοκ αυξάνεται και κατά συνέπεια οι πόροι (resources) έτσι και το ρίσκο να μην φτάσουμε στην επιθυμητή ετήσια παραγωγή των εκμεταλλεύσιμων μαρμάρων. Για να αποφευχθεί αυτό ορίζεται ο συντελεστής  $a$  με τιμές  $a \leq 0.2$  και για το (Wht %) και για το FF(  $m^{-1}$ ) ως μπλοκ που αντιπροσωπεύουν τους εκμεταλλεύσιμους πόρους.

Πίνακας 3-4: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου γεωλογικών πόρων (recourses).

Row Labels	Sum of Volume (m3)
50.0 -> 70.0	78942
70.0 -> 90.0	706543
90.0 -> 101.0	3717
<b>Grand Total</b>	<b>789202</b>

Πίνακας 3-5: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου γεωλογικών πόρων (recourses).

Γεωλογικοί πόροι (Resources)			
Elevation (Z)	WHT	Volume (m3)	Sum
722.0 -> 730.0	-999.0 -> -1.0	519386.00	519386.00
730.0 -> 738.0	-999.0 -> -1.0	483496.00	496600.00
730.0 -> 738.0	70.0 -> 90.0	13104.00	
738.0 -> 746.0	-999.0 -> -1.0	415942.00	463282.00
738.0 -> 746.0	50.0 -> 70.0	1728.00	
738.0 -> 746.0	70.0 -> 90.0	45000.00	
738.0 -> 746.0	90.0 -> 101.0	612.00	
746.0 -> 754.0	-999.0 -> -1.0	346626.00	418374.00
746.0 -> 754.0	50.0 -> 70.0	1872.00	
746.0 -> 754.0	70.0 -> 90.0	69012.00	
746.0 -> 754.0	90.0 -> 101.0	864.00	
754.0 -> 762.0	-999.0 -> -1.0	293247.00	379170.00
754.0 -> 762.0	50.0 -> 70.0	2196.00	
754.0 -> 762.0	70.0 -> 90.0	82971.00	
754.0 -> 762.0	90.0 -> 101.0	756.00	
762.0 -> 770.0	-999.0 -> -1.0	242528.00	338504.00
762.0 -> 770.0	50.0 -> 70.0	1728.00	
762.0 -> 770.0	70.0 -> 90.0	93384.00	
762.0 -> 770.0	90.0 -> 101.0	864.00	
770.0 -> 778.0	-999.0 -> -1.0	145715.00	247199.00



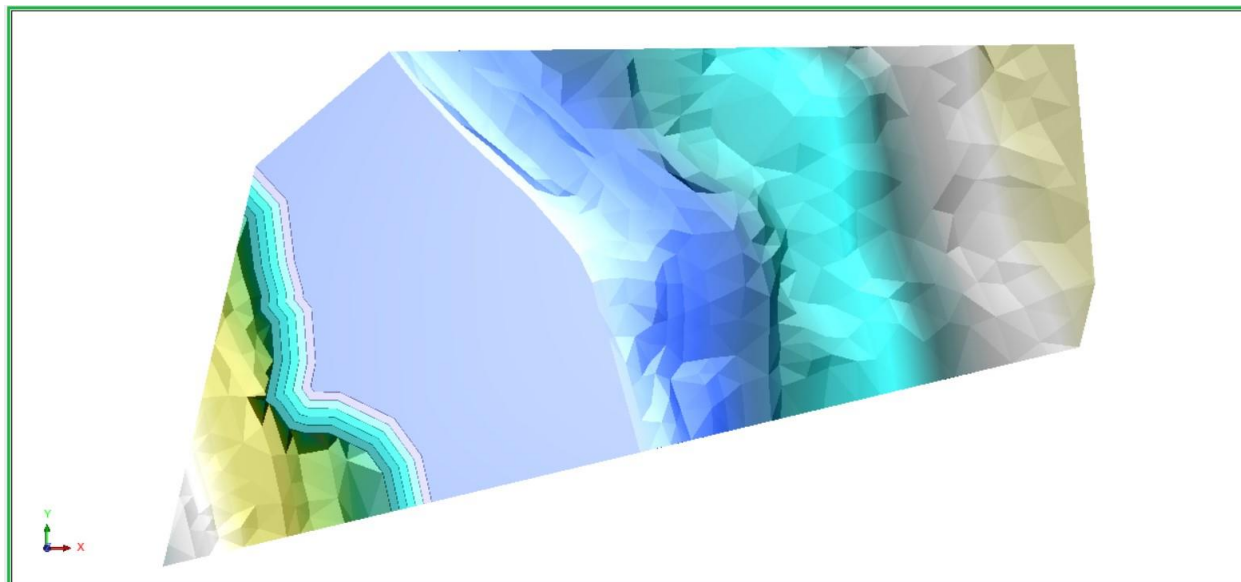
770.0 -> 778.0	50.0 -> 70.0	1800.00	
770.0 -> 778.0	70.0 -> 90.0	99252.00	
770.0 -> 778.0	90.0 -> 101.0	432.00	
778.0 -> 786.0	-999.0 -> -1.0	112547.00	214056.00
778.0 -> 786.0	50.0 -> 70.0	2232.00	
778.0 -> 786.0	70.0 -> 90.0	99088.00	
778.0 -> 786.0	90.0 -> 101.0	189.00	
786.0 -> 794.0	-999.0 -> -1.0	87098.00	175964.00
786.0 -> 794.0	50.0 -> 70.0	540.00	
786.0 -> 794.0	70.0 -> 90.0	88326.00	
794.0 -> 802.0	-999.0 -> -1.0	60242.00	126525.00
794.0 -> 802.0	50.0 -> 70.0	288.00	
794.0 -> 802.0	70.0 -> 90.0	65995.00	
802.0 -> 810.0	-999.0 -> -1.0	54326.00	104953.00
802.0 -> 810.0	50.0 -> 70.0	216.00	
802.0 -> 810.0	70.0 -> 90.0	50411.00	
810.0 -> 818.0	-999.0 -> -1.0	48395.00	81317.00
810.0 -> 818.0	50.0 -> 70.0	32922.00	
818.0 -> 826.0	-999.0 -> -1.0	47876.00	72795.00
818.0 -> 826.0	50.0 -> 70.0	24919.00	
826.0 -> 834.0	-999.0 -> -1.0	45180.00	53361.00
826.0 -> 834.0	50.0 -> 70.0	8181.00	
834.0 -> 842.0	-999.0 -> -1.0	35705.00	36025.00
834.0 -> 842.0	50.0 -> 70.0	320.00	
		Total	3727511.00

### 3.5 Σχεδιασμός τελικής μορφής εκμετάλλευσης και προσδιορισμός μεταλλευτικών αποθεμάτων

Ο προσδιορισμός μεταλλευτικών αποθεμάτων (reserves) από τους γεωλογικούς πόρους (resources) γίνεται με την σύγκριση των γεωλογικών πόρων δηλαδή των γεωλογικών αποθεμάτων που βρίσκονται κάτω από την μαρμαροφόρο περιοχή συνολικά και αυτών που βρίσκονται πάνω από την τελική τοπογραφία δηλαδή την τελική μορφή της εκμετάλλευσης. Ο σχεδιασμός της τελικής μορφής (*Εικόνα 3-16*) έγινε σύμφωνα με τα γεωμετρικά κριτήρια προχώρησης μιας εκμετάλλευσης. Κατά το στάδιο της παραγωγής το λατομείο έχει σχεδιαστεί σε βαθμίδες ύψους 6m και πλάτους , όταν οι βαθμίδες φτάσανε στο στάδιο της εξόφλησης ανά τρεις βαθμίδες ενώνονται μια κάτω από την άλλη και δημιουργούν ένα πρανές 18m. Στο *Παράρτημα Α* απεικονίζεται το μοντέλο (block model) των αποθεμάτων (reserves) για κάθε βαθμίδα της



εκμετάλλευσης. Από το μοντέλο αυτό γίνεται η εκτίμηση σε  $\text{m}^3$  των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων για κάθε βαθμίδα (Πίνακας 3-6). Από τα ογκομετρικά δεδομένα του μοντέλου έχουμε ότι τα μεταλλευτικά αποθέματα συνολικά είναι  $81901\text{m}^3$  (Πίνακας 3-7).



Εικόνα 3-16: Τοπογραφική απεικόνιση τελικής μορφής εκμετάλλευσης.

Πίνακας 3-6: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου μεταλλευτικών αποθεμάτων (reserves).

Μεταλλευτικά Αποθέματα (Reserves)				
Elevation (Z)	WHT	FF	Volume (m3)	Sum
762.0 -> 770.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	5144.00	
762.0 -> 770.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	2250.00	
762.0 -> 770.0	70.0 -> 90.0	0.0 -> 1.5	666.00	
762.0 -> 770.0	70.0 -> 90.0	1.5 -> 3.0	126.00	
762.0 -> 770.0	90.0 -> 101.0	-999.0 -> -1.0	72.00	8258.00
770.0 -> 778.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	81425.00	
770.0 -> 778.0	50.0 -> 70.0	0.0 -> 1.5	90.00	
770.0 -> 778.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	34830.00	
770.0 -> 778.0	70.0 -> 90.0	0.0 -> 1.5	11331.00	
770.0 -> 778.0	70.0 -> 90.0	1.5 -> 3.0	3636.00	
770.0 -> 778.0	70.0 -> 90.0	3.0 -> 4.5	360.00	
770.0 -> 778.0	90.0 -> 101.0	-999.0 -> -1.0	432.00	132104.00
778.0 -> 786.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	53541.00	
778.0 -> 786.0	50.0 -> 70.0	0.0 -> 1.5	927.00	
778.0 -> 786.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	34828.00	
778.0 -> 786.0	70.0 -> 90.0	0.0 -> 1.5	13392.00	
778.0 -> 786.0	70.0 -> 90.0	1.5 -> 3.0	6080.00	
778.0 -> 786.0	70.0 -> 90.0	3.0 -> 4.5	144.00	

778.0 -> 786.0	90.0 -> 101.0	-999.0 -> -1.0	189.00	109101.00
786.0 -> 794.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	32904.00	
786.0 -> 794.0	50.0 -> 70.0	0.0 -> 1.5	180.00	
786.0 -> 794.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	27680.00	
786.0 -> 794.0	70.0 -> 90.0	0.0 -> 1.5	11986.00	
786.0 -> 794.0	70.0 -> 90.0	1.5 -> 3.0	8712.00	81462.00
794.0 -> 802.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	11129.00	
794.0 -> 802.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	16661.00	
794.0 -> 802.0	70.0 -> 90.0	0.0 -> 1.5	10676.00	
794.0 -> 802.0	70.0 -> 90.0	1.5 -> 3.0	4777.00	43243.00
802.0 -> 810.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	6356.00	
802.0 -> 810.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	14870.00	
802.0 -> 810.0	70.0 -> 90.0	0.0 -> 1.5	6478.00	
802.0 -> 810.0	70.0 -> 90.0	1.5 -> 3.0	1908.00	29612.00
810.0 -> 818.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	673.00	
810.0 -> 818.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	13304.00	
810.0 -> 818.0	70.0 -> 90.0	0.0 -> 1.5	45.00	
810.0 -> 818.0	70.0 -> 90.0	1.5 -> 3.0	387.00	14409.00
818.0 -> 826.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	794.00	
818.0 -> 826.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	10879.00	11673.00
826.0 -> 834.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	648.00	
826.0 -> 834.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	3249.00	3897.00
834.0 -> 842.0	-999.0 -> -1.0	-999.0 -> -1.0	324.00	
834.0 -> 842.0	70.0 -> 90.0	-999.0 -> -1.0	99.00	423.00
			Total	<b>434182</b>

Πίνακας 3-7: Δεδομένα ογκομετρικού μοντέλου μεταλλευτικών αποθεμάτων (reserves).

Row Labels	Sum of Volume (m3)
<b>50.0 -&gt; 70.0</b>	<b>1197</b>
0.0 -> 1.5	1197
<b>70.0 -&gt; 90.0</b>	<b>80704</b>
0.0 -> 1.5	54574
1.5 -> 3.0	25500
1.5 -> 3.0	126
3.0 -> 4.5	504
<b>Grand Total</b>	<b>81901</b>

### 3.6 Η εκτίμηση της χωρικής κατανομής των εκμεταλλεύσιμων blocks

Για την εκτίμηση της κατανομής των εμπορικά εκμεταλλεύσιμων όγκων μαρμάρων μιας μαρμαροφόρου περιοχής προσδιορίζεται ένας τελευταίος παράγοντας που είναι ο προσδιορισμός

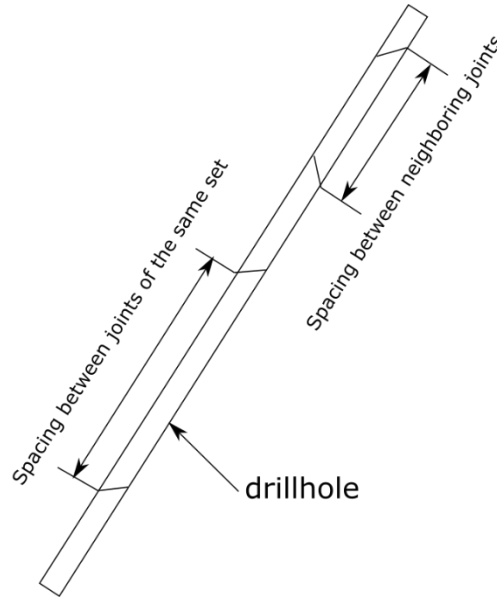
του όγκου που απομονώνεται μεταξύ των τριών οικογενειών. Αρχικά δημιουργούμε τα ιστογράμματα  $FF(m^{-1})$  για κάθε οικογένεια ασυνεχειών και ύστερα εφαρμόζουμε την καλύτερη προσαρμοσμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability density function, pdf). Η διάταξη των ασυνεχειών σε ένα κοίτασμα μαρμάρου θεωρείται τυχαία, επομένως η παρουσία μιας ασυνέχειας στη πυρήνα της γεώτρησης είναι μοναδική. Αυτό το κριτήριο μας οδηγεί στο να προσομοιάσουμε την κατανομή των ασυνεχειών  $FF(m^{-1})$  στο χώρο με την κατανομή Poisson. Η Poisson είναι μια διακριτή συνάρτηση κατανομής που προσδιορίζει την πιθανότητα των γεγονότων που συμβαίνουν σε ένα σταθερό χρονικό διάστημα. Με την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Poisson [εξ. \(3.2\)](#) μετρούνται οι αθροιστικές συχνότητες ασυνεχειών κατά μήκος των γεωτρήσεων που εκφράζουν την πιθανότητα των ασυνεχειών  $k$  σε διάστημα  $x$  της πυρηνοληπτικής γεώτρησης.

$$P\left(\frac{k}{x}\right) = e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^k}{k!} \quad (3.2)$$

Όπου:

$k$  είναι το  $FF(m^{-1})$  ασυνεχειών,  $x$  το μήκος των ασυνεχειών,  $\lambda$  γραμμική συχνότητα ασυνεχειών.

Με βάση αυτή την συνάρτηση συχνότητας πιθανότητας δημιουργούμε έναν αλγόριθμο εκτίμησης της κατανομής των αποστάσεων των ασυνεχειών. Η κατανομή των αποστάσεων των ασυνεχειών σε βραχύδεις μάζες επηρεάζει την αντοχή, την παραμόρφωση και τις ιδιότητες μεταφοράς των μαρμάρων. Η ανάλυση γίνεται μέσω της Matlab™ για κάθε μια οικογένεια ασυνεχειών ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, πρόκειται για 190 μετρήσεις αριθμού ασυνεχειών ανά μέτρο γεώτρησης και εφαρμόζεται ο αλγόριθμος `poissFFfitNew2.m` (Stavropoulou et al, 2021; Xiroudakis & Stavropoulou, 2020) του Matlab™ για την εκτίμηση των φαινόμενων αποστάσεων των ασυνεχειών κάθε οικογένειας από τις μετρήσεις πλήθους των ασυνεχειών ανά μέτρο γεώτρησης ([Εικόνα 3-17](#)) (Stavropoulou et al, 2021).



Εικόνα 3-17: Πλήθος ασυνεχειών κατά μήκος πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων (Stavropoulou et al, 2021).

Όσο μικρότερη είναι η απόσταση των ασυνεχειών  $FF(m^{-1})$  τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των ασυνεχειών ανά μέτρο. Σύμφωνα με την εξίσωση της κατανομής συχνότητας δημιουργείται η αθροιστική κατανομή των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας [εξ. \(3.3\)](#) (Exadaktylos & Saratsis, 2019) των ασυνεχειών για κάθε οικογένεια. Η αθροιστική κατανομή των αποστάσεων και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των ασυνεχειών παίρνουν τη μορφή της συνάρτησης Weibull.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$$

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (3.3)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο προσδιορισμός των αθροιστικών καμπύλων κατανομής των αποστάσεων κάθε οικογένειας ασυνεχειών ([Εικόνα 3.18](#), [Εικόνα 3.19](#), [Εικόνα 3.20](#)). Η κατανομή προκύπτει για την μη ομοιογενή κατανομή του poisson (non-homogeneous Poisson process, NHPP) [εξ. \(3.4\)](#). (Stavropoulou & Xiroudakis, 2020), εφαρμόζοντας τον κανόνα αριθμητικής ολοκλήρωσης του Gauss.

$$F(x) = 1 - \frac{L-x}{2\Lambda(L)} \sum_{i=1}^n w_i \lambda \left( x + \frac{L-x}{2} (\xi_i + 1) \right) e^{-\left[ \Lambda \left( x + \frac{L-x}{2} (\xi_i + 1) \right) - \Lambda \left( \frac{L-x}{2} (\xi_i + 1) \right) \right]} \quad (3.4)$$

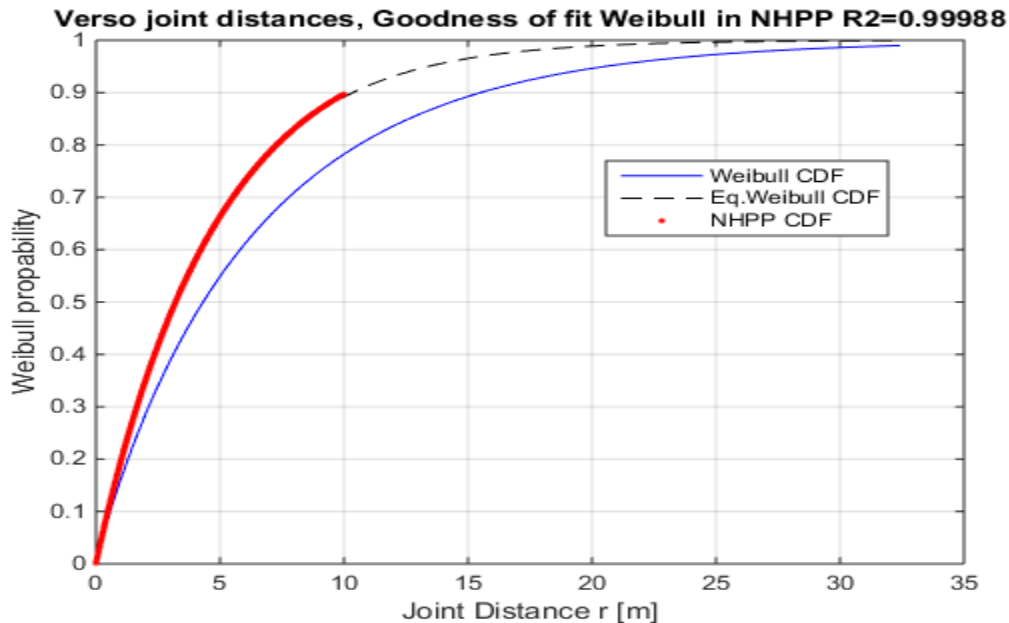
όπου:  $\lambda()$  η μεταβαλλόμενη παράμετρος συχνότητας ασυνεχειών της μη ομοιογενούς κατανομής poisson,

$\Lambda()$  αναφέρεται στη μέση τιμή των γεγονότων (ασυνέχειες) στο διάστημα μήκους που περικλείει:

$$\Lambda(x) = \int_0^x \lambda(y)dy = \frac{x^{b+1}}{(b+1)a^b} + \frac{x^{b'+1}}{(b'+1)a'^{b'}} f_\lambda$$

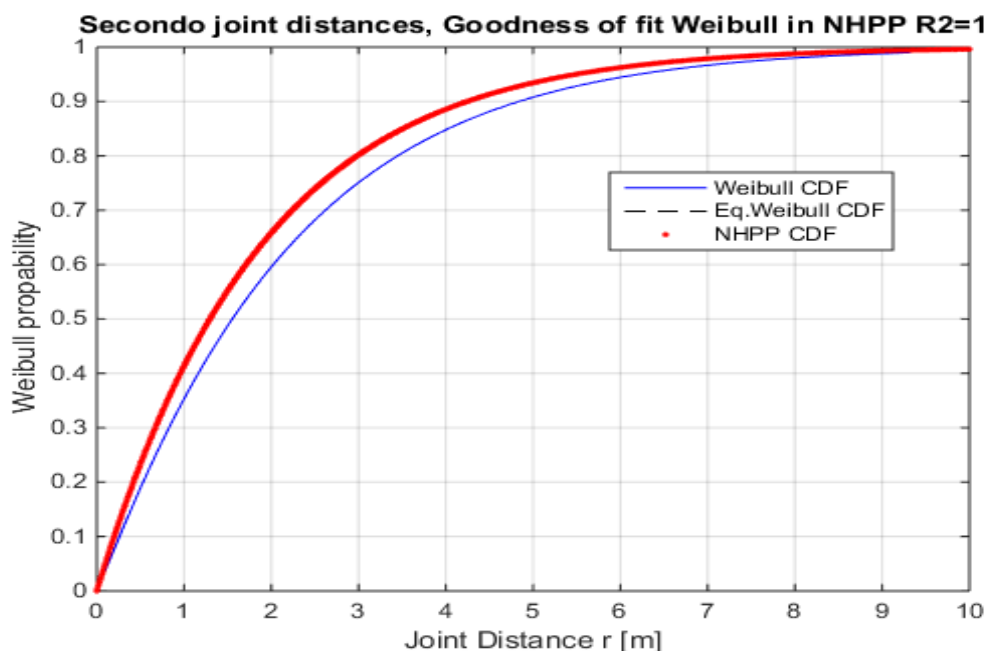
$w_i, \xi_i$  οι συντελεστές βαρύτητας και τα σημεία της αριθμητικής ολοκλήρωσης,

$f_\lambda$ , η μέση αναμενόμενη συχνότητα που εκτιμάτε από την NHPP.

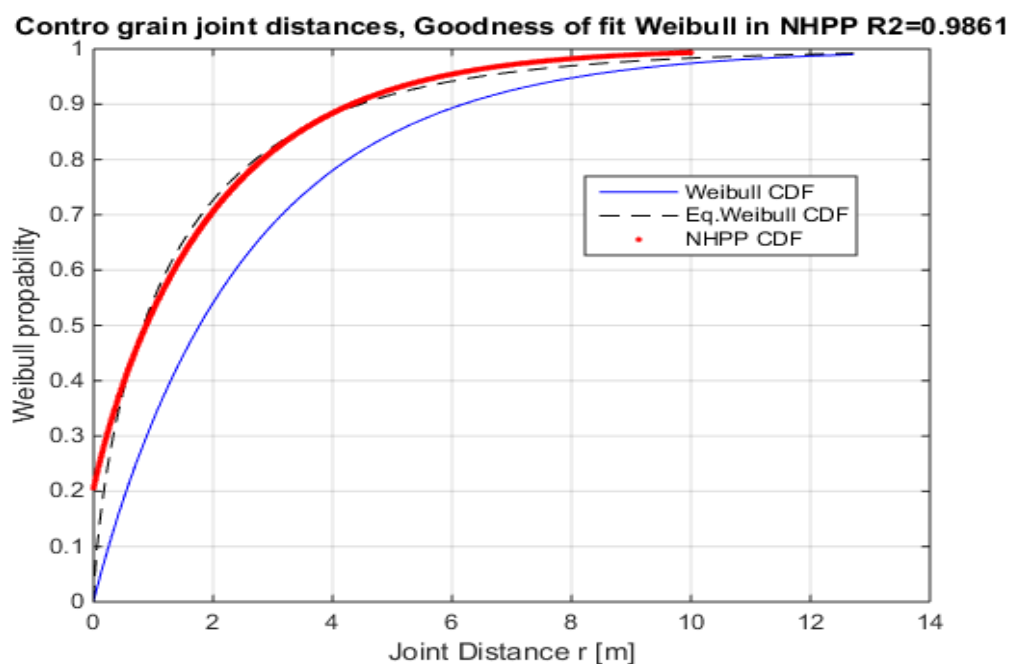


Εικόνα 3-18: Πρόβλεψη αθροιστικής κατανομής αποστάσεων ασυνεχειών 1ης οικογένειας.





Εικόνα 3-19: Πρόβλεψη αθροιστικής κατανομής αποστάσεων ασυνεχειών 2ης οικογένειας.

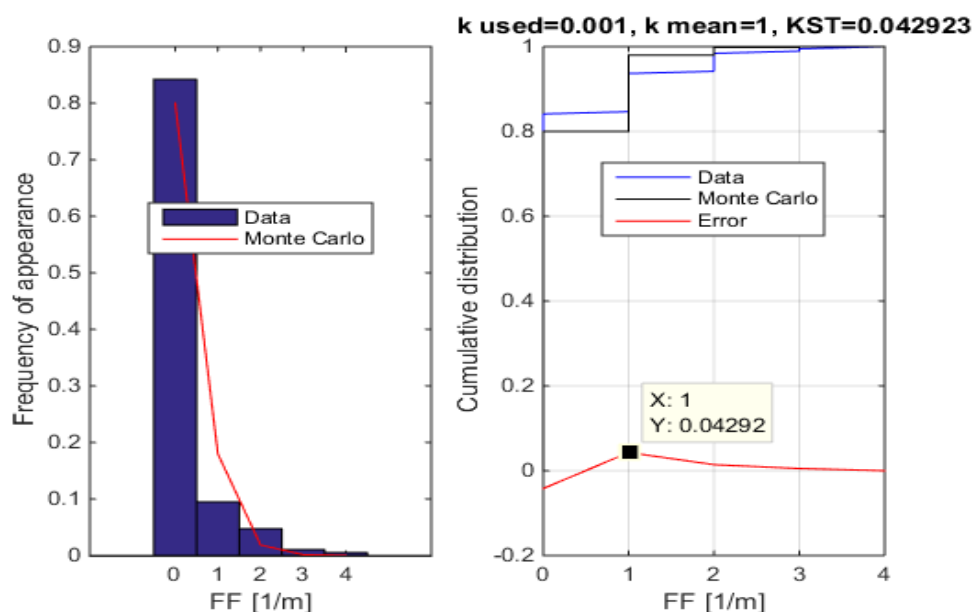


Εικόνα 3-20: Πρόβλεψη αθροιστικής κατανομής αποστάσεων ασυνεχειών 3ης οικογένειας.

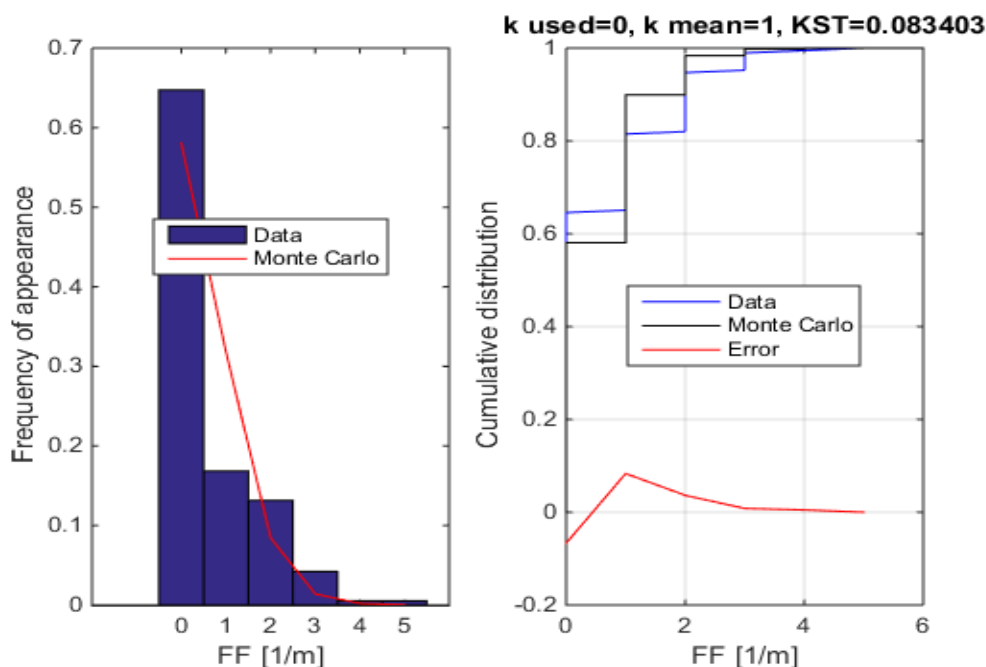
Ύστερα κατασκευάζεται η κατανομή όγκου του block μέσω μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo και από τους cdf's παράγοντες για  $f(x), f(y), f(z)$  των τιμών αποστάσεων των τριών συστημάτων δημιουργείται η κατανομή όγκου σε τρεις διαστάσεις. Για την προσομοίωση της κατανομής των ασυνεχειών στην ευρύτερη μαρμαροφόρο περιοχή οι οποίες θεωρούμαι ότι είναι

τυχαίες στο χώρο, χρειάζεται μια μέθοδος προσομοίωσης που να έχει πρόσβαση σε συνάρτηση πυκνότητας, και να δημιουργεί ψευδοτυχαίους αριθμούς. Αυτό επαναλαμβάνεται συνεχώς και βρίσκεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων και βγαίνει η εκτίμηση. Οι μέθοδοι προσομοίωσης Monte Carlo στη στατιστική είναι υπολογιστικοί αλγόριθμοι που για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων έχουν σαν βασικό κριτήριο την επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία στατιστικών ιδιοτήτων. Η πιθανότητα διαφορετικών αποτελεσμάτων δεν μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα λόγω της τυχαίας μεταβλητής για το λόγο αυτό η προσομοίωση αυτή επαναλαμβάνει συνεχώς τις τυχαίες μεταβλητές για την εκτίμηση του αποτελέσματος. Στη ουσία χρησιμοποιείται για την κατανόηση της επίδρασης του κινδύνου και της αβεβαιότητας σε ένα μοντέλο πρόβλεψης. Ύστερα από την διαδικασία προσομοίωσης Monte Carlo κατασκευάζονται ιστογράμματα (Εικόνα 3-21, Εικόνα 3-22, Εικόνα 3-23) με την παρατηρούμενη συχνότητα των ασυνεχειών κάθε οικογένειας ανά μέτρο γεώτρησης.

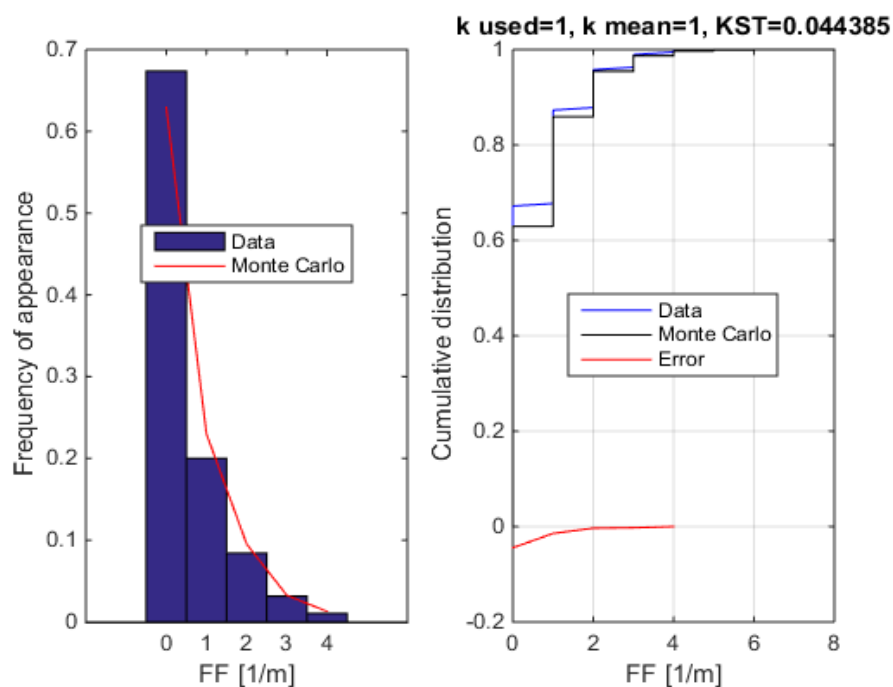
Από τα ιστογράμματα παρατηρείται ότι η 1<sup>η</sup> οικογένεια ασυνεχειών έχει τη μικρότερη συχνότητα εμφάνισης στη μαρμαροφόρο περιοχή μελέτης με μικρή απόκλιση από την προσομοίωση. Η 2<sup>η</sup> οικογένεια ασυνεχειών έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα με μεγαλύτερη απόκλιση από την προσομοίωση και η 3<sup>η</sup> οικογένεια βρίσκεται πάλι σε μικρή συχνότητα με μικρή απόκλιση από την προσομοίωση.



Εικόνα 3-21: Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών 1ης οικογένειας.



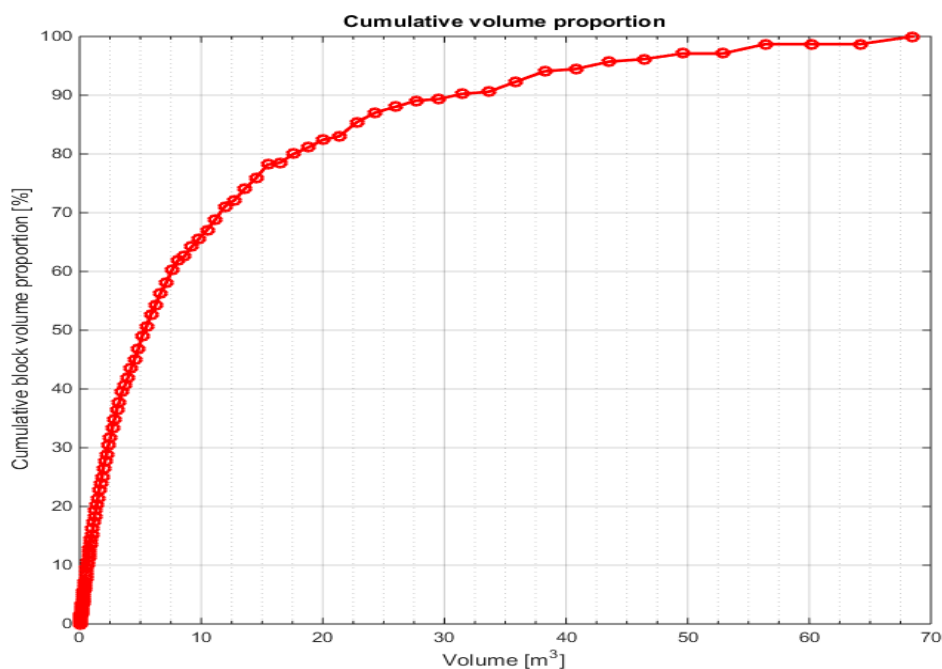
Εικόνα 3-22: Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών 2ης οικογένειας.



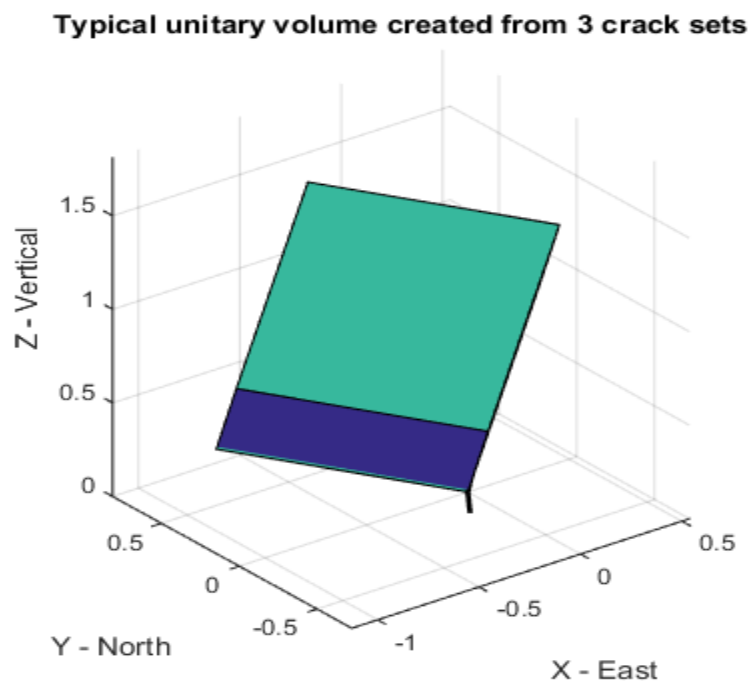
Εικόνα 3-23: Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών 3ης οικογένειας.

Τελικό στάδιο της μεθοδολογίας είναι η αθροιστική καμπύλη κατανομής όγκου που παράγεται από την τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo (Εικόνα 3-24) όπου αναγράφεται το ποσοστό του όγκου των εκμεταλλεύσιμων μαρμάρων που προέρχεται από τις από τις αθροιστικές κατανομές

απόστασης των ασυνεχειών κάθε οικογένειας. Επίσης, προσδιορίζεται ο μοναδιαίος όγκος του μπλοκ που δημιουργείται από τις τρεις οικογένειες ασυνεχειών (Εικόνα 3-25). Το μέγεθος block πάνω από  $2.5\text{m}^3$  θεωρείται ότι δύναται να εκμεταλλευτεί. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το 80% των μαρμάρων είναι με μέγεθος μπλοκ πάνω από  $2.5\text{m}^3$ . Κατά συνέπεια το 80% των αποθεμάτων μαρμάρων που όπως έχει αναφερθεί συνολικά είναι  $81901\text{m}^3$ , δηλαδή  $80\% \times 81901 = 65520\text{m}^3$  είναι τα συνολικά αποθέματα μαρμάρων που εκτιμάται από την μεθοδολογία ότι μπορούν να εκμεταλλευτούν.



Εικόνα 3-24: Αθροιστική κατανομή όγκων των τριών οικογενειών ασυνεχειών.



*Εικόνα 3-25: Μοναδιαίος όγκος των τριών οικογενειών ασυνεχειών.*



#### 4 Συμπεράσματα-Προτάσεις

Παρουσιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλου λιθολογίας και ασυνεχειών κοιτάσματος μαρμάρου. Έγινε η περιγραφή της γεωλογίας και της τεκτονικής της περιοχής του όρους Φαλακρού. Το Όρος Φαλακρό αποτελείται από τέσσερις λιθολογικές ενότητες μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Τα δείγματα των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων ανήκουν στην Ενότητα μαρμάρων (Γ) (πάχους 1500m). Ο προσδιορισμός των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων (reserves) έγινε με την απαλοιφή κάποιων παραγόντων (Factors 1-4) από τους γεωλογικούς πόρους (resources). Οι βασικοί παράγοντες που μελετήθηκαν ανά μέτρο γεώτρησης είναι η λευκότητα (Wht %) που προσδιορίζει την ποιοτική και οικονομική αξία των μαρμάρων και οι ασυνέχειες ( $FF\ m^{-1}$ ) που προσδιορίζουν τον όγκο των εμπορικά εκμεταλλεύσιμων μαρμάρων. Από την επεξεργασία στο Image Analysis Matlab's Colour Thresholder προσδιορίστηκε το ποσοστό λευκότητας για κάθε μέτρο γεώτρησης με τιμές 1-100, συμπεραίνεται ότι τα δείγματα έχουν  $Wht = 70-90\%$  και αποτελούν εμπορεύσιμα λευκόφοντα δολομιτικά μάρμαρα με αραιές ερυθρωπές ταινίες. Οι τιμές με  $Wht (\%) < 50\%$  αποτελούν τον συνολικό μη εμπορικά εκμεταλλεύσιμο όγκο (Factor 1). Ο βασικός προσανατολισμός των ασυνεχειών έγινε μέσω της στερεογραφικής προβολής και έτσι μέσω βαριογραμάτων έγινε η απαλοιφή κάποιων δειγμάτων (Factor 3) και προσδιορίστηκαν τα όρια του ογκομετρικού μοντέλου (Block model). Οι ασυνέχειες προσδιορίζονται με τιμές  $FF - 0.999-100$  και για block με τιμές  $FF > 6m^{-1}$  εκτιμώνται εμπορικά μη εκμεταλλεύσιμα (Factor 2). Οι τιμές κάθε block παίρνουν μια τιμή για την λευκότητα Wht (%) και μια για τις ασυνέχειες ( $FF\ m^{-1}$ ) μέσω της τεχνικής Block kriging. Για την αντιπροσωπευτική εκτίμηση των γεωλογικών πόρων (resources) μαρμάρων βασικός περιορισμός είναι το NSD (Normal Standard Deviation), όπου εκτιμάται για κάθε block και οι τιμές με  $NSD > 0,2$  απαλείφονται από την αναλυτική διαδικασία. Ο προσδιορισμός μεταλλευτικών αποθεμάτων (reserves) από τους γεωλογικούς πόρους (resources) γίνεται με την σύγκριση των γεωλογικών πόρων δηλαδή των γεωλογικών αποθεμάτων που βρίσκονται κάτω από την μαρμαροφόρο περιοχή συνολικά και αυτών που βρίσκονται πάνω από την τελική τοπογραφία δηλαδή την τελική μορφή της εκμετάλλευσης. Από τις κατανομές των αποστάσεων των τριών οικογενειών ασυνεχειών δημιουργείται η κατανομή όγκου σε τρεις διαστάσεις και τα μπλοκ με όγκο  $> 2.5m^3$  εκτιμώνται εμπορικά μη εκμεταλλεύσιμα (Factor 4) και απαλείφονται από τα τελικά αποθέματα. Το 80% των μαρμάρων είναι με μέγεθος μπλοκ  $> 2.5m^3$  και έτσι  $80\% \times 81901 = 65.520m^3$  εκτιμάται ότι είναι τα συνολικά αποθέματα αποληψιμότητας μαρμάρων.

Προτάσεις για βελτίωση του μοντέλου και πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση των αποθεμάτων είναι ο μεγαλύτερος αριθμός πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων, που θα καλύπτουν μια ευρύτερη περιοχή μελέτης. Επίσης, η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό ποιότητας των μαρμάρων με τη χρήση της ανάλυσης εικόνων υψηλής ευκρίνειας μπορεί να προταθεί ως μια πρότυπη μέθοδο αναλυτικής διαδικασίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baker, 1989. *Preliminary notes on The granitoids and related rocks of The Drama region. Report for EEC-GME project MAIM - 0049-GR*, 38 p.. s.l.:s.n.
- Chatzipanagis et al, 1983. *Studio geologico- petrografico der Bos - Dag settentrionale. (Macedonia greca)*. Boll.del assoc. Mineraria Subalpina, 22, 112-126..
- Chatzipanagis, 1989. *Geology and Stratigraphy of Falakro mountain area. Abstract. 2nd Hellenic-bulgarian symposium Thessaloniki, 14-17 Oct. 1989 (in press)*.. s.l.:s.n.
- Der Moro et al, 1989. *The metamorphic complex associated to The Kavala plutonites: an Rb-Sr geochronological, structural and petrological study. Abstract. 2nd Hellenic-bulgarian Symposium Thessaloniki 14-17 Oct. 1989 (in press)*.. s.l.:s.n.
- Dimadis & Zachos, 1989. *Geological and tectonic structure of The metamorphic basement of The Greek Rhodopes. Geol. Rhodopca, 1, 122-130.*.. s.l.:s.n.
- Exadaktylos & Saratsis, 2019. *Methodology for the Estimation and Classification of White Marble Reserves*. s.l.:s.n.
- Fischer, 1964. *Über das Granitmassiv des Symvolon- Gebirges bei Kavala. - Geol. Rdsch. 53, 390-392, Stuttgart*.. s.l.:s.n.
- Fitikas et al, 1984. *Tertiary to Quaternary evolution of The volcanism in The Aegean region. Journ. Geol. Soc., Spec. Publ. 17, 687-699*. s.l.:s.n.
- Gerouki et al, 1989. *The Tertiary granitoids of W. Rhodope N. Greece. Some preliminary geochemical results. Abstract. 2nd Hellenic-bulgarian Symposium, Thessaloniki 14-17 Oct 1989 (in press)*.. s.l.:s.n.
- Gocev & Matova, 1989. *Middle Mesta fault bundle and recent tectonic activity of part of the Rila Rhodope region. Geol. Rhodopica, 1, 139-144.*.. s.l.:s.n.
- Harrison, J. A. H. & J. R., 1997. *Engineering Rock mechanics*. s.l.:s.n.
- Inc.Rocscience, 1989 - 2002. *Plotting, Analysis and Presentation of Structural Data Using Spherical Projection Techniques*. s.l.:s.n.
- Kilias A. and Mountrakis D., 1989, *χ.χ. Kinematics of The crystalline sequences in the Western Rhodope Massif. 2nd Hellenic-bulgarian Symposium, Thessaloniki, 14-17 Oct., 1989. Abstract (in press)*.. s.l.:s.n.
- Kiriakopoulos, 1987. *A geochronological, geochemical and mineralogical study of some Tertiary plutonic rocks of the Rhodope Massif and their isotopic characteristics. PhD thesis, Athens Univ. p. 343.*.. s.l.:s.n.
- Kokkinakis A., 1980, *χ.χ. Altersbeziehungen zwischen Metamorphosen, mechanischen Deformationen und Intrusionen al Sudrand des Rhodope-Massivs (Makedonien, Griechenland). Geol. Rundschau, 69: 3, 726-744, Stuttgart*.. s.l.:s.n.
- Kolokotroni et al, 1991. *The origin and emplacement of the Vrontou granite NE Greece. Bull. Geol. Soc. Greece 25, 469-483.*..

Kotopouli et al, 1982. *Petrographic Relations and Uranium Distribution in the Skaloti Granitois Complex, Paranection District. Greek Macedonia. Econ. Geol.*, 77, 1875-1892. s.l.:s.n.

Kotopouli & Pe-Piper, 1989. *Geochemical characteristics of felsic intrusive rocks within the Hellenic Rhodope: A comparative study and petrogenetic implications. Neues Jahrb. Miner.Abh.*, 161: 2, 141-169.. s.l.:s.n.

Kronberg et al, 1970. *Geologie der Rila - Rhodope - Masse zwischen Strimon und Nestos (Nord - Griechenland). Geol. j.b.Bedh.*, 88, 133-179..

Liati, 1986. *Regional metamorphism and overprinting contact metamorphism of the Rhodope zone, near Xanthi, N. Greece: petrology, geochemistry, geochronology. Diss. Techn. Univ. Braunschweig, Germany.* s.l.:s.n.

M. Stavropoulou, G. Saratsis, G. Xiroudakis & G. Exadaktylos , 2021. *Derivation of the Discontinuity Spacings Distribution from Frequency Data Along Scanlines and Boreholes.* s.l.:s.n.

Marakis, 1969. *Geochronologic studies of some granites from Macedonia. Ann. Geol. PaysHell.*, 21, 121-152..

Meyer, 1968. *Zur Altersstellung des Plutonismus in Sudteil der Rila- Rhodope- Masse (Nordgriechenland). Geol. et Palaeont.*, 2, 173-192..

Mposkos et al, 1989. *Compatible metamorphic conditions in The Rhodope zone. (N. Greece). As evidenced by the petrology of ortho-gneisses of The Lower Tectonic Unit. Abstract. 2nd Hellenic-bulgarian Symposium Thessaloniki 14-17 Oct. 1989.*..

Mposkos, 1989. *Petrological study of the metamorphic rocks of West Rhodope. In: IGME-EEC. Advanced interdisciplinary exploration research for base precious and associated metals in poly-metamorphic terrains, N. Greece. Progr. Report, p 31.*..

Papanikolaou & Panagopoulos, 1981. *The structural style of Southern Rhodope, Greece. Geologica Balcanica*, 11: 3, 13-22..

Patras et al, 1989. *Structural analysis of deformation episodes and correlation with metamorphic events in the Rhodope Massif and the phyllitic series of Alexandroupolis area, North Greece. Geologica Rhodopica*, 1, 131-138..

Sappi, 2013. *Defining and Communicating Color: The CIELAB System.* s.l.:s.n.

Sklavounos, 1981. *The Paranesti granite, mineralogy and petrology. Ph.D. thesis, Univ. Thessaloniki*, p. 175..

Soldatos & Christofides, 1986. *Rb-Sr geochronology and origin of The Elatia pluton, Central Rhodope North Greece. Geol. Balcanica*, 16, 15-23..

Stavropoulou et al, 2021. *Derivation of the Discontinuity Spacings Distribution from Frequency Data Along Scanlines and Boreholes.* s.l.:s.n.

Stavropoulou & Xiroudakis, 2020. *Fracture Frequency and Block Volume Distribution in Rock Masses.* s.l.:s.n.

- Xiroudakis, G. & Stavropoulou, M., 2020. *Fracture Frequency and Block Volume Distribution in Rock Masses*. s.l.:s.n.
- Ynev et al, 1989. Geochemistry of The collision related acid volcanim in the Eastern Rhodopes Bulgaria. Abstract.2nd Hellenic-bulgarian Symposium Thessaloniki, 14-17 Oct., 1989 (in press).
- Yordanov et al, 1962. Geological age of the crystalline complex and the granitoids in South Bulgaria, determined after The Argon method. Bull. Inst. Geol. Strasimir Dimitrov, 11, 33-39..
- Zagorčev, 1992. Neotectonic development of the Struma (Kraistid) Lineament, southwest Bulgaria and northern Greece..
- Αγιουτάντης, 2019. *Στοιχεία γεωμηχανικής Μηχανική πετρωμάτων*. s.l.:s.n.
- Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2001. Πληροφοριακά στοιχεία λειτουργούντων λατομείων και εργοστασίων επεξεργασίας μαρμάρων στην Αν. Μακεδονία και Θράκη, Έκθεση ΙΓΜΕ, Ξάνθη, 91σ..
- Βουγιούκας & Χατζηπαναγής, 2007. *Ολοκληρωμένη διαχείριση διακοσμητικών πετρωμάτων, αδρανών υλικών και απορριμμάτων εκμεταλλεύσεων-τεχνικές αξιοποίησης εγκαταλειμμένων λατομείων. Υποέργο αυτεπιστασίας Γ' Κ.Π.Σ. Περιοχή Πηγών Δράμας (Νότιο Φαλακρό Όρος). Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε., Ξάνθη/αν. 2007, σ.. s.l.:s.n.*
- Ι.Γ.Μ.Ε., 1982α. *Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος κλ.1: 50.000, Φύλλο Αχλαδοχώριον*. s.l.:s.n.
- Ι.Γ.Μ.Ε., 1982β. *Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος κλ.1: 50.000, Φύλλο Κάτω Νευροκόπιον*. s.l.:s.n.
- Καραβασίλη Ε., Χριστοφίδης Γ., Παπαστεφάνου Κ., Κορωναίος Α., Σούλιος Σ., 2005, χ.χ. *Ορυκτολογία, πετρογραφία και ραδιενέργεια γρανιτικών πετρωμάτων. 2ο Συνέδρ. Επιτρ. Οικον. Γεωλογίας, Ορυκτολογίας & Γεωχημείας. Θεσσαλονίκη, σ. 123-132*. s.l.:s.n.
- Καστρινάκη Αι., 2011, χ.χ. *Πετρολογία των λευκοκρατικών γρανιτών του Πλατανοχωρίου Χαλκιδικής και δυνατότητες αξιοποίησης των αστρίων τους στην κεραμική βιομηχανία. Διδακτ. Διατρ. Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σ.193..* s.l.:s.n.
- Κουτσόπουλος & Ανδρουλακάκης, 2003. *Εφαρμογές Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με Χρήση του Λογισμικού*. s.l.:s.n.
- Λασκαρίδη, Κ. κ., 2005. «Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των φυσικών διακοσμητικών πετρωμάτων και η χρήση τους κατά την απόδοση σήμανσης CE», Ι.Γ.Μ.Ε..
- Λασκαρίδης & Πατρώνης, 2005. *ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΑΚΟΣΜΗΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΗΜΑΝΣΗΣ CE*. s.l.:s.n.
- Μοσκοφόγλου, 1991. «Εισαγωγή στην εκμετάλλευση μαρμαροφόρου κοιτάσματος», Σεμινάριο με θέμα “Εκμετάλλευση Λευκών μαρμάρων”, 1991, βιβλιοθήκη ΤΕΕ..
- Νίκος Ανδρουλακάκης, Κ. Χ. Κ., 2012. *Γεωγραφικά συστήματα πληροφορικών με ArcGis10*. s.l.:s.n.
- Παπαδάκης, 1965. Ο πλουτωνίτης της περιοχής Σερρών -Δράμας. - Διδακτ. διατριβή, Παρν/μιο Θεσ/νίκης, σ.127..



Πομάκης, 2000. Σύγχρονα χημικά προϊόντα στην ποιοτική αναβάθμιση του μαρμάρου. Πρακτ. 2ου Πανελλ. Συν. «Το Ελληνικό Μάρμαρο», Θεσσαλονίκη, 103-112..

Τσιραμπίδης, 2000. Πετρογραφικά χαρακτηριστικά, ορυκτολογική και χημική σύσταση και τύποι ελληνικών μαρμάρων. Πρακτ. 2ου Πανελλ. Συν. «Το Ελληνικό Μάρμαρο», Θεσσαλονίκη, 63-78..

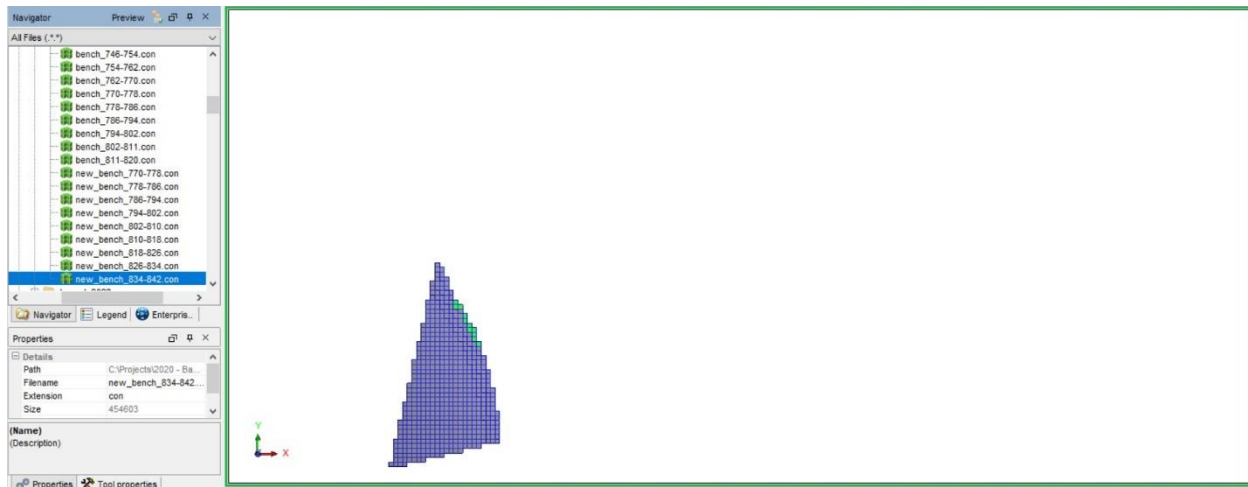
ΥΠΕΚΑ, 2015. Η εξορυκτική μεταλλουργική δραστηριότητα στην Ελλάδα. Στατιστικά δεδομένα για την διετία 2013-2014.. Ιούλιος.

Χατζηπαναγής, 1991. *Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού.*, s.l.: s.n.

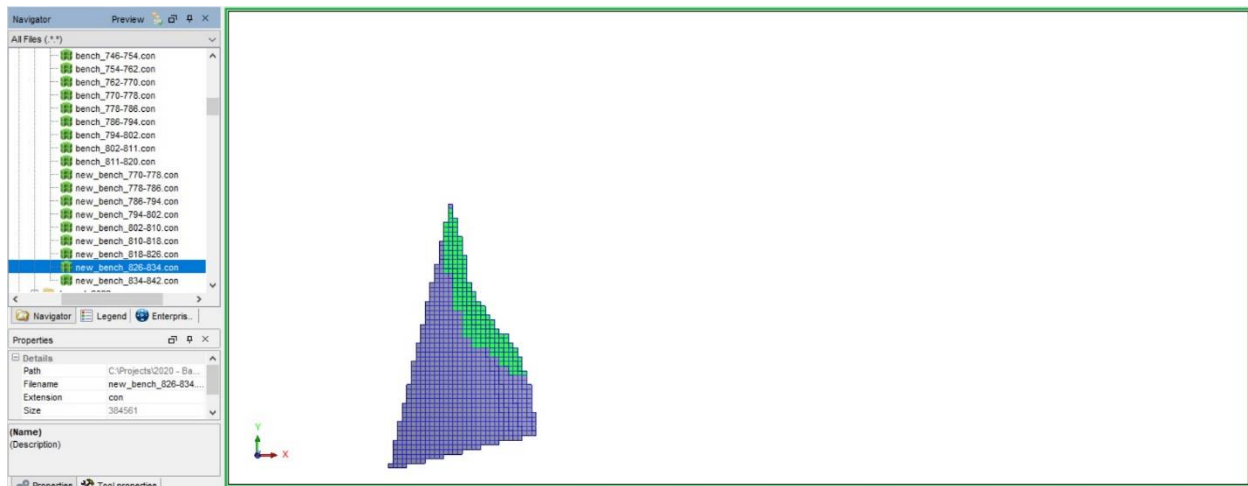
Χατζηπαναγής & Βουγιούκας, 2004. Η σημασία της λιθοστρωματογραφικής θέσης και της τεκτονικής παραμόρφωσης στον εντοπισμό και την αξιοποίηση των δολομιτικών μαρμάρων του όρους Φαλακρού. Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρείας. 36/1, 63-71..

ακολουθείται για τον προσδιορισμό της λευκότητας των διακοσμητικών μαρμάρων.

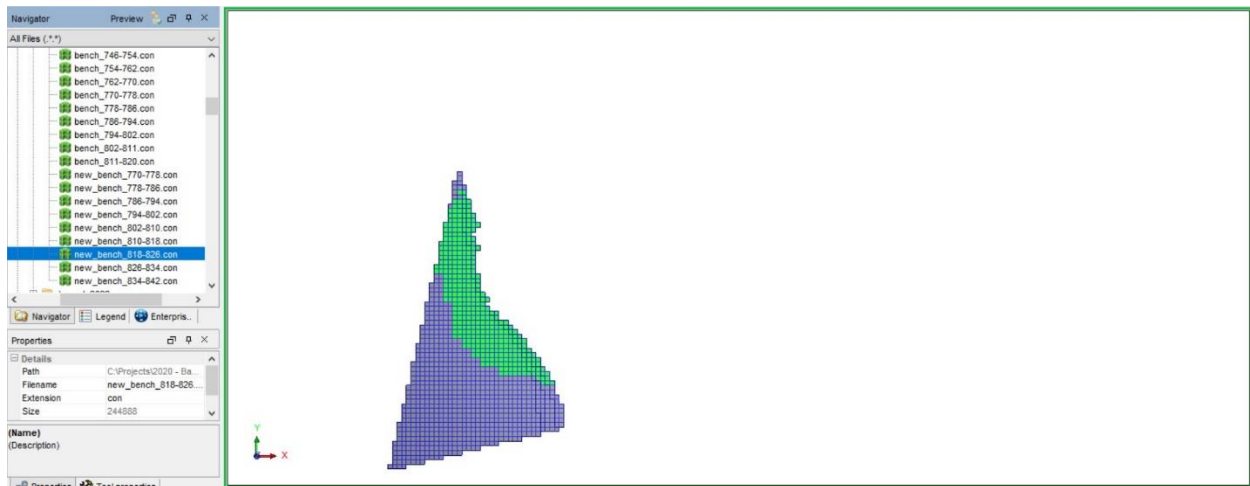
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



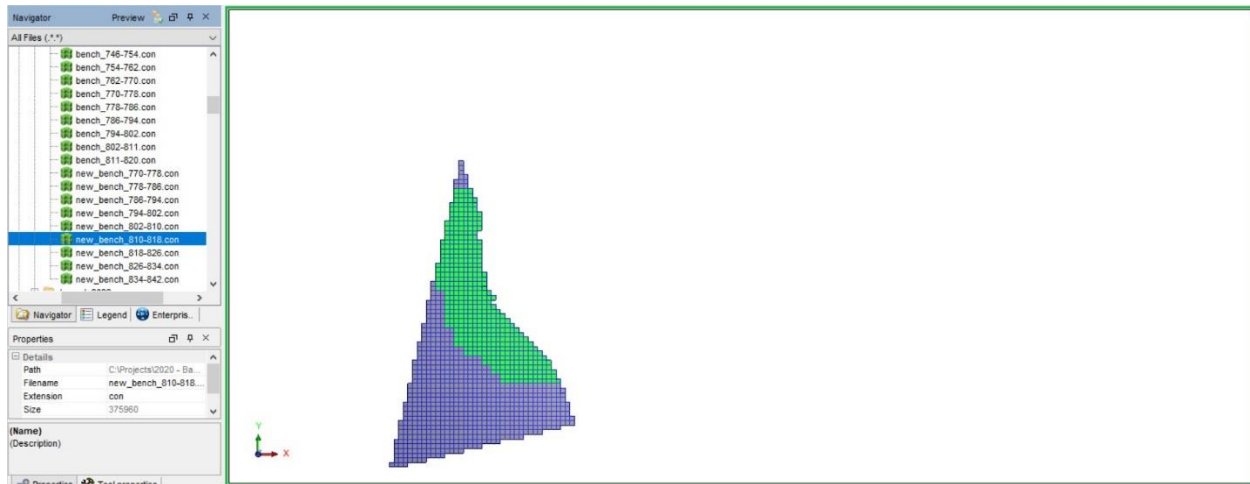
Εικόνα Α. 1: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=834-842.



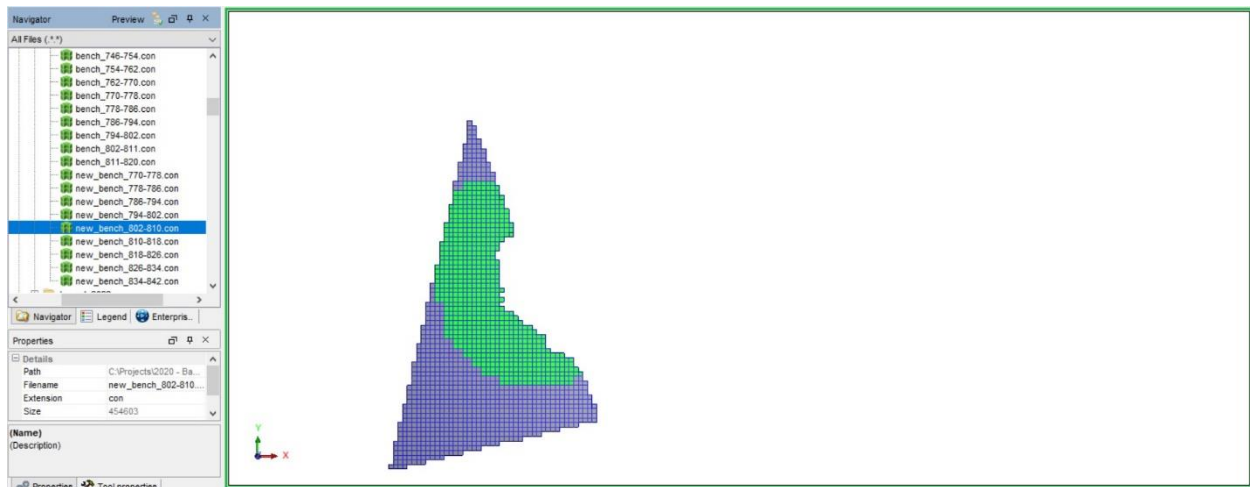
Εικόνα Α. 2: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=826-834.



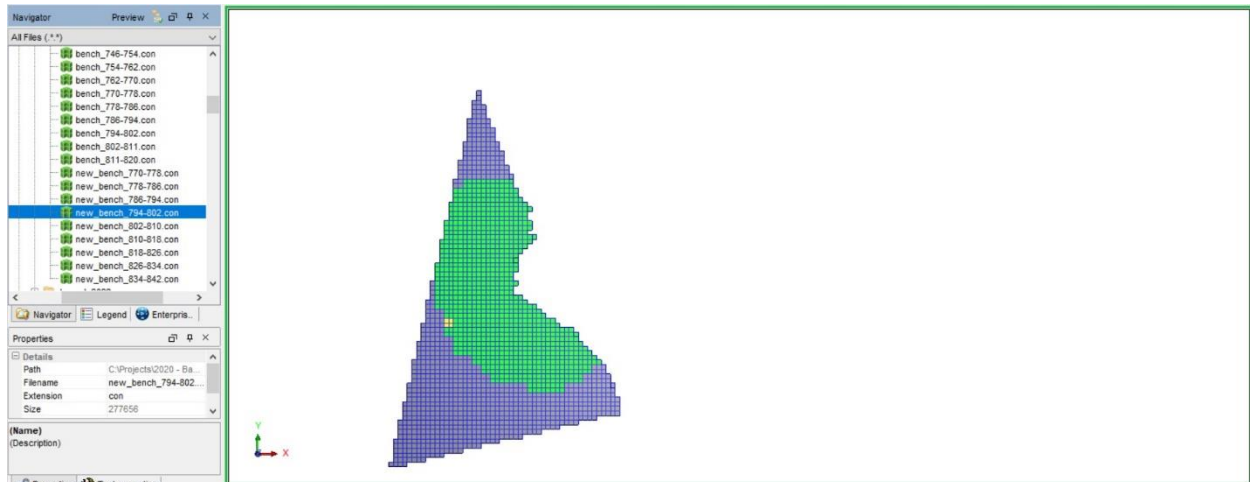
Εικόνα Α. 3: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=818-826.



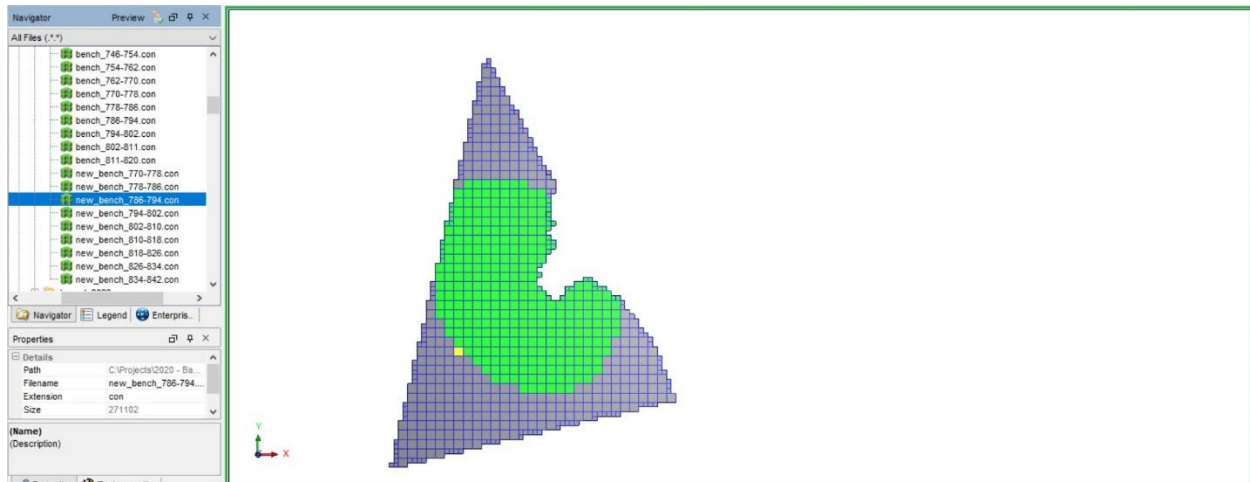
Εικόνα Α. 4: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=810-818.



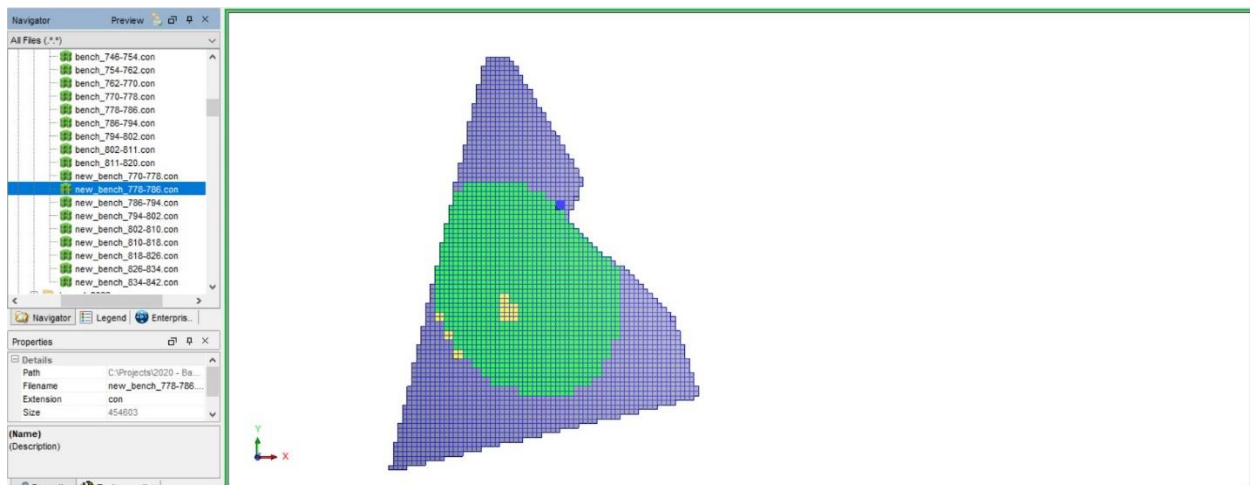
Εικόνα Α. 5: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=802-810.



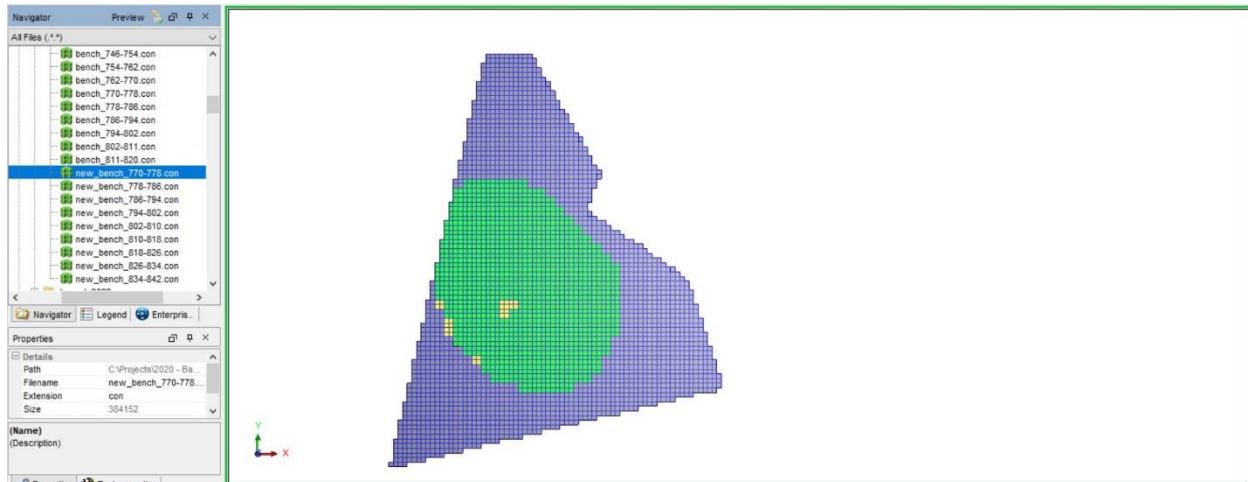
Εικόνα Α. 6: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=794-802.



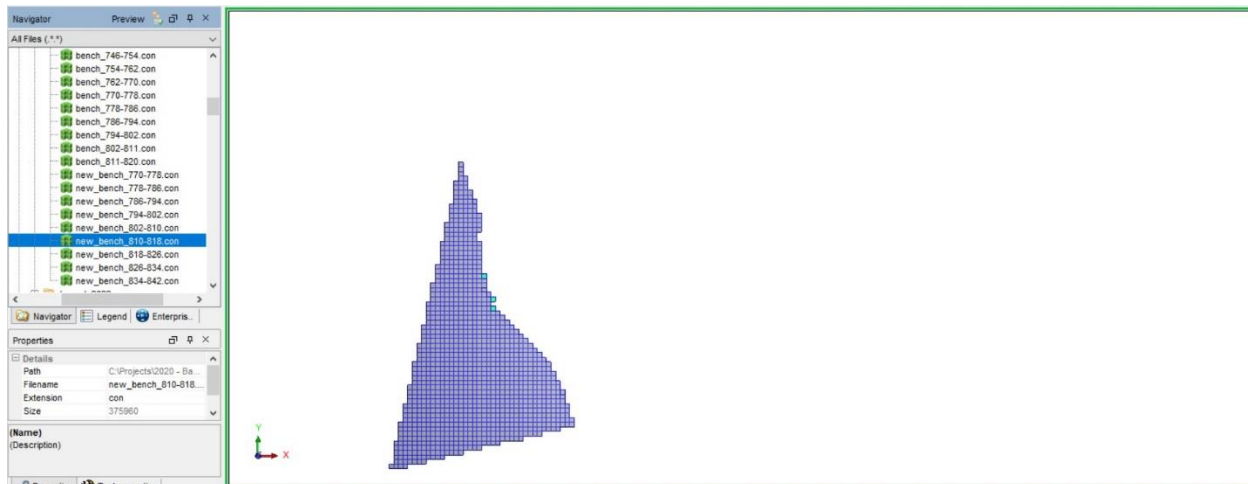
Εικόνα Α. 7: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=786-794.



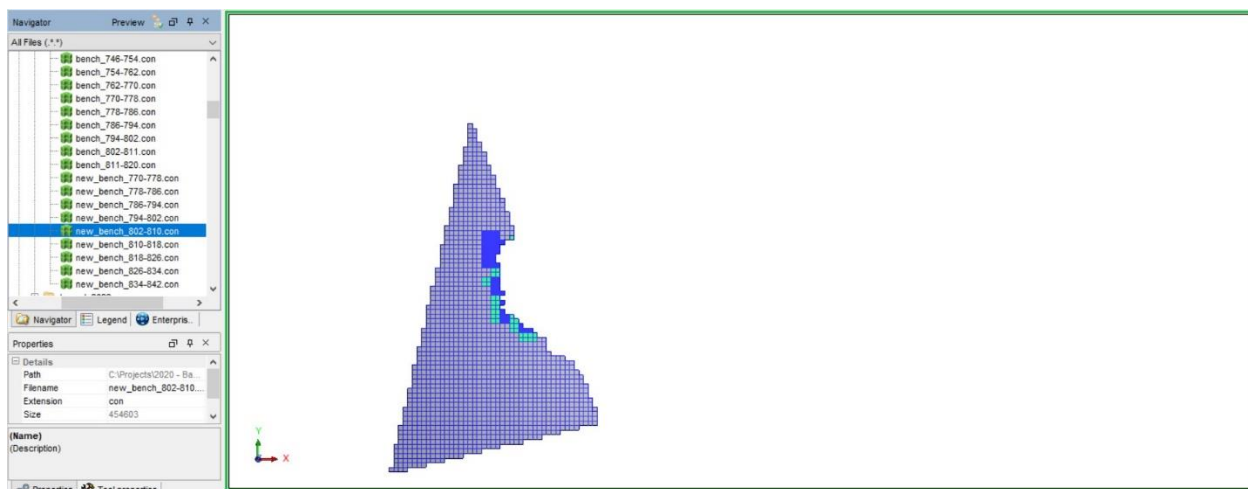
Εικόνα Α. 8: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=778-786.



Εικόνα Α. 9: Κατανομή λευκότητας resources ( Wht (%)) Z=770-778.

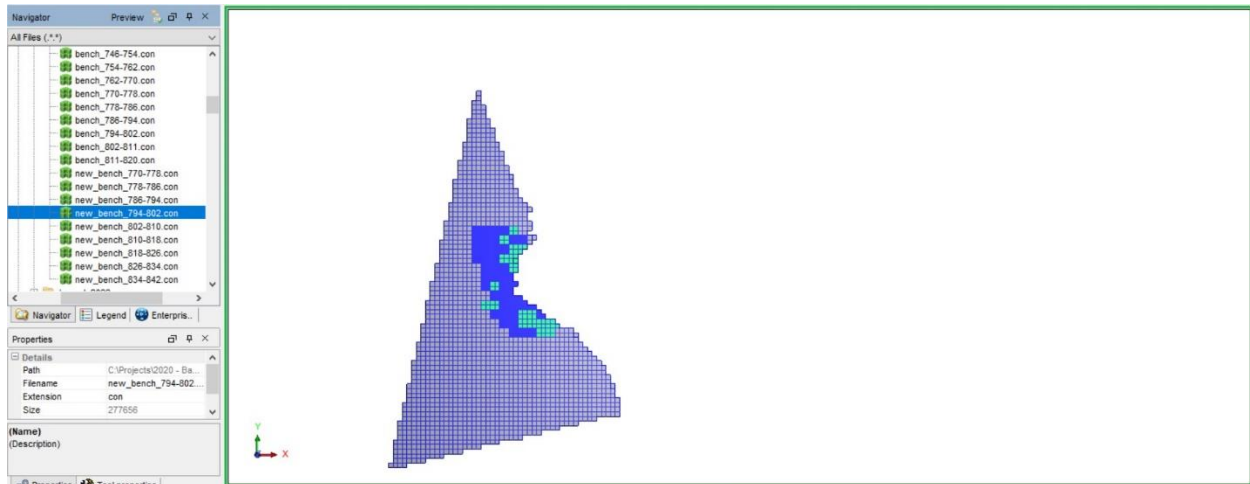


Εικόνα Α. 10: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$  Z=810-818.

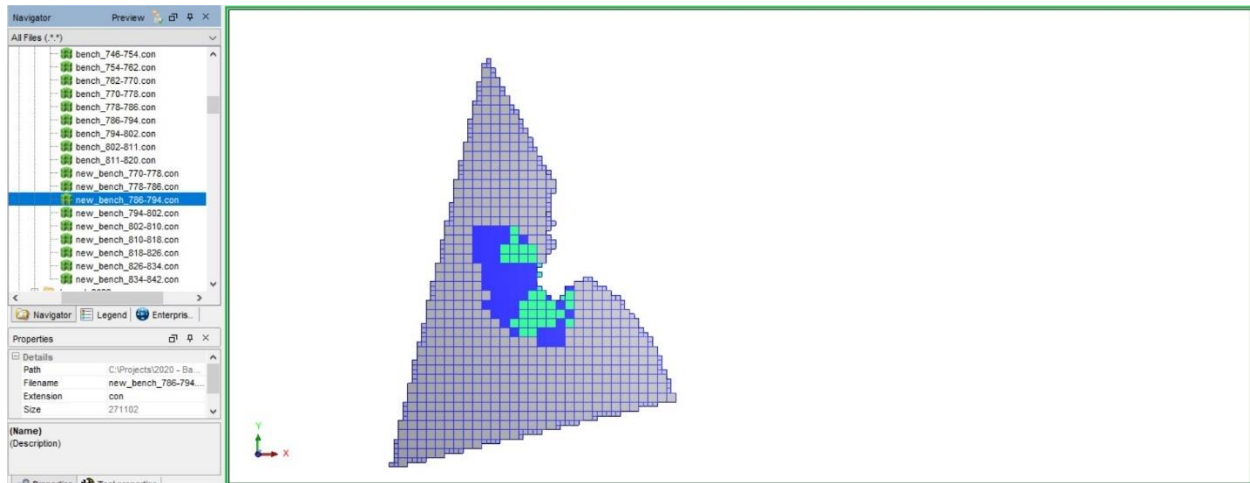


Εικόνα Α. 11: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$  Z=802-810.

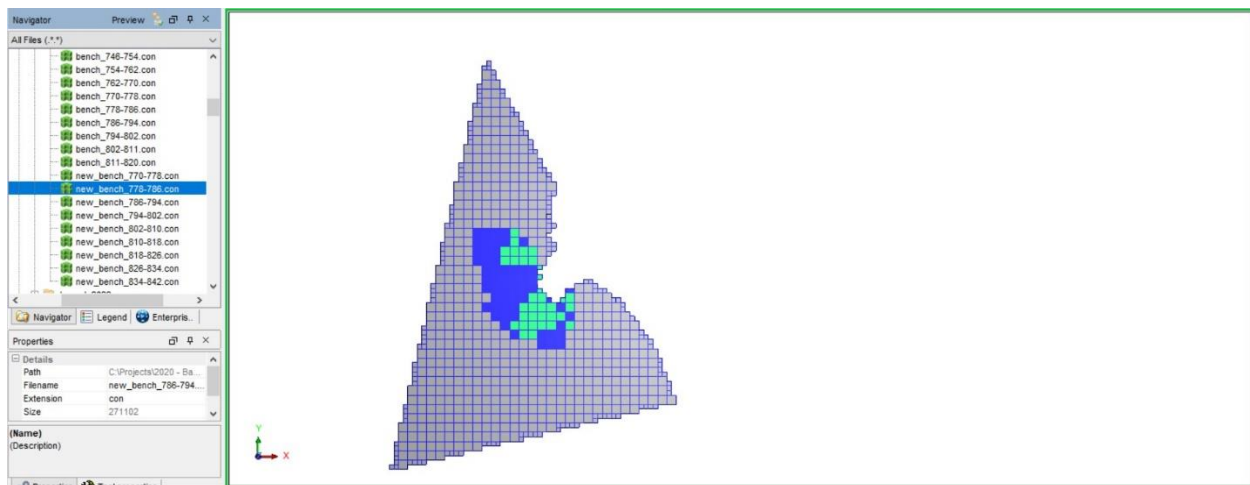




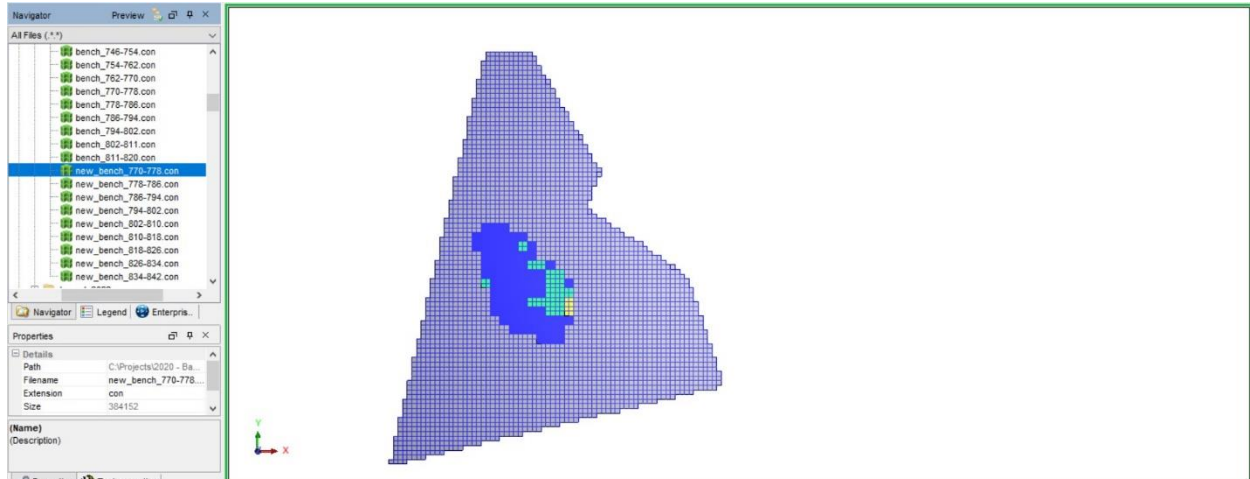
Εικόνα Α. 12: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$   $Z=794-802$ .



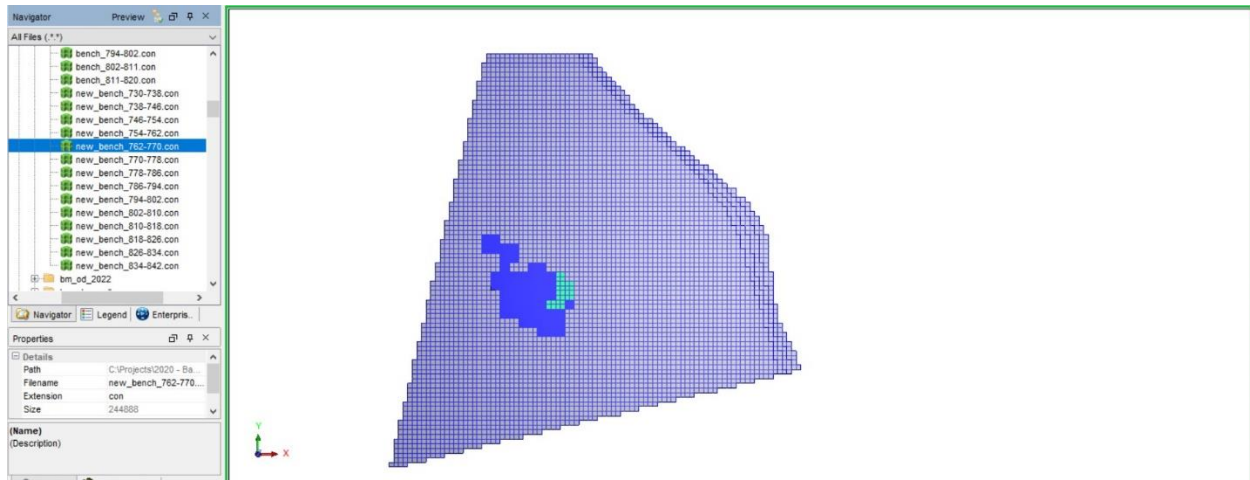
Εικόνα Α. 13: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$   $Z=786-794$ .



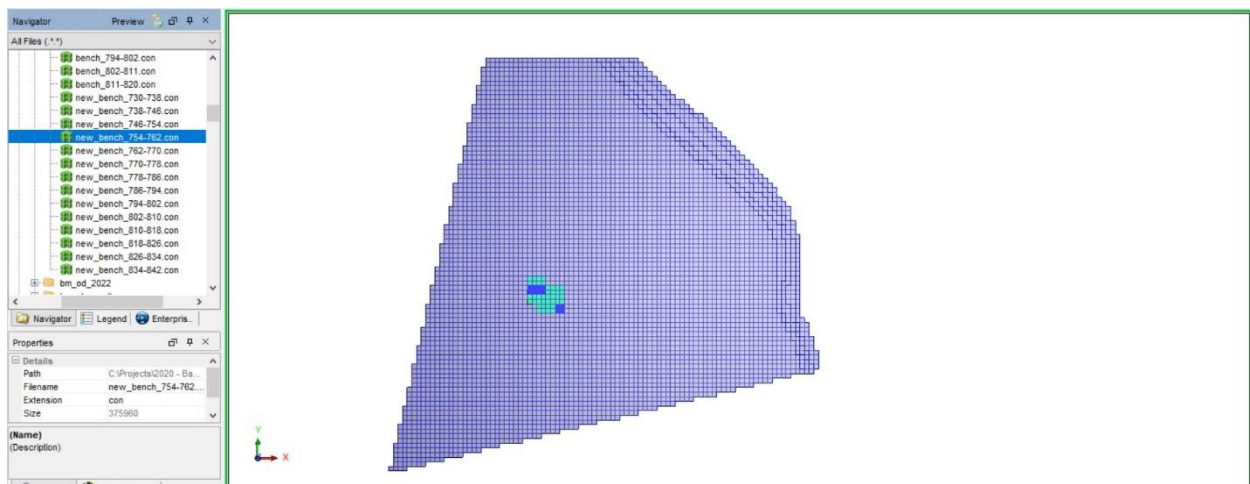
Εικόνα Α. 14: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$   $Z=778-786$ .



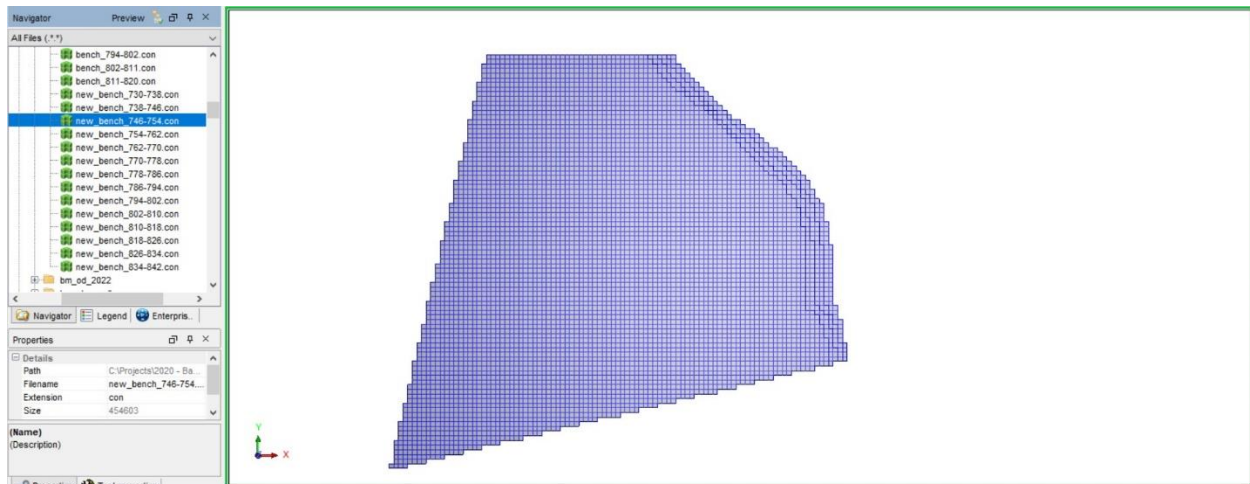
Εικόνα Α. 15: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$  Z=770-778.



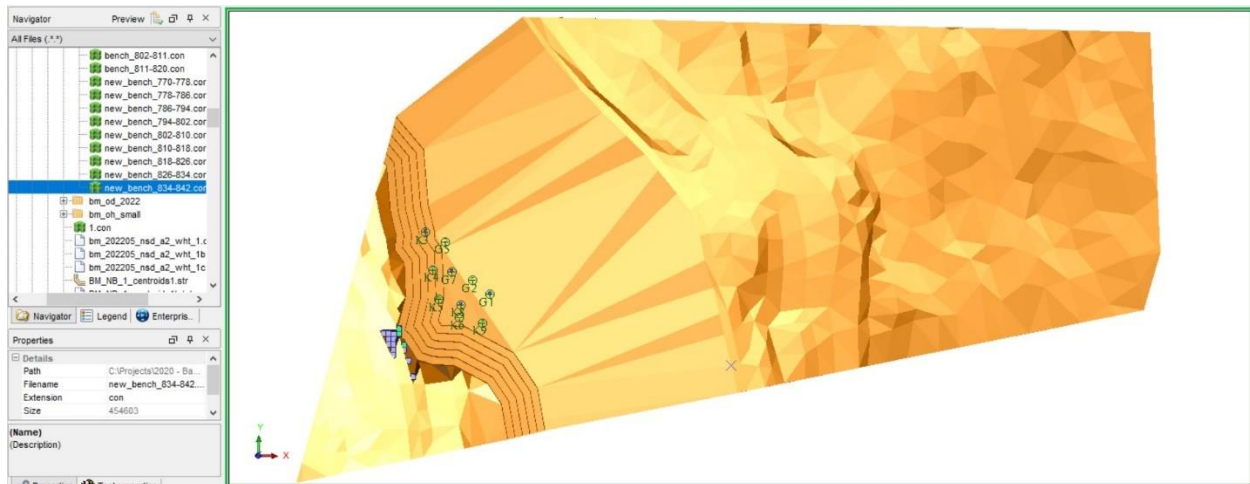
Εικόνα Α. 16: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$  Z=762-770.



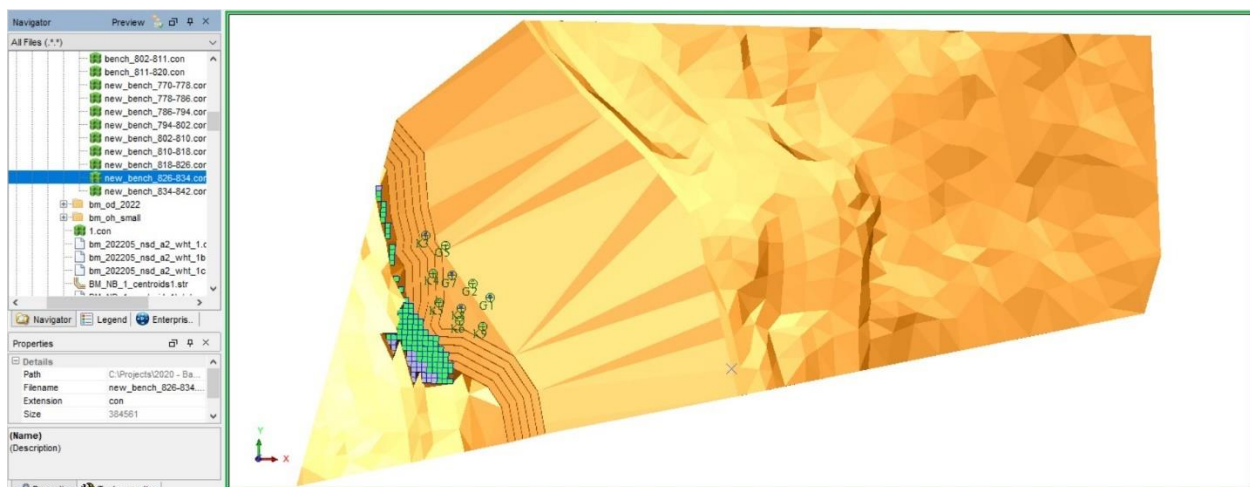
Εικόνα Α. 17: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$  Z=754-762.



Εικόνα Α. 18: Κατανομή συχνότητας resources  $FF(m^{-1})$   $Z=746-754$ .

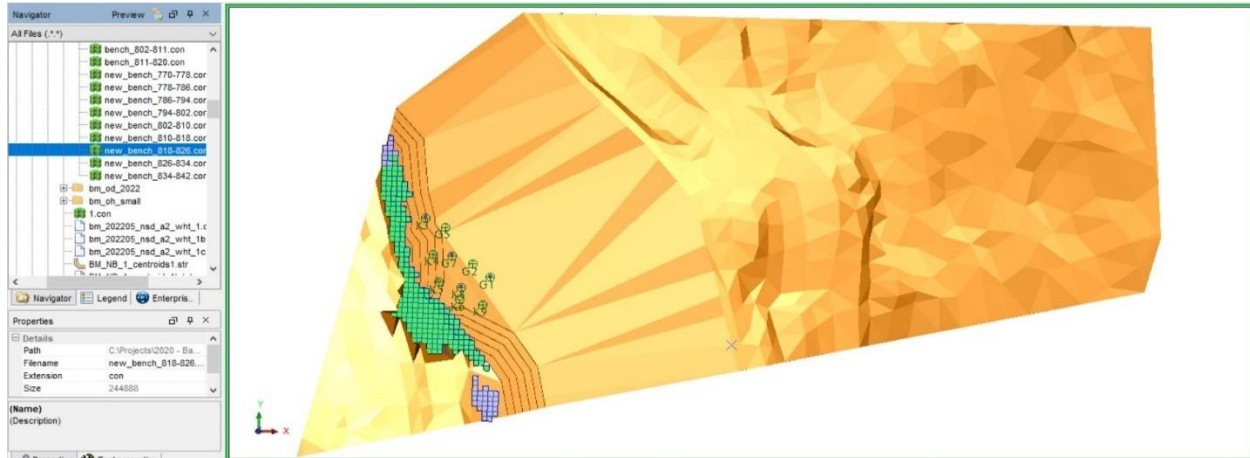


Εικόνα Α. 19: Κατανομή λευκότητας reserves (Wht (%))  $Z=834-842$ .

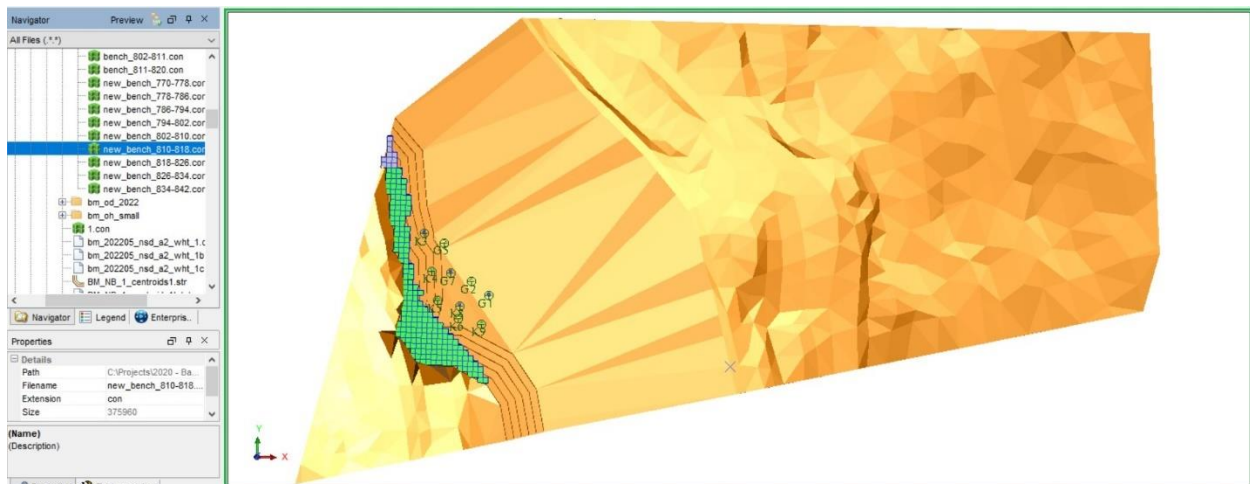


Εικόνα Α. 20: Κατανομή λευκότητας reserves (Wht (%))  $Z=826-834$ .

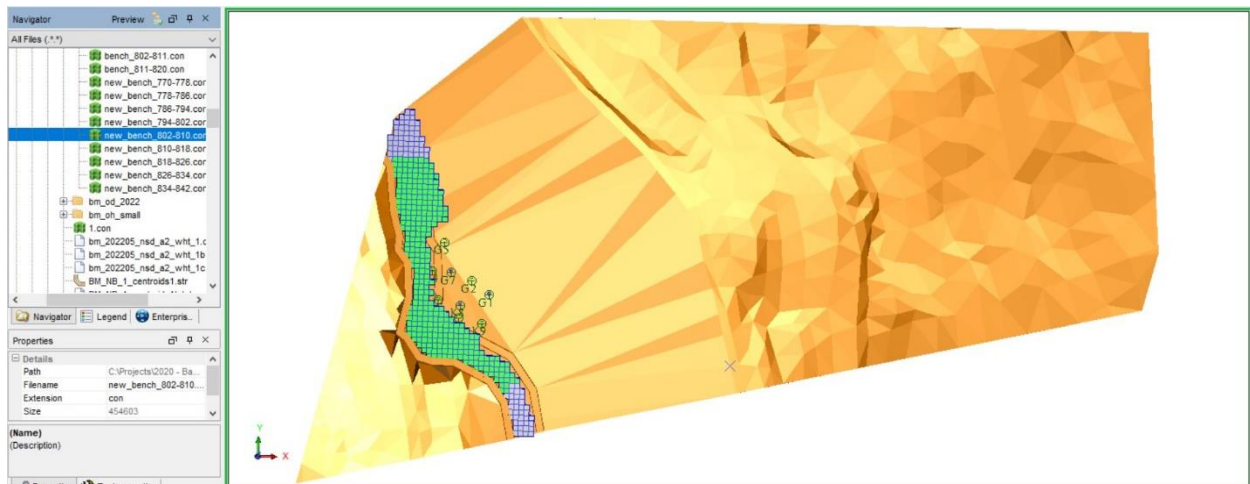




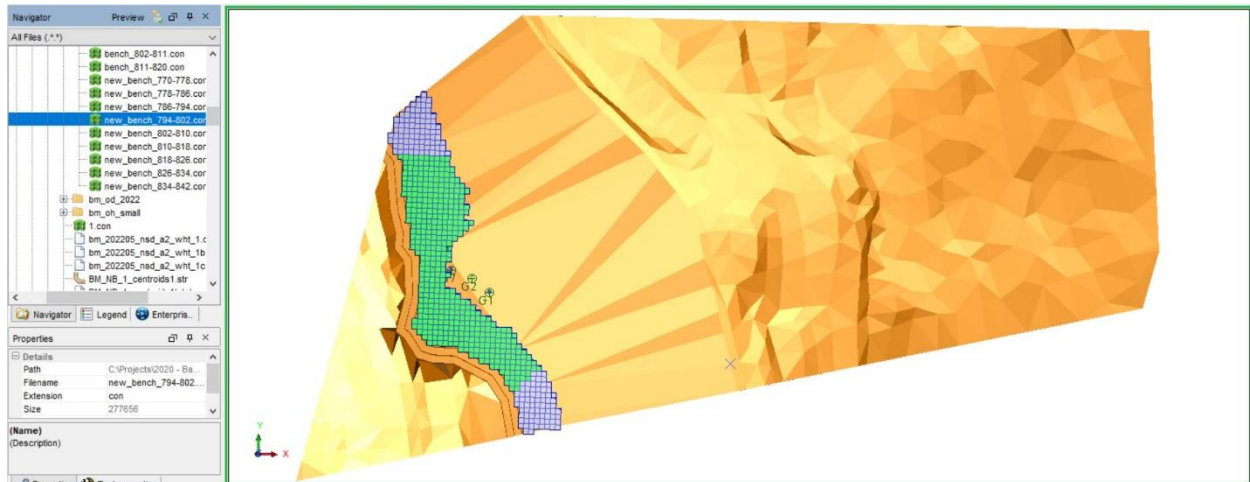
Εικόνα Α. 21: Κατανομή λευκότητας reserves (Wht (%)) Z=818-826.



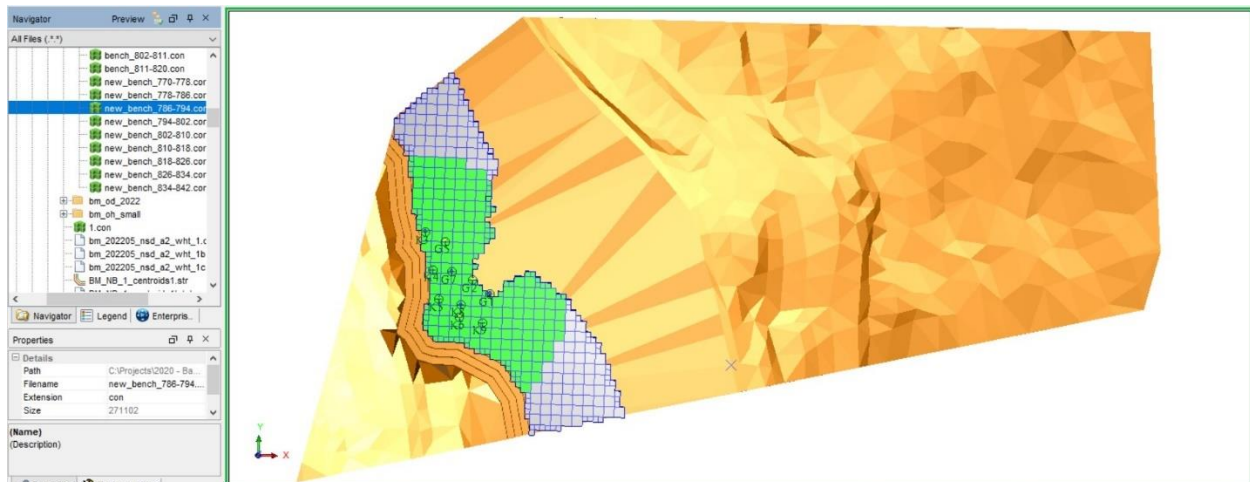
Εικόνα Α. 22: Κατανομή λευκότητας reserves ( Wht (%)) Z=810-818.



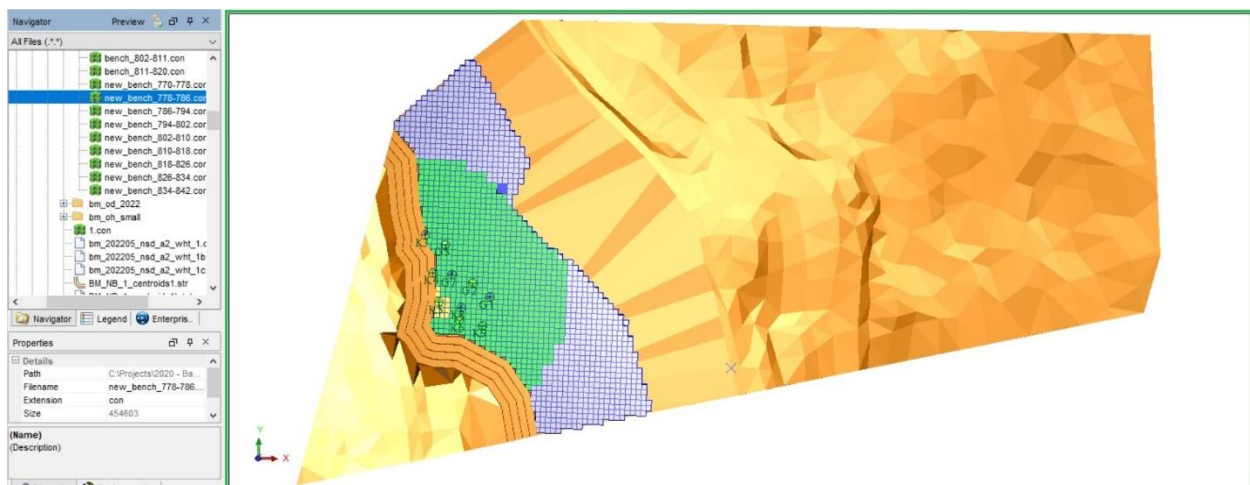
Εικόνα Α. 23: Κατανομή λευκότητας reserves (Wht (%)) Z=802-810.



Εικόνα Α. 24: Κατανομή λευκότητας reserves (Wht (%)) Z=794-802.

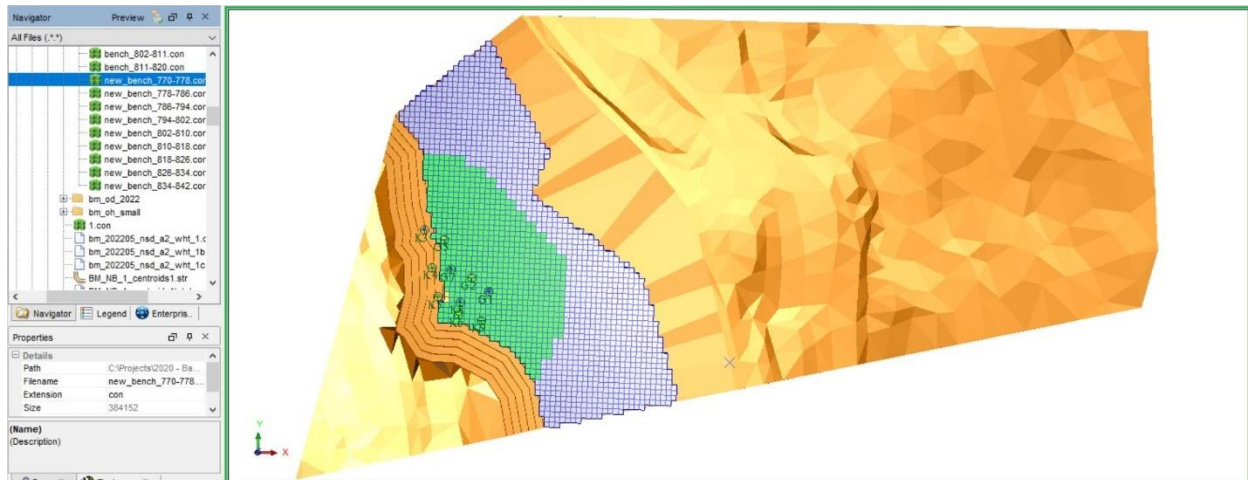


Εικόνα Α. 25: Κατανομή λευκότητας reserves ( Wht (%)) Z=786-794.

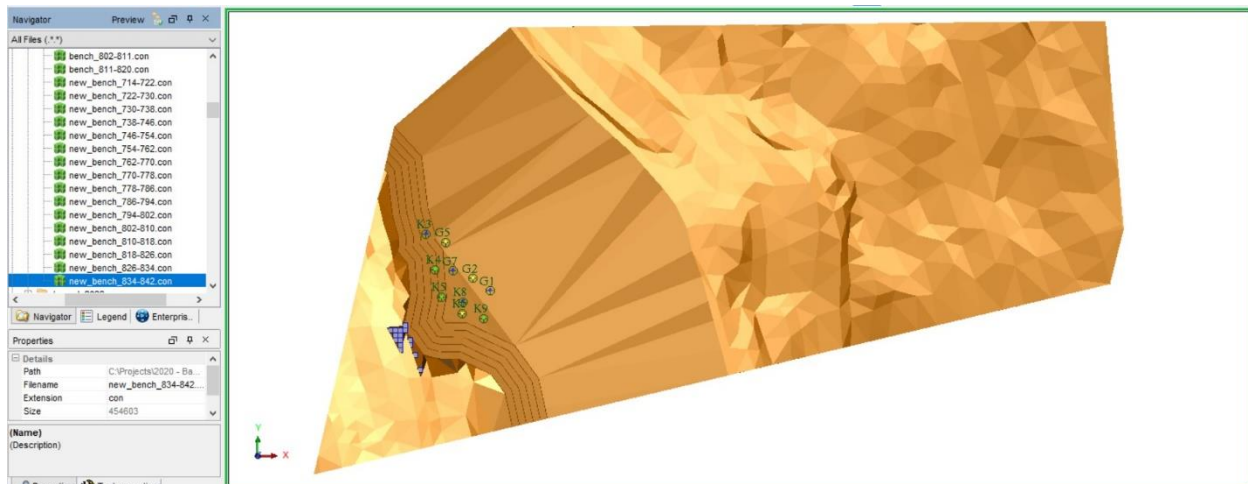


Εικόνα Α. 26: Κατανομή λευκότητας reserves (Wht (%)) Z=778-786.

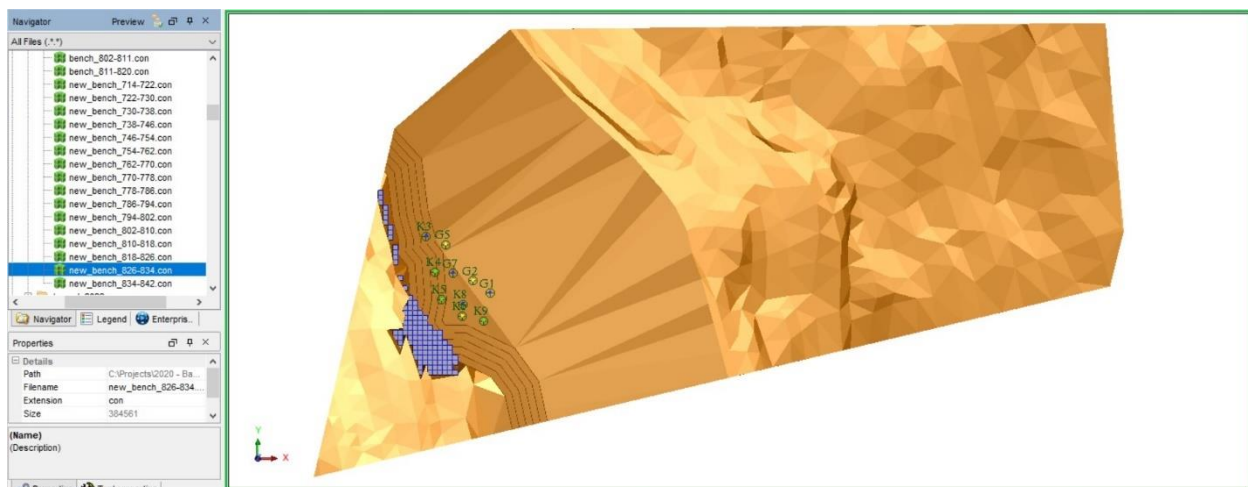




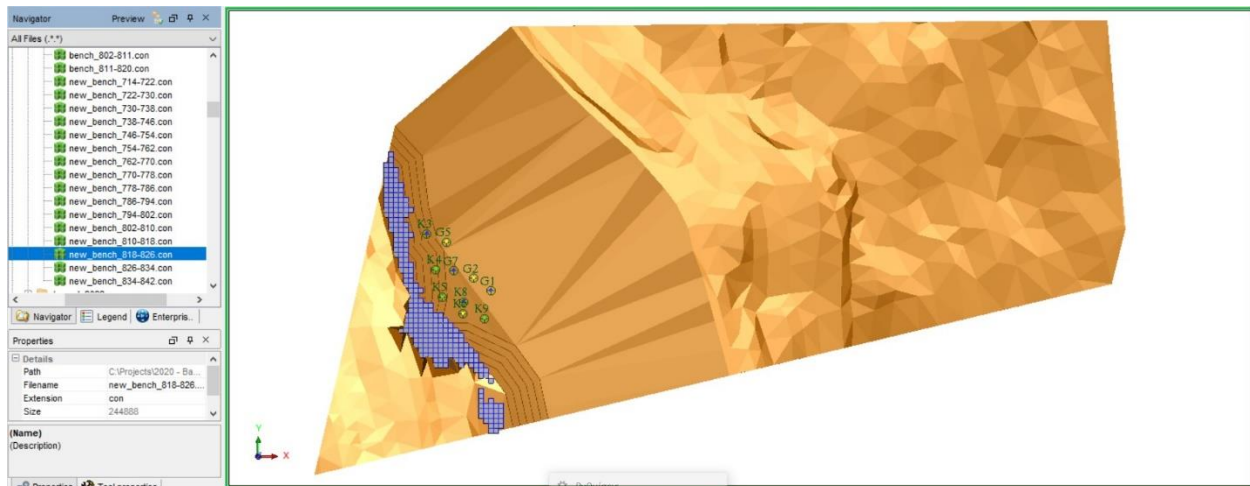
Εικόνα Α. 27: Κατανομή λευκότητας reserves (Wht (%)) Z=770-778.



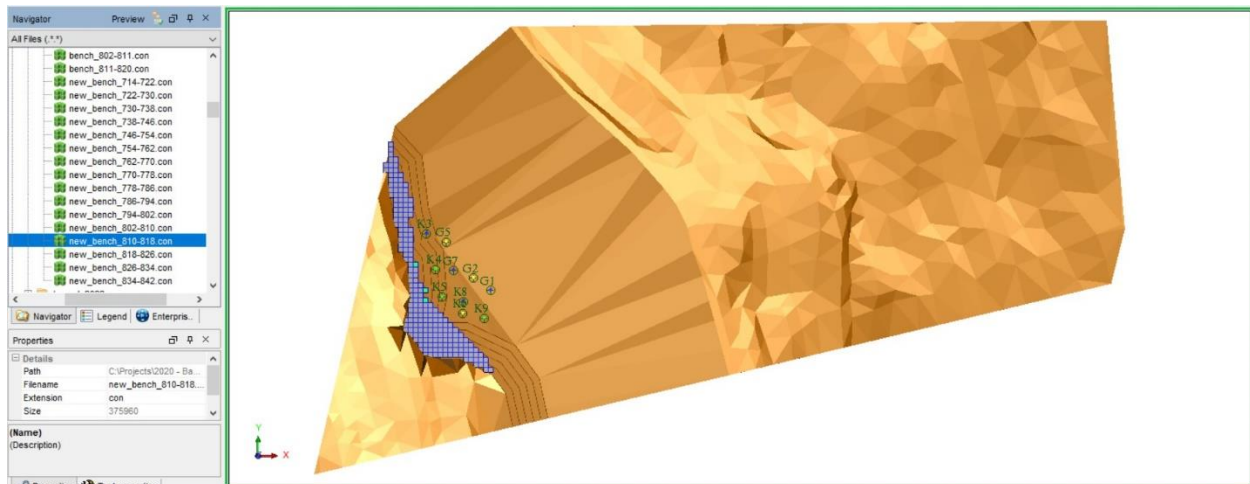
Εικόνα Α. 28: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m^{-1})$  Z=834-842.



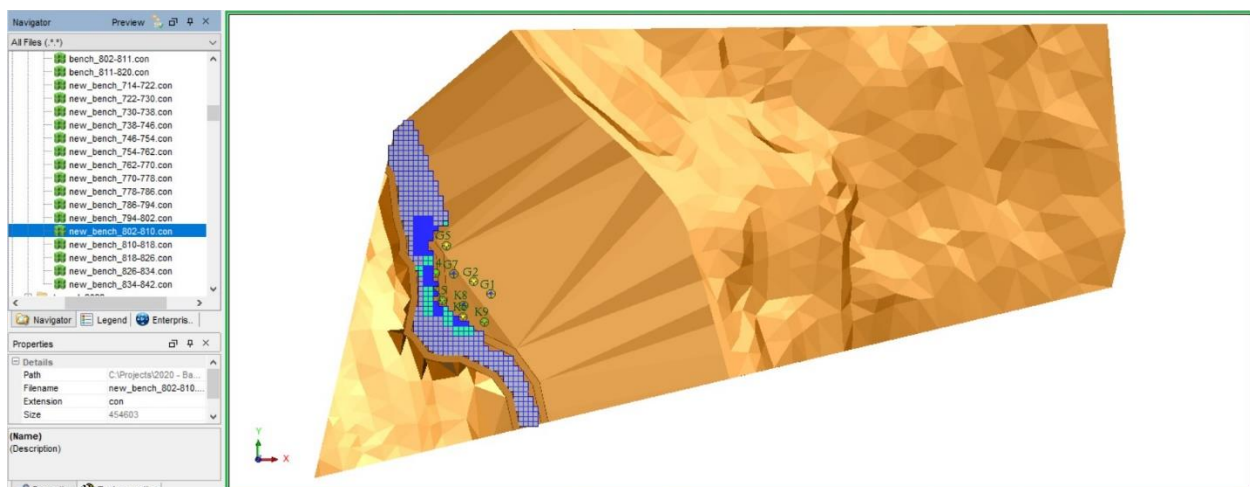
Εικόνα Α. 29: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m^{-1})$  Z=826-834.



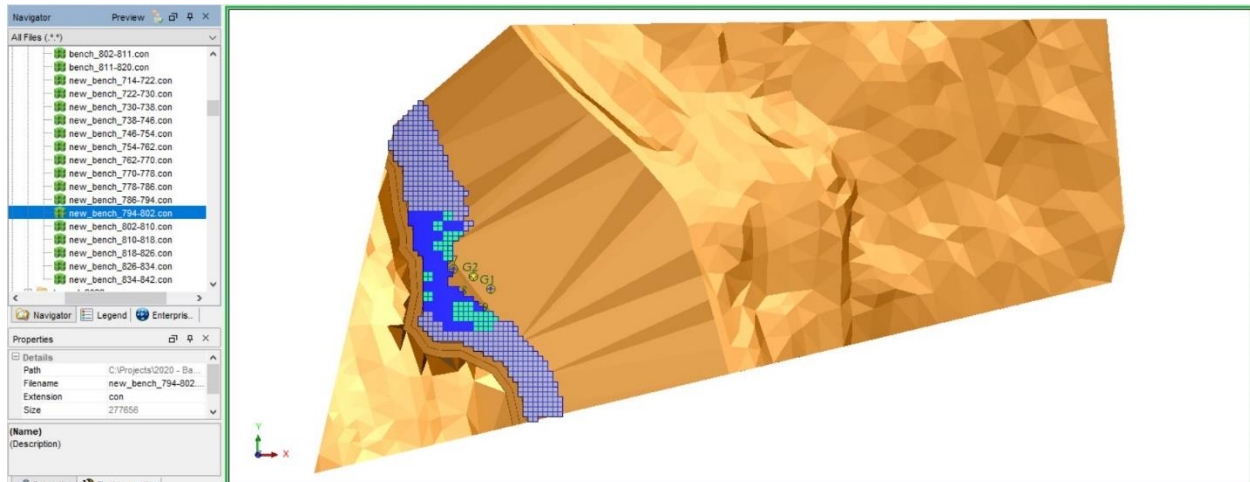
Εικόνα Α. 30: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m^{-1})$   $Z=818-826$ .



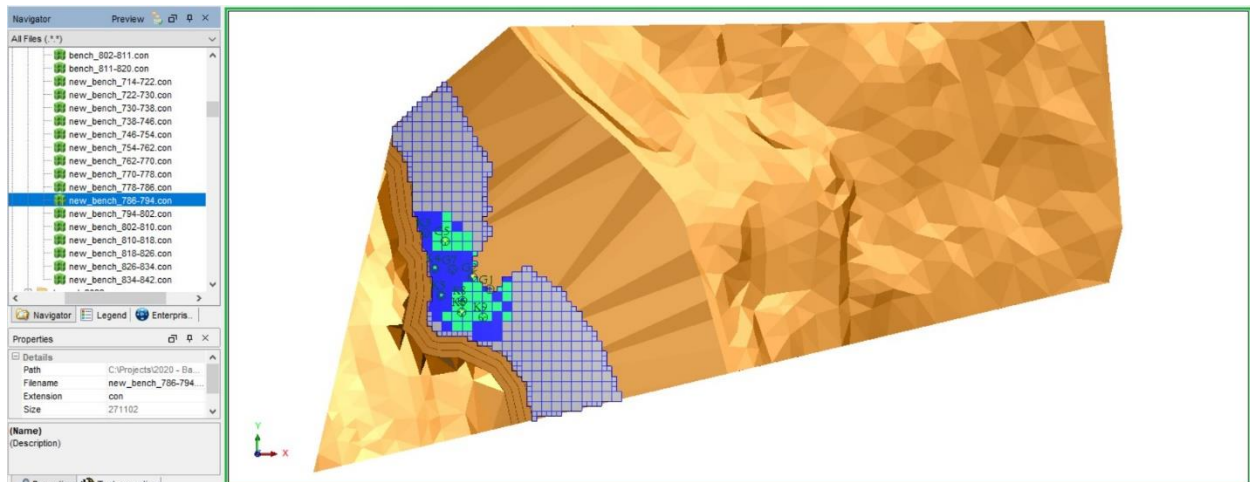
Εικόνα Α. 31: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m^{-1})$   $Z=810-818$ .



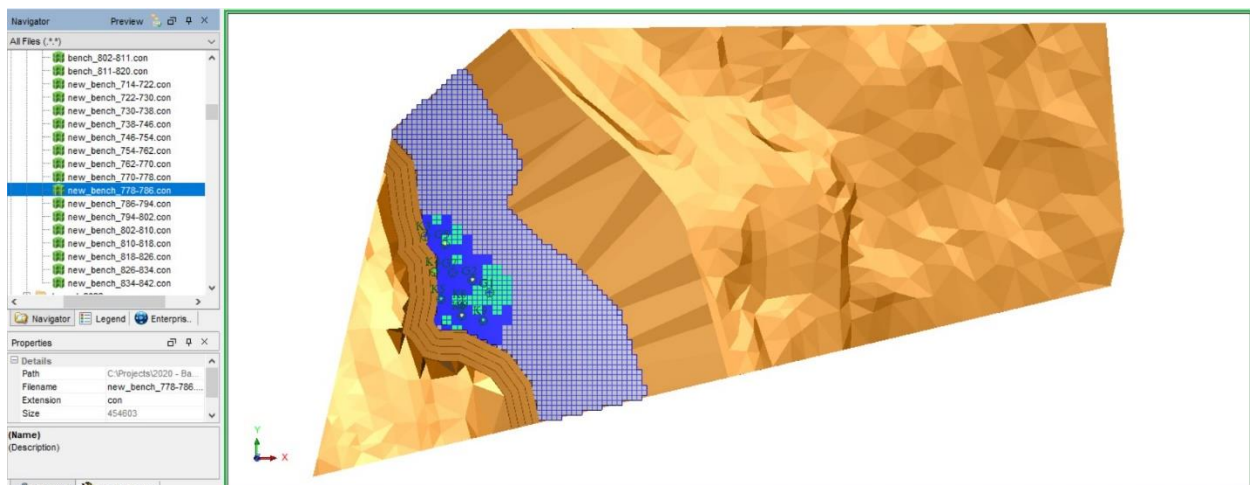
Εικόνα Α. 32: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m^{-1})$   $Z=802-810$ .



Εικόνα Α. 33: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m-1)$   $Z=794-802$ .

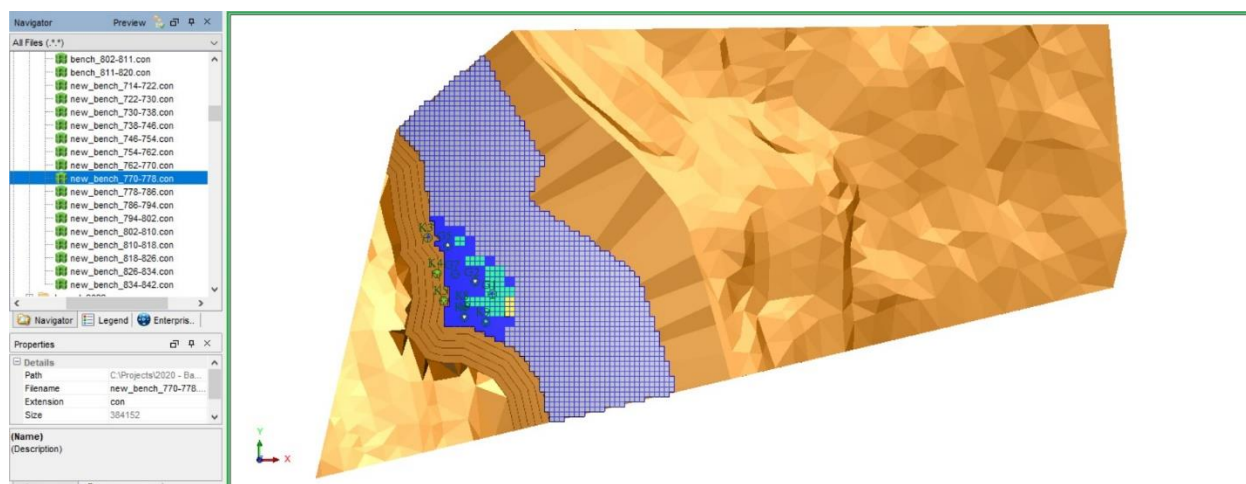


Εικόνα Α. 34: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m-1)$   $Z=786-794$ .

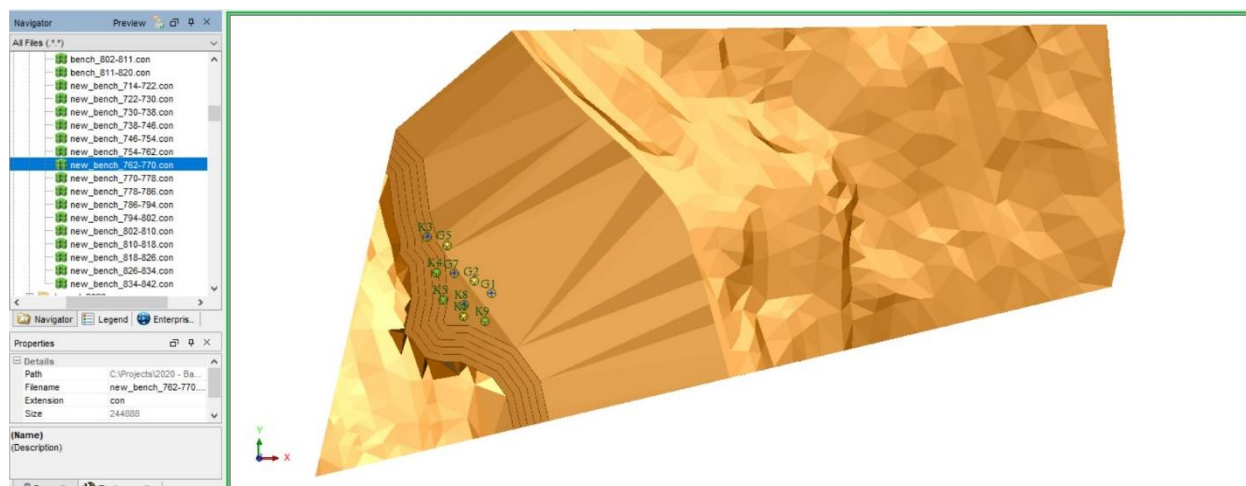


Εικόνα Α. 35: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m-1)$   $Z=778-786$ .





Εικόνα Α. 36: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m^{-1})$   $Z=770-778$ .



Εικόνα Α. 37: Κατανομή συχνότητας reserves  $FF(m^{-1})$   $Z=762-770$ .