



ΠΟΛΥΤΕΧΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σύγκριση γεωλογικού-ογκομετρικού μοντέλου λατομείου
μαρμάρου και επιλογή βέλτιστης μεθόδου εκμετάλλευσης»

Ζωντανός Φώτιος

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων Καθηγητής Γ. Εξαδάκτυλος

Καθηγητής Μ. Γαλετάκης

Δρ. Γ. Σαράτσης

Χανιά, 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο, τον κ. Καθηγητή Μιχαήλ Γαλετάκη και τον Διδάκτορα κ. Γεώργιο Σαράτση για την άψογη συνεργασία και καθοδήγηση, καθώς και για τις καθοριστικές συμβουλές τους, οι οποίες συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ τους φίλους μου, Χará Τσώλη, Γεράσιμο Ηλιόπουλο και Στέλιο Σπαντιδάκη οι οποίοι με βοήθησαν και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια στη προσπάθεια που έκανα για να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου και την αδερφή μου Αλεξάνδρα, των οποίων η πίστη στις δυνατότητές μου και η αγάπη τους αποτελεί μέχρι τώρα αρωγό στους στόχους και τα όνειρά μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εμπορική αξία των λευκών μαρμάρων εξαρτάται περισσότερο από τη λευκότητα, σύννεφα ή ζώνες γκρίζου ή άλλου χρώματος, άλλες χρωματικές ατέλειες και τις ασυνέχειες από την κλίμακα των μερικών cm ή m. Οι ασυνέχειες μεγάλης εμμονής σε ένα κοίτασμα μαρμάρου είναι αυτές που καθορίζουν τις διαστάσεις των όγκων ή των πλακών που θα πουληθούν.

Σε ένα λατομείο δολομιτικού μάρμαρου ορύχθησαν πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις σε κάρναβο και αξιολογήθηκε η συχνότητα των ασυνεχειών ανά 1m μήκους πυρήνα (Fracture Frequency ή FF). Σύμφωνα με 4 κλάσεις (FF) (0-1.5 1/m, 1.5-3 1/m 3-6 1/m και >6 1/m) πραγματοποιήθηκε ο χαρακτηρισμός κάθε όγκου ενός ογκομετρικού μοντέλου του λατομείου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη σύγκριση ενός «γεωλογικού μοντέλου» ποιότητας-παραγωγής με το ογκομετρικό μοντέλο ποιότητας μαρμάρου, σε συνάρτηση μόνο με τη συχνότητα ασυνεχειών (FF). Ως «γεωλογικό μοντέλο» στην παρούσα διπλωματική χαρακτηρίζεται κάθε πάνελ μαρμάρου κατά τον ποιοτικό έλεγχο της παραγωγής σε σχέση με τη συχνότητα των ασυνεχειών στις 4 κλάσεις ενώ ως ογκομετρικό μοντέλο χαρακτηρίζεται κάθε block διαστάσεων $3 \times 3 \times 6 \text{ m}^3$ που κατασκευάστηκε από γεωστατιστική ανάλυση πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων σε σχέση με τη συχνότητα των ασυνεχειών τους στις ίδιες κλάσεις.

Η σχεδίαση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με την χρήση κατάλληλου λογισμικού Cad. Μέσω της σύγκρισης των δύο μοντέλων κρίνεται η αναγκαιότητα αναπροσαρμογής του ογκομετρικού μοντέλου και η τροποποίηση του σχεδιασμού του λατομείου μάρμαρου για την αύξηση της αποληψιμότητας των εμπορεύσιμων ογκομαρμάρων.

ABSTRACT

The market value of white marble depends more on whiteness, clouds or bands of gray or other color, other color imperfections and discontinuities from the scale of some cm or m. Discontinuities of great persistence in a marble deposit define the dimensions of the volumes or plates to be sold.

In a dolomite marble quarry, were executed core boreholes and evaluated the frequency of discontinuities per 1 m of core length (Fracture Frequency or FF). According to the 4 classes (FF) (0-1.5 1/m, 1.5-3 1/m, 3-6 1/m and > 6 1/m), was characterized each volume of a block model of the quarry.

The present diploma thesis aims at comparing a quality-production “geological model” with the block model based on FF. As “geological model”, in the present thesis, is characterized each marble panel during the quality control of production based to the frequency of discontinuities in the 4 classes while as block model is characterized each block with dimensions $3 \times 3 \times 6 \text{ m}^3$ which was made by geostatistical analysis of core boreholes in relation to the frequency of discontinuities in the same classes.

The design of the models was accomplished using the proper Cad. By designing the two models, conclusions are deduced about the discontinuities crossing the marble deposit and is evaluated the necessity of adjusting the block model and the modification of design the marble quarry to increase the profitability of the marketable marble volumes.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	10
1.2 Ορισμοί και χαρακτηριστικά μαρμάρου	11
1.3 Εξόρυξη μαρμάρου στην αρχαιότητα	14
1.4 Χρήσεις μαρμάρου	15
1.5 Εκμετάλλευση μαρμάρου.....	16
1.5.1 Υπαίθρια εκμετάλλευση	16
1.5.2 Υπόγεια εκμετάλλευση.....	19
1.6 Επεξεργασία μαρμάρου.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ.....	22
2.1 Ασυνέχειες στα μάρμαρα	22
2.2 Περιγραφή ασυνεχειών	22
2.2.1 Προσανατολισμός (orientation).....	23
2.2.1.1 Στερεογραφική προβολή (δίκτυο Schmidt)	25
2.2.2 Απόσταση (spacing).....	28
2.2.2.1 Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος (RQD).....	31
2.2.3 Εμμονή (persistence)	35
2.2.4 Αντοχή τοιχωμάτων (wall strength)	35
2.2.5 Τραχύτητα (roughness).....	35
2.2.6 Άνοιγμα (aperture).....	36
2.2.7 Υλικό πλήρωσης (filling).....	36
2.2.8 Συνθήκες νερού (seepage)	36
2.3 Συχνότητα ασυνεχειών στο μάρμαρο (Fracture Frequency)	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ	39
3.1 Εκτίμηση αποθεμάτων	39
3.2 Μέθοδος Kriging	43
3.3 Ογκομετρικό μοντέλο (Block Model) του FF	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΟΥ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ	46
4.1 Εισαγωγή.....	46
4.2 Εύρεση προσανατολισμού των ασυνεχειών στο μάρμαρο.....	46
4.3 Υπολογισμός συχνότητας ασυνεχειών (FF).....	47
4.4 Σχεδίαση ογκομετρικού μοντέλου (Block Model) του FF.....	49

4.5 Σχεδίαση γεωλογικού μοντέλου με βάση την πραγματική παραγωγή	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	61
5.1 Σύγκριση μοντέλων	61
5.2 Συμπεράσματα-προτάσεις για τη βελτίωση του ογκομετρικού μοντέλου και τροποποιήσεις της μεθόδου εκμετάλλευσης	62
Παράρτημα Α: Δημιουργία επιφάνειας.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Οι 3 κύριες ομάδες των διακοσμητικών πετρωμάτων.....	12
Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστικές επιφάνειες μαρμάρου.....	14
Σχήμα 1.3: Μεταβολή κλίσης πρανούς από μια ενδιάμεση φάση στην τελική.....	17
Σχήμα 1.4: Διατρήματα για την συρματοκοπή.....	18
Σχήμα 2.1: Παράμετροι ασυνεχειών σε επιφάνεια μαρμάρου (Νομικός, 2015)	23
Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός των διευθύνσεων των ασυνεχειών (Ρόζος, 2007).....	24
Σχήμα 2.3: Κυκλογραφική-πολική προβολή και στη στερεογραφική προβολή επιπέδου ασυνέχειας (Phillips, 1979).....	25
Σχήμα 2.4: Στερεογραφική προβολή επιπέδου ασυνέχειας στο κατώτερο ημισφαίριο.(Hoek and Bray, 1973).....	26
Σχήμα 2.5: Συγκέντρωση των πόλων 3 συστημάτων ασυνεχειών στο στερεογραφικό διάγραμμα (προβολή στο κάτω ημισφαίριο).....	27
Σχήμα 2.6: Συστήματα ασυνεχειών που σχηματίζονται σε πτυχωμένα στρώματα μαρμάρων.....	27
Σχήμα 2.7: Αποστάσεις μεταξύ των ασυνεχειών σε γραμμή δειγματοληψίας (Hudson and Harrison, 1997).....	28
Σχήμα 2.8: Η αρνητική εκθετική κατανομή των τιμών απόστασης των ασυνεχειών..	29
Σχήμα 2.9: Μεταβολή της συχνότητας ασυνεχειών για γραμμή δειγματοληψίας διερχόμενης από ένα σύνολο ασυνεχειών (Hudson & Harrison, 1997).....	30
Σχήμα 2.10: Μεταβολή της συχνότητας ασυνεχειών για γραμμή δειγματοληψίας διερχόμενη από δύο σύνολα ασυνεχειών (Hudson & Harrison, 1997).....	31
Σχήμα 2.11: Υπολογισμός RQD	32
Σχήμα 2.12: (α) η σχέση του RQD^* με την μέση απόσταση ασυνεχειών,(β) η σχέση του RQD^* με την συχνότητα ασυνεχειών (Σοφιανός και Νομικός, 2008)	34
Σχήμα 2.13: Κυμάτωση και μικροτραχύτητα στην επιφάνεια μιας ασυνέχειας (Ρόζος, 2007)	35
Σχήμα 2.14: Πυρήνας δειγματοληψίας χωρισμένος κάθε 1 m.....	37
Σχήμα 3.1: Μερικοί από τους παράγοντες που μεταβάλλουν το ποσοστό των μεταλλευτικών αποθεμάτων κοιτάσματος διακοσμητικού πετρώματος.....	39
Σχήμα 3.2: (α) παραδείγματα παρουσίας των ποιοτήτων μαρμάρου στις γεωτρήσεις (β) κατασκευή γεωλογικών-κοιτασματολογικών τομών με τις διαφορετικές ποιότητες του διακοσμητικού πετρώματος.....	41
Σχήμα 3.3: Οι ανοχές της απόστασης (h) και της γωνίας (φ) ανίχνευσης των ζευγών των δεδομένων για την κατασκευή ημι-βαριόγραμματος (Σαράτσης, 2004)	42
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση βασικών χαρακτηριστικών ημι-βαριογράμματος (Σαράτσης, 2004)	43
Σχήμα 3.5: Ογκομετρικό μοντέλο σε τρεις διαστάσεις (Crawford & Davey, 1979). ..	44
Σχήμα 4.1: Απεικόνιση των πόλων στο πρόγραμμα dips TM	46
Σχήμα 4.2: Απεικόνιση μέγιστων κύκλων τριών οικογενειών του μαρμάρου στο πρόγραμμα dips TM	47

Σχήμα 4.3: Ιστόγραμμα των 4 κλάσεων μαρμάρου ανάλογα με το FF	49
Σχήμα 4.4: Ημι-βαριόγραμμα του FF μάρμαρη γραμμή το πειραματικό ημι-βαριόγραμμα, κόκκινη γραμμή το εκθετικό ημι-βαριόγραμμα πράσινη γραμμή είναι η διασπορά	50
Σχήμα 4.5: (α) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 912, (β) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 918, (γ) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 924, (δ) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 930, (ε) Τρισδιάστατο ογκομετρικό μοντέλο στον χώρο σχεδιασμένο στο AutoCad	53
Σχήμα 4.6: Σχεδιασμός των τελικών ορίων της εκμετάλλευσης για τον προσδιορισμό των μεταλλευτικών αποθεμάτων (Stavropoulou, 2014)	54
Σχήμα 4.7: Ψηφιοποιημένος χάρτης λατομείου το μήνα Απρίλιο 2014.....	55
Σχήμα 4.8: Ετήσια παραγωγή μάρμαρου στο λατομείο το έτος 2014 αν μήνα	55
Σχήμα 4.9: (α) Μέτωπο σχήματος «Γ» ή μέτωπο παραγωγής ογκομαρμάρων που φαίνεται πάνελ μαρμάρου αποκομμένο με συρματοκοπές έτοιμο για ανατροπή και περαιτέρω παραγωγή ορθογωνισμένων ογκομαρμάρων εμπορικών διαστάσεων από αυτό, (β) Χάρτης ποιότητας για τον μήνα Ιούνιο 2014	57
Σχήμα 4.10: (α) Χάρτης ποιοτήτων με βάση το FF, (β) Γεωλογικό μοντέλο.....	58
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ετήσιας παραγωγής μάρμαρου στο λατομείο	59
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα αποληψιμότητα ανά κλάση γραμμικής συχνότητας	59
 Σχήμα 5.1: Σύγκριση ογκομετρικού μοντέλου με γεωλογικού μοντέλου.....	61
Σχήμα 5.2: Τομή Δ-Α στην οποία φαίνονται με πορτοκαλί χρώμα τα μεγάλα ρήγματα C (contro) που έχουν αποτυπωθεί επί τόπου και έχουν εντοπισθεί από τις γεωτρήσεις	62
Σχήμα 5.3: (α) Πρόταση νέων ορίων εκμετάλλευσης που φαίνονται με τη πράσινη γραμμή για αύξηση της αποληψιμότητας ογκομαρμάρων, (β) Εκμετάλλευση μαρμάρου μόνο στην πράσινη επιφάνεια.....	63
Σχήμα 5.4: Ισομετρική άποψη της τελικής εκμετάλλευσης.....	64
Σχήμα 5.5: (α) Κάτοψη της 4 ^{ης} βαθμίδας, (β) Κάτοψη 5 ^{ης} βαθμίδας.....	65
Σχήμα 5.6: (α) Διεύθυνση τομών στο χώρο του λατομείου, (β) Τομή Α-Α', (γ) Τομή Β-Β', (δ) Τομή C-C', (ε) Τομή D-D'	67
 Σχήμα Π1: Εντολή για την δημιουργία επιφάνειας	69
Σχήμα Π2: Αποθήκευση σε Layer	69
Σχήμα Π3: Υποκατηγορίες επιφάνειας	70
Σχήμα Π4: Επιφάνεια σε 3D model	70
Σχήμα Π5: Δημιουργία στερεού από επιφάνεια	71
Σχήμα Π6: Παραγωγή μέχρι το μήνα Ιούνιο του 2014.....	71
Σχήμα Π7: Παραγωγή το μήνα Ιούλιο του 2014	72
Σχήμα Π8: Παραγωγή το μήνα Αύγουστο του 2014	72
Σχήμα Π9: Παραγωγή το μήνα Σεπτέμβριο του 2014	73
Σχήμα Π10: Παραγωγή το μήνα Οκτώβριο του 2014	73
Σχήμα Π11: Παραγωγή το μήνα Νοέμβριο του 2014.....	74
Σχήμα Π12: Παραγωγή στις αρχές του μήνα Δεκεμβρίου του 2014.....	74

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1: Αποκόλληση μαρμάρου από το μητρικό πέτρωμα (Κορρές, 1994).....	15
Εικόνα 1.2: Αποκόλληση με την χρήση συρματοκόπτης (Εξαδάκτυλος, 2006).....	18
Εικόνα 1.3: Μηχάνημα για την ανατροπή μάρμαρου (Εξαδάκτυλος, 2006).....	19
Εικόνα 1.4: Στοές για υπόγεια εκμετάλλευση	20
Εικόνα 1.5: Εξόρυξη με αλυσοπρίονο	20
Εικόνα 1.6: Κύριοι τύποι προϊόντων διακοσμητικών πετρωμάτων	21

Εικόνα 2.1: Γεωλογική πυξίδα	25
------------------------------------	----

Εικόνα 4.1: Αυτοκινούμενο περιστροφικό γεωτρύπανο για συλλογή πυρήνων με δειγματοσυλλέκτη και αδαμαντοκορώνα.....	48
Εικόνα 4.2: Ξύλινο κουτί αποθηκεύσεως των κυλινδρικών πυρήνων μαρμάρου	48

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση του πετρώματος με βάση το RQD (Bieniawski, 1984).....	32
Πίνακας 2.2: Κατάταξη εμμορφής των ασυνεχειών.....	35
Πίνακας 2.3: Χαρακτηρισμός μάρμαρου με βάση το FF.....	37

Πίνακας 4.1: Συχνότητα ασυνεχειών για κάθε κλάση ασυνεχειών	49
Πίνακας 4.2: Μηνιαίες παραγωγές μαρμάρου	56
Πίνακας 4.3: Παραγωγή κάθε ποιότητας σε m ³	59
Πίνακας 4.4: Εμπορευσιμότητα μάρμαρου για κάθε ποιότητα	60

Πίνακας 5.1: Υψόμετρο βαθμίδων.....	61
Πίνακας 5.2: Ποσοστό που συμπίπτουν το γεωλογικό με το ογκομετρικό μοντέλο ...	62
Πίνακας 5.3: Νέα αποληψιμότητα ανά κλάση γραμμικής συχνότητας	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Το μάρμαρο είναι ένα πέτρωμα που χρησιμοποιείται για τη διακόσμηση εσωτερικών ή εξωτερικών χώρων. Η εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος μαρμάρου πραγματοποιείται με υπαίθρια ή με υπόγεια μέθοδο και τα προϊόντα που μπορούν να παραχθούν είναι όγκοι (blocks) ορθογωνισμένοι ή μη ορθογωνισμένοι και πλάκες. Οι διαστάσεις των πλακών κυμαίνονται συνήθως σε $2 \times 1 \text{ m}^2$ και πάχος 2-4cm, ανάλογα με τη χρήση τους (εσωτερικές και εξωτερικές εφαρμογές), καθώς και τυποποιημένα πλακίδια $30 \times 30 \text{ cm}^2$, $40 \times 40 \text{ cm}^2$ και άλλα προϊόντα ειδικών εφαρμογών. Η εμπορευσιμότητα ενός γεωλογικού σχηματισμού όπως το μάρμαρο εξαρτάται από τα φυσικομηχανικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του, με κυριότερο κριτήριο για την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος, τη δυνατότητα παραγωγής υγιών όγκων με ικανές διαστάσεις για παραγωγή πλακών. Το κριτήριο αυτό καθορίζει την αποληψιμότητα σε εμπορεύσιμα ογκομαρμάρα και εξαρτάται πρωτίστως από τις ασυνέχειες που διασχίζουν το μάρμαρο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία λαμβάνει χώρο σε ένα λατομείο λευκού δολομιτικού μαρμάρου και εξετάστηκε μόνο η συχνότητα των ασυνεχειών που διασχίζουν το σώμα του μαρμάρου. Τα δεδομένα των ασυνεχειών λήφθηκαν από κάναβο πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων. Στην περιοχή μελέτης ορύχθηκαν πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με γεωλογική πυξίδα. Τα δεδομένα τους χρησιμοποιήθηκαν με τη μέθοδο της στερεογραφικής προβολής για διαχωρισμό καθώς και για ταυτοποίηση των ασυνεχειών σε οικογένειες. Από τους πυρήνες των γεωτρήσεων προσδιορίστηκε η συχνότητα των ασυνεχειών (FF) ανά 1m μήκους πυρήνα, που είναι η βασική παράμετρος για τον καθορισμό της αποληψιμότητας του μαρμάρου. Η αποληψιμότητα εμπορεύσιμων ογκομαρμάρων σχετίζεται άμεσα με τις 4 κλάσεις (FF) γραμμικής συχνότητας ασυνεχειών 0-1.5 1/m, 1.5-3 1/m, 3-6 1/m και >6 1/m και σύμφωνα με αυτές πραγματοποιείται ο χαρακτηρισμός του μαρμάρου. Επιπλέον, από το λατομείο διατίθενται δεδομένα χαρακτηρισμού της συχνότητας ασυνεχειών των πάνελ μαρμάρου κατά την παραγωγική διαδικασία. Συνεπώς σχεδιάστηκαν δύο μοντέλα, το «ογκομετρικό» και το «γεωλογικό». Όταν ο χαρακτηρισμός αυτός γίνεται κατά τον ποιοτικό έλεγχο της παραγωγής, τότε το μοντέλο ονομάζεται «γεωλογικό». Όταν ο χαρακτηρισμός γίνεται από τις πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις και με τη μέθοδο παρεμβολής Kriging, τότε ονομάζεται «ογκομετρικό». Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση των δύο μοντέλων στη διάρκεια της παραγωγής ενός έτους και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την ακρίβεια του ογκομετρικού μοντέλου, την

αναγκαιότητα ή μη αλλαγής του σχεδιασμού του λατομείου για την αύξηση της αποληψιμότητας των ογκομαρμάρων.

1.2 Ορισμοί και χαρακτηριστικά μαρμάρου

Η λέξη μάρμαρο χρησιμοποιείται με διάφορους ορισμούς ανάλογα με τον κλάδο που εξυπηρετεί. Στον γεωλογικό κλάδο το μάρμαρο ορίζεται ως το πέτρωμα που αποτελείται από κρυστάλλους ασβεστίτη ή δολομίτη ή μίγμα των δύο αυτών ορυκτών που δημιουργήθηκε κατά στο στάδιο της μεταμόρφωσης των ασβεστόλιθων. Στον εμπορικό κλάδο, αναφέρεται σε κάθε πέτρωμα που μπορεί να πουληθεί σε όγκους και πλάκες (λ.χ. αυτός ο ορισμός συμπεριλαμβάνει τους γρανίτες, τους σχιστόλιθους κ.α.). Στον τεχνικό κλάδο το μάρμαρο αναφέρεται σε κάθε πέτρωμα που μπορεί να εξορυχτεί σε όγκους ικανών διαστάσεων και μπορεί να κοπεί, να λειανθεί και να στιλβωθεί με σκοπό την χρήση του ως διακοσμητικό πέτρωμα σε κατασκευή έργων γλυπτικής, στην εσωτερική ή εξωτερική διακόσμηση κτιρίων. Στην διεθνή βιβλιογραφία, κατά την Αμερικάνικη Επιτροπή Δομικών Υλικών (American Society of Testing Materials) ASTM (C119), το μάρμαρο ορίζεται ως το ανθρακικό πέτρωμα από διακρίνεται από την κρυσταλλική δομή του εξαιτίας ανακρυστάλλωσης, συνήθως από θέρμανση ή πίεση κατά την διάρκεια μεταμόρφωσης, το οποίο συνιστάται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά, ασβεστίτη ή δολομίτη, αποκλειστικά ή σε συνδυασμό.» ([Εξαδάκτυλος, 2006](#))

Τα μάρμαρα ανήκουν στην υποκατηγορία των «διακοσμητικών πετρωμάτων» στην ευρύτερη οικογένεια των δομικών λίθων. Ειδικότερα τα μάρμαρα μαζί με τον τραβερτίνη και τον όνυχα διαμορφώνουν μια ομάδα, οι γρανίτες μια άλλη και οι λίθοι που δεν μπορούν να στιλβωθούν όπως λ.χ. οι ψαμμίτες και οι ασβεστόλιθοι μια τρίτη. Η κατηγοριοποίηση αυτή φαίνεται στο [Σχήμα 1.1](#).



Σχήμα 1.1: Οι 3 κύριες ομάδες των διακοσμητικών πετρωμάτων.

Το μάρμαρο λοιπόν είναι μεταμορφωμένο, ανθρακικό, κρυσταλλικό πέτρωμα το οποίο αποτελείται είτε από ασβεστίτη (CaCO_3) είτε από δολομίτη (CaMgCO_3) που έχουν σκληρότητα 3 και 3,5-4 της σκληρομετρικής κλίμακας Mohs αντίστοιχα ή και συνδυασμό αυτών των δυο ορυκτών. Για να χαρακτηριστεί ένας όγκος μαρμάρου εμπορεύσιμος πρέπει να πληροί κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζουν την ποιότητα του όπως:

- Χρωματικές μεταβολές
- Δομικά χαρακτηριστικά και μεταβολές (Textural characteristics and textural variation)
- Μικρορωγμές/ασυνέχειες (διακλάσεις, ρήγματα, κ.λπ.)
- Διεισδύσεις (Intrusions, π.χ. οξειδία Fe, αιματίτης (κόκκινες φλέβες), λειμωνίτης (κίτρινες φλέβες))
- Προσμίξεις (Inclusions)
- Συνοδά ορυκτά (Accessory minerals, π.χ. ασβεστίτης σε λευκό δολομιτικό μάρμαρο)
- Ζώνες επαφής (Contact zones)
- Εξαλλοιώσεις (Alterations)

Το χρώμα είναι από τις βασικότερες και σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες. Τα μάρμαρα που αποτελούνται από καθαρό ασβεστίτη και δολομίτη είναι λευκά λόγω του λευκού χρώματος των δύο αυτών ορυκτών. Γενικότερα το χρώμα ποικίλλει λόγω της πρόσμειξης ορυκτών όπως χαλαζία, απατίτη, χλωρίτη, μοσχοβίτη, μαγνητίτη και σιδηροπυρίτη, αργιλικών ορυκτών, οξειδίων σιδήρου και γραφίτη. Για παράδειγμα, ο αιματίτης δίνει το

κόκκινο χρώμα στο μάρμαρο ενώ ένα σερπεντινικό μάρμαρο έχει πράσινο χρώμα επειδή στη σύσταση του επικρατεί ο σερπεντίνης με πράσινο χρώμα.

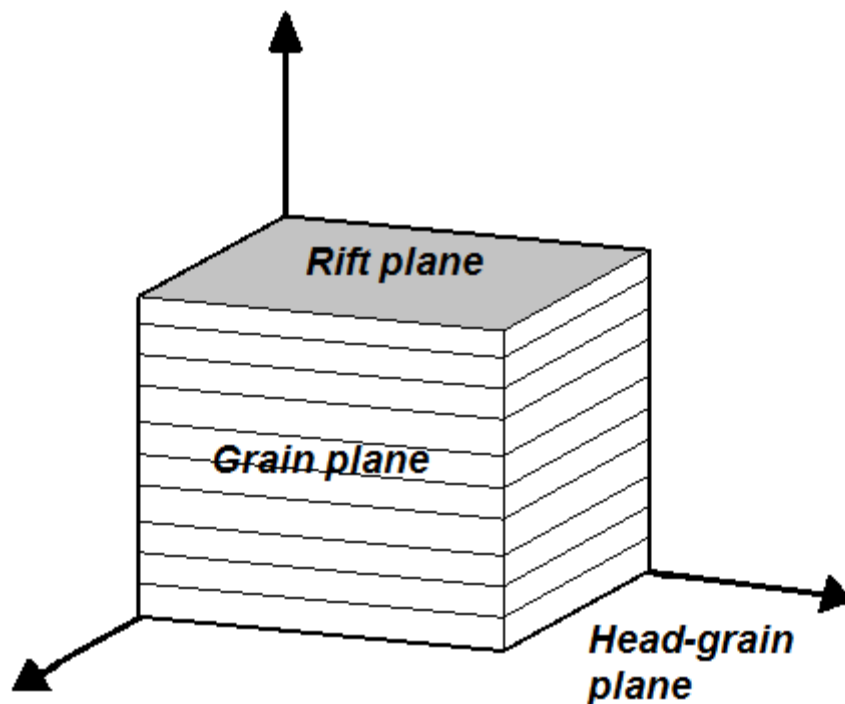
Ανάλογα του μεγέθους των κόκκων των κρυστάλλων, τα μάρμαρα χαρακτηρίζονται ως λεπτο-κρυσταλλικά, μεσο-κρυσταλλικά και αδρο-κρυσταλλικά, επηρεάζοντας το γενικό χρώμα και την αντοχή. Έτσι συνήθως τα λεπτοκρυσταλλικά είναι λευκά και ανθεκτικότερα έναντι των αδροκρυσταλλικών, που είναι γκρίζα και μικρότερης αντοχής. Όμως η αντοχή τους δεν εξαρτάται μόνο με το μέγεθος των κόκκων αλλά κατά κύριο λόγο από τον ιστό που εμφανίζουν. Ο ιστός τους είναι λοβοειδής ή πολυγωνικός γρανοβλαστικός και σπάνια εμφανίζουν ατελή φολίδωση ή σχιστότητα.

Οι πιο γνωστές φυσικομηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου είναι:

- φαινόμενο ειδικό βάρος
- συντελεστής υδατοαπορροφητικότητας
- αντοχή σε θλίψη
- αντοχή σε άμεσο εφελκυσμό
- μέτρο ελαστικότητας

Οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του μαρμάρου με την ονοματολογία που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία εξόρυξης των ογκομαρμάρων είναι (*Σχήμα 1.2*):

- πρόσωπο (verso ή rift) ή τα «νερά» του μαρμάρου, ορίζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την στρώση (παράλληλου ιστού). Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στη θλίψη είναι μικρότερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.
- μουρέλο ή παρειά (grain ή second) είναι η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την παράταξη του μαρμαροφόρου κοιτάσματος και κάθετη προς το πρόσωπο.
- κεφάλι (contro ή head-grain) είναι η επιφάνεια που είναι κάθετη στις δύο προηγούμενες. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στη θλίψη είναι μεγαλύτερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου (*Εξαδάκτυλος, 2006*)

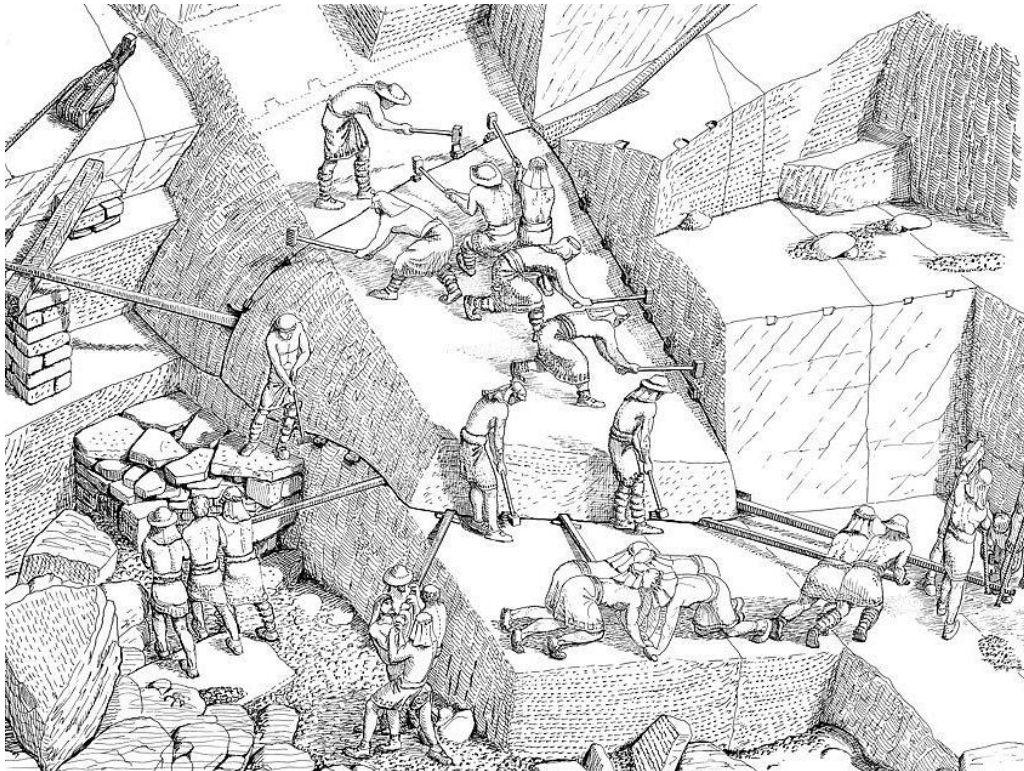


Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστικές επιφάνειες μαρμάρου

1.3 Εξόρυξη μαρμάρου στην αρχαιότητα

Από την αρχαιότητα έχει παρατηρηθεί ότι το μάρμαρο χάρη της λευκότητας και της διαφάνειας του στο φως χρησιμοποιήθηκε για την διακόσμηση σε χώρους λατρείας καθώς επίσης και στην γλυπτική. Η κατασκευή αυτών των γλυπτών ήταν κάτι παραπάνω από ένα έργο τέχνης αφού σμιλεύονταν προς τιμή ενός θεού και είχαν λατρευτικό χαρακτήρα. Χαρακτηριστικά μαρμάρινα γλυπτά είναι η Αφροδίτη της Μήλου, ο Ερμής του Πραξιτέλους κ.ά.

Αρχαίες μαρτυρίες για τον τρόπο εξόρυξης μαρμάρου δεν υπάρχουν. Τα μεγάλα λατομεία της αρχαιότητας έχουν σε μεγάλο ποσοστό καταστραφεί από μεταγενέστερες εκμεταλλεύσεις. Σύμφωνα με διαπιστώσεις και ευρήματα οι αρχαίοι λατόμοι ακολουθούσαν μια επίπονη διαδικασία για την αποκοπή και εξόρυξη των ογκομαρμάρων. Αρχικά δημιουργούσαν κατακόρυφα και οριζόντια αυλάκια με πριόνι και άμμο. Στην συνέχεια άνοιγαν υποδοχές για την τοποθέτηση σιδερένιων σφηνών ώστε να γίνει η απόσπαση του όγκου από το μητρικό πέτρωμα (*Εικόνα 1.1*). Μετά την εξόρυξη ακολουθούσε η πρώτη λάξευση «πελέκηση» ώστε να φύγει το περιττό βάρος.



Εικόνα 1.1: Αποκόλληση μαρμάρου από το μητρικό πέτρωμα (Κορρές, 1994)

Τέλος για την μεταφορά των ογκομαρμάρων από το λατομείο χρησιμοποιούσαν «φάλαγγες» ή «σκυτάλες» δηλαδή ξύλινους κυλίνδρους όταν η απόσταση ήταν οριζόντια ενώ για κεκλιμένα επίπεδα η μεταφορά γινόταν πάνω σε «ξύλινες εσχάρες» με την βοήθεια μοχλών.

1.4 Χρήσεις μαρμάρου

Το μάρμαρο εμφανίζεται σε κοιτάσματα μεγάλου μεγέθους ευνοώντας την εξόρυξη σε μεγάλη κλίμακα με συνέπεια τη μείωση του κόστους. Λόγω οικονομικότερης εξόρυξης, οι χρήσεις του δεν περιορίζονται μόνο στις κατασκευές, την αρχιτεκτονική και τη γλυπτική αλλά συνεχώς επεκτείνονται και σε νέους καινοτόμους τομείς.

Τα υγιή ογκομάρμαρα είναι αυτά τα οποία αποφέρουν τα μέγιστα κέρδη αλλά ένα λατομείο μαρμάρου δεν αποτελείται μόνο αυτά. Τα μάρμαρα τα οποία βρίσκονται μέσα σε οικογένειες ασυνεχειών, διαθλάσεων, ρηγμάτων δηλαδή είναι τεκτονισμένα, θραύονται με τη μέθοδο της διάτρησης-ανατίναξης. Το θραυσμένο μάρμαρο χρησιμοποιείται ως αδρανές υλικό σε αυτοκινητόδρομους, λατομεία σιδηρόδρομων, κτίρια και άλλους τύπους κατασκευών.

Τα υπολείμματα της εξόρυξης μαρμάρου, θραύονται και επεξεργάζονται για την παραγωγή μαρμαρόσκονης σε διάφορες κοκκομετρίες. Αυτή η σκόνη χρησιμοποιείται ως

χρωστική ουσία και πλήρωση στην μπογιά, τον ασβέστη, σε στόκους, πλαστικά, ενέματα, καλλυντικά, χαρτί και σε άλλα βιομηχανικά προϊόντα.

Το μάρμαρο υψηλής καθαρότητας, λευκού χρώματος, είναι ιδανικό για τη κατασκευή γλυπτών και διακοσμητικών αντικειμένων. Η διαύγεια του μαρμάρου το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό για πολλούς τύπους γλυπτών.

Το μάρμαρο έχει τη δυνατότητα κρυσταλλοποίησης γεγονός που επιτρέπει στα ελκυστικά κομμάτια του να κόβονται, να γυαλίζονται και να χρησιμοποιούνται ως πλακάκια δαπέδου, αρχιτεκτονικά πάνελ, σκάλες, έπιπλα, κλπ

Μαρμάρινες πλάκες ειδικών διαστάσεων χρησιμοποιούνται τελευταία σε θερμαντικά συστήματα, αφού παρουσιάζουν υψηλή θερμοσυσσωρευτική ικανότητα και μετάδοση θερμότητας με αποτέλεσμα ομοιόμορφη θέρμανση, υγιεινή ατμόσφαιρα και εξοικονόμηση ενέργειας.

1.5 Εκμετάλλευση μαρμάρου

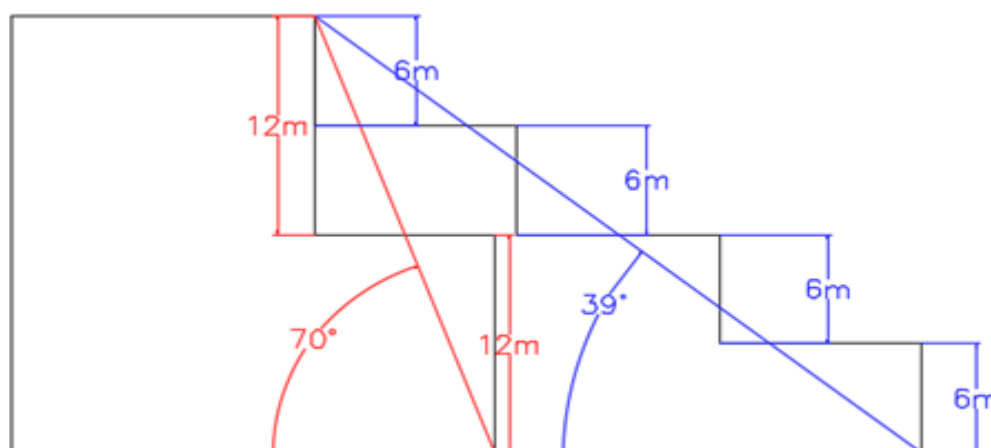
Η εκμετάλλευση μαρμάρου μπορεί να είναι υπαίθρια ή υπόγεια καθώς και συνδυασμός αυτών των δύο. Η υπαίθρια εκμετάλλευση στο μάρμαρο εφαρμόζεται με την μέθοδο των ορθών βαθμίδων ανοικτού ή κλειστού τύπου ενώ η υπόγεια με την μέθοδο θαλάμων και στύλων.

1.5.1 Υπαίθρια εκμετάλλευση

Προπαρασκευαστικό στάδιο υπαίθριας εκμετάλλευσης μαρμαροφόρου κοιτάσματος θεωρείται η προσπέλαση προς το κοίτασμα δηλαδή η διάνοιξη δρόμων πλάτους 4–8 m ανάλογα με τις διαστάσεις των οχημάτων. Στους διανοιγόμενους από δημόσιες οδούς προς τα έργα δρόμους, η μέγιστη κλίση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 8%. Στους δευτερεύοντες δρόμους, μέσα στο χώρο του έργου, η μέγιστη κλίση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 12%. (*K.M.A.E., Άρθρο 40*). Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στη βέλτιστη μετακίνηση και μεταφορά του εξοπλισμού προς το εκάστοτε εξορυσσόμενο μέτωπο εργασίας. Με το πέρας της προσπέλασης ακολουθεί η αποκάλυψη του κοιτάσματος. Σημαντικό ρόλο στην αποκάλυψη διαδραματίζει το κόστος των εργασιών αποκάλυψης και της αβεβαιότητας που αφορά την αποληψιμότητα, ποιότητα και έκταση του κοιτάσματος. Τα στεία υπερκείμενα πετρώματα σε μια υπαίθρια εκμετάλλευση πρέπει να απομακρυνθούν με τη μέθοδο διάτρησης-ανατίναξης, που πραγματοποιείται με κατάλληλα εκρηκτικά για αποφυγή ρωγμάτων του υπερκείμενου μαρμάρου.

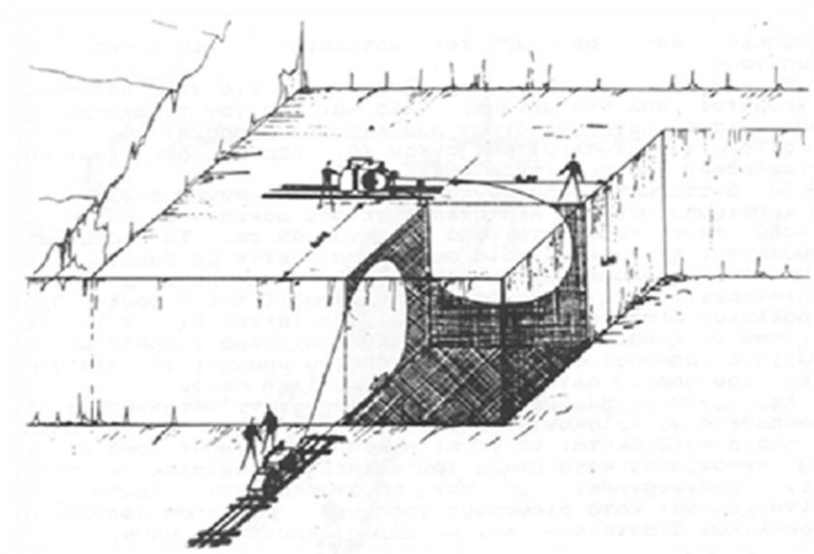
Η διάτρηση ακολουθείται από τη μεταφορά των στείρων σε περιοχή απόθεσης αγόνων. Κατά την προετοιμασία των μετώπων εξόρυξης πρέπει να προσδιοριστούν οι επιφάνειες καθώς και οι ασυνέχειες που ορίζουν τις διαστάσεις των όγκων. Το πρόσωπο που δημιουργείται στην φάση της αποκάλυψης, το μουρέλο που αποτελεί το μέτωπο της εξορυσσόμενης σειράς ογκομαρμάρων και το κεφάλι που έχει σχηματιστεί από την εξόρυξη του διπλανού όγκου είναι οι τρεις ελεύθερες επιφάνειες για την απόσπαση του όγκου από το μητρικό πέτρωμα.

Η εκμετάλλευση στα μέτωπα παραγωγής γίνεται με την χρήση ορθών βαθμίδων. Οι βαθμίδες παραγωγής έχουν ύψος 2m έως 7m το μέγιστο και πλάτος κατάλληλο ώστε να μπορεί να γίνει η ανατροπή του μαρμάρου καθώς και η μεταφορά του στην πλατεία. Σε όλες τις φάσεις εκμετάλλευσης, η γωνία πρανούς της εκμετάλλευσης ενός υπαίθριου λατομείου μαρμάρου σύμφωνα με τον Κ.Μ.Λ.Ε. πρέπει να είναι μέχρι 60 μοίρες αλλά μπορεί να αυξηθεί μέχρι τις 70 μοίρες αν πληροί κάποιες απαραίτητες προδιαγραφές (*Άρθρο 83*) (*Σχήμα 1.3*).



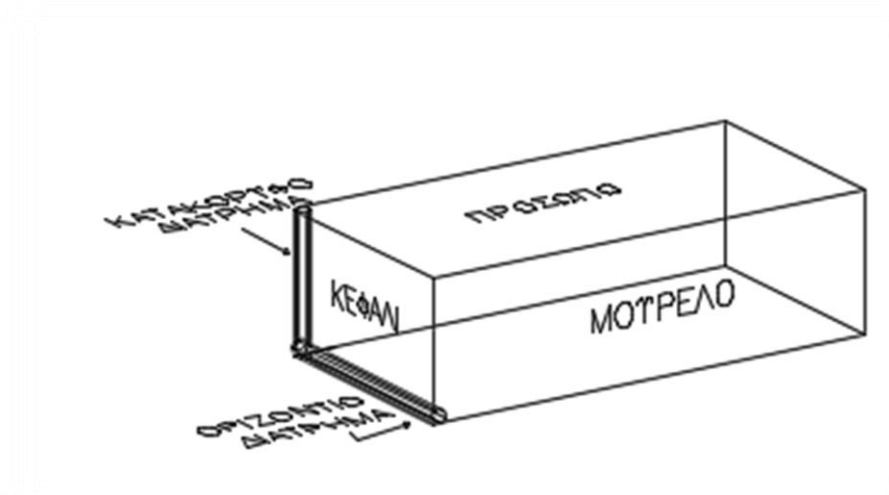
Σχήμα 1.3: Μεταβολή κλίσης πρανούς από μια ενδιάμεση φάση στην τελική

Η αποκόλληση του εξορυσσόμενου όγκου γίνεται με την χρήση μηχανημάτων αδαμαντοφόρου συρματοκοπής και με αλυσοπρίονα (*Εικόνα 1.2*). Η συρματοκοπή αποτελείται από σύρμα ανοξείδωτου χάλυβα διαμέτρου 5 mm όπου πάνω του είναι περασμένος ένας αριθμός κοπτικών σωμάτων 10 mm. Τα σώματα αυτά αποτελούνται από χαλύβδινο πυρήνα που έχει τοποθετηθεί πάνω του σκόνη διαμαντιών.



Εικόνα 1.2: Αποκόλληση με την χρήση συρματοκόπης (Εξαδάκτυλος, 2006)

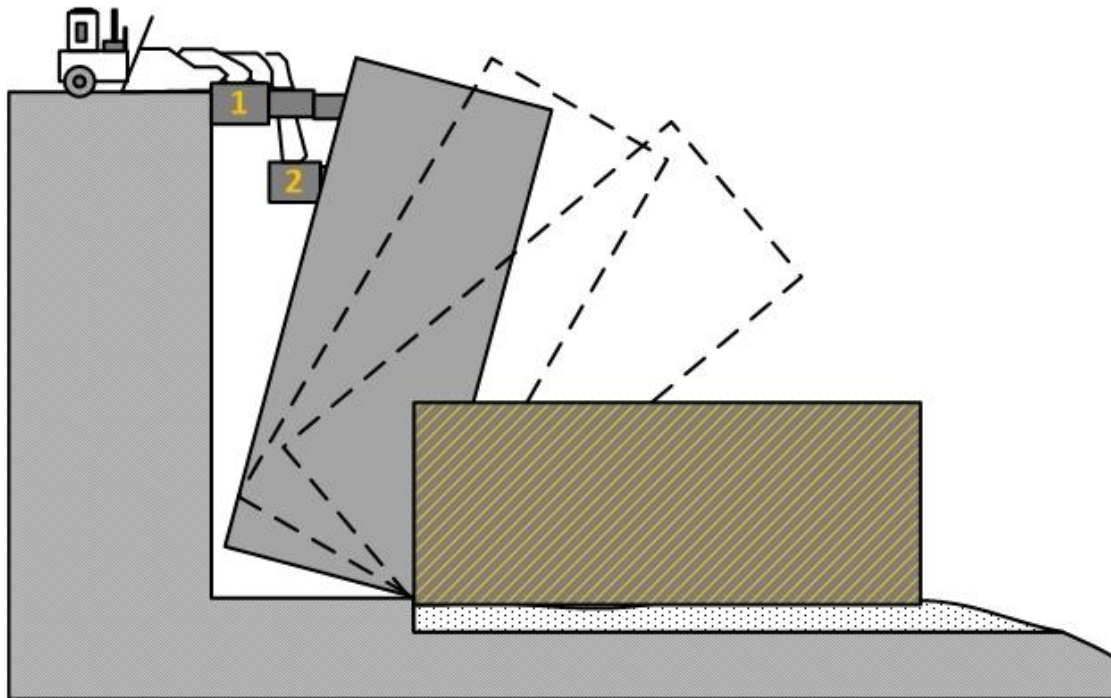
Το σύρμα εισέρχεται σε δύο διατρήματα, ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους. (Σχήμα 1.4). Στην συνέχεια συνδέεται με τον κινητήριο μηχανισμό που είναι τοποθετημένος σε ειδικές σιδηροτροχιές και λόγω της περιστρεφόμενης τροχαλίας και της μεγαλύτερης σκληρότητας του σύρματος από το μάρμαρο, αποκόπτει την επιφάνεια από το μητρικό πέτρωμα.



Σχήμα 1.4: Διατρήματα για την συρματοκοπή

Τα αλυσοπρίονα είναι μηχανήματα που αποτελούνται από ένα κοπτικό βραχίονα μήκους 1m έως 4m. Στο βραχίονα είναι τοποθετημένη η αλυσίδα κοπής που φέρει κοπτικά άκρα από χάλυβα, απόστασης 5-10cm μεταξύ τους ή από συνθετικό διαμάντι. Ο βραχίονας αυτός κινείται με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιεί κοπή σε οριζόντιο αλλά και σε κάθετο επίπεδο.

Μετά την αποκοπή ο εξορυσσόμενος όγκος ανατρέπεται με τη βοήθεια γρύλλου ή εκσκαφέα, ανεστραμμένου κάδου με εκσκαπτικό εργαλείο Ripper αφού πρώτα έχει τοποθετηθεί στείο υλικό στο σημείο που θα ανατραπεί, για την αποφυγή της διάσπασης του σε μικρότερους όγκους (Εικόνα 1.3). Τέλος μεταφέρεται με κατάλληλα μηχανήματα στην πλατεία που είναι ο χώρος εναπόθεσης των μαρμάρινων όγκων. Αν οι διαστάσεις του όγκου δεν επιτρέπουν την μεταφορά του τότε τεμαχίζεται σε μικρότερους όγκους και έπειτα μεταφέρεται.



Εικόνα 1.3: Μηχάνημα για την ανατροπή μάρμαρου (Εξαδάκτυλος, 2006)

1.5.2 Υπόγεια εκμετάλλευση

Στην υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου εφαρμόζεται η μέθοδος θαλάμων και στύλων κανονικής ή ακανόνιστης διάταξης. Το μαρμαροφόρο κοίτασμα χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια των ασυνεχειών και ατελειών με αποτέλεσμα την ακανόνιστη διάταξη των στύλων στο κοίτασμα (Εικόνα 1.4). Τις θέσεις των στύλων στο χώρο καθορίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος (χρώμα, ανισοτροπία κ.α.) όπως αυτά προκύπτουν κατά την προπαρασκευή του, η οποία έχει διερευνητικό χαρακτήρα σε συνδυασμό με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της οροφής και το βάθος του κοιτάσματος από την επιφάνεια (Εξαδάκτυλος, 2006).



Εικόνα 1.4: Στοές για υπόγεια εκμετάλλευση

Η υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου προϋποθέτει τη χρήση συγκεκριμένου εξοπλισμού, ειδικό αλυσοπρίονο ή και αδαμαντοφόρο συρματοκοπή, για την εξόρυξη του μαρμάρου από τη φυσική του θέση. Η εκμετάλλευση με χρήση αλυσοπρίονου πραγματοποιείται απουσία διατρητικού μηχανήματος πλεονεκτώντας στην εξάλειψη δονήσεων για αποφυγή τυχόν ρωγμάτων του περιβάλλοντος μαρμάρου ενώ παράλληλα επιτρέπει τον περιορισμό στείρων αποθέσεων (*Εικόνα 1.5*).



Εικόνα 1.5: Εξόρυξη με αλυσοπρίονο

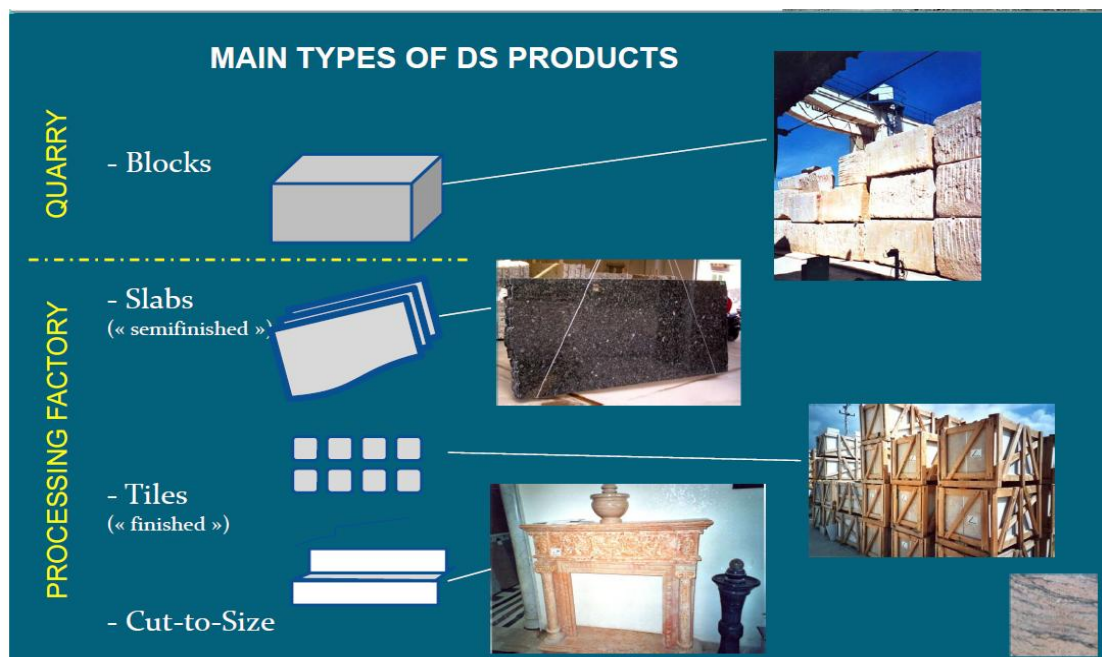
1.6 Επεξεργασία μαρμάρου

Ανεξάρτητα με τον τρόπο εκμετάλλευσης του μάρμαρου (υπαίθρια ή υπόγεια εκμετάλλευση) η επεξεργασία του μαρμάρου στα σχιστήρια είναι κοινή.

Αρχικά γίνεται ο ορθογωνισμός των ακανόνιστων όγκων με τη χρήση μονόλαμου, λάμα με αδαμαντοφόρα κοπτικά άκρα που κινείται παλινδρομικά, με μονόσυρμα, άτεμνο σύρμα και με την χρήση κόφτη που αποτελείται από δίσκο με διάμετρο έως 3,5 μέτρα που περιμετρικά φέρει αδαμαντοφόρα κοπτικά άκρα.

Το δεύτερο στάδιο είναι το σχίσιμο των ογκομαρμάρων για την παραγωγή ενδιάμεσων προϊόντων. Πραγματοποιείται με τη μέθοδο κοπής με λάμες σε τελάρο και κοπής με περιστρεφόμενο αδαμαντοφόρο δίσκο. Τα τελάρα διαθέτουν παράλληλες κοπτικές λάμες σε απόσταση κατάλληλη για να φέρουν μαρμάρινες πλάκες 2-3 cm. Το σχίσιμο με δίσκο γίνεται με μηχανήμα που αποτελείται από έναν ή περισσότερους παράλληλους κατακόρυφους δίσκους και ένα οριζόντιο.

Στο τελικό στάδιο καθορίζεται το επιθυμητό σχήμα και γίνεται λείανση και στίλβωση του προϊόντος. Η λείανση είναι απαραίτητη για την ανάδειξη του χρώματος και της λευκότητας του μαρμάρου. Η στίλβωση περιλαμβάνει τον καθαρισμό της επιφάνειας, την απομάκρυνση κάθε είδους λειαντικού υλικού, την επεξεργασία της επιφάνειας με κατάλληλο διάλυμα και τέλος το κέρωμά της.



Εικόνα 1.6: Κύριοι τύποι προϊόντων διακοσμητικών πετρωμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ

2.1 Ασυνέχειες στα μάρμαρα

Με τον όρο ασυνέχειες (discontinuities) θεωρείται κάθε είδους διαχωρισμός της επιφάνειας ενός άρρηκτου πετρώματος. Σε μία εκμετάλλευση μαρμάρου οι ασυνέχειες καθορίζουν σε μέγιστο βαθμό την αποληψιμότητα σε ογκομάρμαρα. Η αποληψιμότητα εμπορεύσιμων όγκων κυμαίνεται σε ένα βιώσιμο λατομείο από 5%-15%. Το υπόλοιπο ποσοστό απορρίπτεται ως στείρο πέτρωμα ή αν υπάρχει οικονομική δυνατότητα εκμεταλλεύεται ως παραπροϊόν. Η αποληψιμότητα αυτή καθορίζεται κυρίως από το δίκτυο των προϋπαρχουσών ασυνεχειών που διασχίζουν το κοίτασμα μαρμάρου. Οι ασυνέχειες αυτές δημιουργήθηκαν σε προηγούμενες φάσεις τεκτονικής παραμόρφωσης ενός κοιτάσματος. Αυτές ταξινομούνται στην πράξη σε διακριτές οικογένειες ασυνεχειών με την μέτρηση του προσανατολισμού τους στο χώρο και εν συνεχεία αποτυπώνονται με τη βοήθεια της στερεογραφικής προβολής.

Οι ασυνέχειες στα πετρώματα και κατ' επέκταση στα μάρμαρα διακρίνονται:

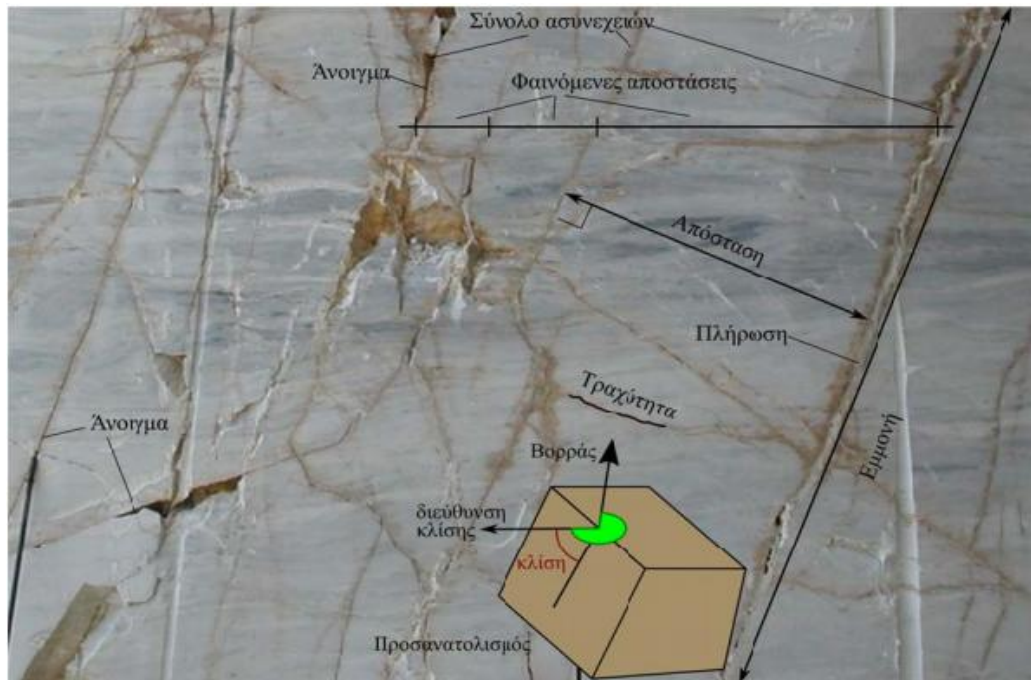
- Στις επιφάνειες στρώσεις, που δημιουργούνται κατά τη διεργασία της ιζηματογένεσης.
- Στις επιφάνειες σχιστότητας, που δημιουργούνται κατά τη μεταμόρφωση του πετρώματος.
- Στο σχισμό, που ορίζεται ως η ιδιότητα ενός ορυκτού να σχίζεται σε συγκεκριμένα επίπεδα.
- Στα ρήγματα, που προέρχονται από τεκτονικές κινήσεις και μετατοπίζονται
- Στις διακλάσεις, που προέρχονται και αυτές από τεκτονικές κινήσεις αλλά δεν λαμβάνουν μετατόπιση.
- Στις ρωγματώσεις, που δεν σχετίζονται με τον τεκτονισμό αλλά με παράγοντες όπως μεταβολές της θερμοκρασίας, εκρήξεις κ.α.

2.2 Περιγραφή ασυνεχειών

Τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής (I.S.R.M. 1981) είναι τα εξής (Σχήμα 2.1):

- 1) προσανατολισμός (orientation)
- 2) απόσταση (spacing)

- 3) εμμονή (persistence)
- 4) αντοχή τοιχωμάτων (wall strength)
- 5) τραχύτητα (roughness)
- 6) άνοιγμα (aperture)
- 7) υλικό πλήρωσης (filling)
- 8) συνθήκες υπογείου νερού (seepage)



Σχήμα 2.1: Παράμετροι ασυνεχειών σε επιφάνεια μαρμάρου (Νομικός, 2015)

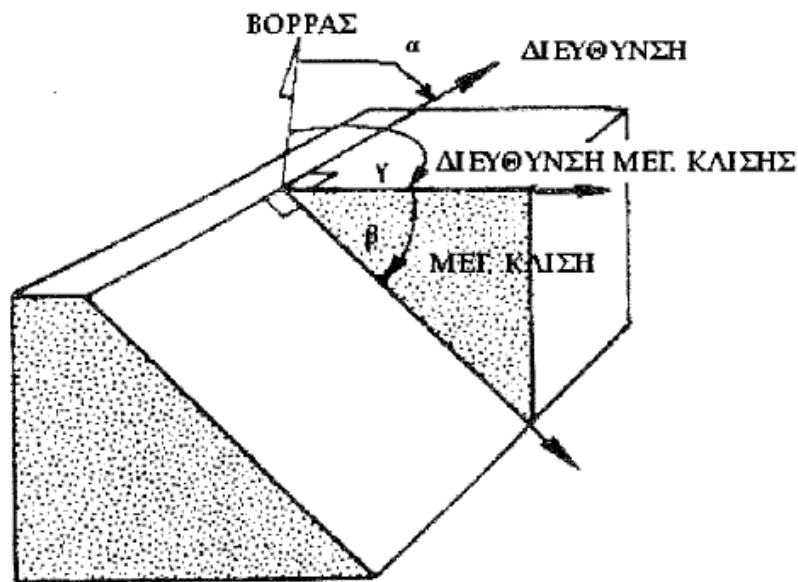
Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σχετίζονται κυρίως με την ευστάθεια της βραχώδους. Κατά την εξόρυξη μαρμάρου θα πρέπει να αξιολογηθούν όλα τα χαρακτηριστικά διότι επηρεάζουν την ασφάλεια του λατομείου. Όμως πολλές από αυτές τις ιδιότητες με κυριότερες (την απόσταση των ασυνεχειών, τον προσανατολισμό, την εμμονή) παρέχουν δεδομένα και για την αποληψιμότητα του μαρμάρου. Οι ασυνέχειες που παρουσιάζουν παρόμοιο προσανατολισμό, κοινές μηχανικές ιδιότητες, ίδια ηλικία και κοινό τρόπο γένεσης και που σχετίζονται με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά ομαδοποιούνται και εντάσσονται σε συστήματα ασυνεχειών (discontinuity sets).

2.2.1 Προσανατολισμός (orientation)

Οι ασυνέχειες που παρουσιάζει ένας βραχώδης σχηματισμός δεν είναι επίπεδες αλλά θεωρούνται επίπεδες για την καταγραφή του προσανατολισμού στο χώρο. Για την εύρεση

του πρέπει να προσδιοριστεί η κατεύθυνση και η διεύθυνση των ασυνεχειών. Τα κύρια στοιχεία που προσδιορίζονται είναι τα εξής (Σχήμα 2.2):

- Η διεύθυνση της ασυνέχειας (Strike), δηλαδή η τομή του επιπέδου της ασυνέχειας με το οριζόντιο επίπεδο. Για τη μέτρηση της διεύθυνσης αυτής, το μέτρο που χρησιμοποιείται είναι η γωνία που σχηματίζει η σχετική τομή με το βορρά (γωνία α).
- Η μέγιστη κλίση (Dip), δηλαδή η μέγιστη γωνία του επιπέδου της ασυνέχειας με το οριζόντιο επίπεδο (γωνία β).
- Η διεύθυνση (φορά) μέγιστης κλίσης (dip direction), δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η τομή του επιπέδου της μέγιστης κλίσης με το οριζόντιο επίπεδο και το βορρά (γωνία γ) (Ρόζος, 2007).



Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός των διευθύνσεων των ασυνεχειών (Ρόζος, 2007)

Η μέτρηση των παραπάνω γωνιών γίνεται με χρήση γεωλογικής πυξίδας που είναι βασικό «εργαλείο» για τη μέτρηση στοιχείων των επιπέδων γεωλογικών επιφανειών (στρώση, σχιστότητα, σχισμός, επωθήσεις, ρήγματα, διακλάσεις κ.λπ.) καθώς και στοιχείων γραμμικών δομών (άξονες πτυχών, τεκτονικές γραμμώσεις, γραμμές προστριβής κ.λπ.) (Εικόνα 2.1).

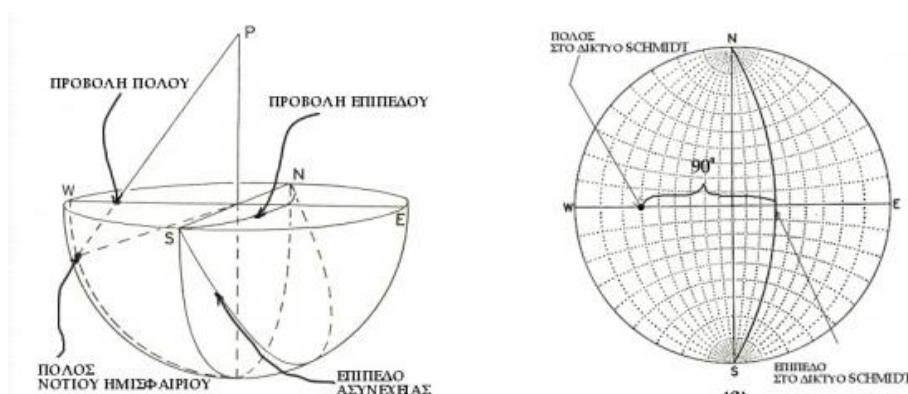


Εικόνα 2.1: Γεωλογική πυξίδα

2.2.1.1 Στερεογραφική προβολή (δίκτυο Schmidt)

Η καλύτερη ανάλυση του προσανατολισμού των ασυνεχειών αποδίδεται με την χρήση στερεογραφικών προβολών. Η ισοεμβαδική προβολή δίκτυο Schmidt χρησιμοποιείται γενικά στη γεωτεχνική μηχανική και ιδιαίτερα στο μάρμαρο διότι αποτυπώνει τις ασυνέχειες και τα επίπεδα.

Το δίκτυο Schmidt προκύπτει από τη στερεογραφική (αζιμουθιακή) προβολή των μεσημβρινών και παραλλήλων κύκλων μιας σφαίρας αναφοράς στο επίπεδο του Ισημερινού της σφαίρας. Για την αποτύπωση του επιπέδου ασυνέχειας χρησιμοποιείται το κάτω ημισφαίριο. Όλα τα επίπεδα ασυνεχειών είναι τοποθετημένα ώστε να περνάνε από το κέντρο της σφαίρας. Το σημείο τομής της κάθετου στο επίπεδο της ασυνέχειας που ξεκινάει από το κέντρο της σφαίρας με το νότιο ημισφαίριο είναι το σημείο πόλου.. Η αποτύπωση του πόλου χρειάζεται για τον εντοπισμό διαφορετικών οικογενειών ασυνεχειών. (Σχήμα 2.3).

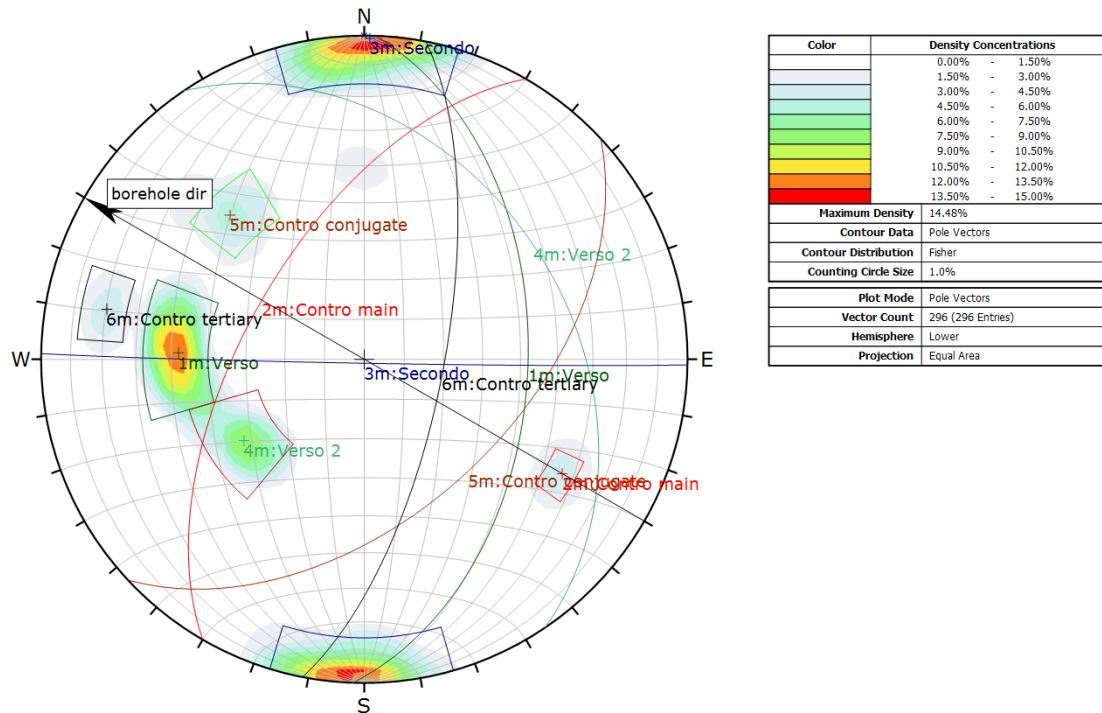


Σχήμα 2.3: Κυκλογραφική-πολική προβολή και στη στερεογραφική προβολή επιπέδου ασυνέχειας (Phillips, 1979)

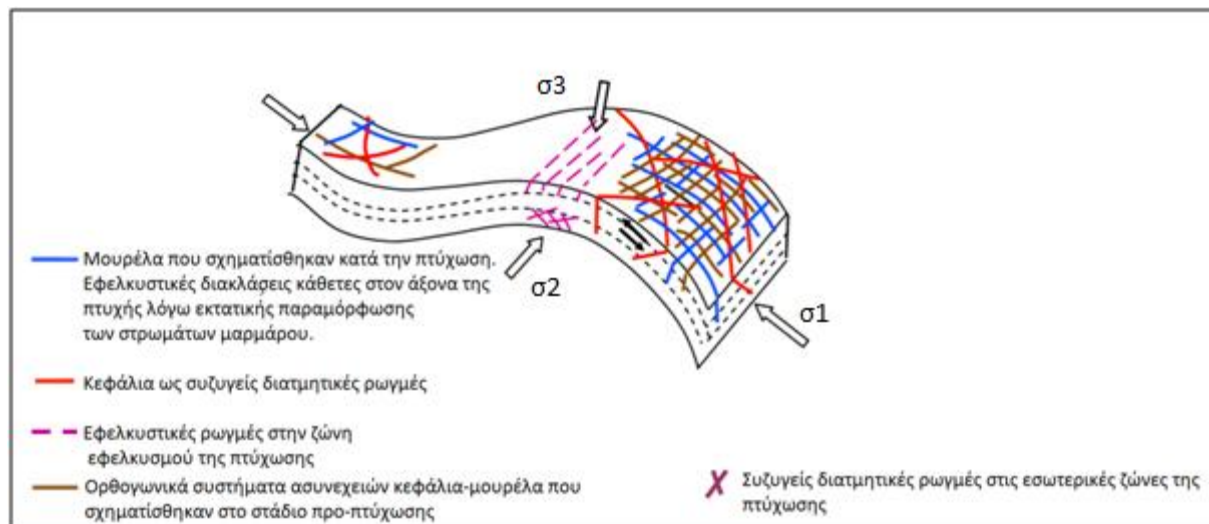
Σύμφωνα με το Σχήμα 2.4 η στερεογραφική προβολή μιας ασυνέχειας, που διέρχεται από την αρχή των αξόνων έχει τη μορφή κυκλικού τόξου πάνω στο επίπεδο του Ισημερινού

Με την χρήση του προγράμματος Dips στον ηλεκτρονικό υπολογιστή εισάγονται οι μετρήσεις (κλίση, κλίση διεύθυνσης) και καταγράφονται οι αντίστοιχοι πόλοι. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης εκτός της διεύθυνσης κλίσης και της κλίσης και άλλων χαρακτηριστικών μιας ασυνέχειας.

μαρμάρου. Τέλος το σύστημα 6 (contro tertiary) έχει ίδια παράταξη σχεδόν με το verso και το contro αλλά μεγάλη κλίση ($>70^\circ$) και αυτό είναι εφελκυστικές ρωγμές που μπορεί να σχηματίσθηκαν στην-πτυχωτική φάση. Ουσιαστικά λοιπόν τα κύρια συστήματα είναι τρία, το verso, το contro και το secondo που εμφανίζονται ως έξι λόγω της πτύχωσης. Όλα αυτά εξηγούνται σχηματικά με το μοντέλο πτυχωμένου στρώματος που φαίνεται στο (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.5: Συγκέντρωση των πόλων 3 συστημάτων ασυνεχειών στο στερεογραφικό διάγραμμα (προβολή στο κάτω ημισφαίριο)



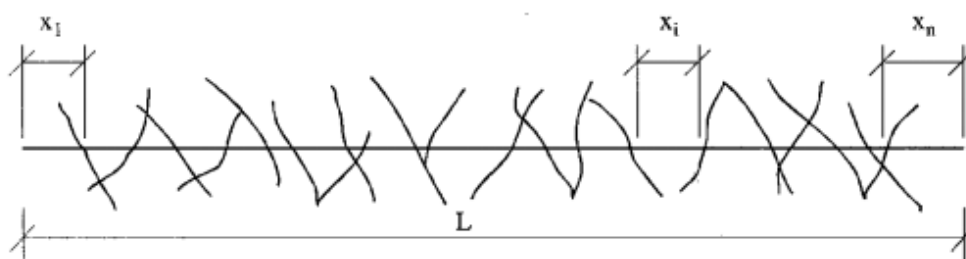
Σχήμα 2.6: Συστήματα ασυνεχειών που σχηματίζονται σε πτυχωμένα στρώματα μαρμάρων

2.2.2 Απόσταση (spacing)

Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών είναι βασικός παράγοντας αφού επηρεάζει το βαθμό κατακερματισμού της βραχομάζας και καθορίζει τις διαστάσεις των τεμαχιδίων. Για τη μέτρηση της απόστασης απαιτούνται πυρήνες γεωτρήσεων ή επιφάνειες πετρωμάτων που έχουν αποκαλυφθεί.

Οι αποστάσεις των ασυνεχειών δεν έχουν καθορισμένες τιμές αλλά κυμαίνονται εντός ενός εύρους τιμών. Η στατιστική επεξεργασία μετρήσεων της απόστασης των ασυνεχειών για μία συγκεκριμένη βραχομάζα συχνά οδηγεί στην προσαρμογή κάποιας στατιστικής κατανομής στα δεδομένα που συλλέχθηκαν. Οι θεωρητικές κατανομές που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των αποστάσεων των ασυνεχειών είναι η Αρνητική εκθετική (negative exponential), η Ομοιόμορφη (Uniform) και η Γκαουσιανή (Normal) με επικρατέστερη στη διεθνή βιβλιογραφία την αρνητική εκθετική κατανομή που προτάθηκε από τους Priest & Hudson (1976, 1981).

Στην περίπτωση δειγματοληπτικής γεώτρησης για την εύρεση του βαθμού κατακερματισμού του πετρώματος σε πρώτο στάδιο πραγματοποιείται μέτρηση των αποστάσεων των ασυνεχειών πάνω στην δειγματοληπτική γεώτρηση και καταγράφονται οι συχνότητες των ασυνεχειών (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Αποστάσεις μεταξύ των ασυνεχειών σε γραμμή δειγματοληψίας (Hudson and Harrison, 1997)

Επομένως προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{συχνότητα ασυνεχειών } \lambda = \frac{N}{L} (m^{-1})$$

και

$$\text{απόσταση } \bar{\lambda} = \frac{L}{N} (m)$$

Όπου (λ) η συχνότητα ασυνεχειών, (N) αριθμός ασυνεχειών, (L) μήκος δειγματοληψίας και ($\bar{\lambda}$) απόσταση.

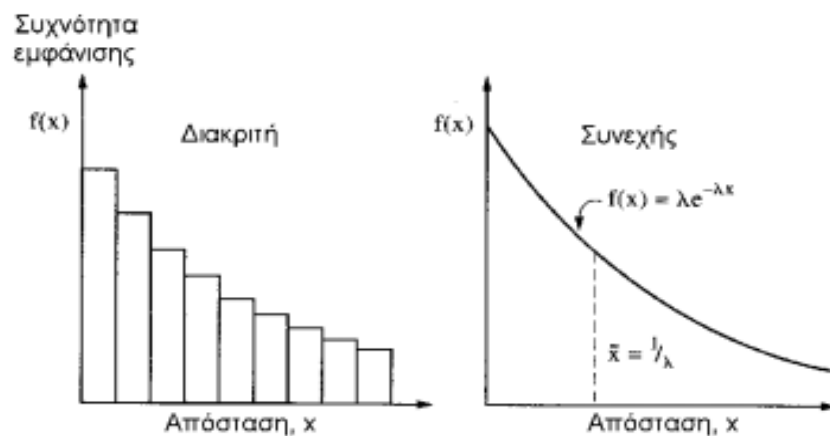
Όταν ο αριθμός μετρήσεων είναι μεγαλύτερος από 200 μετρήσεις (John A. Hudson and John P. Harrison), το ιστόγραμμα των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών προσεγγίζεται συνήθως ικανοποιητικά από μία αρνητική εκθετική κατανομή. (Σχήμα 2.8)

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της αρνητικής εκθετικής κατανομής δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

όπου:

- $f(x)$ = η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας
- x = η πραγματική απόσταση ασυνεχειών
- λ = η συχνότητα των ασυνεχειών



Σχήμα 2.8: Η αρνητική εκθετική κατανομή των τιμών απόστασης των ασυνεχειών (Σοφιανός και Νομικός, 2008)

Η αθροιστική κατανομή αποστάσεων ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας δίνεται από τον εξής τύπο:

$$F(x) = \int_0^x f(\xi) d\xi = \int_0^x \lambda e^{-\lambda \xi} d\xi = \left[-e^{-\lambda \xi} \right]_0^x = 1 - e^{-\lambda x}$$

Οι αποστάσεις που μετριοούνται πάνω στην γραμμή δειγματοληψίας είναι οι φαινόμενες αποστάσεις και πρέπει να διορθωθούν.

Οι διορθώσεις των αποστάσεων προκύπτουν με βάση τον τύπο των Hudson and Priest (1983)

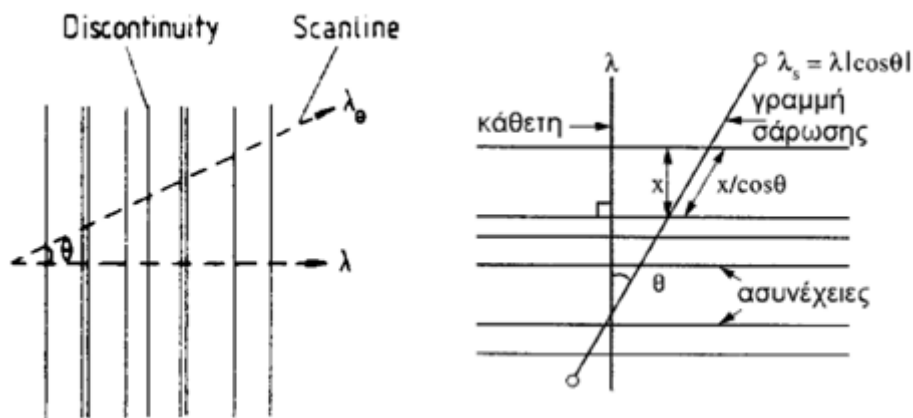
$$x = x' * \cos \theta$$

όπου,

- x = πραγματική απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών
- x' = φαινόμενη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών που μετράται πάνω στο καρότο της δειγματοληπτικής γεώτρησης
- θ = γωνία που σχηματίζει η γεώτρηση με την κάθετη ευθεία στις παράλληλες ασυνέχειες μιας οικογένειας

Με βάση τη διόρθωση των αποστάσεων προκύπτει κατά τον ίδιο τρόπο και η διόρθωση της φαινόμενης συχνότητας. (Σχήμα 2.9)

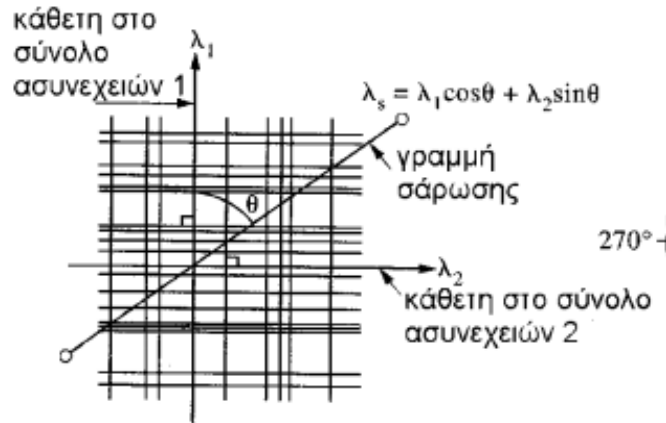
$$\lambda_{\theta} = \lambda * \cos \theta$$



Σχήμα 2.9: Μεταβολή της συχνότητας ασυνεχειών για γραμμή δειγματοληψίας διερχόμενης από ένα σύνολο ασυνεχειών (Hudson & Harrison, 1997)

Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο κάθετα μεταξύ τους σύνολα παράλληλων επιπέδων ασυνεχειών με συχνότητες ασυνεχειών λ_1 και λ_2 η τιμή της λ_s κατά μήκος της γραμμής σάρωσης μεταξύ δύο επιπέδων ασυνεχειών με οξεία γωνία θ από τον άξονα της συχνότητας λ_1 είναι το σύνολο της συνεισφοράς: (Σχήμα 2.10)

$$\lambda_s = \lambda_1 / \cos \theta + \lambda_2 / \sin \theta$$



Σχήμα 2.10: Μεταβολή της συχνότητας ασυνεχειών για γραμμή δειγματοληψίας διερχόμενη από δύο σύνολα ασυνεχειών (Hudson & Harrison, 1997)

Ο προσδιορισμός της συχνότητας μιας ασυνέχειας κατά μήκος μια γραμμής σάρωσης μπορεί να επεκταθεί σε τρεις διαστάσεις και σε οποιοδήποτε αριθμό συνόλων ασυνεχειών. Η συχνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot |\cos \theta_i|$$

όπου

- n συνόλων ασυνεχειών
- λ_i η κύρια συχνότητα
- θ_i η οξεία γωνία μεταξύ της καθέτου στο σύνολο και της διεύθυνσης δειγματοληψίας για το σύνολο i .

2.2.2.1 Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος (RQD)

Ο δείκτης ποιότητας πετρώματος (Rock Quality Designation) αναπτύχθηκε από το Deere το 1964 και δηλώνει το ποσοστό των αδιατάρακτων τεμαχιδίων του πετρώματος μήκους μεγαλύτερου των $t = 0,1m$ στο συνολικό μήκος διάτρησης με πυρηνοληψία όπου μαθηματικά εκφράζεται:

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i(t > 0,1m)}{L} \right)$$

Όπου,

- n ο αριθμός των μετρούμενων αποστάσεων

- L το μήκος της γραμμής δειγματοληψίας

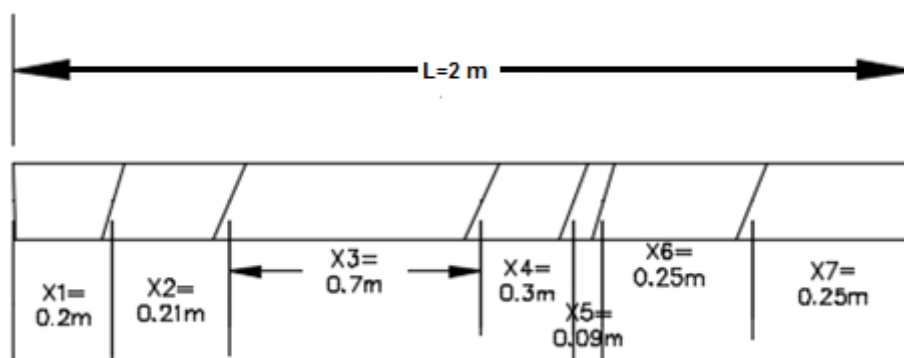
Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του πετρώματος με βάση το δείκτη ταξινόμησης RQD δίνεται στον παρακάτω πίνακα: (Πίνακας 2.1)

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση του πετρώματος με βάση το RQD (Bieniawski, 1984)

Δείκτης RQD	Χαρακτηρισμός του Πετρώματος
90-100	πολύ καλό
75-90	Καλό
50-75	Μέτριο
25-50	Κακό
<25	πολύ κακό

Οι Deere & Deere (1989) για την εύρεση τιμής RQD προτείνουν ως κατάλληλο μήκος πυρηνοληψίας μικρότερο του 1,5 m και ανώτατο τα 3m.

Ένα τυπικό παράδειγμα για τον υπολογισμό του RQD δίνεται στο παρακάτω (Σχήμα 2.11):



Σχήμα 2.11: Υπολογισμός RQD

Όπου φαίνεται στο Σχήμα 2.11:

- L=2m μήκος δειγματοληψίας
- $x_1=0.2m$, $x_2=0.21m$, $x_3=0.7m$, $x_4=0.3m$, $x_5=0.09m$, $x_6=0.25m$, $x_7=0.25m$

οι αποστάσεις μεταξύ ασυνεχειών

Άρα

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i(t > 0,1m)}{L} \right) = 100 \frac{0,2m + 0,21m + 0,7m + 0,3m + 0,25 + 0,25m}{2m} = 95\%$$

Συμφώνα με τον Πίνακα 2.1 το 95% χαρακτηρίζεται ως πολύ καλό.

Το RQD δίνεται να υπολογισθεί για την συνεχή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(x)$ ως :

$$RQD^* = 100 \cdot \frac{1}{L} \int_{x=0.1}^{x=\infty} N \cdot x \cdot f(x) \cdot dx = 100 \cdot \lambda \int_{x=0.1}^{x=\infty} x \cdot f(x) \cdot dx$$

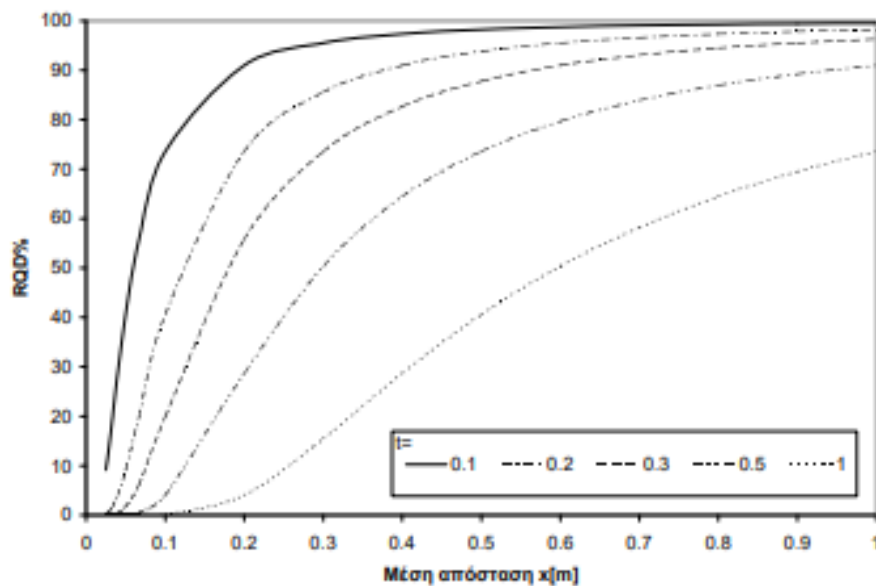
Από την επίλυση του ολοκληρώματος για την αρνητική εκθετική κατανομή προκύπτει:

$$RQD^* = 100 \cdot \lambda^2 \int_{x=0.1}^{x=\infty} x \cdot e^{-\lambda x} \cdot dx = 100(0.1\lambda + 1)e^{-0.1\lambda}$$

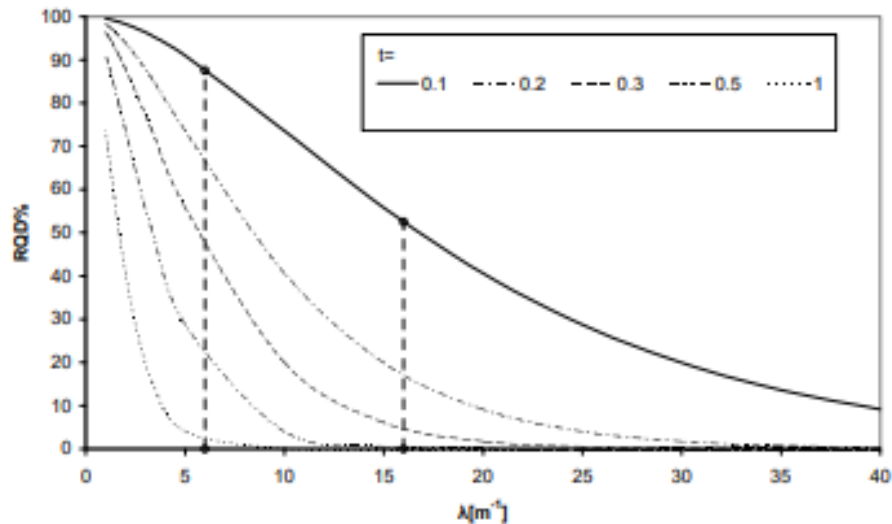
Προκείμενου να ξεπεραστεί η αδυναμία ευαισθησίας του RQD^* για την διάταξη ασυνεχειών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη τιμή αφετηρίας t , αντί για τη συμβατή τιμή $t=0.1m$. Σε αυτήν την περίπτωση ο γενικός τύπος για το RQD^* είναι ο εξής:

$$RQD^* = 100(\lambda t + 1)e^{-\lambda t}$$

Η σχέση του RQD^* με την μέση απόσταση ασυνεχειών, καθώς και η σχέση RQD^* με την συχνότητα των ασυνεχειών για αρνητική εκθετική κατανομή των τιμών απόστασης, δίνεται στα παρακάτω σχήματα.



(α)



(β)

Σχήμα 2.12: (α) η σχέση του RQD^* με την μέση απόσταση ασυνεχειών, (β) η σχέση του RQD^* με την συχνότητα ασυνεχειών (Σοφριανός και Νομικός, 2008)

Το RQD είναι ένας πολύ σημαντικός δείκτης που εφαρμόζεται στη γεωτεχνική έρευνα μη λαμβάνοντας παραμέτρους όπως τον προσανατολισμό ασυνεχειών, την τραχύτητα, την εξαλλοίωση των επιφανειών, το υλικό πλήρωσης και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Οι ελλείψεις δημιούργησαν την απαίτηση για ανάπτυξη άλλων συστημάτων όπως το σύστημα ταξινόμησης Q, RMR (Rock Mass Rating) κ.ά.

Ο δείκτης ποιότητας Q ή ταξινόμηση NGI αναπτύχθηκε από τους Barton, Lien Lunde, 1974 και περιλαμβάνει έξι παραμέτρους στον τύπο της:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

όπου,

RQD, είναι ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος

J_n , είναι ο δείκτης του αριθμού των συστημάτων ασυνεχειών

J_r , είναι ο δείκτης τραχύτητας των ασυνεχειών

J_a , είναι ο δείκτης εξαλλοίωσης του επιπέδου αδυναμίας

J_w , είναι ο δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες

SRF, είναι ο συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος

Η τελική ποιότητα της βραχομάζας Q, είναι το γινόμενο των τριών λόγων. Ο πρώτος λόγος (RQD/J_n) αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συνιστούν τη βραχομάζα, ο δεύτερος λόγος (J_r/J_a) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών και ο τρίτος λόγος (J_w/SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχομάζα (Αγιουτάντης, 2001).

2.2.3 Εμμονή (persistence)

Με τον όρο εμμονή εννοείται η έκταση που έχει μια ασυνέχεια μέσα στην βραχομάζα. Είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους διότι όσο η εμμονή των ασυνεχειών εκτείνεται σε μεγάλο μήκος τόσο επιδεινώνει τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Σύμφωνα με την I.S.R.M. (1981) η κατάταξη της εμμονής των ασυνεχειών δίνεται στον παρακάτω *Πίνακα 2.2*:

Πίνακας 2.2: Κατάταξη εμμονής των ασυνεχειών

πολύ μικρή	< 1 m
Μικρή	1-3 m
Μέτρια	3-10 m
Μεγάλη	10-20 m
πολύ μεγάλη	> 20 m

2.2.4 Αντοχή τοιχωμάτων (wall strength)

Σημαντική παράμετρος είναι και η αντοχή των τοιχωμάτων που είναι συνάρτηση του βαθμού αποσάθρωσης. Για τη μέτρηση της αντοχής των τοιχωμάτων χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια η σφύρα Schmidt τύπου L. Λαμβάνονται πολλές μετρήσεις και εκτιμάται ο μέσος όρος. Υπάρχει νομόγραμμα όπου ανάλογα με τη γωνία προσέγγισης της επιφάνειας κατά τη μέτρηση και την ένδειξη υπολογίζεται η αντοχή σε MPa. (*Ρόζος, 2007*)

2.2.5 Τραχύτητα (roughness)

Με τον όρο τραχύτητα, που είναι πολύ σημαντική για την αντοχή σε διάτμηση της βραχομάζας εννοούνται οι τύποι ανωμαλίας της επιφάνειας της ασυνέχειας διότι οι ασυνέχειες σχεδόν ποτέ δεν είναι λείες και επίπεδες στο χώρο. Η τραχύτητα χαρακτηρίζεται από μια μεγάλου μήκους κυμάτωση (waviness), αλλά και μια μικρότερης έκτασης ανωμαλία, δηλαδή μικροτραχύτητα (asperity).(*Σχήμα 2.13*)



Σχήμα 2.13: Κυμάτωση και μικροτραχύτητα στην επιφάνεια μιας ασυνέχειας (Ρόζος, 2007)

2.2.6 Άνοιγμα (aperture)

Άνοιγμα μιας ασυνέχειας θεωρείται η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων της. Το άνοιγμα μπορεί να προκληθεί είτε από φυσικά αίτια (αποσάθρωση, εκτόνωση τάσεων) είτε από ανθρώπινους παράγοντες (χρήση εκρηκτικών).

Ανάλογα με το άνοιγμα διακρίνονται σε:

- Πολύ κλειστές (<0,1 mm)
- Κλειστές (0,1-0,25 mm)
- Μερικά ανοιχτές (0,25-0,50 mm)
- Ανοιχτές (0,50-2,5 mm)
- Μέτρια ευρείες (2,5-10 mm)
- Ευρείες (>10mm)
- Πολύ ευρείες (1-10 cm)
- Εξαιρετικά ευρείες (10-100 cm)
- Σπηλαιώδεις (>100 cm)

2.2.7 Υλικό πλήρωσης (filling)

Το υλικό πλήρωσης είναι το ορυκτό υλικό (π.χ. ασβεστίτης) που εισχωρεί στο άνοιγμα μια ασυνέχειας. Το πάχος και η σύσταση του σε συνδυασμό με την τραχύτητα της ασυνέχειας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αντοχή.

2.2.8 Συνθήκες νερού (seepage)

Η παρουσία νερού επιφέρει διάφορες φυσικοχημικές διεργασίες όπως αποσάθρωση, διάβρωση και καρστικοποίηση. Κατά συνέπεια η ροή νερού στις ασυνέχειες επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την αντοχή και την ανθεκτικότητα της βραχομάζας.

2.3 Συχνότητα ασυνεχειών στο μάρμαρο (Fracture Frequency)

Για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας με βάση τις ασυνέχειες σε πετρώματα όπως τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται η μέτρηση των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών ή ο δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD), ή η μέτρηση μόνο της συχνότητας των ασυνεχειών ανά μέτρο (m) μήκους πυρήνα (Fracture Frequency).

Σύμφωνα με την τελευταία διαδικασία απαιτείται πυρηνοληπτική γεώτρηση στην οποία γίνεται η μέτρηση του αριθμού όλων των ασυνεχειών ανεξαρτήτως οικογένειας (πρόσωπο, μουρέλο, κεφάλι) σε πυρήνα μήκους 1m. Ανάλογα με το πόσες ασυνέχειες διασχίζουν ένα σταθερό μήκος πυρήνα γίνεται χαρακτηρισμός και από την αντίστοιχη κλάση

FF, για να κατασκευαστεί εν συνεχεία το ογκομετρικό μοντέλο που κάθε όγκος θα αντιστοιχηθεί σε μία από τις 4 κλάσεις όπως φαίνεται στον παρακάτω [Πίνακα 2.3](#). Έτσι όταν χαρακτηριστούν όλοι οι πυρήνες γεωτρήσεων το επόμενο στάδιο είναι η εκτίμηση των αποθεμάτων σε ένα λατομείο μαρμάρου. Ουσιαστικά το FF είναι ένας τροποποιημένος παράγοντας αποθεμάτων και με βάση αυτόν καθορίζεται η αποληψιμότητα σε εμπορεύσιμα ογκομάρμαρα.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηρισμός μάρμαρου με βάση το FF

Fracture Frequency (FF) class	Κατηγορία
0-1.5	A
1.6-3	B
3.1-6	C
6.1-100	Κατακερματισμένο

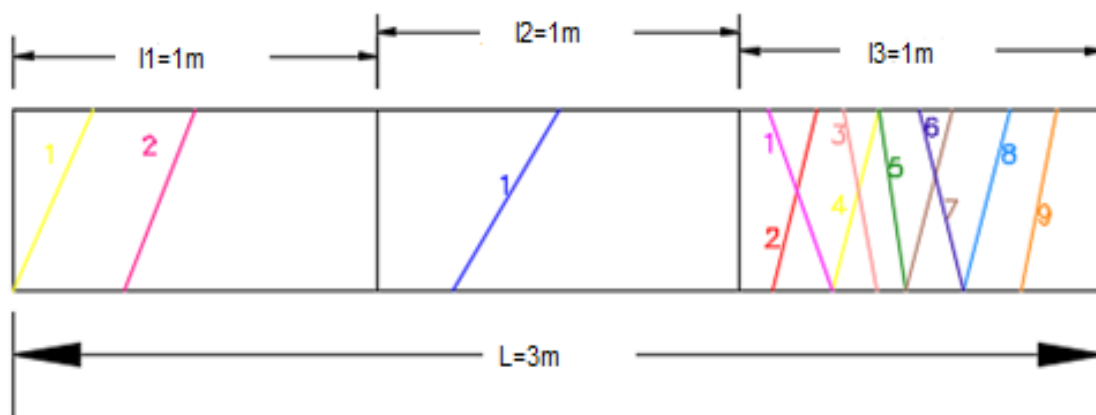
Ένα τυπικό παράδειγμα για την μέτρηση της συχνότητας των ασυνεχειών είναι: Θεωρείται πυρήνας δειγματοληψίας $L=3\text{ m}$ που χωρίζεται σε 3 ίσα μέρη του ενός μέτρου l_1 , l_2 , l_3 όπως φαίνεται στο [Σχήμα 2.14](#).

Με μαθηματικό τύπο:

$$FF = \frac{N}{l}$$

όπου

- N ο αριθμός των ασυνεχειών που συναντάται σε μήκος πυρήνα l ανεξαρτήτως οικογένειας
- $l=1\text{m}$ αλλά μπορεί να είναι οποιοδήποτε άλλο σταθερό μήκος



Σχήμα 2.14: Πυρήνας δειγματοληψίας χωρισμένος κάθε 1 m

Συνεπώς:

- Στο πρώτο μέτρο υπάρχουν 2 (1/m) ασυνέχειες στο μέτρο, Κατηγορία (B)
- Στο δεύτερο μέτρο υπάρχει 1 (1/m) ασυνέχεια στο μέτρο, Κατηγορία (A)
- Στο τρίτο μέτρο υπάρχουν 9 (1/m) ασυνέχειες στο μέτρο και χαρακτηρίζεται ως κατακερματισμένο (ρηγματωμένη ζώνη)

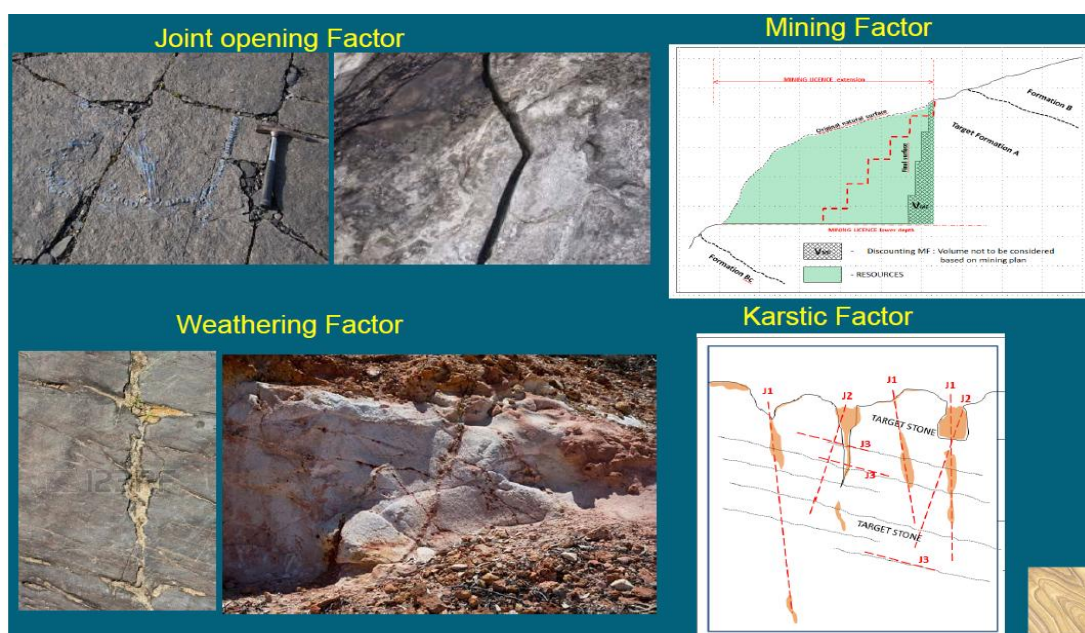
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ

3.1 Εκτίμηση αποθεμάτων

Τα αποθέματα καθορίζουν την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος. Με βάση αυτά θα αποφασιστεί αν ένα κοιτάσμα κρίνεται εκμεταλλεύσιμο ή όχι, καθορίζοντας παράλληλα και το σχεδιασμό της εκμετάλλευσης.

Οι γεωλογικοί και τεκτονικοί παράγοντες που μειώνουν τα αποθέματα εμπορεύσιμων ογκομαρμάρων (modifying factors) φαίνονται στο [Σχήμα 3.1](#), και είναι οι εξής:

- **(Block factor)** Παντός είδους ασυνέχειες με επιμονή από μερικά cm έως μέτρα. Οι αποστάσεις και τα μήκη αυτών των ασυνεχειών καθορίζουν τις γεωμετρικές διαστάσεις των ογκοτεμαχίων.
- **(Joint opening or Karstic factor)** Άνοιγμα των ασυνεχειών (άνοιγμα διακλάσεων και πάχος ισχυρά διατμημένων ζωνών που σχηματίζουν ρήγματα). Καρστικές ζώνες εντός των κοιτασμάτων από διάβρωση ασβεστολικών μαρμάρων
- **(Coloration factor)** Ζώνες με σκούρο χρώμα σε κοιτάσμα λευκού ή ημίλευκων μαρμάρων. Γενικά **commercial factor** που προσδιορίζεται από χρώμα, ιστό, μικροδομή.
- **(Weathering factor)** Ζώνες αποσάθρωσης και διάβρωσης
- **(Mine design factor)** Σχεδιασμός εκμετάλλευσης



Σχήμα 3.1: Μερικοί από τους παράγοντες που μεταβάλλουν το ποσοστό των μεταλλευτικών αποθεμάτων κοιτάσματος διακοσμητικού πετρώματος.

Ο κλάδος που ασχολείται με θέματα όπως το βαθμό μεταβολής της χωρικής διασποράς των σημείων είναι ο επιστημονικός κλάδος της Γεωστατιστικής. Η Γεωστατιστική απαρτίζεται από ένα σύνολο τεχνικών μοντελοποίησης της χωρικής κατανομής φυσικών μεγεθών που θεωρούνται ως τυχαίες μεταβλητές. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δύο στάδια όπως:

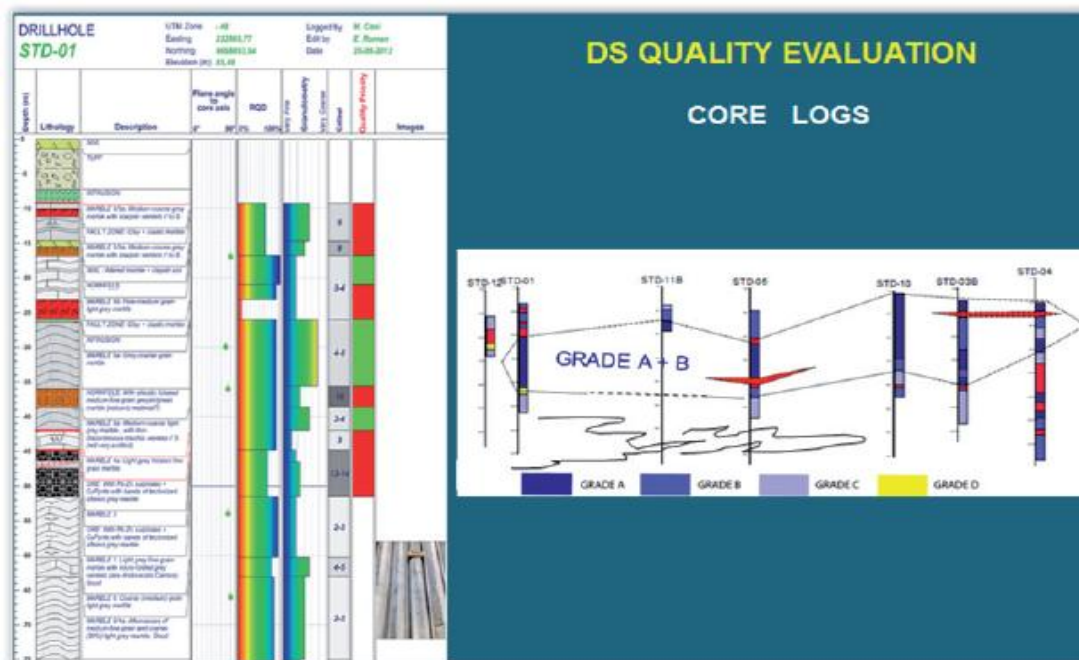
1. Στατιστική ανάλυση των δειγματοληπτικών μετρήσεων κάποιου φυσικού μεγέθους που έχουν περισυλλέγει από μια περιοχή.
2. Παρεμβολή των τιμών των μεγεθών αυτών μεταξύ των σημείων ή περιοχών δειγματοληψίας, με χρήση διαφόρων τεχνικών όπως του πλησιέστερου γείτονα (Nearest neighbor), της δύναμης της αντίστροφης απόστασης (inverse distance) και του Kriging, οι οποίες είναι οι πλέον διαδεδομένες (Σαράτσης, 2004).

Για την εκτίμηση των αποθεμάτων ορύσσονται πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις σε κάναβο και εκτιμώνται η λιθολογία, το χρώμα και άλλες δομικές ή χρωματικές ατέλειες των πυρήνων μαρμάρου. Μετά από τις χαρακτηρισμένες γεωτρήσεις γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ αυτών των ποιοτικών και δομικών χαρακτηριστικών του κοιτάσματος όπως φαίνεται στο [Σχήμα 3.2](#) και εκτιμώνται τα γεωλογικά αλλά και τα μεταλλευτικά αποθέματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιολογήθηκαν οι πυρήνες γεωτρήσεων αναφορικά με τη συχνότητα των ασυνεχειών.

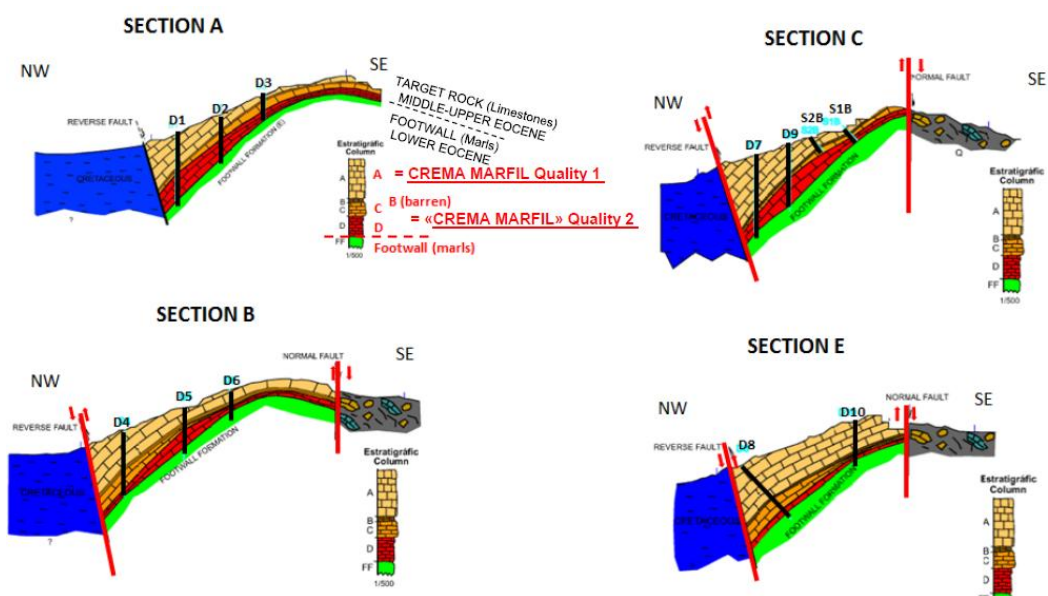
Για την εκτίμηση αποθεμάτων αρχικά απαιτείται η στατιστική ανάλυση των δεδομένων των γεωτρήσεων. Όταν συλλεχθούν όλα τα στοιχεία από τις γεωτρήσεις υπολογίζονται οι βασικές στατιστικές παράμετροι (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, διάμεσος, επικρατούσα τιμή, μέτρο ασυμμετρίας και κύρτωσης) και εξακριβώνεται η θεωρητική κατατομή των στοιχείων των γεωτρήσεων.

Στην συνέχεια γίνεται ο έλεγχος του τύπου της κατανομής με βάση την δημιουργία ιστογραμμάτων σχετικής ή αθροιστικής συχνότητας. Έλεγχος γραφικός για το αν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή μπορεί να γίνει με χρήση των ειδικών διαγραμμάτων κανονικής κατανομής, όπου η καμπύλη αθροιστικής κατανομής αν ακολουθείται η κανονική κατανομή εμφανίζεται ως ευθεία. Οι κατανομές που ακολουθούν συνήθως παράμετροι ποιότητας και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κοιτασμάτων είναι η κανονική και η λογαριθμοκανονική κατανομή.

Σε σπανιότερες περιπτώσεις ακολουθείται κατανομή εκθετική ή Weibull. Στην περίπτωση δεδομένων με κατανομή ασύμμετρη ο πιο συνηθισμένος μετασχηματισμός στα αρχικά δεδομένα είναι ο λογαριθμικός (Γαλετάκης, 2017).



(α)



(β)

Σχήμα 3.2: (α) παραδείγματα παρουσίασης των ποιοτήτων μαρμάρου στις γεωτρήσεις (β) κατασκευή γεωλογικών-κοιτασματολογικών τομών με τις διαφορετικές ποιότητες του διακοσμητικού πετρώματος

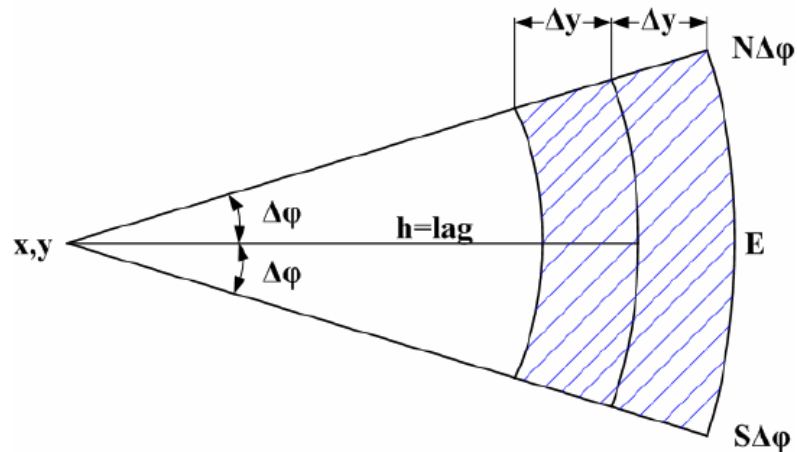
Αφού πραγματοποιηθεί η στατιστική ανάλυση και ο έλεγχος των δεδομένων απαιτείται η εκτίμηση του βαθμού μεταβολής της χωρικής διασποράς των σημείων. Αυτό εκφράζεται μέσω του βαριογράμματος, που δείχνει την μεταβολή της μέσης διαφοράς των τιμών των σημείων (FF), συναρτήσει της απόστασης. Το βαριόγραμμα υπολογίζεται σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$\gamma(h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Όπου

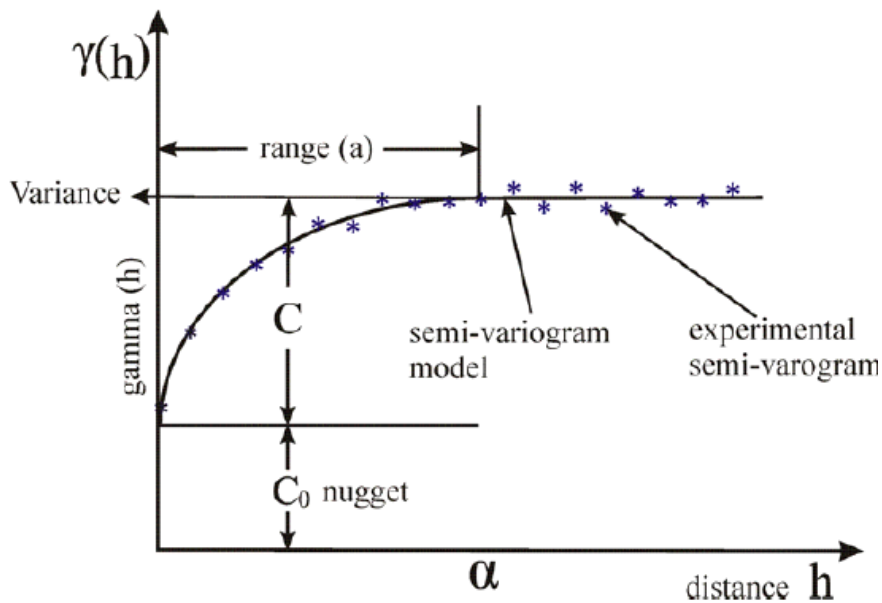
- $\gamma(h)$ η τιμή του βαριογράμματος
- $n(h)$ το άθροισμα των δειγμάτων που απέχουν απόσταση h
- $Z(x_i)$ η τιμή της μεταβλητής (FF) στη θέση x_i
- $Z(x_i+h)$ η τιμή της μεταβλητής (FF) στη θέση x_i+h

Η τιμή της απόστασης $|h|$ είναι διανυσματική και κυμαίνεται μεταξύ ενός εύρους τιμών $h=h \pm \Delta h$. Αυτό συμβαίνει διότι σε πραγματικές συνθήκες τα δεδομένα σπάνια βρίσκονται σε κανονικό κάναβο δειγματοληψίας. Το Δh καθορίζεται σύμφωνα με τον αριθμό δεδομένων. Σε δισδιάστατα μοντέλα η ανίχνευση γίνεται σε ένα τμήμα ενός κύκλου (Σχήμα 3.3). Ενώ σε τρισδιάστατα μοντέλα η ανίχνευση γίνεται σε κωνικό τμήμα μιας σφαίρας.



Σχήμα 3.3: Οι ανοχές της απόστασης (h) και της γωνίας (ϕ) ανίχνευσης των ζευγών των δεδομένων για την κατασκευή ημι-βαριόγραμματος (Σαράτσης, 2004)

Το πειραματικό ημι-βαριόγραμμα, μπορεί να προσδιοριστεί από μια μαθηματική εξίσωση (μοντέλο) (π.χ. σφαιρικό, εκθετικό, κανονικό ή μοντέλο Gauss, μοντέλο Bessel κ.λπ.) της οποίας οι παράμετροι βελτιστοποιούνται για την καλύτερη προσέγγιση του ημι-βαριογράμματος. Οι βασικές παράμετροι που υπολογίζονται από το μαθηματικό μοντέλο ενός ημι-βαριογράμματος είναι το nugget, η οροφή (sill) και η μέγιστη απόσταση επιρροής (range) παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση βασικών χαρακτηριστικών ημι-βαριογράμματος (Σαράτσης, 2004)

Το nugget (C_0) είναι η διασπορά μεταξύ δύο δειγμάτων των οποίων απόσταση είναι μηδενική. Κανονικά η διασπορά αυτή πρέπει να είναι μηδέν αλλά δεν είναι λόγω των σφαλμάτων κατά την δειγματοληψία. Η οροφή είναι το άθροισμα $C_0 + C$. Η καμπύλη $\gamma(h)$ αυξάνεται μέχρι να φτάσει την οροφή, οπότε λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της σε μια απόσταση (μέγιστη απόσταση επιρροής range) που καθορίζει το χώρο εντός του οποίου οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των σημείων είναι χωρικά εξαρτημένες.

3.2 Μέθοδος Kriging

Η μέθοδος Kriging πήρε το όνομα της από τον Νοτιοαφρικανό μηχανικό μεταλλείων D. G. Krige, ο οποίος το 1950 βασίστηκε σε δεδομένα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (περιεκτικότητα χρυσού) σε κάναβο και υπολόγισε τα αποθέματα κοιτασμάτων χρυσού στην Νότια Αφρική. Ως εκ τούτου θεωρείται πρωτοπόρος στην εφαρμογή στατιστικών μεθόδων στη διερεύνηση των κοιτασμάτων.

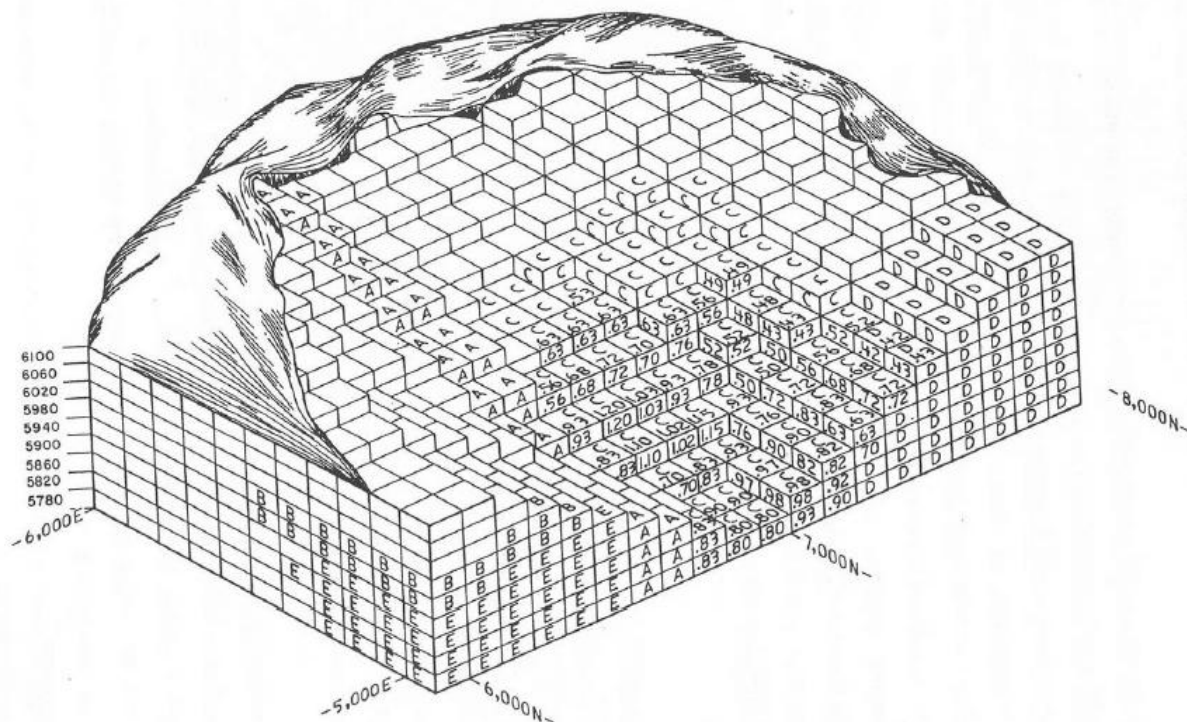
Σύμφωνα με την μέθοδο Kriging, η βραχομάζα χωρίζεται συνήθως σε ορθογώνια σχήματα (blocks) στα οποία η τιμή τους εξαρτάται από τις τιμές των γειτονικών μετρήσεων, τον αριθμό των δεδομένων και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ημι-βαριογράμματος.

Ουσιαστικά το Kriging είναι μια γεωστατιστική μέθοδος εκτίμησης των τιμών των blocks και έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές όπως το απλό (simple) kriging, το κανονικό (ordinary) kriging, ενδεικτικό (indicator) kriging και το γενικευμένο (universal) kriging.

3.3 Ογκομετρικό μοντέλο (Block Model) του FF

Οι βασικές τεχνικές για την εκτίμηση της ποιότητας και ποσότητας των αποθεμάτων είναι η απεικόνιση τους με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη μορφή block. Βιβλιογραφικά έχει δοθεί μια καθοδήγηση για το μέγεθος των block από τον David (1977).

Για την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου είναι απαραίτητος ένας τρισδιάστατος κάναβος με μοναδιαία διανύσματα ΔX , ΔY , ΔZ . Οι διαστάσεις ΔX , ΔY είναι συνδεδεμένες με την πυκνότητα των γεωτρήσεων ενώ η τιμή της διάστασης ΔZ ισούται με το ύψος της βαθμίδας. Οι διαστάσεις αυτές δημιουργούν ένα στοιχειώδη όγκο ΔV του κοιτάσματος, με κέντρο τον κόμβο και διαστάσεις $\Delta X \Delta Y \Delta Z$. Ο στοιχειώδης όγκος ΔV ονομάζεται κυψελίδα (block) και οι διαστάσεις και το σχήμα του εξαρτώνται από τη μορφή του κοιτάσματος και από το είδος της εκμετάλλευσης. Κάθε στοιχειώδης όγκος καθορίζεται από τρεις δείκτες i , j , k . Έχοντας καθορίσει την αρχή των αξόνων του μοντέλου οι δείκτες i , j , k , δίνουν σε συνάρτηση με τις στοιχειώδεις διαστάσεις ΔX , ΔY , ΔZ τις συντεταγμένες κάθε στοιχειώδους όγκου στο χώρο (Γαλετάκης 2017). Ένας τύπος μοντέλου που χρησιμοποιείται σε υπαίθρια εκμετάλλευση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.5: Ογκομετρικό μοντέλο σε τρεις διαστάσεις (Crawford & Davey, 1979).

Σε κάθε block υπολογίζονται οι τιμές των παραμέτρων (FF) του κοιτάσματος. Για τον υπολογισμό εφαρμόζονται μέθοδοι παρεμβολής, χρησιμοποιώντας γνωστά στοιχεία από τις γεωτρήσεις και άλλες ερευνητικές εργασίες. Όλες οι τεχνικές βασίζονται στην έννοια της

σφαίρας επιρροής στην οποία η τιμή του FF που αποδίδεται σε ένα block προκύπτει από τιμές των γειτονικών blocks. Με την κατασκευή του ογκομετρικού μοντέλου το κάθε block χαρακτηρίζεται από μια τιμή (FF) και αποκτά το καθένα τη δική του αποληψιμότητα.

Τα βασικά λοιπόν βήματα στη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου κοιτάσματος είναι:

1. Υπολογισμός των σύνθετων δειγμάτων από τα δείγματα πυρήνων των γεωτρήσεων.
2. Καθορισμός της θέσης και των στοιχειωδών διαστάσεων του μοντέλου.
3. Υπολογισμός του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας για την περιοχή που καταλαμβάνει το μοντέλο του κοιτάσματος.
4. Απόδοση τιμής της παραμέτρου του κοιτάσματος που εξετάζεται σε κάθε ένα στοιχειώδη όγκο (*Γαλετάκης 2017*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΟΥ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ

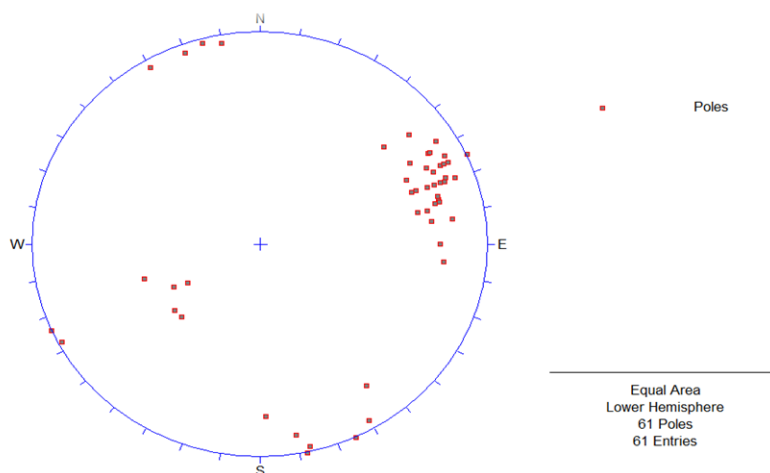
4.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στις διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του προσανατολισμού των ασυνεχειών στο μάρμαρο, τον υπολογισμό των ασυνεχειών με βάση τις κλάσεις (FF), στη σχεδίαση του ογκομετρικού και του «γεωλογικού μοντέλου». Η καινοτομία της εργασίας αυτής ήταν ότι και τα δύο μοντέλα κατασκευάστηκαν στο AutoCad για την ευκολότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων.

4.2 Εύρεση προσανατολισμού των ασυνεχειών στο μάρμαρο

Κατά τη διαδικασία της γεωλογικής μελέτης εντοπίστηκαν οι οικογένειες ασυνεχειών του μαρμάρου που αποτυπώνονται με τη στερεογραφική προβολή μέσω του προγράμματος dipsTM.

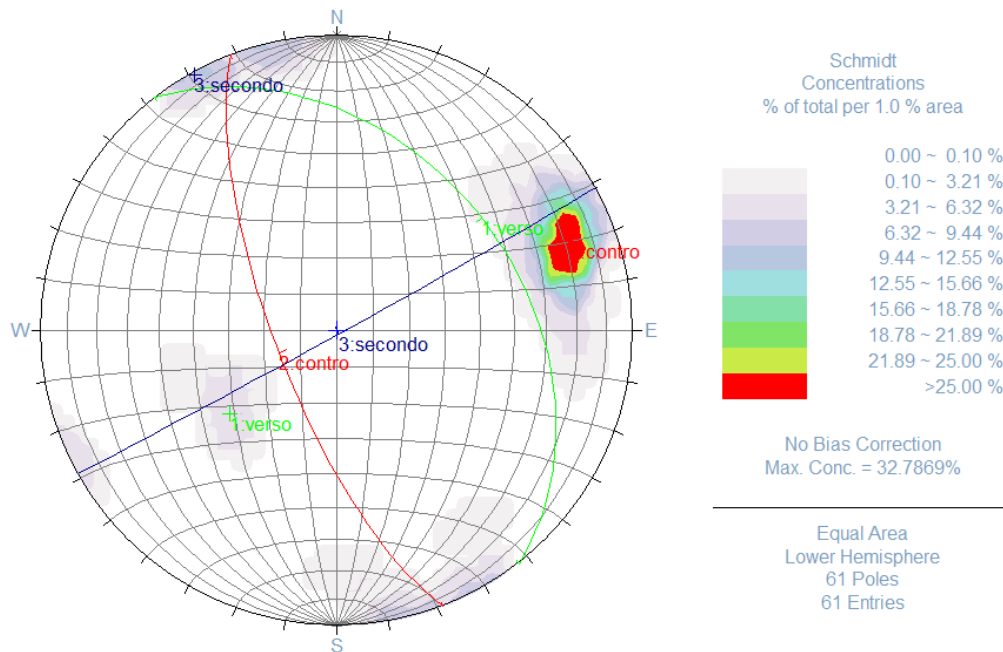
Αναλυτικότερα η διαδικασία για την εύρεση του προσανατολισμού των ασυνεχειών χρειάζεται η καταγραφή των γωνιών της κλίσης και της διεύθυνσης κλίσης στο excel που γίνεται η ταυτοποίηση των οικογενειών των ασυνεχειών που διασχίζουν το κοίτασμα μαρμάρου με βάση τα κριτήρια του προσανατολισμού. Στην συνέχεια η επεξεργασία των μετρήσεων προσανατολισμού των ασυνεχειών έγινε με τη στερεογραφική προβολή στο κατώτερο ημισφαίριο με την χρήση του λογισμικού dipsTM που απεικονίζονται οι πόλοι κάθε ασυνέχειας. (Σχήμα 4.1)



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση των πόλων στο πρόγραμμα dipsTM

Σε αυτό το στάδιο διακρίνονται οι πόλοι κάθε ασυνέχειας. Το πρόγραμμα dipsTM δίνει τη δυνατότητα με την επιλογή (contour plot) να ομαδοποιεί τη συνεισφορά των πόλων

απεικονίζοντας σημεία με τα ανάλογα χρώματα (ισοβαρής κατανομή πόλων) ώστε να αποδίδεται το κατάλληλο επίπεδο κάθε οικογένειας ασυνεχειών και οι μεγάλοι κύκλοι να αντιστοιχούν στην μέση τιμή κλίσης-διεύθυνσης κλίσης κάθε συστήματος ασυνεχειών. Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών είναι τρία (Σχήμα 4.2): (1) με πράσινο χρώμα η στρώση (verso), (2) με κόκκινο το κεφάλι (contro), και (3) με μπλε το μουρέλο (secondo).



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση μέγιστων κύκλων τριών οικογενειών του μαρμάρου στο πρόγραμμα *dipsTM*

4.3 Υπολογισμός συχνότητας ασυνεχειών (FF)

Μετά την γεωλογική μελέτη ορύχθηκαν κατακόρυφες πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις στο δολομιτικό μάρμαρο σε κατάλληλο κάναβο με περιστροφικό γεωτρήπανο (Εικόνα 4.1). Οι πυρήνες κατάλληλης διαμέτρου (ανάλογα με την διάμετρο της αδαμαντοκορώνας του περιστροφικού γεωτρήπανου) περισυλλέγονται και φυλάσσονται σε ξύλινα δοχεία μήκους 1-2 m τα οποία διαθέτουν χωρίσματα για τοποθέτηση 4-6 m κυλινδρικών πυρήνων (Εικόνα 4.2). Με βάση αυτά τα δεδομένα θα προσδιορισθούν τουλάχιστον σε πρώτη προσέγγιση σχεδιασμού της εκμετάλλευσης το απαιτούμενο βάθος της αποκάλυψης, η κλίση και η παράταξη των στρωμάτων και η ομοιομορφία του μαρμάρου καθώς επίσης γίνεται και η εκτίμηση της αποληψιμότητας των υγιών ογκομαρμάρων. Σε δεύτερη φάση αφού τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά σχεδιάζονται τα τελικά όρια της εκμετάλλευσης και υπολογίζονται τα αποδεδειγμένα (proven) μεταλλευτικά αποθέματα.



Εικόνα 4.1: Αυτοκινούμενο περιστροφικό γεωτρύπανο για συλλογή πυρήνων με δειγματοσυλλέκτη και αδαμαντοκορώνα



Εικόνα 4.2: Ξύλινο κουτί αποθηκεύσεως των κυλινδρικών πυρήνων μαρμάρου

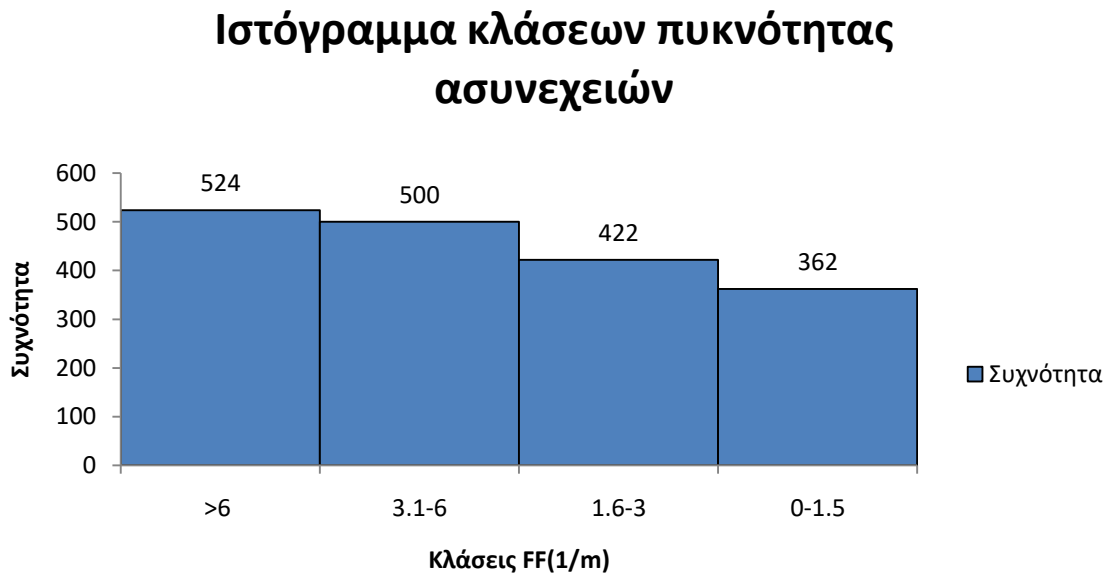
Στην *Εικόνα 4.2* διακρίνονται οι ασυνέχειες που διασχίζουν τους πυρήνες μαρμάρου. Με τη βοήθεια του excel κατασκευάστηκε μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει το όνομα της γεώτρησης, τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη, το βάθος της γεώτρησης από την επιφάνεια καθώς και τη μέτρηση των αριθμών των ασυνεχειών ανά 1 m μήκος πυρήνα (FF).

Με βάση τις γεωτρήσεις και τον *Πίνακα 2.3*, που παρουσιάζει τις κλάσεις σε σχέση με τον αριθμό των ασυνεχειών στο ένα μέτρο μήκους πυρήνα κατασκευάστηκε το ιστόγραμμα κλάσεων πυκνότητας ασυνεχειών. (*Πίνακας 4.1*)

Πίνακας 4.1: Συχνότητα ασυνεχειών για κάθε κλάση ασυνεχειών

Κλάση (FF)	Συχνότητα
0-1.5	362
1.6-3	422
3.1-6	500
>6	524

Σύμφωνα με τον παραπάνω *Πίνακα 4.1* το διάγραμμα (ιστόγραμμα) που προκύπτει είναι το εξής (*Σχήμα 4.3*):



Σχήμα 4.3: Ιστόγραμμα των 4 κλάσεων μαρμάρου ανάλογα με το FF

Από την ανάλυση του διαγράμματος, (στον άξονα X είναι οι κλάσεις της συχνότητας των ασυνεχειών (FF) και στον άξονα Ψ είναι η συχνότητα εμφάνισης για κάθε κλάση), φαίνεται ότι στην κατηγορία από 0-1.5 ασυνέχειες ανά μέτρο, η συχνότητα εμφάνισης είναι 362, από 1.6-3 η συχνότητα εμφάνισης είναι 422, από 3.1-6 η συχνότητα εμφάνισης είναι 500 και μεγαλύτερη από 6 η συχνότητα εμφάνισης είναι 524.

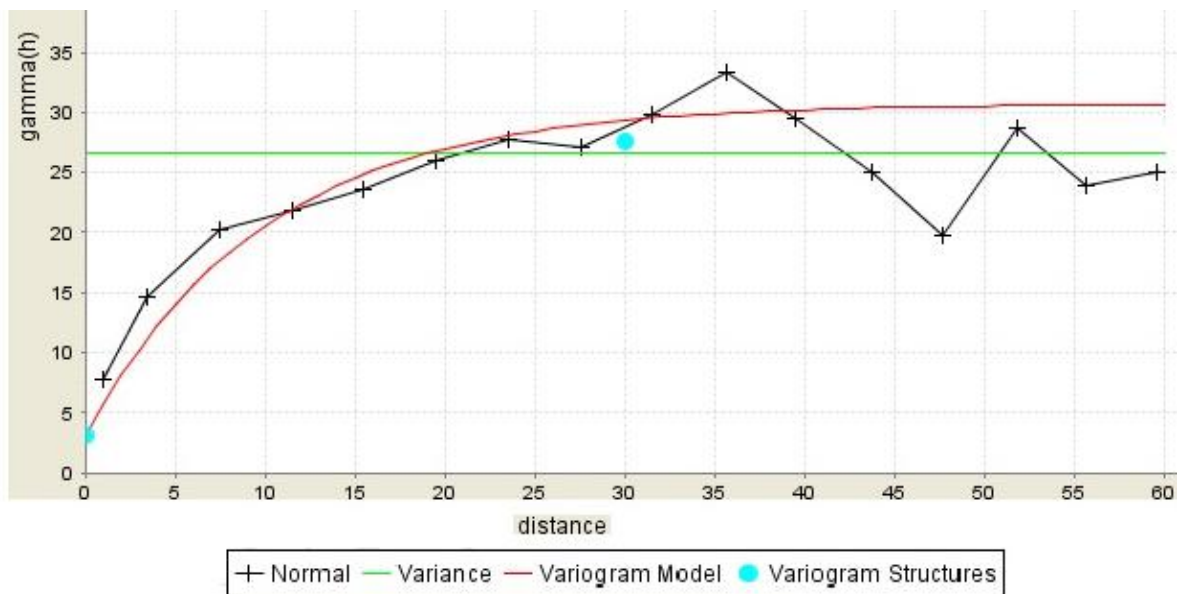
4.4 Σχεδίαση ογκομετρικού μοντέλου (Block Model) του FF

Το ογκομετρικό μοντέλο (block model) βασίστηκε στις μετρήσεις της FF από τις γεωτρήσεις. Έτσι πραγματοποιήθηκε, αρχικά στατιστική ανάλυση των δειγμάτων του FF στην συνέχεια εκτίμηση του βαθμού μεταβολής της χωρικής διασποράς των σημείων (ημι-

βαριόγραμμα) και τέλος παρεμβολή των τιμών FF μεταξύ των σημείων με τη μέθοδο Kriging.

Στην παρούσα διπλωματική το πειραματικό ημι-βαριόγραμμα του FF προσεγγίζεται καλύτερα με το εκθετικό μοντέλο που φαίνεται στο [Σχήμα 4.4](#). Ο τύπος για το εκθετικό βαριόγραμμα είναι:

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right)]$$



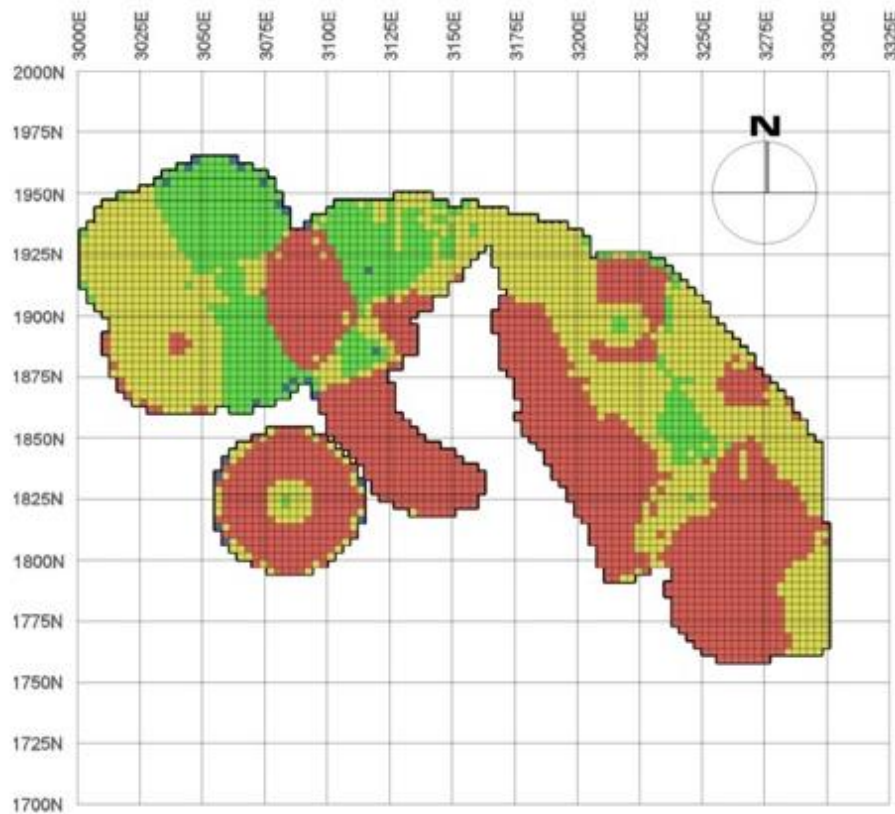
Σχήμα 4.4: Ημι-βαριόγραμμα του FF μάρνη γραμμή το πειραματικό ημι-βαριόγραμμα, κόκκινη γραμμή το εκθετικό ημι-βαριόγραμμα πράσινη γραμμή είναι η διασπορά

Από το ημι-βαριόγραμμα που υπολογίστηκε στο πρόγραμμα Surpac παρουσιάζεται στο [Σχήμα 4.4](#), και υπολογίζονται οι ακόλουθες παράμετροι που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο Kriging:

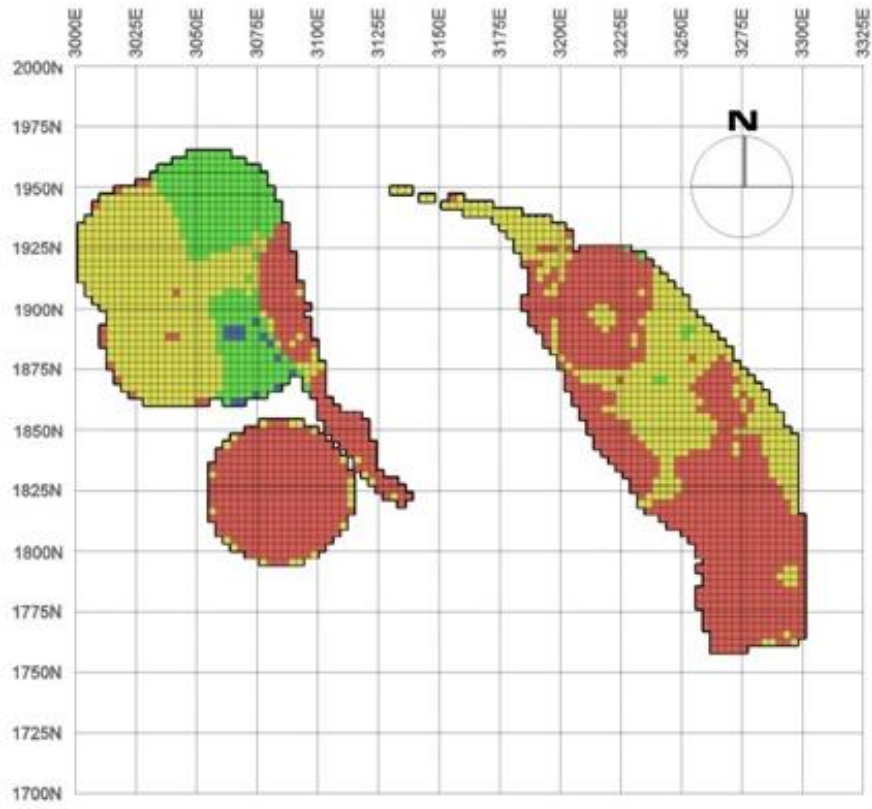
- Nugget $C_0=3$
- Οροφή (Sill)=28
- Απόσταση επιρροής Range $a=30$

Με τη μέθοδο block Kriging το κάθε block έχει χαρακτηριστεί από τις κλάσεις του FF και έχει πλέον αποκτήσει την δική του αποληψιμότητα. Το ογκομετρικό μοντέλο σχεδιάστηκε από τον Δρ. Γ. Σαράτση στο εμπορικό σχεδιαστικό πρόγραμμα Surpac. Οι διαστάσεις κάθε block είναι $(3 \times 3 \times 6) \text{ m}^3$ και τα blocks χαρακτηρίστηκαν από τις 4 κλάσεις

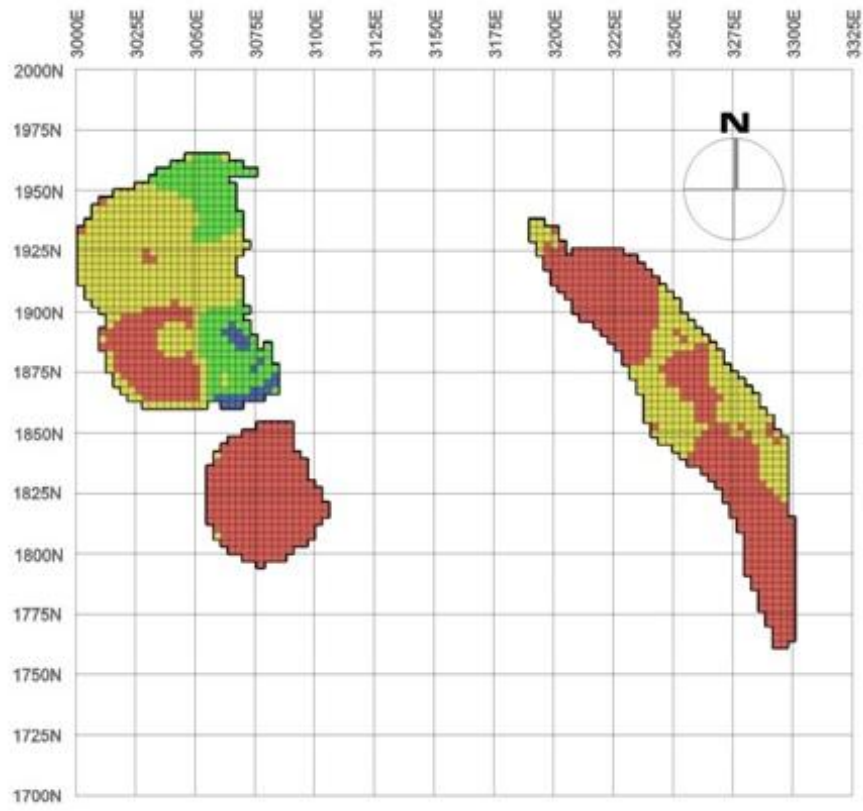
(FF) σύμφωνα με τον [Πίνακα 2.3](#). Η σύγκριση των μοντέλων όμως πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα AutoCad Civil 3D διότι είναι ένα εύχρηστο και διαδεδομένο πρόγραμμα. Έτσι στο πρόγραμμα AutoCad της Autodesk εισήχθηκαν τομές στα υψόμετρα +912m, +918m, +924m, +930m από του ογκομετρικού μοντέλου που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Surpac. Οι τομές αυτές απεικονίζουν τα blocks σε δύο διαστάσεις (τετράγωνα, 3x3). Στο κάθε τετράγωνο δόθηκε ύψος 6m για να είναι συμβατό με το ύψος κάθε βαθμίδας με αποτέλεσμα την κατασκευή τρισδιάστατου ογκομετρικού μοντέλου στο πρόγραμμα AutoCad ([Σχήμα.4.5](#)).



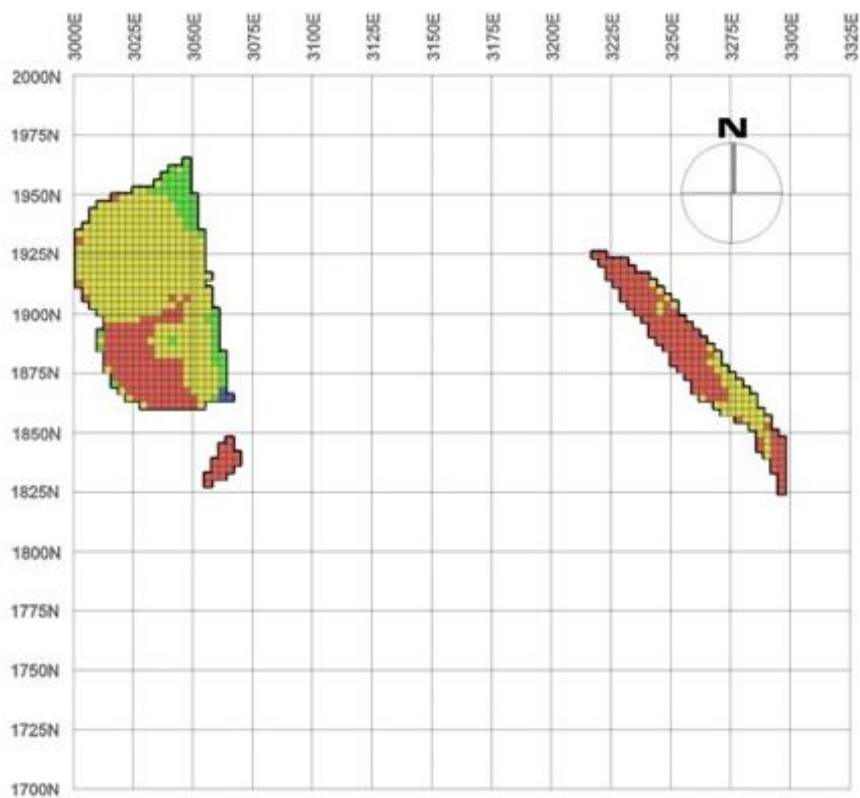
(α)



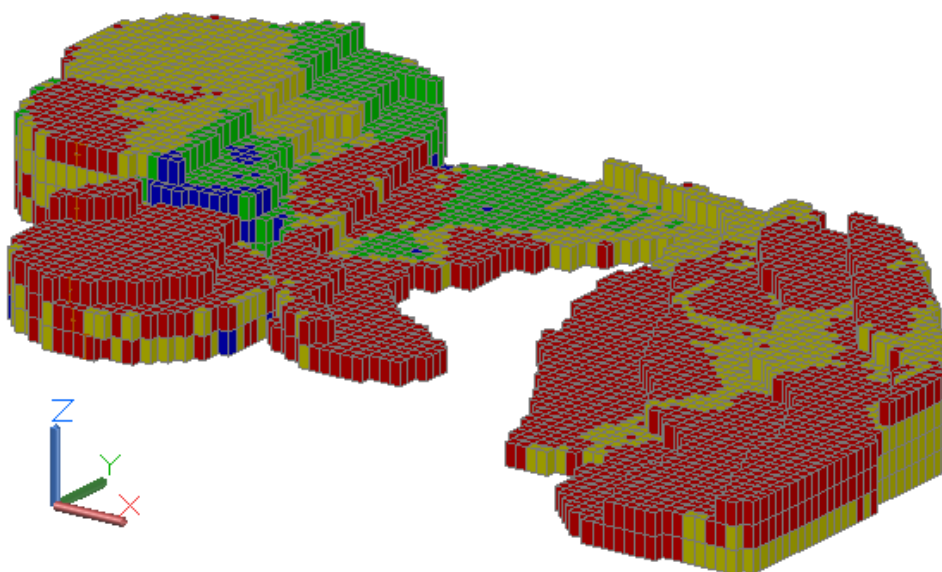
(β)



(γ)



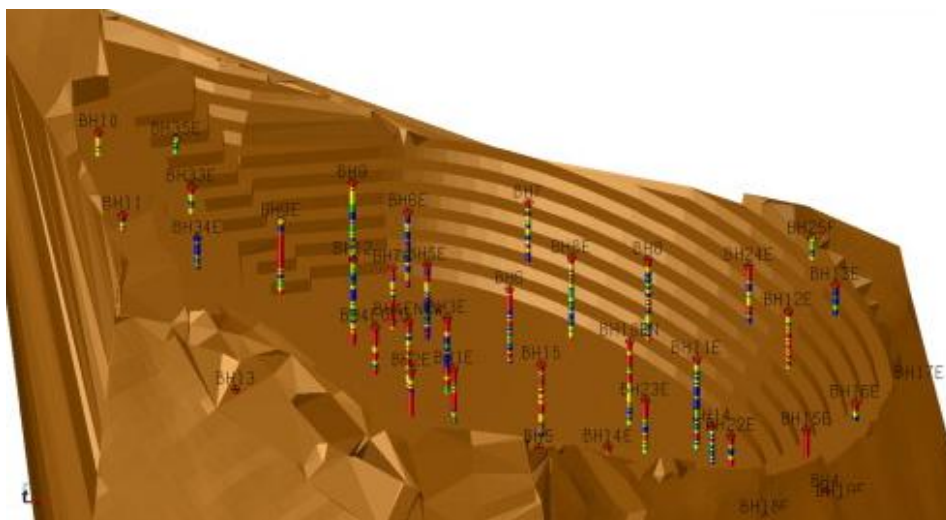
(δ)



(ε)

Σχήμα 4.5: (α) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 912, (β) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 918, (γ) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 924, (δ) κάτοψη ογκομετρικού μοντέλου στο υψόμετρο 930, (ε) Τρισδιάστατο ογκομετρικό μοντέλο στον χώρο σχεδιασμένο στο AutoCad

Με βάση το ογκομετρικό μοντέλο έγινε η σχεδίαση των τελικών ορίων εκμετάλλευσης και υπολογίστηκαν τα αποθέματα (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Σχεδιασμός των τελικών ορίων της εκμετάλλευσης για τον προσδιορισμό των μεταλλευτικών αποθεμάτων (Stavropoulou, 2014)

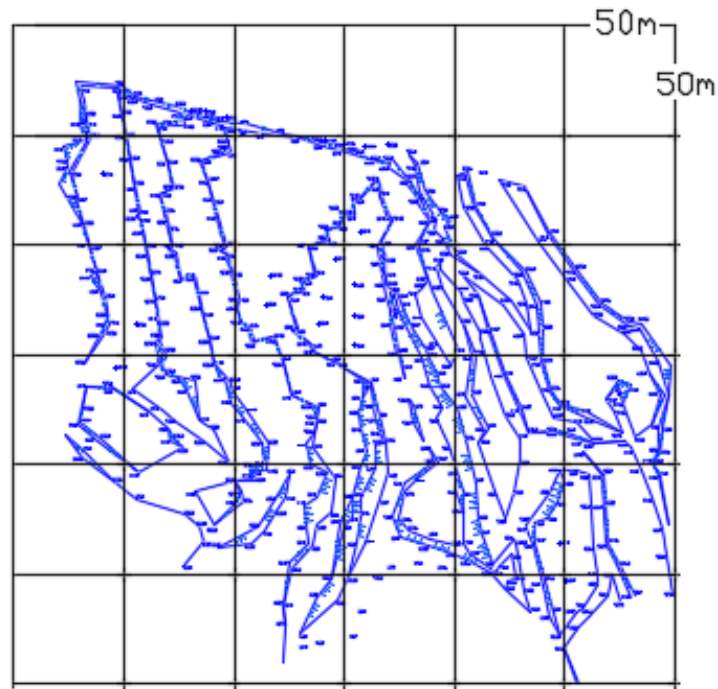
Σύμφωνα με τα όρια εκμετάλλευσης ο συνολικός όγκος του κοιτάσματος είναι περίπου $V_{ολ}=600.000m^3$ και αν η ετήσια παραγωγή είναι περίπου $Q_{ετ}=30.000m^3/έτος$, τότε ο χρόνος εξόφλησης του λατομείου προκύπτει από το λόγο $\frac{V_{ολ}}{Q_{ετ}} = \frac{600.000m^3}{30.000m^3/έτος} = 20$ έτη.

4.5 Σχεδίαση γεωλογικού μοντέλου με βάση την πραγματική παραγωγή

Για τη σχεδίαση της παράγωγης αρχικά απαιτείται η δημιουργία ψηφιοποιημένων χαρτών. Με την βοήθεια του προγράμματος (Autocad Civil 3D) οι τοπογραφικοί χάρτες της περιοχής μελέτης ψηφιοποιήθηκαν.

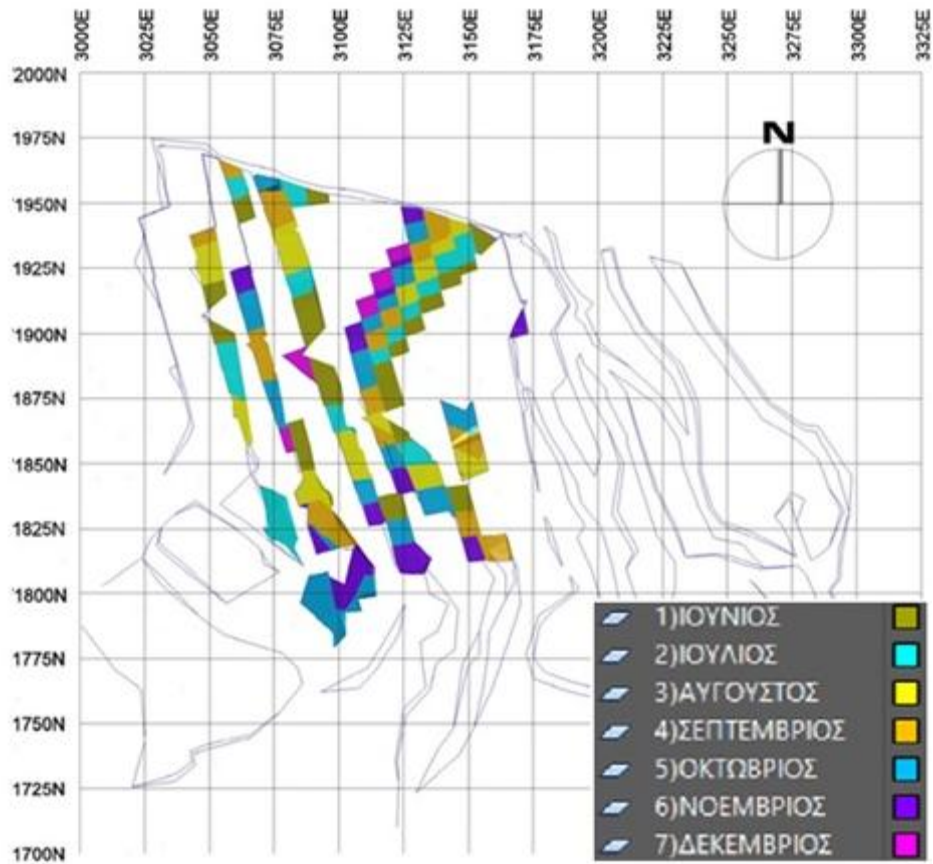
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7 το λατομείο μαρμάρου βρίσκεται σε μια ενδιάμεση φάση και πάνω σε αυτήν θα γίνει η σχεδίαση της παραγωγής μαρμάρου για τον επόμενο χρόνο. Στο λατομείο μαρμάρου της περιοχής μελέτης, οι εργασίες ξεκίνησαν το μήνα Απρίλιο και τελείωσαν το μήνα Δεκέμβριο. Για τον υπολογισμό της ετήσιας παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατοι χάρτες που απεικονίζουν την εξόρυξη του μαρμάρου κάθε μήνα. Με την χρήση του προγράμματος του AutoCad Civil 3D κατασκευάστηκαν επιφάνειες για κάθε μήνα ξεχωριστά.

Στη συνέχεια (με την εντολή extrude) δόθηκε όγκος στις επιφάνειες ώστε όταν αφαιρεθούν δυο μηνιαίες διαδοχικές επιφάνειες να απεικονίζουν την μηνιαία παραγωγή. Η διαδικασία για το πως κατασκευάστηκαν οι επιφάνειες παρουσιάζεται στο (Παράρτημα Α).



Σχήμα 4.7: Ψηφιοποιημένος χάρτης λατομείου το μηνά Απρίλιο 2014

Η ετήσια παράγωγή που προκύπτει από αυτήν την διαδικασία φαίνεται στα παρακάτω (Σχήμα 4.8)



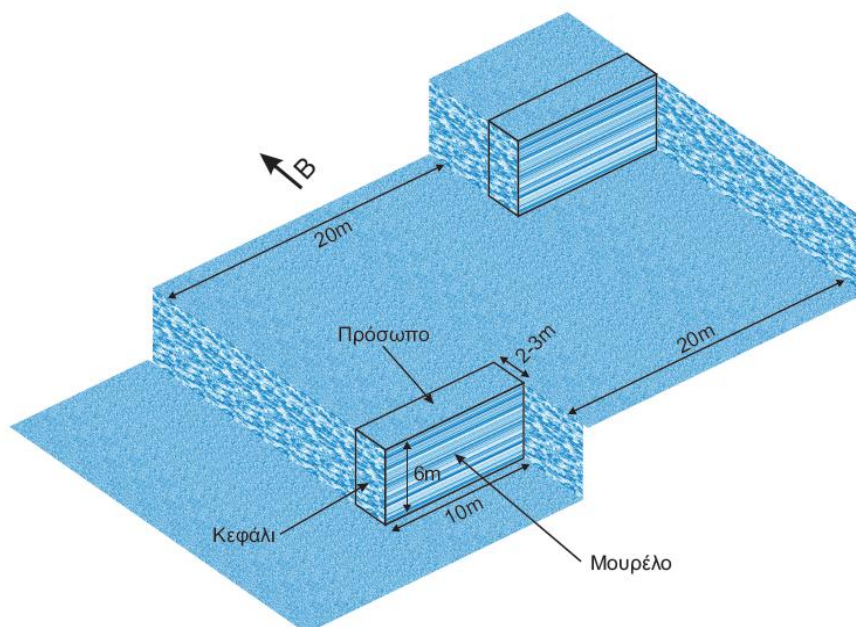
Σχήμα 4.8: Ετήσια παραγωγή μάρμαρου στο λατομείο το έτος 2014 αν μήνα

Η παράγωγή μαρμάρου μετρήθηκε σε κυβικά μέτρα (m^3) και τα αποτελέσματα για κάθε μήνα παρουσιάζονται στον παρακάτω [Πίνακα 4.2](#):

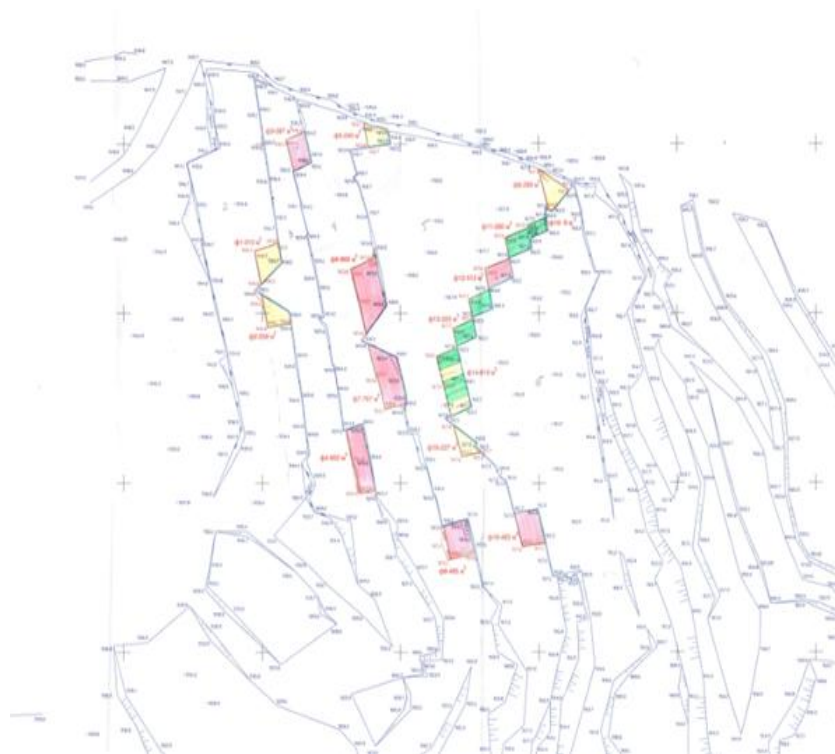
Πίνακας 4.2: Μηνιαίες παραγωγές μαρμάρου

ΜΗΝΕΣ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ(m^3)
Ιούνιος	6.851 m^3
Ιούλιος	4.671 m^3
Αύγουστος	5.300 m^3
Σεπτέμβριος	5.864 m^3
Οκτώβριος	6.382 m^3
Νοέμβριος	3.778 m^3
Δεκεμβρίου	1.352 m^3
Συνολικό Έτος	34.198 m^3

Από αυτό το λατομείο δόθηκαν δεδομένα χαρακτηρισμού από πλευράς συχνότητας ασυνεχειών των πάνελ μαρμάρου κατά την παραγωγική διαδικασία όπως φαίνεται στο [Σχήμα 4.9](#). Ο χαρακτηρισμός του κάθε πάνελ πραγματοποιείται πριν την ανατροπή σύμφωνα με τις 4 κλάσεις γραμμικής συχνότητας.



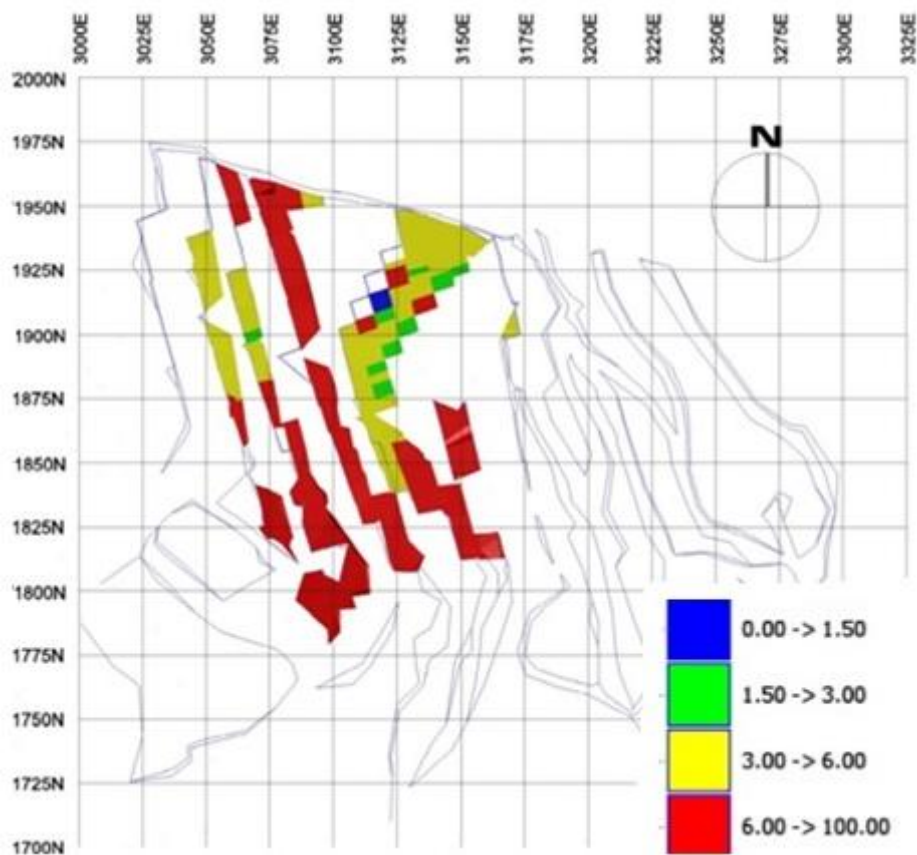
(α)



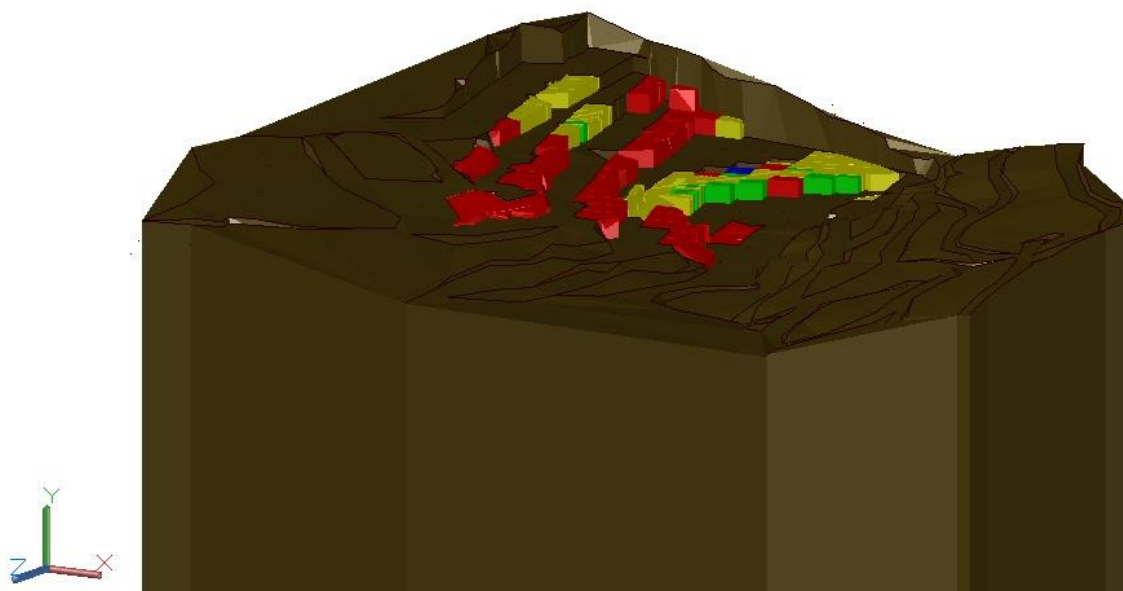
(β)

Σχήμα 4.9: (α) Μέτωπο σχήματος «Γ» ή μέτωπο παραγωγής ογκομαρμάρων που φαίνεται πάνελ μαρμάρου αποκομμένο με συρματοκοπές έτοιμο για ανατροπή και περαιτέρω παραγωγή ορθογωνισμένων ογκομαρμάρων εμπορικών διαστάσεων από αυτό, (β) Χάρτης ποιότητας για τον μήνα Ιούνιο 2014

Τα δεδομένα από τον χαρακτηρισμό κάθε πάνελ που πραγματοποιήθηκε κατά τον ποιοτικό έλεγχο εισήχθησαν και σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα AutoCad Civil 3D της Autodesk με αποτέλεσμα τη κατασκευή του «γεωλογικού μοντέλου» (Σχήμα 4.10).



(α)



(β)

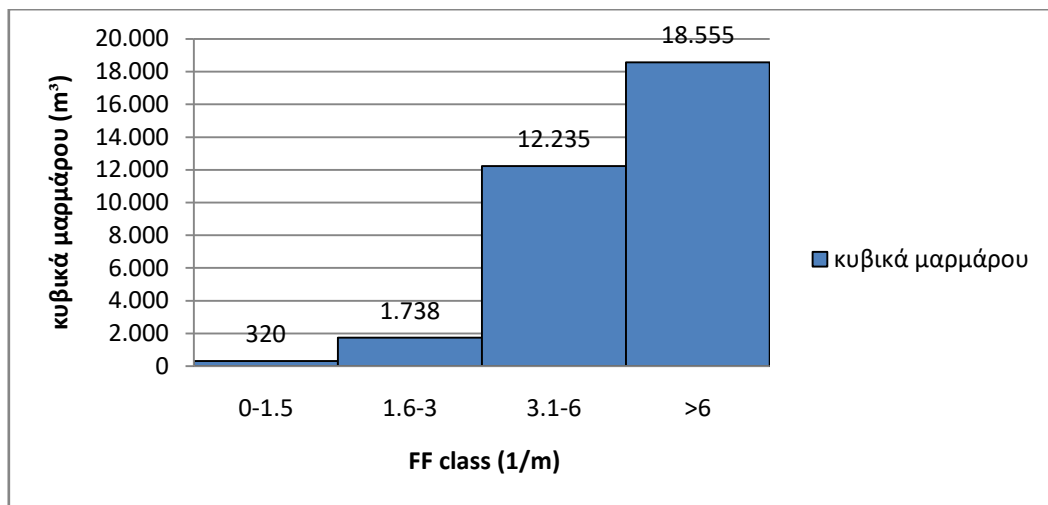
Σχήμα 4.10: (α) Χάρτης ποιότητων με βάση το FF, (β) Γεωλογικό μοντέλο

Στο λατομείο δεν έχει χαρακτηριστεί η ποιότητα για το μήνα Δεκέμβριο διότι δεν είχαν ολοκληρωθεί οι εργασίες. Η παράγωγή για κάθε κλάση (FF) παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Παραγωγή κάθε ποιότητας σε m³

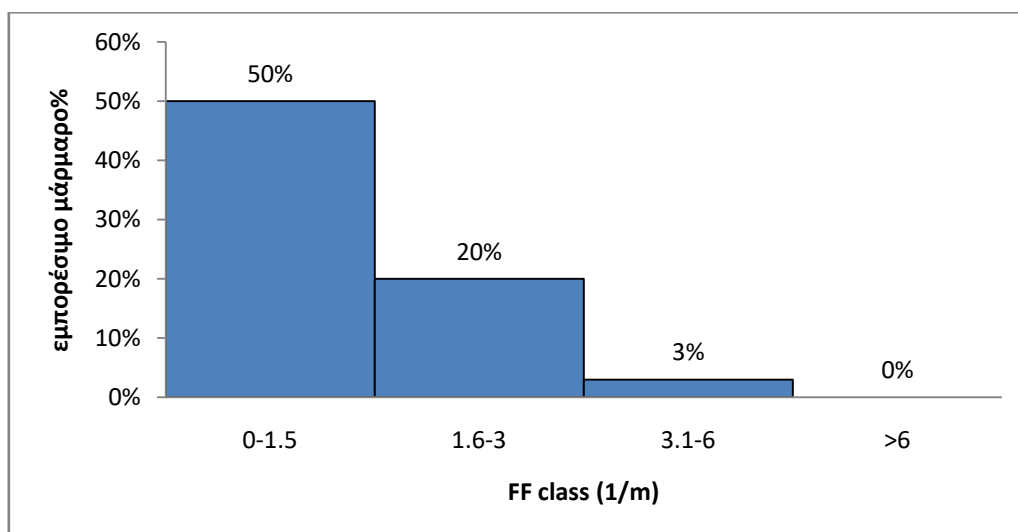
Κλάσεις Fracture Frequency (FF)	Παραγωγή
μπλε χρώμα (0-1.5)	320 m ³
πράσινο χρώμα (1.6-3)	1.738 m ³
κίτρινο χρώμα (3.1-6)	12.235 m ³
κόκκινο χρώμα (>6)	18.555 m ³
ΣΥΝΟΛΟ	32.848 m ³

Το διάγραμμα της ετήσιας παραγωγής για κάθε κλάση παρουσιάζεται στο [Σχήμα 4.11](#).



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ετήσιας παραγωγής μάρμαρου στο λατομείο

Σύμφωνα με παλαιότερες εξορύξεις, έχει αναπτυχτεί για το συγκεκριμένο λατομείο μαρμάρου ένα διάγραμμα που φαίνεται το ποσοστό εμπορεύσιμου μαρμάρου κάθε ποιότητας με βάση το FF ([Σχήμα 4.12](#)).



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα αποληψιμότητα ανά κλάση γραμμικής συχνότητας

Με τα παραπάνω διαγράμματα υπολογίστηκε η εμπορεύσιμη παραγωγή κάθε ποιότητας :

Πίνακας 4.4: Εμπορευσιμότητα μάρμαρου για κάθε ποιότητα

Ποιότητες	Εμπορεύσιμο ποσοστό μάρμαρου %	Παράγωγή(m³)	Εμπορεύσιμα ογκομάρμαρα(m³)
μπλε(0-1.5)	50%	320	160
πράσινη(1.6-3)	20%	1.738	348
κίτρινη (3.1-6)	3%	12.235	367
κόκκινη (>6)	0%	18.555	0
ΣΥΝΟΛΟ		32.848	875

Έτσι η αποληψιμότητα για την εκμετάλλευση μαρμάρου το έτος 2014, που προκύπτει από το λόγο των εμπορεύσιμων ογκομαρμάρων προς την ετήσια παραγωγή, είναι περίπου 3%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

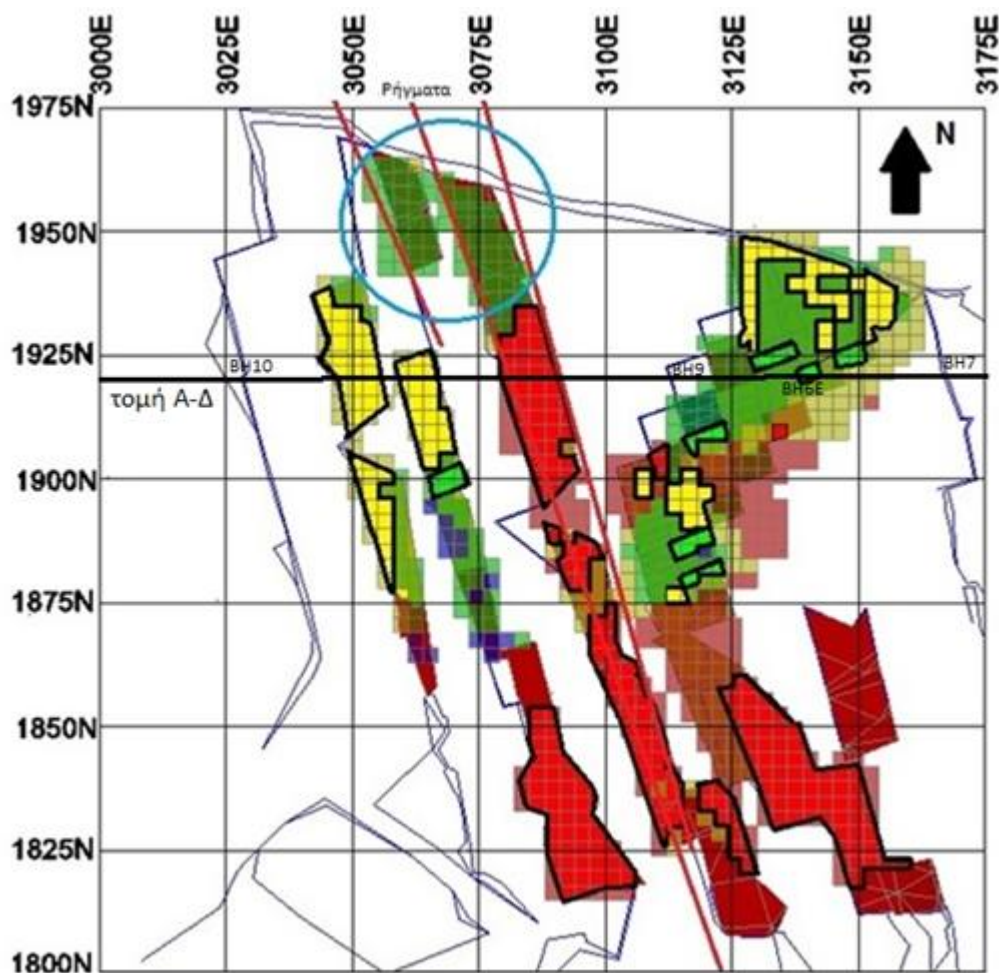
5.1 Σύγκριση μοντέλων

Το γεωλογικό μοντέλο με δεδομένα πραγματικής παραγωγής σε σύγκριση με το ογκομετρικό μοντέλο το έτος 2014 παρουσιάζει διαφορές. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε σε κάθε βαθμίδα ξεχωριστά σύμφωνα με τον [Πίνακα 5.1](#).

Πίνακας 5.1: Υψόμετρο βαθμίδων

Βαθμίδα	Υψόμετρο(m)
1 ^η	936-942
2 ^η	930-936
3 ^η	924-930
4 ^η	918-924
5 ^η	912-918

Το παρακάτω [Σχήμα 5.1](#) παρουσιάζει με μαύρο περίγραμμα τα κομμάτια που τα δύο μοντέλα συμπίπτουν.



Σχήμα 5.1: Σύγκριση ογκομετρικού μοντέλου με γεωλογικού μοντέλου

Για την σύγκριση του γεωλογικού με το ογκομετρικό μοντέλο μετρήθηκαν επίσης και τα κυβικά μαρμάρου στα οποία συμπίπτουν τα δυο μοντέλα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή ποσοστού στον παρακάτω *Πίνακα 5.2*:

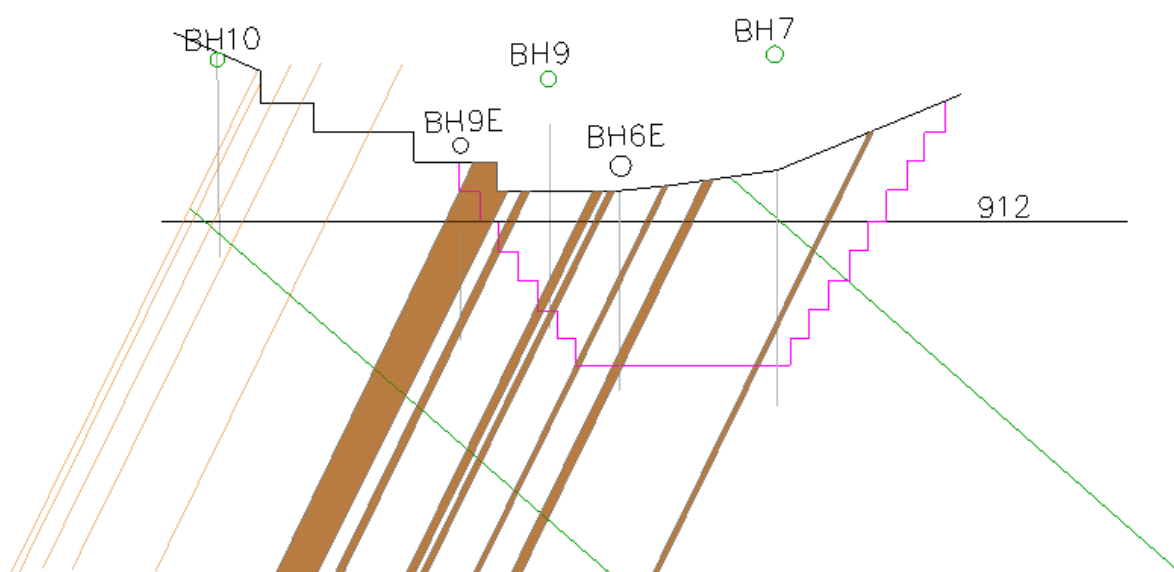
Πίνακας 5.2: Ποσοστό που συμπίπτουν το γεωλογικό με το ογκομετρικό μοντέλο

Βαθμίδα	Κυβικά που συμπίπτουν τα δύο μοντέλα(m ³)	Συνολικά κυβικά κάθε βαθμίδας(m ³)	Ποσοστό που συμπίπτουν τα δύο μοντέλα(%)
5 ^η	6.465	14.450	45%
4 ^η	5.335	7.453	72%
3 ^η	4.200	6.321	66%
2 ^η	2240	3.290	68%
Σύνολο	18.240	31.514	58%

Παρατηρείται μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα δυο μοντέλα. Το συνολικό ποσοστό που συμπίπτει είναι 58%.

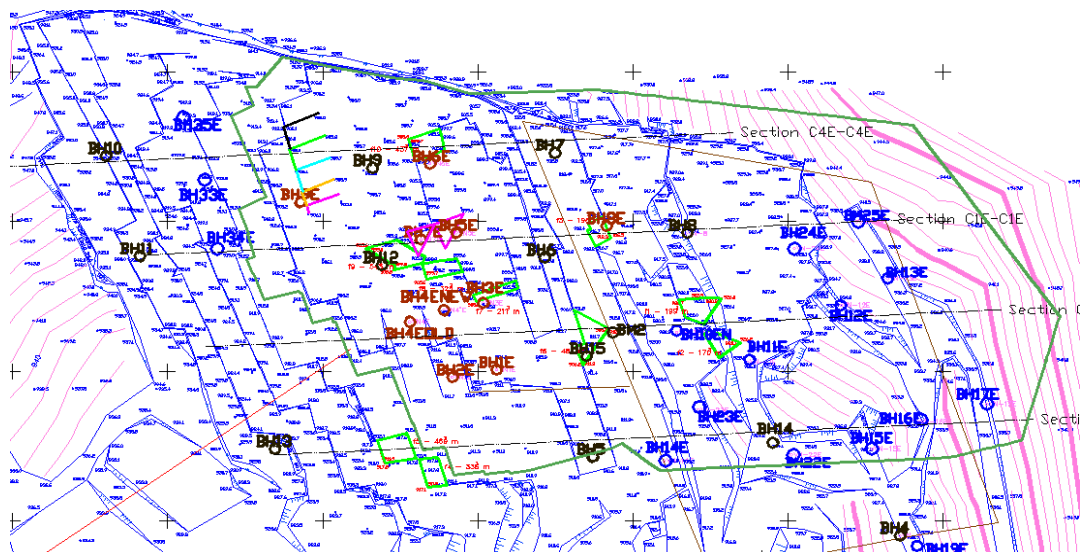
5.2 Συμπεράσματα-προτάσεις για τη βελτίωση του ογκομετρικού μοντέλου και τροποποιήσεις της μεθόδου εκμετάλλευσης

Στο *Σχήμα 5.1* παρατηρείται ασυμφωνία μεταξύ των μοντέλων με χαρακτηριστικό παράδειγμα το χώρο που περικλείεται στο μπλε κύκλο. Ενώ το ογκομετρικό μοντέλο σε αυτό το χώρο παρουσιάζει καλά αποθέματα (πράσινο χρώμα), το γεωλογικό μοντέλο έχει την χειρότερη ποιότητα (κόκκινο χρώμα). Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ρηγμάτων που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στο ογκομετρικό μοντέλο. Η καλύτερη προσέγγιση των ρηγμάτων στο χώρο του λατομείου φαίνεται στο παρακάτω *Σχήμα 5.2*.

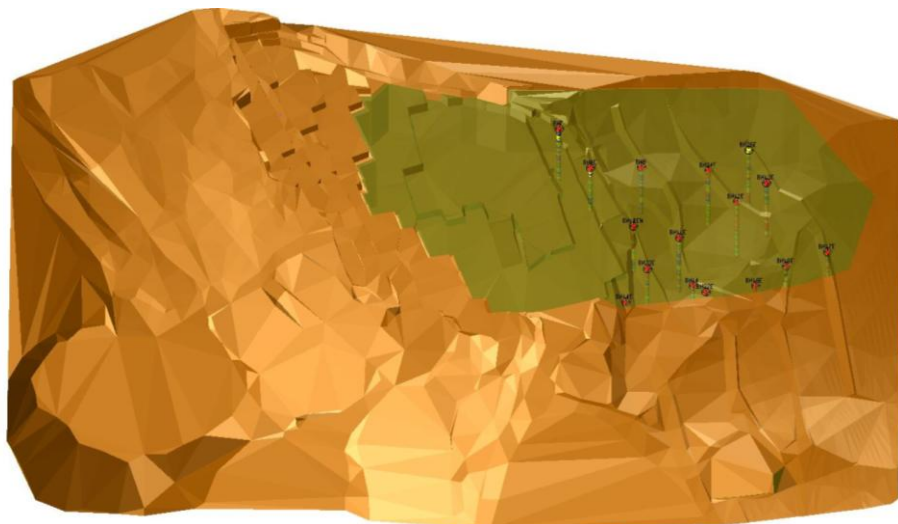


Σχήμα 5.2: Τομή Δ-Α στην οποία φαίνονται με πορτοκαλί χρώμα τα μεγάλα ρήγματα C (contro) που έχουν αποτυπωθεί επί τόπου και έχουν εντοπισθεί από τις γεωτρήσεις

Σύμφωνα με την τη στερεογραφική προβολή τα ρήγματα ταυτοποιούνται ως ρήγματα C (contro). Τα ρήματα αυτά είναι μεγάλα και με μεγάλη εξάπλωση (εμμονή) με αποτέλεσμα να επηρεάζουν αρνητικά την αποληψιμότητα σε εμπορεύσιμα ογκομάρμαρα. Όπως φαίνεται στην τομή Δ-Α τα ρήματα βρίσκονται κυρίως το Δυτικό τμήμα της εκμετάλλευσης ενώ στο Ανατολικό της τμήμα είναι μειωμένη η παρουσία (πάχος, απόστασης, εμμονής) αυτών. Για την αύξηση της αποληψιμότητας πρέπει λοιπόν να οριστούν νέα όρια εκμετάλλευσης (Σχήμα 5.3) αποκλείοντας μεγάλο τμήμα του Δυτικού τομέα του αρχικού σχεδιασμού των ορίων του λατομείου.



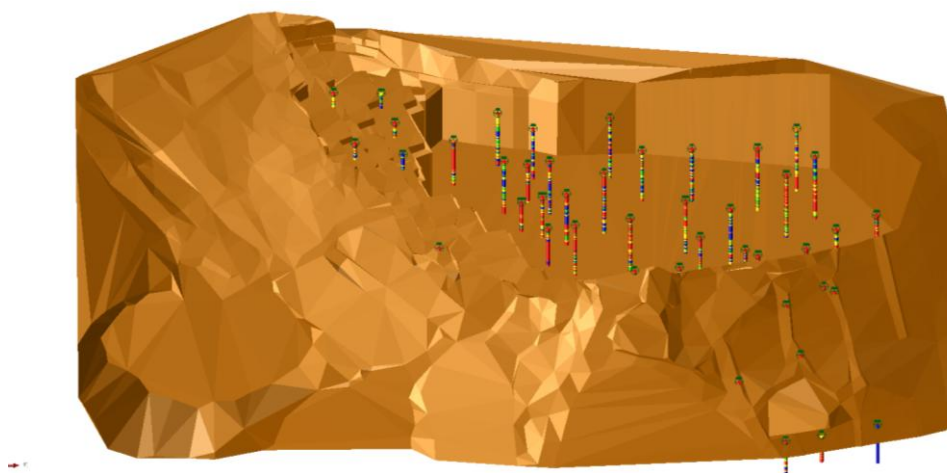
(α)



(β)

Σχήμα 5.3: (α) Πρόταση νέων ορίων εκμετάλλευσης που φαίνονται με τη πράσινη γραμμή για αύξηση της αποληψιμότητας ογκομαρμάρων, (β) Εκμετάλλευση μαρμάρου μόνο στην πράσινη επιφάνεια

Μετά τη νέα οριοθέτηση πρέπει να σχεδιαστεί η τελική φάση εκμετάλλευσης. Όπως φαίνεται στο παρακάτω [Σχήμα 5.4](#) η εκμετάλλευση επικεντρώνεται στον Ανατολικό τομέα ενώ στο Δυτικό τομέα τείνει να σταματήσει λόγω των ρηγμάτων C (contro).



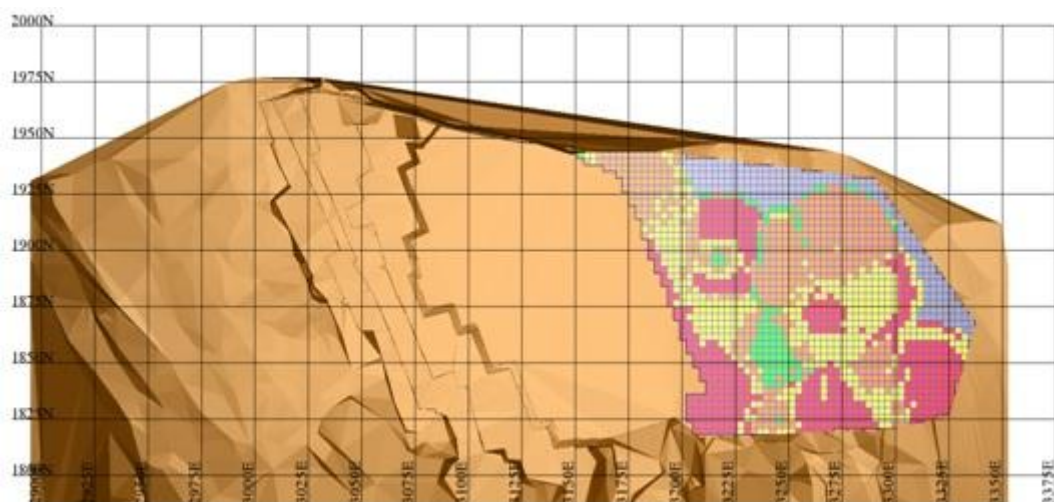
Σχήμα 5.4: Ισομετρική άποψη της τελικής εκμετάλλευσης

Για την καλύτερη εκτίμηση των αποθεμάτων πρέπει το προκαθορισμένο ογκομετρικό μοντέλο να γίνει πιο λεπτομερές. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη άλλης μιας κλάσης. Η αποληψιμότητα για κάθε κλάση θα ορίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω [Πίνακα 5.3](#).

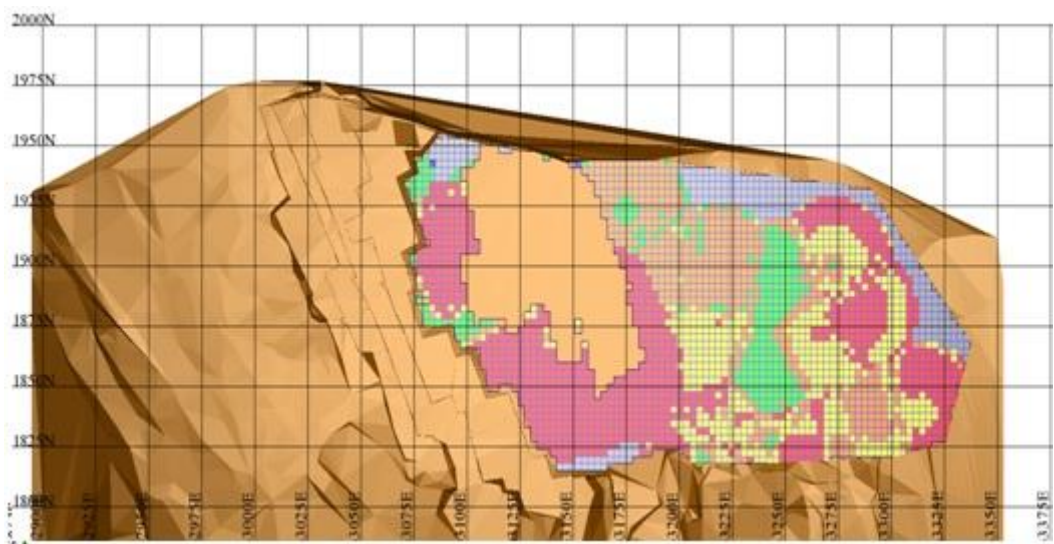
Πίνακας 5.3: Νέα αποληψιμότητα ανά κλάση γραμμικής συχνότητας

Κλάσεις Fracture Frequency (FF)	Αποληψιμότητα εμπορεύσιμων ογκομαρμάρων
(0-1.5)	0.5
(1.5-2.5)	0.25
(2.5-3)	0.15
(3-6)	0.03
(>6)	0

Με την προσθήκη της νέας κλάσης το ογκομετρικό μοντέλο παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



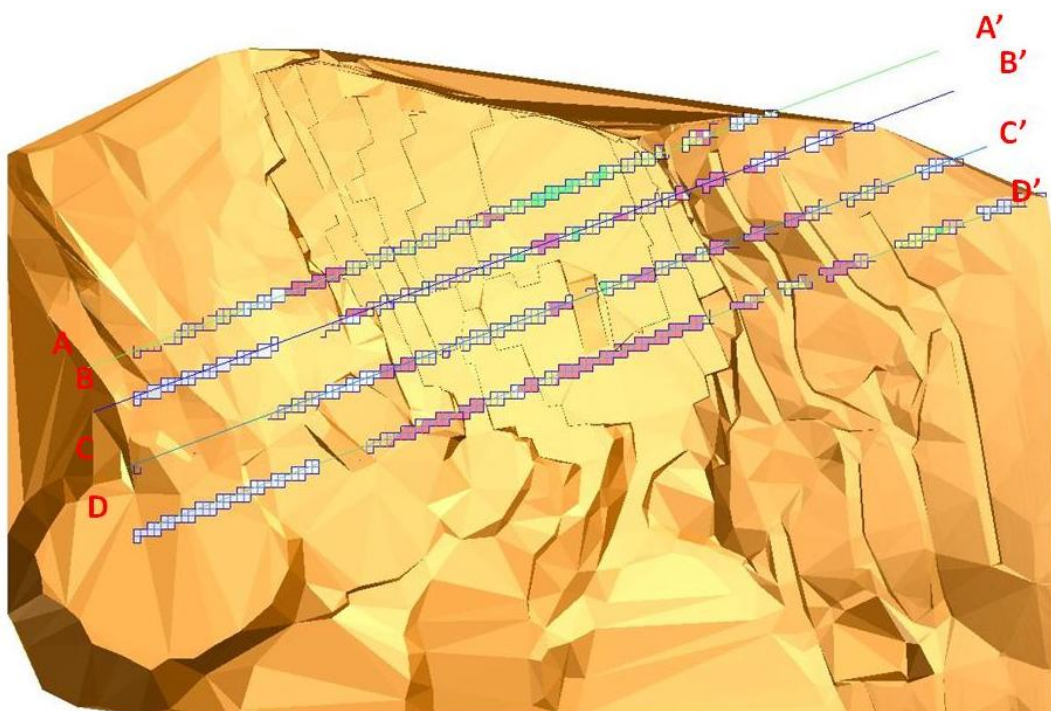
(α)



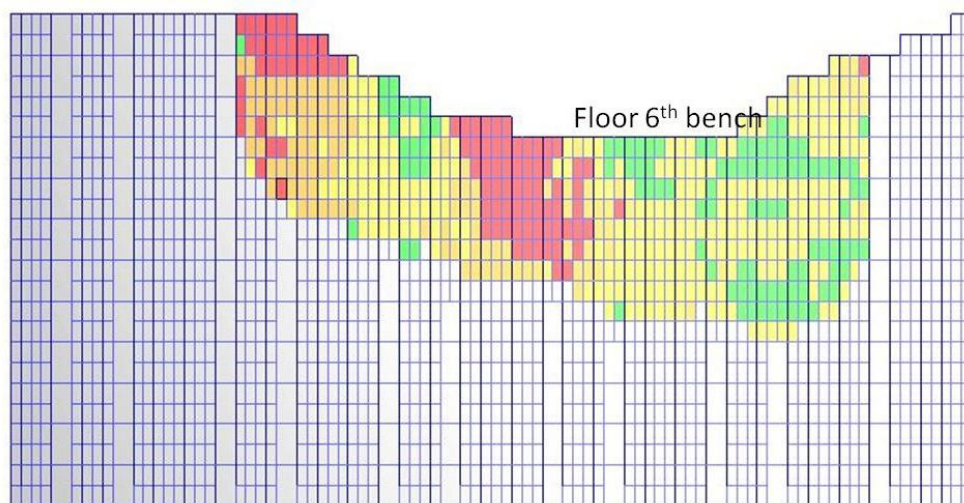
(β)

Σχήμα 5.5: (α) Κάτοψη της 4^{ης} βαθμίδας, (β) Κάτοψη 5^{ης} βαθμίδας

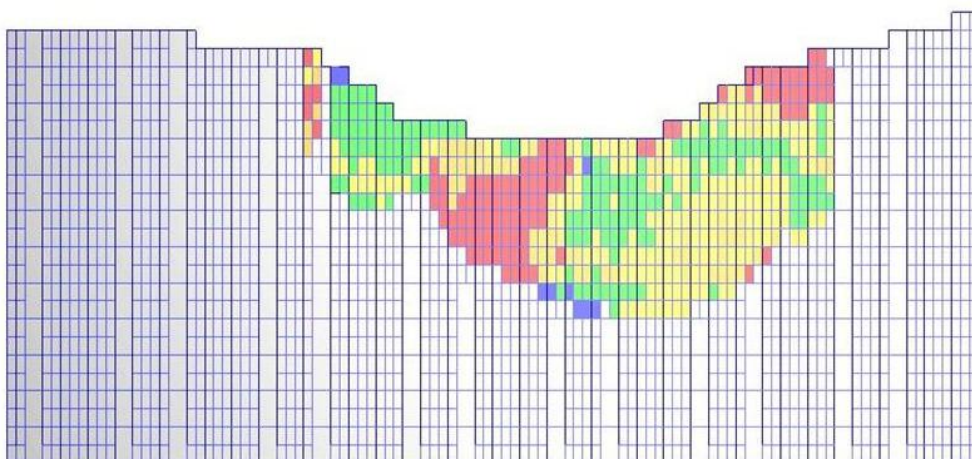
Ακόμα στο ογκομετρικό μοντέλο πραγματοποιήθηκαν τομές για την απεικόνιση των αποθεμάτων μαρμάρου στην μελλοντική εξέλιξη του λατομείου. Όπως φαίνεται στις παρακάτω τομές τα αποθέματα στον Ανατολικό τομέα είναι ενθαρρυντικά για την μελλοντική εκμετάλλευση του λατομείου. (Σχήμα 5.6).



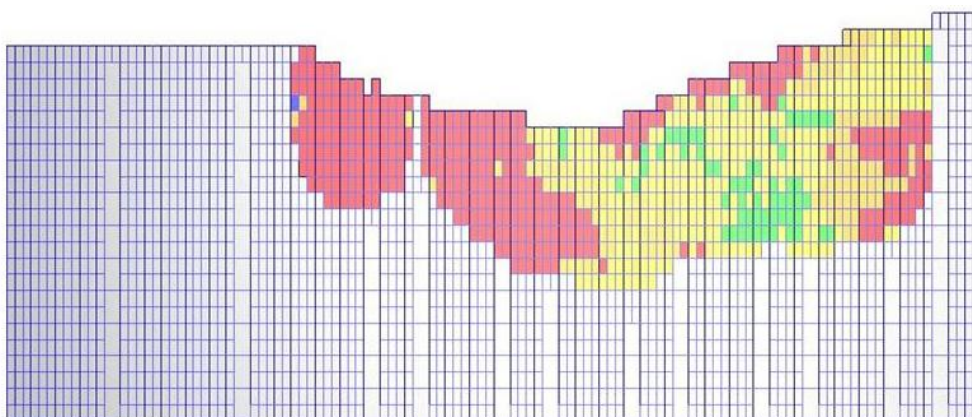
(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 5.6: (α) Διεύθυνση τομών στο χώρο του λατομείου, (β) Τομή A-A', (γ) Τομή B-B', (δ) Τομή C-C', (ε) Τομή D-D'

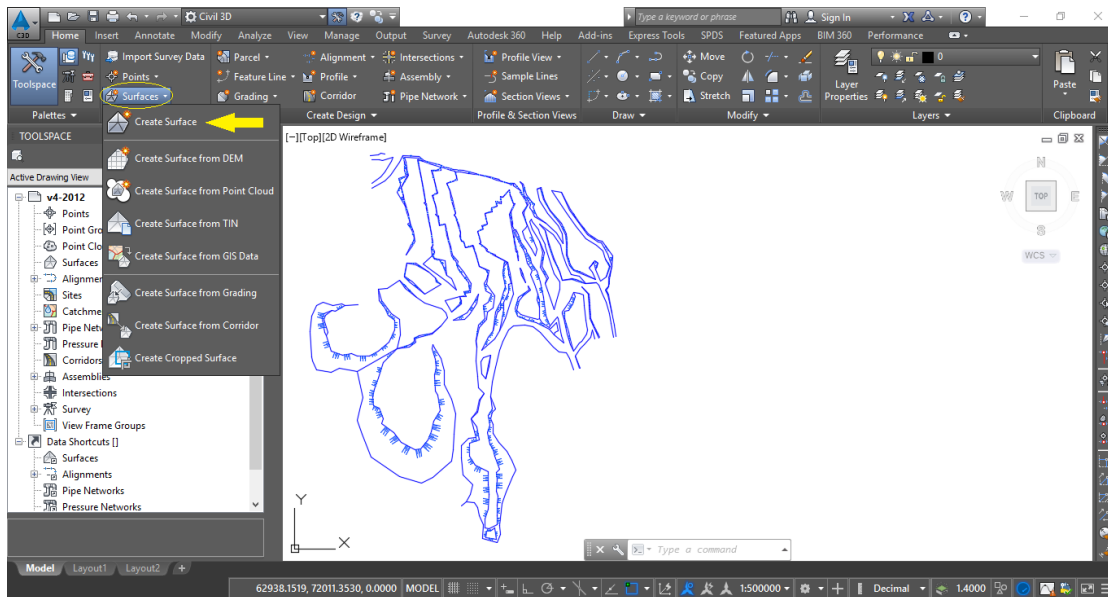
Συνοπτικά, κατά την διαδικασία της σύγκρισης του γεωλογικού με το ογκομετρικό μοντέλο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα και προτάσεις:

- Τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν διαφορές που οφείλονται στα μεγάλα ρήγματα (contro) στο Δυτικό τομέα και η εκμετάλλευση του μαρμάρου σε αυτό τον τομέα κρίνεται ως ασύμφορη.
- Για την εξέλιξη του λατομείου πρέπει να οριστούν νέα όρια εκμετάλλευσης που να επικεντρώνονται στον Ανατολικό τομέα του λατομείου.
- Με βάση τα νέα όρια εκμετάλλευσης πρέπει να σχεδιαστεί καινούργιο ογκομετρικό μοντέλο που θα συμπεριλαμβάνει τα ρήγματα και την προσθήκη νέας κλάσης της συχνότητας ασυνεχειών (FF) για μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση των αποθεμάτων.

Παράρτημα Α: Δημιουργία επιφάνειας

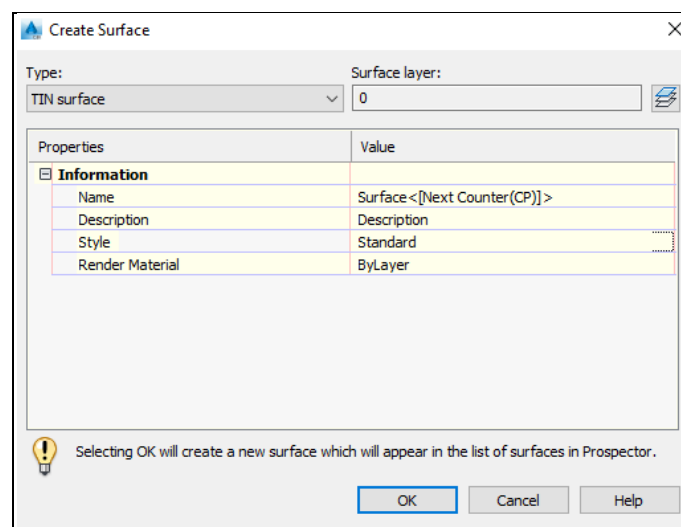
Η διαδικασία για την δημιουργία της επιφάνειας έχει τα εξής βήματα:

1. Για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας στο AutoCad Civil 3D αρχικά απαιτείται, χάρτης που να απεικονίζει τα υψόμετρα στο λατομείο. Πατώντας την εντολή Surface (κίτρινος κύκλος και επιλέγοντας το Create Surface (κίτρινο βελάκι) δημιουργείται η επιφάνεια. (Σχήμα Π 1)



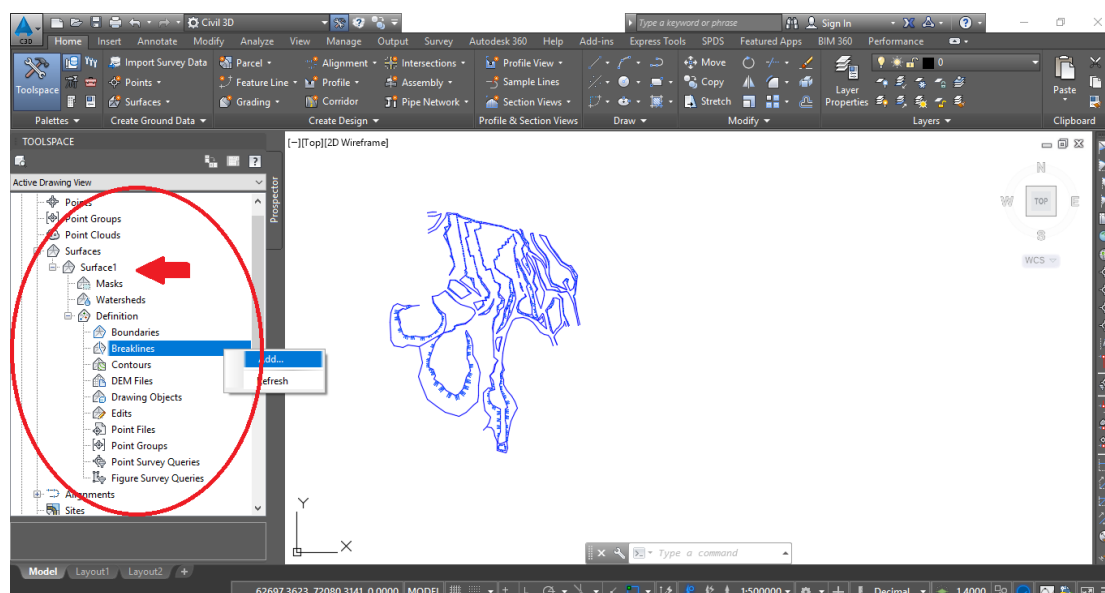
Σχήμα Π1: Εντολή για την δημιουργία επιφάνειας

2. Εν συνεχεία ανοίγει ένα 'παράθυρο' το οποίο αναφέρει τον τύπο της επιφάνειας και το layer στο οποίο θα αποθηκευτεί η επιφάνεια. (Σχήμα Π 2.)



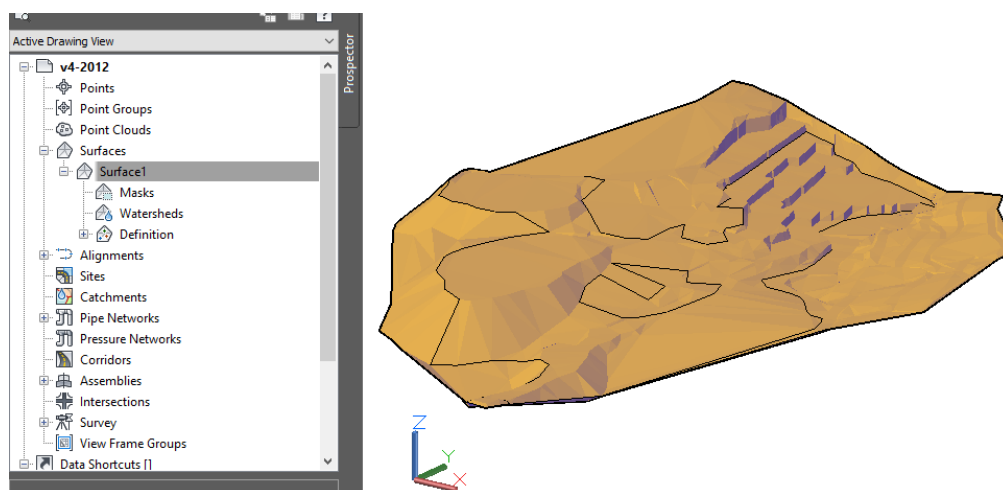
Σχήμα Π2: Αποθήκευση σε Layer

3. Στο TOOLSPACE έχει δηλωθεί η νέα επιφάνεια με το όνομα Surface1 (κόκκινο βελάκι). Κάνοντας κλικ σε όλα τα + που αφορούν τις επιφάνειες παρουσιάζονται οι υποκατηγορίες των επιφανειών. Ανάλογα με τα στοιχεία που δίνονται στο χάρτη (π.χ. points, ισοϋψείς) επιλέγεται και η αντίστοιχη υποκατηγορία (κόκκινος κύκλος). (Σχήμα Π3)



Σχήμα Π3: Υποκατηγορίες επιφάνειας

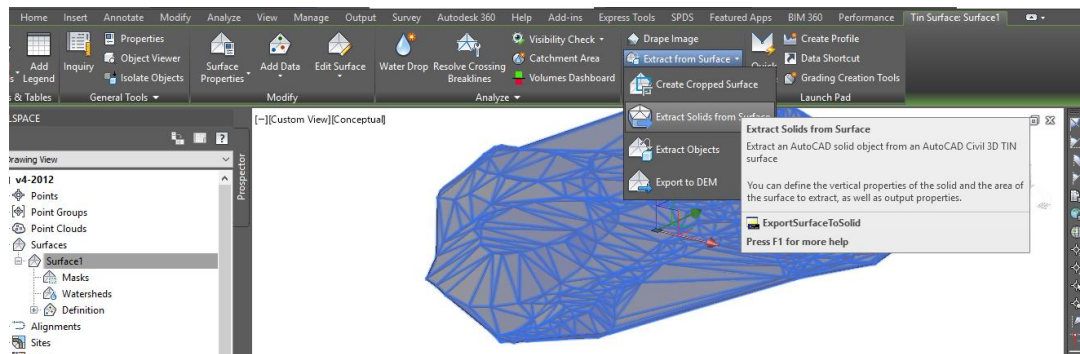
4. Κάνοντας δεξί κλικ στην αντίστοιχη υποκατηγορία και πατώντας το Add υπάρχει η δυνατότητα για την επιλογή των στοιχείων ώστε να δημιουργηθεί η επιφάνεια. (Σχήμα Π4)



Σχήμα Π4: Επιφάνεια σε 3D model

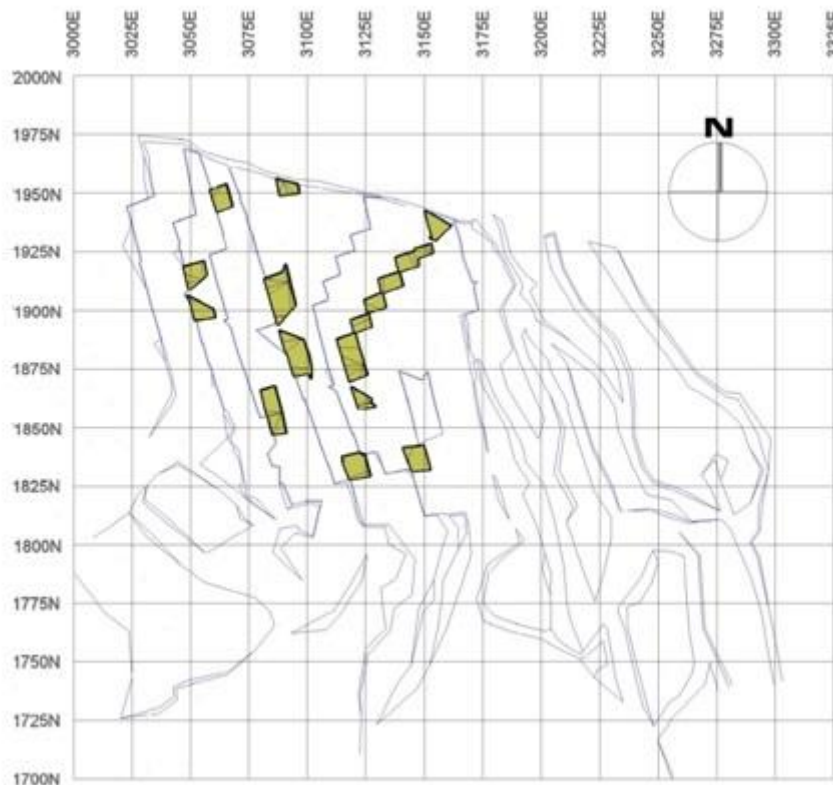
5. Για να μπορούν να αφαιρεθούν οι επιφάνειες είναι αναγκαία η δημιουργία στερεών επιφανειών. Έτσι επιλέγοντας την επιφάνεια, στο πάνω μέρος του προγράμματος εμφανίζεται το μενού που αφορά τις επιφάνειες και πατώντας το extract from Surface

>extract Solids from surface ανοίγει ένα νέο παράθυρο που καθορίζεται το βάθος και το υψόμετρο του στερεού.(*Σχήμα Π 5*).

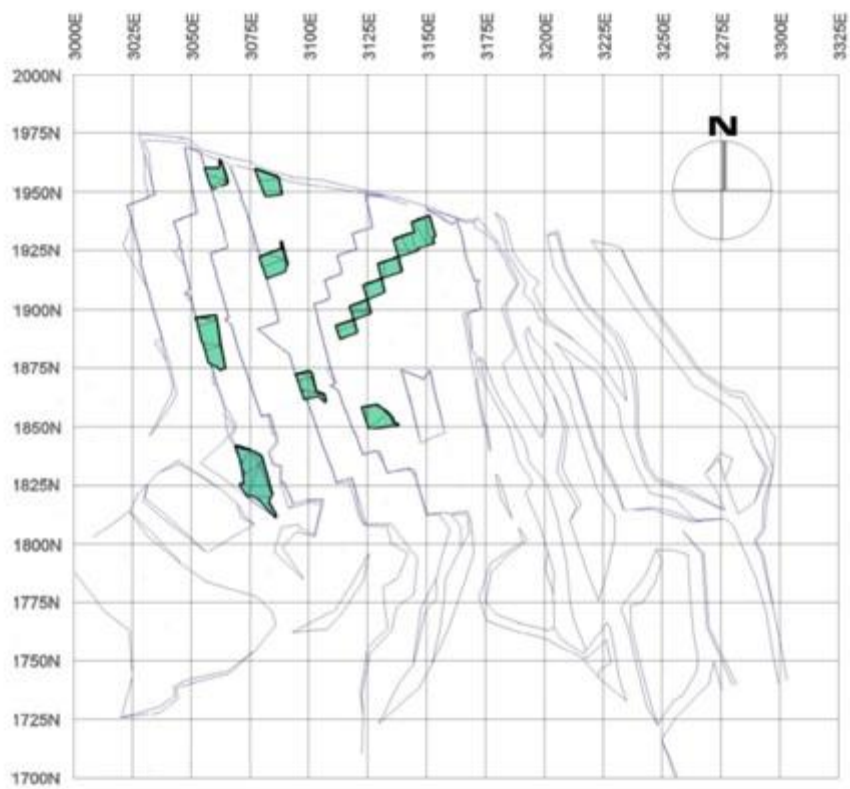


Σχήμα Π5: Δημιουργία στερεού από επιφάνεια

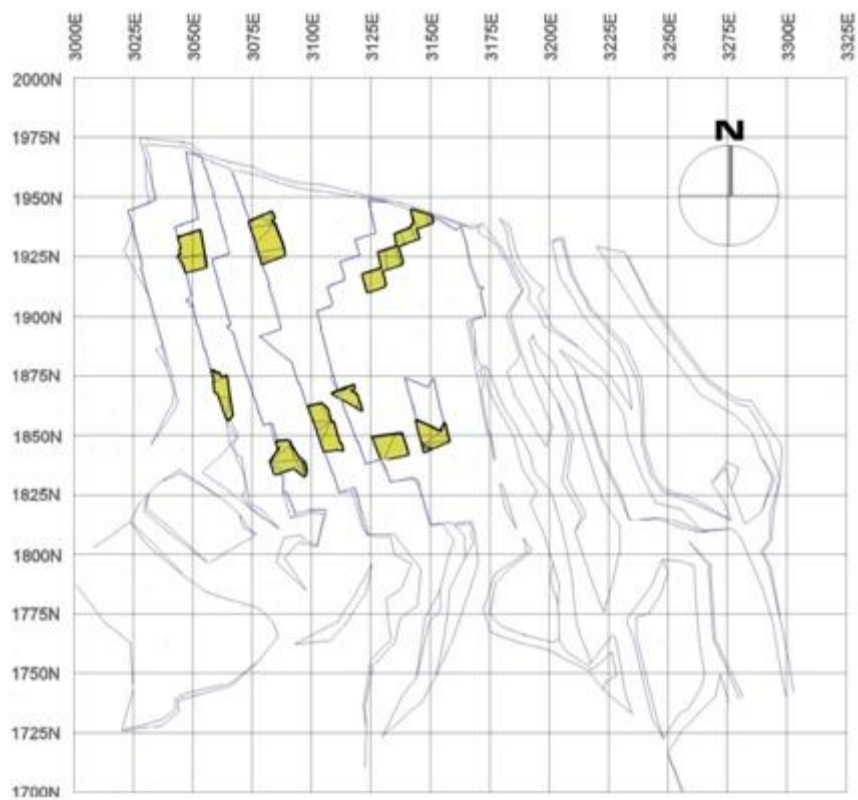
Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για όλους τους χάρτες και η παραγωγή προκύπτει, από την αφαίρεση των στερεών, δηλαδή ο όγκος που παραμένει μετά την αφαίρεση δύο διαδοχικών μηνών είναι η μηνιαία παραγωγή. Αναλυτικότερα από την επεξεργασία κάθε μήνα προκύπτει η εξής παραγωγή: (*Σχήματα Π6, Π7, Π8, Π9, Π10, Π11, Π12*)



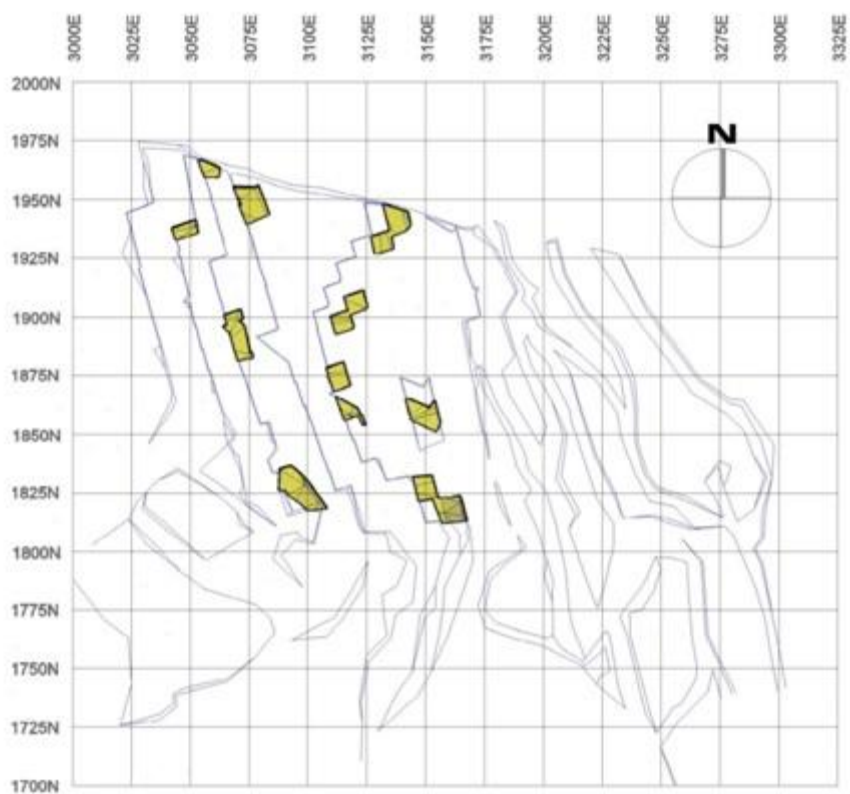
Σχήμα Π6: Παραγωγή μέχρι το μήνα Ιούνιο του 2014



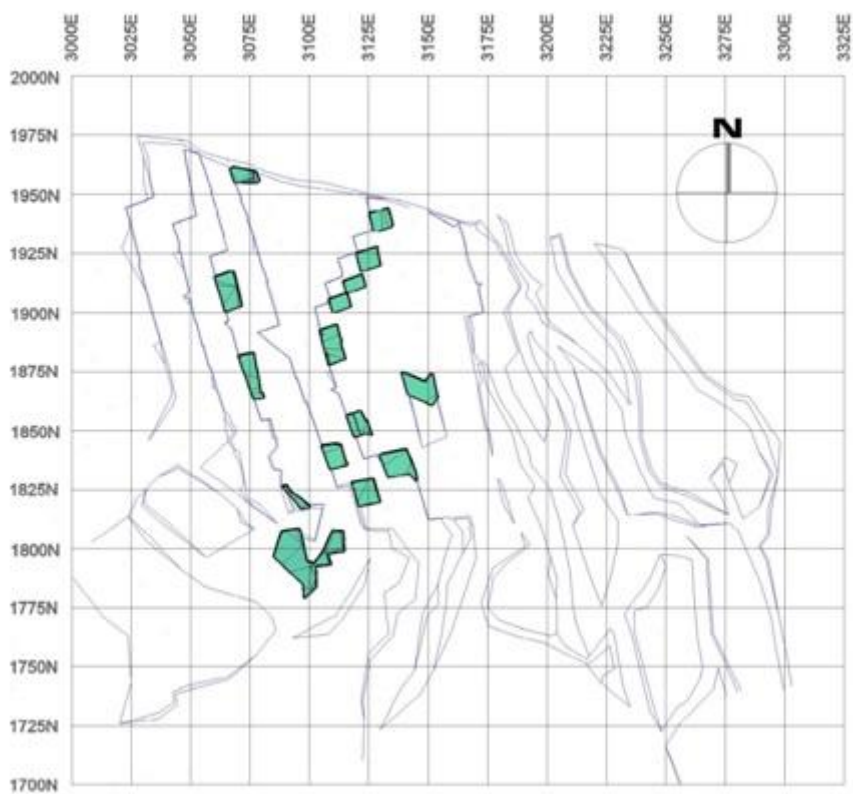
Σχήμα Π7: Παραγωγή το μήνα Ιούλιο του 2014



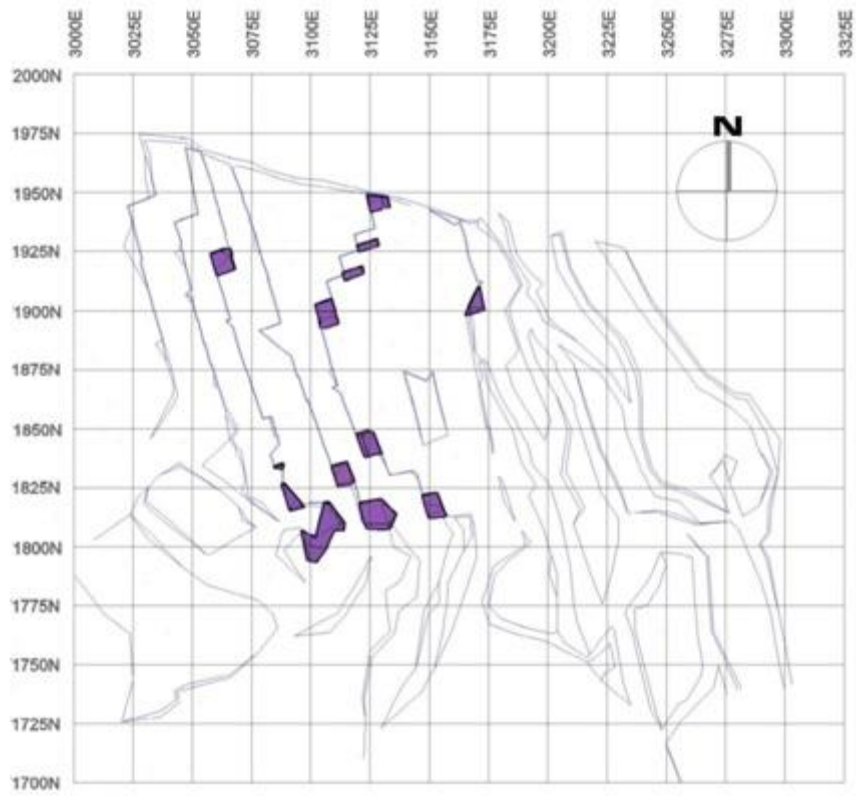
Σχήμα Π8: Παραγωγή το μήνα Αύγουστο του 2014



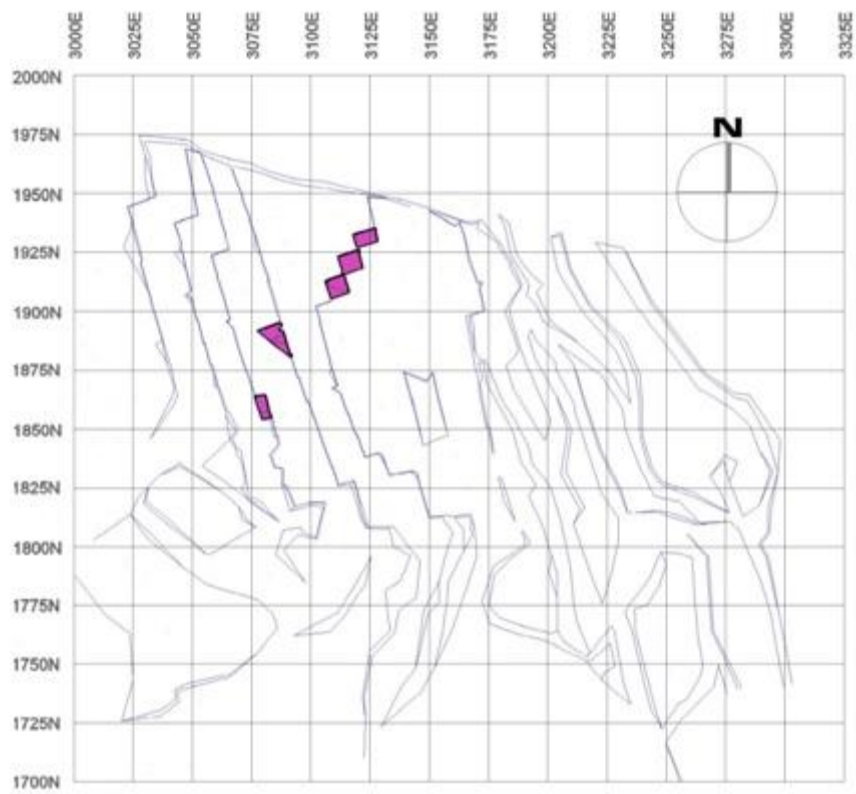
Σχήμα Π9: Παραγωγή το μήνα Σεπτέμβριο του 2014



Σχήμα Π10: Παραγωγή το μήνα Οκτώβριο του 2014



Σχήμα Π11: Παραγωγή το μήνα Νοέμβριο του 2014



Σχήμα Π12: Παραγωγή στις αρχές του μήνα Δεκεμβρίου του 2014

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγιουτάντης Ζ., (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής-Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

Βουγιούκας Δ. & Χατζηπαναγής Ι. (2001). Πληροφοριακά στοιχεία λειτουργούντων λατομείων και εργοστασίων επεξεργασίας μαρμάρων στην Αν. Μακεδονία και Θράκη. ΙΓΜΕ, Ξάνθη.

Γαλετάκης Μ., (2017). Σχεδιασμός Εκμεταλλεύσεων με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Εξαδάκτυλος Γ., (2006). Σχεδιασμός Γεωτεχνικών & Λατομικών Έργων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Ζορμπά Κ, Δρίβας Σ, Καμπόση Κ, Κουκουλάκη Θ, Κρομούδας Σ, Κωνσταντοπούλου Σ, Νόβας Ι, Πίνοτση Δ, Ραντίν Λ.,(2007) Εκτίμηση Επαγγελματικού Κινδύνου Σε Σχιστήρια Και Λατομεία Μαρμάρου, ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., Αθήνα.

Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών, σύνδεσμος μεταλλευτικών επιχειρήσεων, ΥΑ2223 ΦΕΚ122714/06/11.

Κορρές Μ., (1994). Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα, Εκδόσεις Μέλισσα.

Νομικός Π.,(2015). Εισαγωγή στη Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις Κάλλιπος, Αθήνα.

Ρόζος Δ., (2017). Τεχνική γεωλογία II, Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Αθήνα.

Σαράτσης Γ., (2004). Συζευγμένη Γεωστατιστική-Μηχανική Ανάλυση Σηράγγων, Μεταπτυχιακή διατριβή, Χανιά.

Σοφιανός Αλ., Νομικός Π., (2008) Μηχανική Πετρωμάτων, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Χατζηπαναγής Ι., (1991). Η Γεωλογική Δομή Της Ευρύτερης Περιοχής Του Όρους Φαλακρού, διδακτορική διατριβή, Αθήνα.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Crawford, J.T. and Davey, R.K., 1979. Case study in open pit limit analysis. In: Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry (A.Weiss, editor): 310–318. SME-AIME.

David, M., (1977). Geostatistical Ore Reserve Estimation, Amsterdam, Elsevier.

Deere D.U., 1968. Geological considerations. Rock Mechanics in Engineering Practice, eds. K.G. Staggs and O.C. Zienkiewicz. John Wiley & Sons, London.

Hudson J.A. and Harrison J.P. (1997).“Engineering Rock Mechanics An Introduction to the Principles”, Pergamon.

Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1981, June). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 18, No. 3, pp. 183-197).Pergamon.

Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976, May).Discontinuity spacings in rock.In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 13, No. 5, pp. 135-148).Pergamon.

Stavropoulou M., (2014). Discontinuity frequency and block volume distribution in rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Volume 65, January 2014, Pages 62-74.

William Hustrulid, Mark Kuchta and R. Martin, (2006). Open pit mine planning and design. CRC Press.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<http://www.dionyssomarble.com>

<http://www.e-marmara.gr>

<http://www.orykta.gr>