

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη ασυνεχειών κοιτάσματος δολομιτικού μαρμάρου με
τη βοήθεια προσανατολισμένων γεωτρήσεων»

ΡΟΒΙΘΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΣΑΡΑΤΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ, 2020

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκφράζουν τον συγγραφέα αυτής.

Πρόλογος

Η παρακάτω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ομώνυμου ερευνητικού προγράμματος, στην ευρύτερη περιοχή της Δράμας, με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου, Γεώργιο Εξαδάκτυλο για την επιλογή και ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, τις συμβουλές και τις διορθώσεις του, καθώς και το ενδιαφέρον και τη συμπαράσταση του όσο διέμενα στη Δράμα για την εκπόνηση των μετρήσεων της εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Στειακάκη Εμμανουήλ, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και για το χρόνο που διέθεσε για τη διόρθωση της εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Σαράτση Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια του στην ολοκλήρωση της εργασίας, για την υποστήριξη του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και για την καλή μας συνεργασία.

Επίσης ευχαριστώ τον κύριο Ξηρουδάκη Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια του στην επεξεργασία των δεδομένων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στην επικεφαλής γεωλόγο της KAPMAP A.E. (Stone Group International) Κορίννα Πιπερά για την άριστη συνεργασία μας κατά τη διαμονή μου στη Δράμα, για την μεταλαμπάδευση των γνώσεων της καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές της.

Επιπροσθέτως ευχαριστώ την εταιρεία KAPMAP A.E. καθώς και το ερευνητικό πρόγραμμα (MARBLECORE AM ΘΡ2-0016310), για την εξ' ολοκλήρου κάλυψη όλων των εξόδων μου κατά την παραμονή μου στη Δράμα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου σπουδών, και ιδιαίτερα τον αδερφό μου Ιάσονα στον οποίο και αφιερώνω την παρούσα εργασία.

Περιεχόμενα

Κατάλογος εικόνων.....	5
Κατάλογος διαγραμμάτων.....	7
Κατάλογος πινάκων	8
Περίληψη	9
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	11
1.1 Μάρμαρο.....	11
1.1.1 Ασυνέχειες στο μάρμαρο	13
1.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	14
1.2.1 Μάζα Ροδόπης.....	14
1.2.2 Περιοχή Φαλακρού.....	16
Κεφάλαιο 2 - Γεωτρήσεις πυρηνοληψίας πετρωμάτων.....	18
2.1 Περιστροφική διάτρηση.....	19
2.1.1 Γεώτρηση με χρήση κοπτικών ελασμάτων	21
2.1.2 Γεώτρηση με χρήση τρίκωνων κοπτικών	21
2.1.3 Γεώτρηση με χρήση αδαμάντινης κεφαλής.....	22
2.2 Προσανατολισμένες γεωτρήσεις	27
Κεφάλαιο 3 – Ασυνέχειες – Στατιστικός χαρακτήρας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών	30
3.1 Ασυνέχειες.....	30
3.2 Στατιστικός χαρακτήρας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών	35
Κεφάλαιο 4 - Περιγραφή της διαδικασίας	40
4.1 Προσανατολισμός των ασυνεχειών που αποτυπώθηκαν στα μέτωπα του λατομείου.....	41
4.2 Προσανατολισμοί ασυνεχειών από μετρήσεις των γωνιών α, β από προσανατολισμένες γεωτρήσεις	44
4.2.1 Προσανατολισμός πυρήνα – REFLEX ACT III™	46
4.3 Διαδικασία μετρήσεων	49
Κεφάλαιο 5 - Επεξεργασία δεδομένων	57
5.1 Μαθηματικό μοντέλο.....	57
5.2 Κατανομές των αποστάσεων των ασυνεχειών σε κάθε οικογένεια από μετρήσεις των συχνοτήτων των ασυνεχειών	59

5.2.1 1η οικογένεια ασυνεχειών – Στρώσεις	59
5.2.2 2η οικογένεια ασυνεχειών – Κεφάλια	62
5.2.3 3η οικογένεια ασυνεχειών – Μουρέλα.....	64
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα.....	68
Βιβλιογραφία	70

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1-Χαρακτηριστικά επίπεδα πάγκου μαρμάρου (rift= πρόσωπο, grain= μουρέλο, head-grain=κεφάλι) (Εξαδάκτυλος, 2005).....	13
Εικόνα 2-Χάρτης γεωτεκτονικών ζωνών Ελλάδας, με ροζ χρώμα αποτυπώνεται η μάζα Ροδόπης (www.orykta.gr).....	14
Εικόνα 3-Μάζα Ροδόπης κατά Παπανικολάου - Παναγόπουλο (1981).....	15
Εικόνα 4-Λιθολογικές ενότητες όρους Φαλακρού (Χατζηπαναγής, 2004).....	17
Εικόνα 5-Ενότητα μαρμάρων (Χατζηπαναγής, 1991).....	17
Εικόνα 6-Γεωτρύπανο τύπου Longyear (Εξαδάκτυλος 2019, διαλέξεις μαθήματος Σχεδιασμού υπαίθριων εκμεταλλεύσεων).....	18
Εικόνα 7-Κύρια μέρη διατρητικής στήλης (Μόδης- Σταματάκη, 2015)	20
Εικόνα 8- Κοπτικά με ελάσματα (Σταματάκη, 2006)	21
Εικόνα 9-Τύποι κοπτικών με περιστρεφόμενους κώνους (Σταματάκη, 2006)	22
Εικόνα 10-Μέρη αδαμάντινης κεφαλής (Μόδης- Σταματάκη, 2015)	23
Εικόνα 11-Πυρήνας γεώτρησης μαρμάρου (φωτογραφία στο πεδίο)	23
Εικόνα 12-Δειγματοσυλλέκτης μονού τοιχώματος (Μόδης-Σταματάκη, 2015)	24
Εικόνα 13-Μέθοδος Wireline (Μόδης-Σταματάκη, 2015)	25
Εικόνα 14-Τυποποίηση διαμέτρων κοπτικών άκρων και δειγματοληπτών wireline στην τεχνολογία γεωτρήσεων (Abzalov, 2016, Applied Mining Geology (Modern Approaches in Solid Earth Sciences) 1st ed., Springer Switzerland).....	26
Εικόνα 15-Όργανο Core Marking Punch (Abzalov, 2016).....	27
Εικόνα 16-Συσκευή Craelius (Abzalov,2016)	28
Εικόνα 17-Μαρκάρισμα πυρήνα καθώς εξέρχεται από τη γεώτρηση (Abzalov, 2016)	28
Εικόνα 18-Συσκευή μέτρησης προσανατολισμού (Abzalov,2016)	29
Εικόνα 19-Άποψη λατομείου ασβεστολίθου στη Μιννεσότα που διασχίζεται από λίγες ασυνέχειες και διαθέτει μεγάλη απόδοση ορθογωνισμένων όγκων.	

(Εξαδάκτυλος 2019, σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμού Υπαίθριων Εκμεταλλεύσεων)	30
Εικόνα 20-Τεχνικοί όροι για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών (International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on Terminology, Symbols and Graphic Representation, Terminology Int. Soc. Rock Mech. Secretary, Lisbon, 1975)	31
Εικόνα 21-Κλίση και διεύθυνση κλίσης επιπέδου ασυνέχειας (International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on Terminology, Symbols and Graphic Representation, Terminology Int. Soc. Rock Mech. Secretary, Lisbon, 1975).....	32
Εικόνα 22-Χρήση γεωλογικής πυξίδας για μέτρηση κλίσης και διεύθυνσης κλίσης μιας ασυνέχειας στο μέτωπο (Λόζιος, 2015)	33
Εικόνα 23-Ασυνέχεια που περνά από το κέντρο της σφαίρας αναφοράς (Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah, Rock Slope Engineering, Civil and mining 4th edition)	33
Εικόνα 24-Στερεογραφική προβολή της ασυνέχειας με τη μορφή μεγάλου κύκλου και πόλου (ως προβολές του επιπέδου της ασυνέχειας και του κάθετου διανύσματος στο κατώτερο ημισφαίριο της σφαίρας αναφοράς) (Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah, Rock Slope Engineering).....	34
Εικόνα 25-Κατανομές των συγκεντρώσεων των πόλων των ασυνεχειών (Priest, 1993)	35
Εικόνα 26-Μέτρηση αποστάσεων διαδοχικών ασυνεχειών σε πυρήνες γεώτρησης (Εξαδάκτυλος, σημειώσεις μαθήματος Μηχανικής Πετρωμάτων).....	36
Εικόνα 27-Φαινόμενη και πραγματική απόσταση διαδοχικών ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας	36
Εικόνα 28-Ιστόγραμμα συχνότητας αποστάσεων ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας σε γραμμή σάρωσης συνολικού μήκους 514.57 m και προσαρμοσμένη αρνητική εκθετική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Priest, 1993).....	38
Εικόνα 29-Ιστόγραμμα FF και προσαρμοσμένη κατανομή Poisson.....	39
Εικόνα 30-Εκτεθειμένο μέτωπο.....	41
Εικόνα 31-Κάτοψη θέσεων που μετρήθηκαν οι ασυνέχειες στα εκτεθειμένα μέτωπα με γεωλογική πυξίδα (AutoCAD 2019)	42
Εικόνα 32-Άποψη από Βορρά του γεωτρυπάνου (Στο βάθος της φωτογραφίας φαίνεται το χωριό Οχυρό)	44
Εικόνα 33-Γεωτρύπανο που χρησιμοποιήθηκε.....	45
Εικόνα 34-Συσκευή REFLEX ACT III (https://reflexnow.com/product/reflex-act-iii/) .	46
Εικόνα 35-Περισυλλογή προσανατολισμένων γεωτρήσεων στη θέση Οχυρό Δράμας	47

Εικόνα 36-Μαρκάρισμα πυρήνα αφού έχει προσανατολισθεί	48
Εικόνα 37-Συσκευή υποδοχής των πυρήνων	48
Εικόνα 38-Κασόνια πυρήνων μαρμάρου που μεταφέρθηκαν από το χώρο των γεωτρήσεων στο λατομείο	49
Εικόνα 39-Κασόνι τοποθέτησης προσανατολισμένου πυρήνα και ίχνος στο πάνω μέρος του πυρήνα	49
Εικόνα 40-Ειδικά βαθμονομημένη διαφάνεια με την οποία μετρώνται πάνω στο καρότο διαμέτρου HQ οι α, β	50
Εικόνα 41-Υπολογισμός α, β γωνιών πάνω στον πυρήνα (Abzalov, 2016)	51
Εικόνα 42-Μετρηση α, β όταν το ίχνος βρίσκεται στο κατώτερο σημείο του πυρήνα όταν: α) η γωνία β είναι μεταξύ $0-180^\circ$, β) η γωνία β είναι μεταξύ $180-360^\circ$ (Abzalov, 2016)	51
Εικόνα 43-Απεικόνιση BOH, CA, Vertical Plane, Circumference Plane (http://rogermarjoribanks.info/stereonet-solution-alpha-beta-angles-oriented-drill-core)	52
Εικόνα 44-Τρόπος εύρεσης των E, E' (http://rogermarjoribanks.info/stereonet-solution-alpha-beta-angles-oriented-drill-core)	53
Εικόνα 45-Κατασκευή μεγάλου κύκλου και εύρεση γωνίας $90^\circ - \alpha$ για τις 2 περιπτώσεις (http://rogermarjoribanks.info/stereonet-solution-alpha-beta-angles-oriented-drill-core)	54
Εικόνα 46- Συστήματα ασυνεχειών που αναπτύσσονται σε πτυχωμένα στρώματα μαρμάρου	56

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1-Πόλοι και μεγάλοι κύκλοι οικογένειων ασυνεχειών από μετρήσεις με γεωλογική πυξίδα (Dips v6.0 (2016), Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data, Rocscience https://www.rocscience.com/software/dips)	42
Διάγραμμα 2-Εύρεση του πόλου P της ασυνέχειας	54
Διάγραμμα 3-Κατανομή πόλων ασυνεχειών	55
Διάγραμμα 4-Προβολές των ασυνεχειών που μετρήθηκαν από τις γεωτρήσεις	55
Διάγραμμα 5-Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών ανά 1 m της οικογένειας 1 (στρώση)	59
Διάγραμμα 6-Αθροιστική κατανομή και προσαρμοσμένη κατανομή τροποποιημένης Poisson για συχνότητα ανά μέτρο ($CDF = \text{αθροιστική κατανομή}$)	60
Διάγραμμα 7-Προσαρμογή συνάρτησης x με σχέση δύναμης	61

Διάγραμμα 8-Κατανομή Weibull φαινόμενων αποστάσεων (CDF Weibull=αθροιστική κατανομή κατά Weibull)	61
Διάγραμμα 9-Κατανομή Weibull πραγματικών αποστάσεων (Yakovlev, G., Rundle, J. B., Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2005). Inter-arrival time distribution for the non-homogeneous Poisson process. arXiv preprint cond-mat/0507657)	62
Διάγραμμα 10-Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών ανά 1 m της οικογένειας 2 (κεφάλια)	62
Διάγραμμα 11-Αθροιστική κατανομή και προσαρμοσμένη κατανομή τροποποιημένης Poisson για συχνότητα ανά μέτρο (CDF=αθροιστική κατανομή)....	63
Διάγραμμα 12-Προσαρμογή συνάρτησης x με σχέση δύναμης	63
Διάγραμμα 13-Κατανομή Weibull φαινόμενων αποστάσεων (Weibull CDF=αθροιστική κατανομή κατά Weibull)	64
Διάγραμμα 14-Κατανομή Weibull πραγματικών αποστάσεων (Yakovlev, G., Rundle, J. B., Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2005). Inter-arrival time distribution for the non-homogeneous Poisson process. arXiv preprint cond-mat/0507657)	64
Διάγραμμα 15-Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών ανά 1 m της οικογένειας 3 (μουρέλα).....	65
Διάγραμμα 16-Αθροιστική κατανομή και προσαρμοσμένη κατανομή τροποποιημένης Poisson για συχνότητα ανά μέτρο (CDF=αθροιστική κατανομή)....	65
Διάγραμμα 17-Προσαρμογή της συνάρτησης x με σχέση δύναμης.....	66
Διάγραμμα 18-Κατανομή Weibull φαινόμενων αποστάσεων (Weibull CDF=αθροιστική κατανομή κατά Weibull)	66
Διάγραμμα 19-Κατανομή Weibull πραγματικών αποστάσεων (Yakovlev, G., Rundle, J. B., Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2005). Inter-arrival time distribution for the non-homogeneous Poisson process. arXiv preprint cond-mat/0507657)	67
Διάγραμμα 20-Αθροιστική κατανομή εμβάδων πλακών μαρμάρου που δυνητικά μπορούν να παραχθούν από το λατομείο	69

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-Τύποι μαρμάρων Φαλακρού όρους.....	12
Πίνακας 2-Μετρήσεις προσανατολισμού στα μέτωπα με γεωλογική πυξίδα	41
Πίνακας 3-Μέσες κλίσεις και διευθύνσεις κλίσεων των οικογενειών ασυνεχειών ...	43
Πίνακας 4-Προσανατολισμός δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.....	46
Πίνακας 5-Οικογένειες ασυνεχειών που προέκυψαν από προσανατολισμένες γεωτρήσεις.....	56

Περίληψη

Η αποληψιμότητα ογκομαρμάρων εμπορικών διαστάσεων και ποιοτήτων καθορίζει τον προσδιορισμό των αποθεμάτων ενός κοιτάσματος μαρμάρου και κατ' επέκταση την εκμεταλλευσιμότητα του. Σήμερα τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να εκτιμηθούν τα αποθέματα και κατ' επέκταση η αποληψιμότητα των κοιτασμάτων μαρμάρου είναι οι πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις. Παρ'όλα αυτά η μέθοδος των γεωτρήσεων δεν παρέχει πλήρη προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών. Στην περίπτωση που πραγματοποιηθούν πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις σε κανονικό κানাβο για τον χαρακτηρισμό των κοιτασμάτων μαρμάρου, μία πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι η εκτέλεση προσανατολισμένων γεωτρήσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να δώσει τον προσανατολισμό και την απόσταση στον τρισδιάστατο χώρο των κύριων συστημάτων των ασυνεχειών.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάλυση δεδομένων από προσανατολισμένες πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις σε κοίτασμα μαρμάρου στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας.

Τα αποτελέσματα των προσανατολισμένων πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων σε συνδυασμό με ένα μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού κατανομής των όγκων που δημιουργούνται από τις αλληλοτέμνουσες ασυνέχειες, μπορούν να οδηγήσουν στον υπολογισμό του λόγου απόληψης εμπορεύσιμων ογκομαρμάρων προς τον συνολικό εξορυχθέντα όγκο του κοιτάσματος μαρμάρου. Ο βασικός στόχος των προσανατολισμένων γεωτρήσεων είναι η ταυτοποίηση και ομαδοποίηση των ασυνεχειών που διασχίζουν τους πυρήνες γεωτρήσεων σε οικογένειες με βάση τον προσανατολισμό τους και η κατανομή των πόλων των ασυνεχειών. Αφού επιτευχθούν τα παραπάνω μπορεί να μετρηθεί η συχνότητα των ασυνεχειών της κάθε οικογένειας ξεχωριστά (Fracture Frequency, FF). Τα αποτελέσματα της προηγούμενης διαδικασίας υφίστανται στατιστική ανάλυση και προκύπτουν οι κατανομές των αποστάσεων των ασυνεχειών κάθε οικογένειας για να προκύψει η αποληψιμότητα του κοιτάσματος σε όγκους μαρμάρων εμπορικών διαστάσεων.

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Μάρμαρο

Το μάρμαρο αποτελεί προϊόν μεταμόρφωσης ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων (ασβεστολίθων, δολομιτών). Αποτελείται από κρυστάλλους ασβεστίτη (CaCO_3), ή από συνδυασμό κρυστάλλων ασβεστίτη (CaCO_3) και δολομίτη ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Η σκληρότητα του κυμαίνεται μεταξύ 3-4 στην κλίμακα Mohs. Θεωρείται διακοσμητικό πέτρωμα με εφαρμογές σε δάπεδα, χώρους υγιεινής κτιρίων, καλλιτεχνήματα και μνημεία. Στον Ελληνικό χώρο υπάρχει μεγάλη ποικιλία εμπορικών τύπων μαρμάρου σε διαφορετικούς χρωματισμούς, κυρίως σε λευκά και ανοιχτόχρωμα μάρμαρα. Η περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ελληνικής παραγωγής και εμπορίας μαρμάρου.

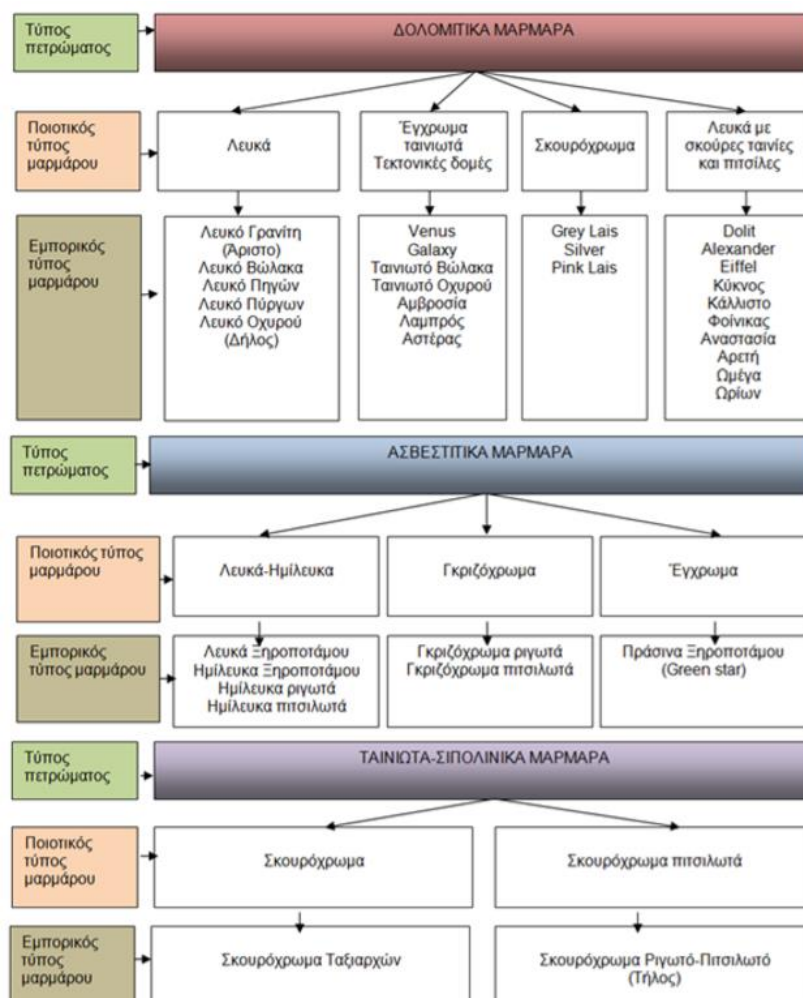
Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εμπορική αξία των μαρμάρων είναι οι εξής: (Χατζηπαναγής-Βουγιούκας, 2005)

- 1) Χημική- Ορυκτολογική σύσταση: η αισθητική και οι φυσικομηχανικές ιδιότητες του κάθε τύπου μαρμάρου ποικίλλει ανάλογα με τους ορυκτολογικούς τύπους που περιέχει.
- 2) Κοκκομετρία: ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με το ρυθμό ανακρυστάλλωσης του πετρώματος καθώς και το βαθμό μεταμορφώσής του.
- 3) Χρωματισμός: ανάλογα με το είδος και το ποσοστό των περιεχόμενων μη ανθρακικών ορυκτών, τα μάρμαρα εμφανίζουν διαφορετικούς χρωματισμούς. Συνήθως τα λευκά έχουν δολομιτική σύσταση, τα ημίλευκα, γκριζόχρωμα και σκουρόχρωμα είναι ασβεστιτικά, ενώ τα ποικιλόχρωμα είναι σιπολινικά.
- 4) Τεκτονική παραμόρφωση: η αποτύπωση των τεκτονικών δομών διαφέρει ανάλογα με το είδος της παραμόρφωσης και το είδος του μαρμάρου. Οι δομές αυτές δεν επηρεάζουν τη συνοχή του μαρμάρου, αλλά δημιουργούν νέους εμπορικούς τύπους. Για παράδειγμα ο τύπος “Galaxy” που διαμορφώνεται από πτυχωμένες ποικιλόχρωμες ταινίες που εναλλάσσονται με το λευκό δολομιτικό.
- 5) Φυσικοχημικές ιδιότητες: διαφέρουν από πέτρωμα σε πέτρωμα και παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μεταποίηση και τη χρήση των διακοσμητικών πετρωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντοχή στην κάμψη, τη φθορά από τριβή και στην κρούση είναι περίπου ίδιες τόσο για τα δολομιτικά όσο και τα ασβεστιτικά μάρμαρα (Βουγιούκας, 2001).
- 6) Τεχνικές κατεργασίες: πρόκειται για ορισμένες διαδικασίες που χωρίς αυτές θα ήταν αδύνατη η εκμετάλλευση ορισμένων μαρμάρων. Ορισμένες από αυτές είναι το ρητινάρισμα (εμποτισμός πλάκας μαρμάρου με ρητίνες για να καλυφθούν οι ρωγμές του), στοκάρισμα (πλήρωση μικρών ή μεγάλων οπών

του πετρώματος), ενίσχυση (συνδυασμός ρητίνης με υαλούφασμα για αύξηση της αντοχής).

Στην ευρύτερη περιοχή του Φαλακρού όρους συναντάται τεράστια ποικιλία εμπορικών τύπων μαρμάρου που ομαδοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: (Βουγιούκας-Χατζηπαναγής, 2009)

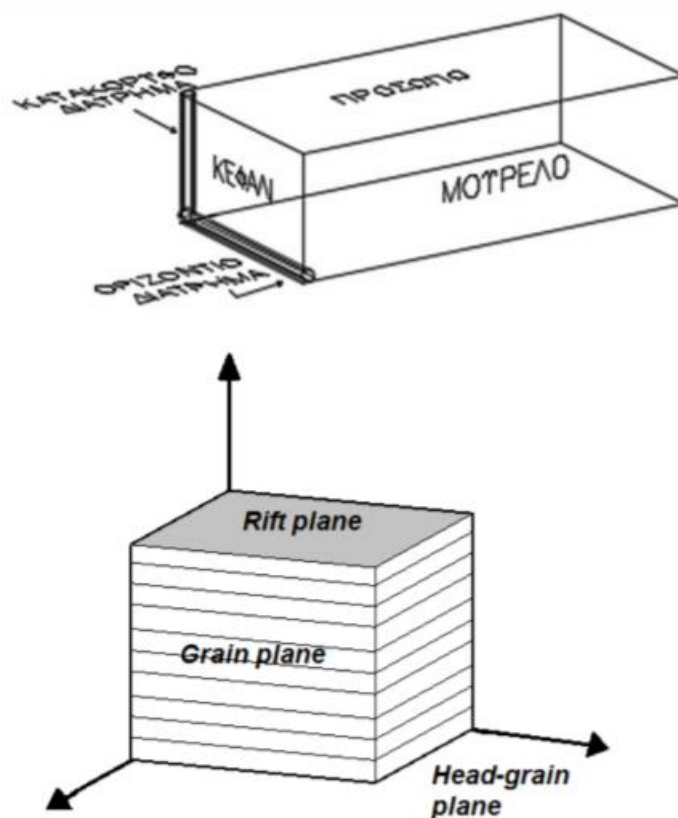
- i) Δολομιτικά μάρμαρα : έχουν τη μεγαλύτερη εμπορική αξία από τους υπόλοιπους τύπους. Κάποια από αυτά είναι τα Χιονόλευκα Θάσου, τα Λευκά Θάσου, τα δολομιτικά Γρανίτη-Βώλακα και τα δολομιτικά Πηγών Δράμας.
- ii) Ασβεστιτικά μάρμαρα : εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία εμπορικών τύπων. Οι τύποι με τη μεγαλύτερη εμπορική αξία είναι τα Λευκά Λημνιάς, τα λευκά Κεχροκάμπου και η Κρυσταλλίνα Θάσου.
- iii) Σιπολινικά μάρμαρα : αποτελούν τα μάρμαρα με τη μικρότερη εμπορική αξία λόγω προβλημάτων που παρουσιάζουν στην κοπή, στη λείανση και στη στίλβωση και λόγω του σκούρου τους χρώματος. Το μοναδικό σιπολινικό μάρμαρο που εξορύσσεται σήμερα είναι το Πράσινο Ξηροποτάμου (Green Star)



Πίνακας 1-Τύποι μαρμάρων Φαλακρού όρους

1.1.1 Ασυνέχειες στο μάρμαρο

Οι χαρακτηριστικές ασυνέχειες που διασχίζουν συνήθως το μάρμαρο, με βάση την ονοματολογία που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία εξόρυξης ογκομαρμάρων, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

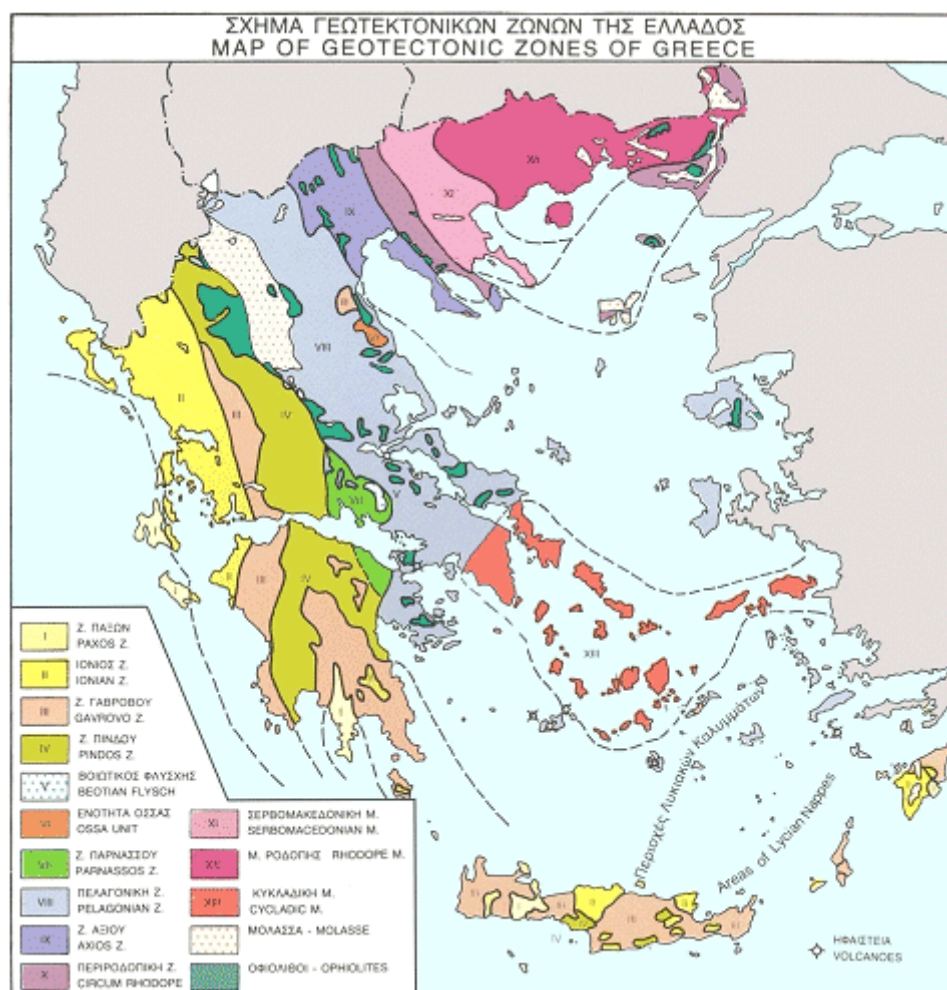


Εικόνα 1-Χαρακτηριστικά επίπεδα πάγκου μαρμάρου (rift= πρόσωπο, grain= μουρέλο, head-grain=κεφάλι)
(Εξαδάκτυλος, 2005)

- Πρόσωπο ή Verso ή Rift: τα λεγόμενα «νερά» του μαρμάρου είναι οι παράλληλες επιφάνειες προς τη στρώση. Παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση στη διάτρηση, στην κάμψη, στη θλίψη και στη συρματοκοπή.
- Μουρέλο ή Grain ή Secondo: είναι η παράλληλη επιφάνεια προς την παράταξη του κοιτάσματος και κάθετη προς το πρόσωπο.
- Κεφάλι ή Contro ή Head-Grain: είναι η κάθετη στις δύο προηγούμενες επιφάνειες. Παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη διάτρηση, στην κάμψη, στη θλίψη και στη συρματοκοπή.

1.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Η περιοχή που εκπονήθηκε το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα είναι η Ανατολική Μακεδονία και πιο συγκεκριμένα, λίγο έξω από την πόλη της Δράμας, στο όρος Φαλακρό. Η περιοχή αυτή ανήκει στη μάζα της Ροδόπης όπως φαίνεται και από τον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 2-Χάρτης γεωτεκτονικών ζωνών Ελλάδας, με ροζ χρώμα αποτυπώνεται η μάζα Ροδόπης (www.orykta.gr)

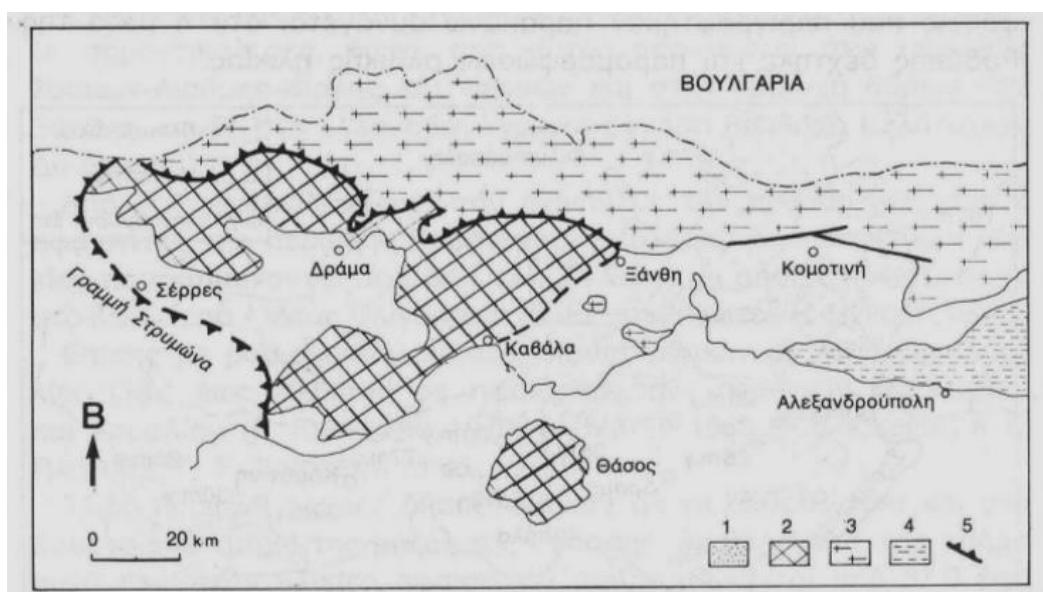
1.2.1 Μάζα Ροδόπης

Η μάζα Ροδόπης μαζί με τη Σερβομακεδονική μάζα θεωρούνται τμήματα της Ευρασιατικής λιθосφαιρικής πλάκας. Η μελέτη της αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία λόγω της απουσίας μη μεταμορφωμένων σχηματισμών. Αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη και εκρηξιγενή πετρώματα με πάχος 10-24 km. Η μάζα της Ροδόπης χωρίζεται σε 4 σειρές: (Μανούτσογλου, 2008 από OSSWALD, 1938)

- 1) Σειρά Ε, των γνεύσιων. Εμφανίζεται κυρίως στη Δυτική Ροδόπη με πάχος περίπου 7 χιλιόμετρα. Περιλαμβάνει κατά σειρά μοσχοβιτικούς γνεύσιους, βιοτιτικούς και διμαρμαρυγιακούς γνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, αμφιβολίτες και λεπτές ενστρώσεις μαρμάρων και σιπολινών. Η σειρά αυτή είναι μια παλιά ιζηματογενής σειρά με βαθμιαία μετάβαση προς την υπερκείμενη σειρά μαρμάρων.
- 2) Σειρά F, των μαρμάρων. Εκτείνεται από τον ποταμό Στρυμόνα έως το Νέστο και έχει πάχος μεταξύ 5,5-7 χιλιόμετρα. Αποτελείται κυρίως από μάρμαρα με ενστρώσεις σιπολινών, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, ασβεστούχων μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, και αμφιβολιτών.
- 3) Σειρά G, των μαρμαρυγιών και των σχιστολίθων. Έχει πάχος περίπου πέντε χιλιόμετρα και αποτελείται από μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους που συχνά μετρέπονται σε γνεύσιους καθώς και σπάνιες εμφανίσεις αμφιβολιτών και φακών μαρμάρου.
- 4) Σειρά Η, των σχιστολίθων και των μαρμάρων. Αναπτύσσεται στη ΒΑ όχθη του ποταμού Νέστου. Έχει πάχος γύρω στα τρία χιλιόμετρα και αποτελείται κυρίως από αμφιβολίτες μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους και μάρμαρα.

Σύμφωνα με τους Παπανικολάου και Παναγόπουλο (1981), η μάζα της Ροδόπης διακρίνεται σε :

- 1) Ανώτερη ενότητα ή αλλιώς ενότητα Σιδηρόνερου. Στη συγκεκριμένη ενότητα περιλαμβάνεται η βόρεια ενότητα της μάζας της Ροδόπης και αποτελείται από οφθαλμογνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους και αμφιβολίτες.
- 2) Κατώτερη ενότητα ή αλλιώς ενότητα του Παγγαίου. Αποτελείται από:
 - i) Κατώτερο ορίζοντα με ορθογνεύσιους, σχιστολίθους και αμφιβολίτες
 - ii) Μεσαίο ορίζοντα μαρμάρων
 - iii) Ανώτερο ορίζοντα με εναλλαγές σχιστολίθων-μαρμάρων.



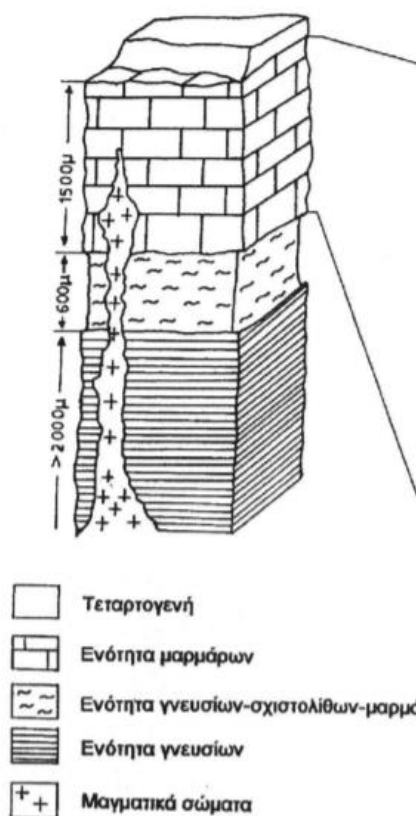
Εικόνα 3-Μάζα Ροδόπης κατά Παπανικολάου - Παναγόπουλο (1981)

1.2.2 Περιοχή Φαλακρού

Το όρος Φαλακρό βρίσκεται στην τεκτονική ενότητα Παγγαίου, της μάζας της Ροδόπης. Αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα πρασινοσχιστολιθικής φάσης με διεισδύσεις όξινων μαγματικών στρωμάτων. (Μπόσκος, 1994)

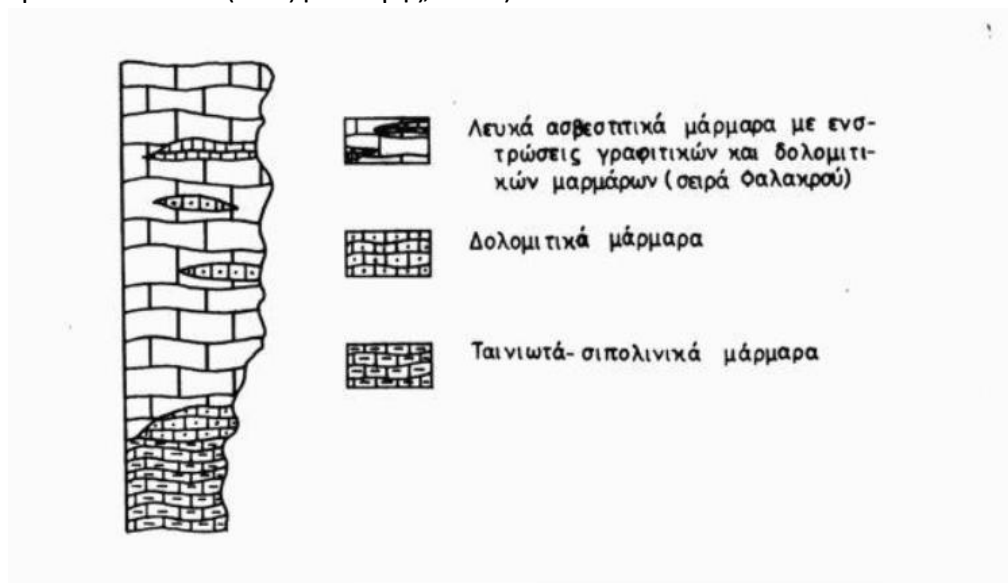
Τα μεταμορφωμένα πετρώματα χωρίζονται σε 3 μεγάλες λιθολογικές ενότητες όπως φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα :

- 1) Ενότητα των ορθογνεύσιων με πάχος μεγαλύτερο απο δύο χιλιόμετρα και περιλαμβάνει τα εξής πετρώματα (Χατζηπαναγής, 1991):
 - Λευκοκρατικούς μοσχοβιτικούς γνεύσιους
 - Σκουρόχρωμους βιοτιτικούς γνεύσιους
 - Οφθαλμογνεύσιους
 - Μιγματίτες
- 2) Ενότητα λιθολογικών εναλλαγών με πάχος μεταξύ 300-600 μέτρα και αποτελείται από τις πιο κάτω σειρές (Χατζηπαναγής, 1989):
 - Σειρά εναλλαγών γνεύσιων-σχιστολίθων-μαρμάρων.
 - Σειρά εναλλαγών γνεύσιων-σχιστολίθων-μαρμάρων με παρεμβολές αμφιβολιτών κατά θέσεις.
 - Σειρά εναλλαγών σχιστολίθων-γνεύσιων-αμφιβολιτών-μαρμάρων με παρεμβολές σερπεντινών ανά θέσεις.
- 3) Ενότητα μαρμάρων που εμφανίζεται στο ΝΝΔ τμήμα του νομού Δράμας, καλύπτει επιφανειακή έκταση γύρω στα 700 τετρ. Χιλιόμετρα και έχει πάχος περίπου 1500 μέτρα Αποτελείται από τις παρακάτω σειρές (Χατζηπαναγής, 1991):
 - Ταινιωτά σιπολινικά μάρμαρα στη βάση της ενότητας με μέγιστο πάχος 250 μέτρα.
 - Δολομιτικά μάρμαρα, υπό μορφή φακών, που βρίσκονται στο δυτικό τμήμα της περιοχής.
 - Άστρωτα ασβεστιτικά μάρμαρα.



Εικόνα 4-Λιθολογικές ενότητες όρους Φαλακρού (Χατζηπαναγής, 2004)

Πιο συγκεκριμένα η ενότητα των μαρμάρων περιγράφεται σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα (Χατζηπαναγής, 1991):



Εικόνα 5-Ενότητα μαρμάρων (Χατζηπαναγής, 1991)

Κεφάλαιο 2 - Γεωτρήσεις πυρηνοληψίας πετρωμάτων

Μία από τις κυριότερες αρμοδιότητες ενός μηχανικού σε ένα μεταλλείο είναι ο προσδιορισμός των γεωλογικών χαρακτηριστικών ενός μεταλλεύματος και του περιβάλλοντος πετρώματος που το φιλοξενεί. Αυτό επιτυγχάνεται με συστηματική δειγματοληψία του υπό μελέτη σχηματισμού. Έχοντας όλα τα απαραίτητα δεδομένα από τη δειγματοληψία, κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο που προσομοιάζει το κοίτασμα και παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους. Η επικρατέστερη μέθοδος δειγματοληψίας είναι η γεώτρηση. Γεώτρηση καλείται η κατακόρυφη ή κεκλιμένη κυκλικής διαμέτρου κυλινδρική οπή, η οποία ορύσσεται στο υπέδαφος με ειδικό μηχάνημα και κατάλληλο εξοπλισμό. Στόχοι των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων είναι:

- Συγκέντρωση στοιχείων του τεκτονισμού και της σύστασης των γεωλογικών σχηματισμών.
- Λήψη πυρήνων από διάφορα βάθη για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών.
- Προσδιορισμός του προσανατολισμού των στρώσεων, ρηγμάτων και άλλων τεκτονικών χαρακτηριστικών.
- Ανίχνευση και εντοπισμός υδροφόρων στρωμάτων και προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών τους (πορώδες, διαπερατότητα).



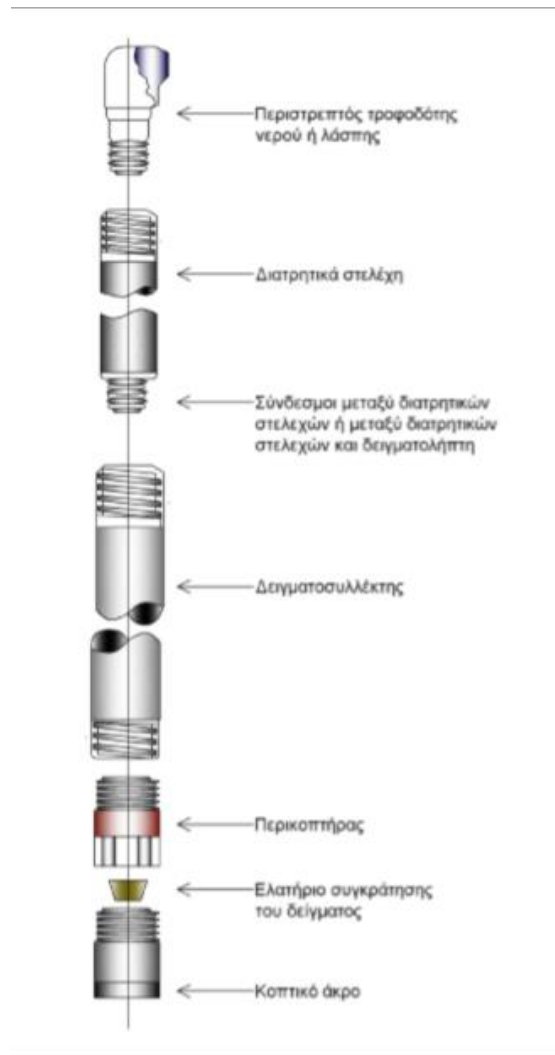
Εικόνα 6-Γεωτρήπανο τύπου Longyear (Εξαδάκτυλος 2019, διαλέξεις μαθήματος Σχεδιασμού υπαίθριων εκμεταλλεύσεων)

Στη συγκεκριμένη περίπτωση για τη λήψη των πυρήνων που μελετήθηκαν εφαρμόστηκε η περιστροφική διάτρηση όπου η προχώρηση επιτυγχάνεται με περιστροφή της διατρητικής στήλης και με χρήση κοπτικών κεφαλών.

2.1 Περιστροφική διάτρηση

Ο πλήρης εξοπλισμός ενός γεωτρητικού συγκροτήματος αποτελείται από ένα γεωτρύπανο και το βοηθητικό εξοπλισμό του. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται το γεωτρύπανο είναι τα εξής (Μόδης- Σταματάκη, 2015):

- Το πλαίσιο στήριξης: σε περίπτωση αυτοκινούμενου γεωτρυπάνου (όπως στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα) το όχημα ακινητοποιείται στη θέση εκτέλεσης της γεώτρησης με κατάλληλα μέσα.
- Το σύστημα παραγωγής και μετάδοσης κίνησης: αυτο επιτυγχάνεται ή με πετρελαιοκινητήρες ή με βενζινοκινητήρες ή με ηλεκτροκινητήρες (κυρίως σε υπόγειες διεργασίες).
- Ο μηχανισμός μετάδοσης περιστροφικής κίνησης στη διατρητική στήλη: Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ατράκτου που βρίσκεται στο μπροστινό τμήμα του γεωτρυπάνου, σε κατακόρυφη θέση με τη γεώτρηση.
- Το σύστημα ανόδου και καθόδου της διατρητικής στήλης (βαρούλκο, πύργος): στα αυτομεταφερόμενα γεωτρύπανα ο πύργος βρίσκεται στο πίσω μέρος του οχήματος. Το ύψος του πύργου καθορίζει και τον αριθμό των στελεχών που μπορεί να διαχειριστεί.
- Η διατρητική στήλη: που αποτελείται από το κοπτικό άκρο, τον περικοπτήρα, τον δειγματοσυλλέκτη, τα διατρητικά στελέχη, το Kelly και τον περιστρεπτό τροφοδότη ρευστού.
- Το σύστημα καθαρισμού της γεώτρησης από τα θρύμματα του πετρώματος λόγω της αποσύνθεσης του.



Εικόνα 7-Κύρια μέρη διατρητικής στήλης (Μόδης- Σταματάκη, 2015)

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα το κατώτερο μέρος του γεωτρητικού συγκροτήματος αποτελεί το κοπτικό άκρο. Ανάλογα με τη μορφή και το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι κοπτικές ακμές διακρίνονται σε: (Μόδης- Σταματάκη, 2015)

- Κοπτικά με ελάσματα (Drag Bits). Χρησιμοποιούνται στην περιστροφική διάτρηση και αποτελούν τον παλαιότερο τύπο κοπτικού άκρου. Το σχήμα τους ποικίλλει και συνήθως προσβάλλουν μαλακούς μη συνεκτικούς σχηματισμούς.
- Τρίκωνα κοπτικά (κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους). Οι κοπτικές ακμές κατασκευάζονται, είτε από το ίδιο υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το κοπτικό άκρο είτε παρουσιάζονται με τη μορφή κομβίων.
- Αδαμαντοκορώνες. Ανάλογα με το μέγεθος των διαμαντιών που φέρουν διακρίνονται σε αδαμαντοκορώνες με

βιομηχανικά διαμάντια, σε πολυκρυσταλλικά συμπαγή αδαμαντοκοπτικά και σε θερμικά σταθερά πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά.

2.1.1 Γεώτρηση με χρήση κοπτικών ελασμάτων

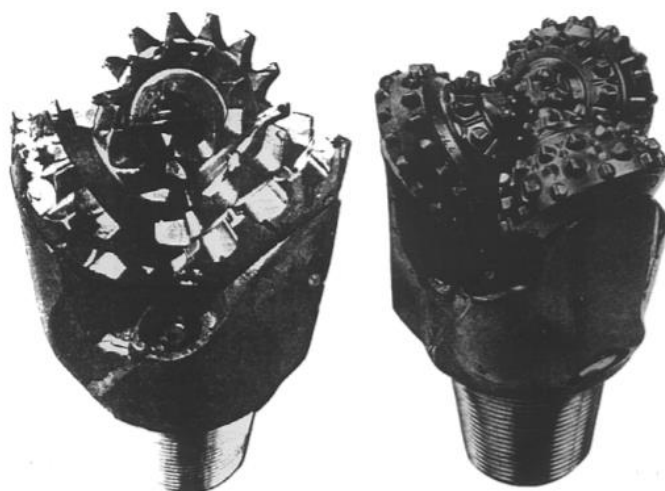
Αποτελεί τον παλαιότερο τύπο κοπτικού άκρου που χρησιμοποιήθηκε στην περιστροφική όρυξη γεωτρήσεων. Το πρώτο μέρος του κοπτικού άκρου διαθέτει δύο ελάσματα, ενώ σήμερα κατασκευάζονται διάφορα σχήματα ελασμάτων που είναι ενσωματωμένα στο κύριο σώμα του κοπτικού ή στερεώνονται σε αυτό και περιστρέφονται όλα μαζί σαν μία μονάδα με τη διατρητική στήλη. Σε σκληρούς και συνεκτικούς σχηματισμούς η φθορά του κοπτικού επιταχύνεται και μειώνεται ο ρυθμός προχώρησης. (Σταματάκη, 2006)



Εικόνα 8- Κοπτικά με ελάσματα (Σταματάκη, 2006)

2.1.2 Γεώτρηση με χρήση τρίκωνων κοπτικών

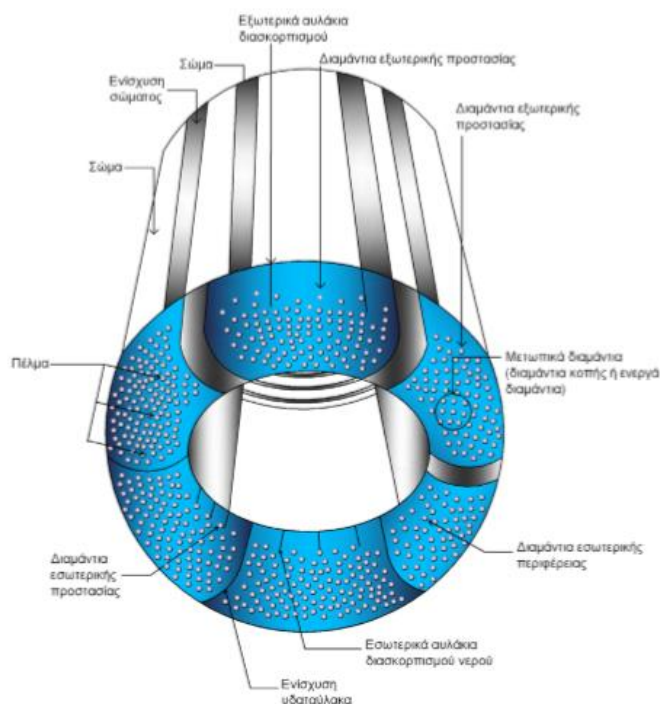
Περιλαμβάνει τρεις κώνους, προσαρμοσμένους κατάλληλα σε ένα σκέλος ο καθένας. Κάθε κώνος περιστρέφεται γύρω από πείρο, που αποτελεί προέκταση του σκέλους του κοπτικού. Τα σκέλη συγκολλούνται μεταξύ τους και σχηματίζουν την κυλινδρική άτρακτο του κοπτικού η οποία βιδώνεται στη διατρητική στήλη. Καθοριστικός είναι και ο τρόπος τοποθέτησης των οδόντων σε κάθε κώνο και η σχέση μεταξύ των οδόντων των κώνων μεταξύ τους. Οι οδόντες τοποθετούνται στους κώνους με τρόπο τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται η αλληλοεμπλοκή τους. (Σταματάκη, 2006)



Εικόνα 9-Τύποι κοπτικών με περιστρεφόμενους κώνους (Σταματάκη, 2006)

2.1.3 Γεώτρηση με χρήση αδαμάντινης κεφαλής

Στο συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα οι γεωτρήσεις εκτελέσθηκαν με αδαμαντοκορώνες. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί λεπτόκοκκους έως πολύ λεπτόκοκκους γεωμετρικά κατανεμημένους κρυστάλλους διαμαντιού μέσα σε μήτρα από καρβίδιο του βολφραμίου και χάλυβα. Όταν τα διαμάντια έχουν μεγάλο μέγεθος (έως 100 λίθοι/καράτι) τότε εμφυτεύονται στην επιφάνεια της κεφαλής. Έτσι κατασκευάζονται οι κορώνες κόκκου και χρησιμοποιούνται στη διάτρηση μαλακών ή μέτριας σκληρότητας σχηματισμών. Στην περίπτωση που τα διαμάντια είναι μικρά σε μέγεθος (200-4500 λίθοι/καράτι) τότε αναμιγνύονται με το υλικό της κεφαλής και επεξεργάζονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες όπου και συσσωματώνονται. Έτσι κατασκευάζονται οι κορώνες κόνεως που έχουν την ικανότητα να προσβάλλουν πολύ σκληρούς σχηματισμούς. Η αδαμάντινη κεφαλή του γεωτρυπάνου προσβάλλει κατά μέτωπο την υπό μελέτη βραχομάζα και με περιστροφική κίνηση, μέσω μηχανισμού ανακτώνται συμπαγείς κύλινδροι, που ονομάζονται πυρήνες γεωτρήσης. Κατά τη διάρκεια της προσβολής λόγω τοπικής φθοράς της κεφαλής, νέες κοπτικές ακμές εκτίθενται προς χρήση, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μία ομαλή διατρητική συμπεριφορά έως και την πλήρη φθορά της.



Εικόνα 10-Μέρη αδαμάντινης κεφαλής (Μόδης- Σταματάκη, 2015)



Εικόνα 11-Πυρήνας γεώτρησης μαρμάρου (φωτογραφία στο πεδίο)

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χρησιμοποιείται ροή νερού που περιχύνεται στη βραχομάζα έτσι ώστε να δημιουργείται υδραυλική πίεση στην κεφαλή του γεωτρυπάνου και να διευκολύνεται η διαδικασία. Μέσω του νερού ψύχεται το γεωτρυπάνο κατά τη διάρκεια της διάτρησης και καθαρίζεται η τρύπα καθώς αφαιρείται ο πυρήνας της γεώτρησης. Ανάλογα με τις ιδιότητες του εδάφους, το νερό εμπλουτίζεται με διάφορα προσθετικά που ρυθμίζουν το ιξώδες της γεωτρητικής λάσπης. Το κύκλωμα που επιτρέπει τη συνεχή κυκλοφορία ρευστού κατά την όρυξη της γεώτρησης περιλαμβάνει την κεντρική δεξαμενή (δεξαμενή λάσπης) και τη

βοηθητική δεξαμενή (δεξαμενή καθίζησης). Το παραπάνω σύστημα εμφανίζει απώλειες, οι οποίες καλύπτονται με επιπλέον συμπλήρωση ρευστού στην κεντρική δεξαμενή.

Καθώς αυξάνει το βάθος της διάτρησης ο πυρήνας ανέρχεται στην επιφάνεια μέσω σωληνοειδούς ράβδου, όπου και τοποθετείται σε κασόνια υποδοχής πυρήνων.

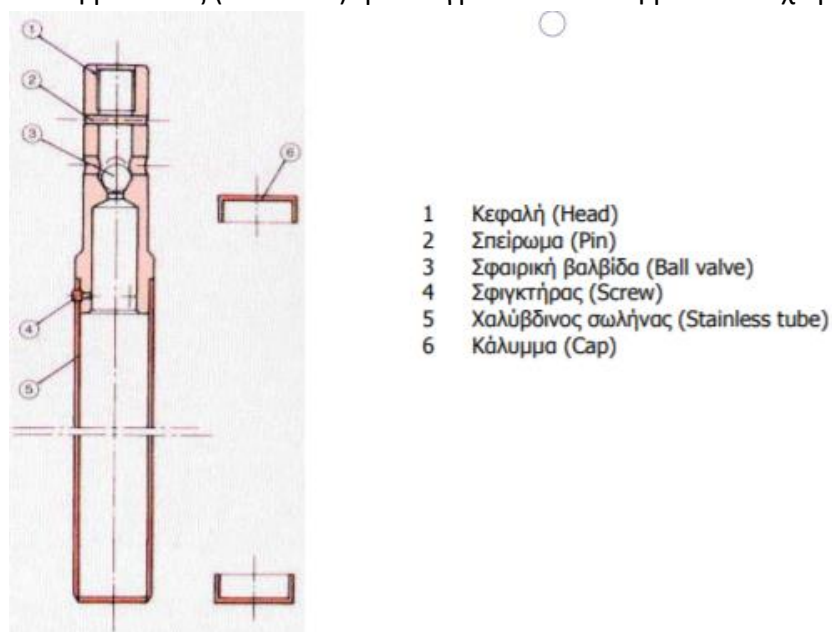
Η χρήση της αδαμάντινης κεφαλής βρίσκει εφαρμογή τόσο σε υπαίθρια όσο και σε υπόγεια έργα

- Υπαίθριες εφαρμογές: Το μέγεθος του εξοπλισμού σε υπαίθρια έργα ποικίλλει. Μπορεί να τρυπήσει έως και 2000 μέτρα βάθος, ενώ είναι ικανό να εκτελέσει διάτρηση σε δυσπρόσιτες περιοχές που η προσέγγιση είναι δυνατή μόνο με ελικόπτερο. Τέλος έχει τη δυνατότητα να τρυπήσει τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια θέση, ενώ η πιο αποδοτική κλίση είναι 60° - 80° .
- Υπόγειες εφαρμογές: Ο εξοπλισμός σε υπόγεια έργα είναι μικρότερος σε σχέση με τα υπαίθρια, συνήθως βασίζεται σε ράγες και κινείται με ηλεκτρικά μέσα. Είναι ικανό να τρυπήσει σε μεγάλο εύρος κλίσεων, από κατακόρυφη προς τα πάνω θέση έως και κατακόρυφη προς τα κάτω.

2.1.3.1 Διαδικασία ανάκτησης πυρήνα

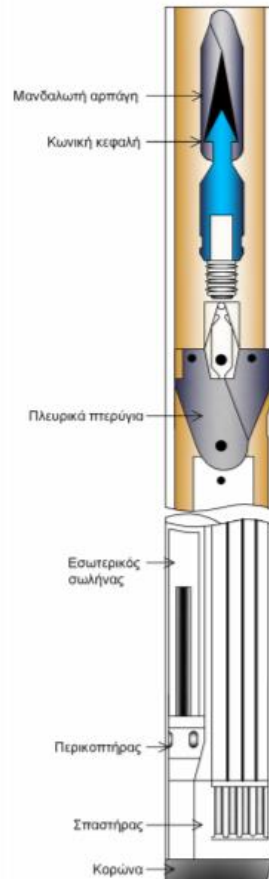
Ο πυρήνας ανακτάται στην επιφάνεια, από ειδικό σωλήνα, με 2 τεχνικές :

- α) Πρότυπη μέθοδος (standard): με δειγματοσυλλέκτη μονού τοιχώματος.



Εικόνα 12-Δειγματοσυλλέκτης μονού τοιχώματος (Μόδης-Σταματάκη, 2015)

- b) Μέθοδος wireline: με δειγματοσυλλέκτη διπλού τοιχώματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος σχεδιάστηκε για να καλύπτει τους περιορισμούς της πρότυπης μεθόδου και για αύξηση του ποσοστού ανάκτησης πυρήνα. Για την εφαρμογή της χρησιμοποιείται ένα καλώδιο το οποίο ανελκύει το εσωτερικό του σωλήνα που περιέχει τον πυρήνα και δεν περιστρέφεται στη διατρητική στήλη. Στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος.



Εικόνα 13-Μέθοδος Wireline (Μόδης-Σταματάκη, 2015)

Όταν ο πυρήνας έχει φτάσει στην επιφάνεια με μία από τις 2 παραπάνω μεθόδους, ξεπλένεται πριν τοποθετηθεί στα κασόνια αποθήκευσης. Στο εξωτερικό από τα κασόνια πρέπει να σημειώνεται το όνομα του προγράμματος, ο αριθμός της γεώτρησης καθώς και το βάθος εξαγωγής των πυρήνων. Όλη η διαδικασία πρέπει να επιβλέπεται από τον μηχανικό, έτσι ώστε να μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος.

Table 4.2 Standard diamond drill sizes

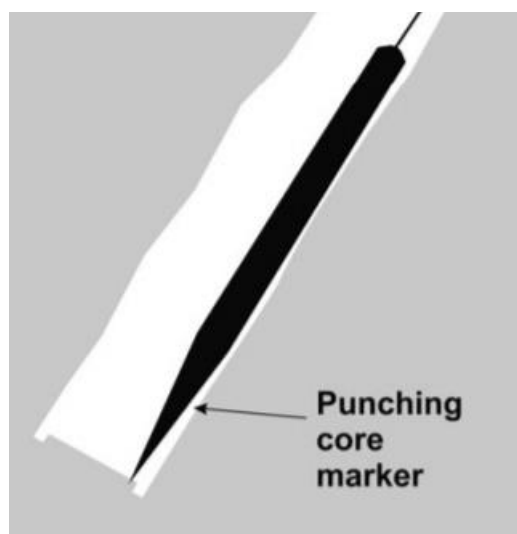
	Standard			Wireline		
	Index	Hole diameter (mm)	Core diameter (mm)	Index	Hole diameter (mm)	Core diameter (mm)
North American	XRT	30	19			
	EX	38	22			
	AX	48	31	AQ	48	27
	BX	60	42	BQ	60	36
	NX	76	55	NQ	76	48
	HX	96	74	HQ	96	63
				PQ	123	85
Metric System	North American equivalent (approximate)		Hole diameter (mm)		Core diameter (mm)	
					Thin bits	Thick bits
	EX		36		22	–
	AX		46		32	28
			56		42	34
	BX		66		52	44
	NX		76		62	54
			86		72	62
	HX		101		–	75
			116		–	90
			131		–	105
			146		–	120

Εικόνα 14-Τυποποίηση διαμέτρων κοπτικών άκρων και δειγματοληπτών wireline στην τεχνολογία γεωτρήσεων
(Abzalov, 2016, *Applied Mining Geology (Modern Approaches in Solid Earth Sciences)* 1st ed., Springer
Switzerland)

2.2 Προσανατολισμένες γεωτρήσεις

Προσανατολισμένος πυρήνας γεώτρησης είναι ο πυρήνας που έχει προσανατολιστεί εντός του δειγματοσυλλέκτη πριν θραυσθεί και ανέλθει στην επιφάνεια και εφαρμόζεται μόνο στην τεχνική wireline και σε κεκλιμένες γεωτρήσεις. Μία προσανατολισμένη γεώτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους:

- 1) Ο πυρήνας “σημαδεύεται” με ένα καλέμι με μορφή δόρατος το λεγόμενο Core Marking Punch. Το συγκεκριμένο όργανο έχει μια κοφτερή συμπαγή λεπίδα που χαράσσει το ίχνος στην επιφάνεια του πυρήνα.

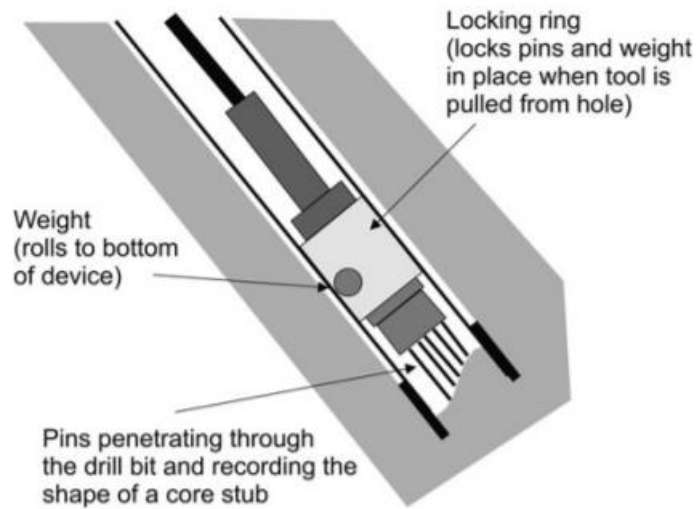


Εικόνα 15-Όργανο Core Marking Punch (Abzalov, 2016)

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει προβλήματα σε περίπτωση πολύ μαλακού ή πολύ σκληρού τύπου βραχομάζας. Για αυτό το λόγο σε ορισμένες περιπτώσεις στη θέση της λεπίδας τοποθετείται ένας μαρκαδόρος. Με αυτό τον τρόπο λύνεται το πρόβλημα στα μαλακά πετρώματα αλλά όχι στα σκληρά. Αξίζει να σημειωθεί πως και οι δύο παραπάνω μέθοδοι έχουν χαμηλή ακρίβεια και μπορούν να λειτουργήσουν μόνο σε ένα περιορισμένο εύρος κλίσεων. Για παράδειγμα δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε οριζόντιες ή με κλίση προς τα πάνω γεωτρήσεις.

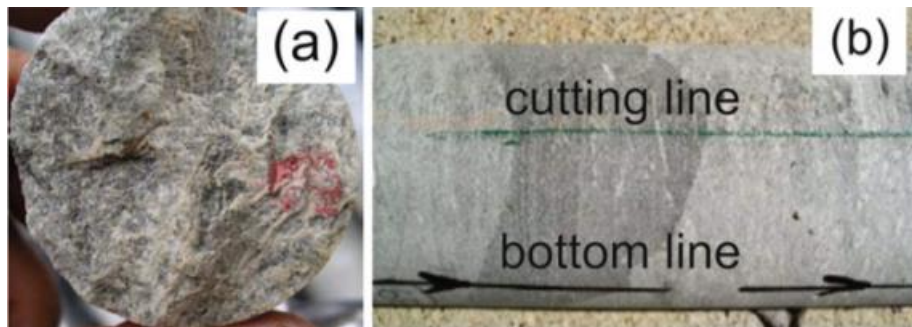
- 2) Μέθοδος Craelius: Ένας μικρός κύλινδρος με κινούμενα ατσάλινα καρφιά που εξέρχουν από την κεφαλή του γεωτρυπάνου και παίρνουν τη μορφή της επιφάνειας της βραχομάζας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα καρφιά να λειτουργούν ως αποτύπωμα της προσβαλλόμενης επιφάνειας και έτσι μπορεί να προκύψει ο προσανατολισμός.

Η μέθοδος Craelius έχει εφαρμογή σε οριζόντιες και με κλίση προς τα πάνω γεωτρήσεις, όμως παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα σε επίπεδους και λείους σχηματισμούς.



Εικόνα 16-Συσκευή Craelius (Abzalov,2016)

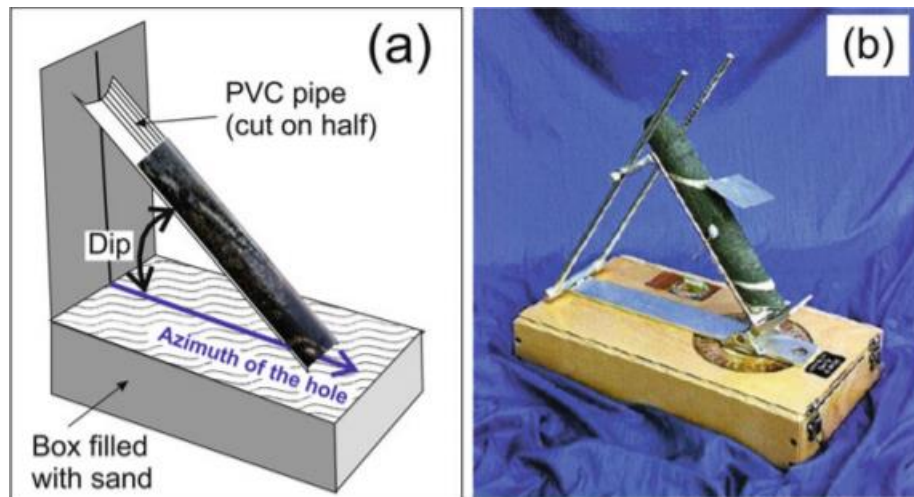
- 3) Μαρκάρισμα του πυρήνα, αφού έχει ανέλθει στην επιφάνεια, στο κατώτερο σημείο του όπως έχει εξαχθεί από τη γεώτρηση. Στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος, με το ίχνος στο ανώτερο και όχι στο κατώτερο σημείο του πυρήνα.



Εικόνα 17-Μαρκάρισμα πυρήνα καθώς εξέρχεται από τη γεώτρηση (Abzalov, 2016)

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της χάραξης του ίχνους πάνω στον πυρήνα, μετράται ο προσανατολισμός των ασυνεχειών που φέρονται από αυτόν. Υπάρχουν 2 τρόποι μέτρησης προσανατολισμού ασυνεχειών.

- Προσαρμογή ανακτηθέντος πυρήνα σε μια ειδικά διαμορφωμένη υποδοχή γνωστή και ως Rocket Launcher. Έκει γίνεται απευθείας μέτρηση της κλίσης και του αζιμούθιου.



Εικόνα 18-Συσκευή μέτρησης προσανατολισμού (Abzalov, 2016)

- Μέτρηση γωνιών α , β . Η αναλυτική περιγραφή της συγκεκριμένης διαδικασίας γίνεται σε παρακάτω κεφάλαιο (Κεφ. 4) καθώς αυτή ήταν και η χρησιμοποιούμενη μέθοδος.

Σημειώνεται ότι η διαδικασία του μαρκαρίσματος του πυρήνα αφού έχει ανέλθει στην επιφάνεια προυποθέτει τον ακριβή προσανατολισμό του πυρήνα καθώς εξέρχεται από τη σωληνοειδή ράβδο. Αυτό επιτεύχθηκε με τη συσκευή REFLEX ACT III™. Η επεξήγηση της αρχής λειτουργίας καθώς και ο τρόπος χρήσης της συσκευής γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο. (Κεφ. 4)

Κεφάλαιο 3 – Ασυνέχειες – Στατιστικός χαρακτήρας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών

3.1 Ασυνέχειες

Τα αποθέματα κοιτασμάτων μαρμάρου προσδιορίζονται από την περιέκτικότητα του συνολικού όγκου του κοιτάσματος που πρόκειται να εκμεταλλευθεί σε όγκους εμπορικών διαστάσεων, από την αισθητική του εμφάνιση και από τις φυσικές, μηχανικές και τεχνικές του ιδιότητες. Η απόδοση ενός κοιτάσματος σε εμπορεύσιμους όγκους εξαρτάται από το δίκτυο των φυσικών ασυνεχειών που το διασχίζουν.

Ασυνέχεια είναι κάθε επίπεδο αδυναμίας ή αποχωρισμού το οποίο παρουσιάζει πολύ μικρή ή μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Μπορεί να περιλαμβάνει επίπεδα διάστρωσης ή στρώσης, επίπεδα σχιστότητας, διακλάσεις ή ζώνες διάτμησης ανάλογα με τις τεκτονικές διεργασίες διαρρηκτικού ή παραμορφωσιακού τύπου που έχει υποστεί το πέτρωμα από τη γέννηση του έως σήμερα.

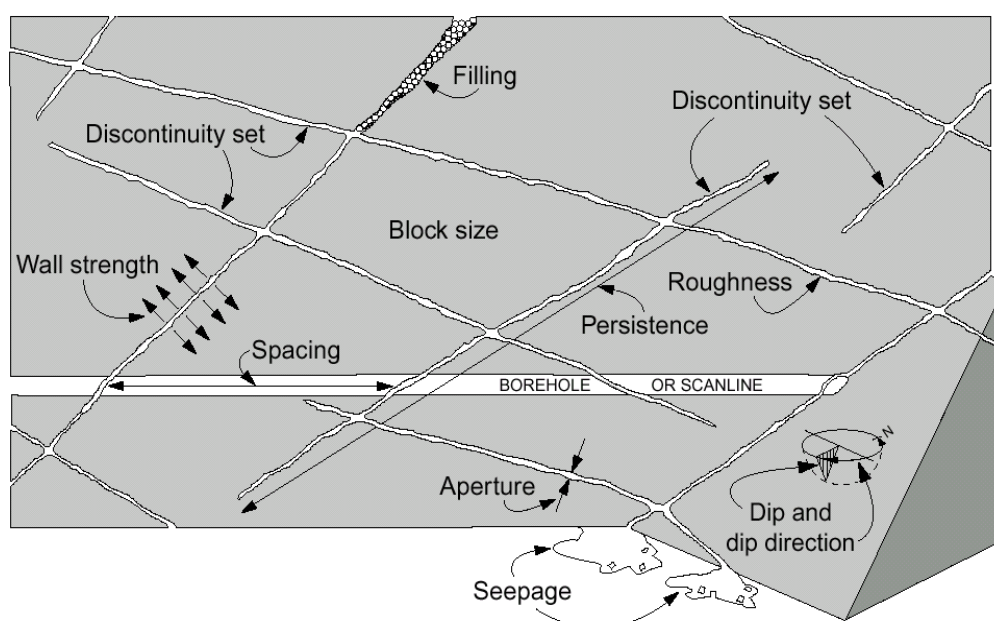


Εικόνα 19-Άποψη λατομείου ασβεστολίθου στη Μιννεσότα που διασχίζεται από λίγες ασυνέχειες και διαθέτει μεγάλη απόδοση ορθογωνισμένων όγκων. (Εξαδάκτυλος 2019, σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμού Υπαιθριων Εκμεταλλεύσεων)

Στην περίπτωση: α) ενός συμπαγούς κοιτάσματος μαρμάρου με λίγες ασυνέχειες, όπως αυτό της Εικόνας 16, ή, β) ενός έντονα κατακερματισμένου κοιτάσματος, η απόφαση για το αν θα συνεχιστεί ή όχι η εκμετάλλευση είναι μία εύκολη απόφαση. Τα κοιτάσματα όμως που βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας συνήθως βρίσκονται σε μία ενδιάμεση κατάσταση ανάμεσα στις δύο ακραίες περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν.

Σε αυτή την περίπτωση προκειμένου να κριθεί εάν το λατομείο είναι εκμεταλλεύσιμο, ακολουθείται μία χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία με σημαντικό κόστος εκτέλεσης και αξιολόγησης των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων. Κατόπιν, με βάση τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων εξετάζεται η βιωσιμότητα του προγράμματος. Σε ενδεχόμενη λανθασμένη εκτίμηση και προχώρηση σε εκμετάλλευση με μικρό ποσοστό αποληψιμότητας, τότε υπάρχει περίπτωση η επένδυση να μην αποβεί οικονομικά βιώσιμη και τα στείρα που θα παραχθούν να δημιουργήσουν άσχημο αισθητικό αποτέλεσμα λόγω της έκτασης και του όγκου που καταλαμβάνουν.

Οι μέθοδοι ποσοτικής περιγραφής των ασυνεχειών των πετρωμάτων έχουν προταθεί από την ISRM (1978). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τυποποίηση οι διάφορες φυσικές και γεωμετρικές ιδιότητες των ασυνεχειών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Η ISRM προτείνει 10 παραμέτρους για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών που περιγράφονται αναλυτικά.



Εικόνα 20-Τεχνικοί όροι για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών (International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on Terminology, Symbols and Graphic Representation, Terminology Int. Soc. Rock Mech. Secretary, Lisbon, 1975)

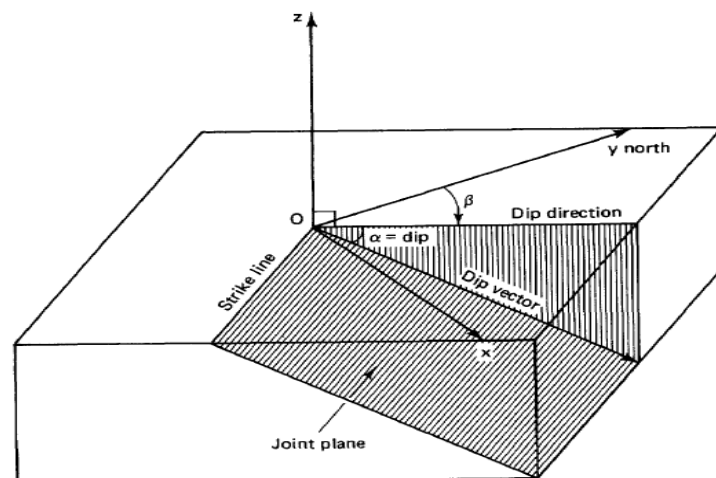
Οι τεχνικοί όροι που έχουν προταθεί από την ISRM είναι οι εξής :

- **Discontinuity set** : οικογένεια παράλληλων ασυνεχειών ίδιας ηλικίας και τρόπου γέννησης
- **Filling** : υλικό πλήρωσης ασυνέχειας
- **Wall strength** : αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (βρίσκεται με Schmidt hammer ή ειδικό διεισδυτή)
- **Roughness** : τραχύτητα τοιχωμάτων ασυνέχειας
- **Persistence** : εμμονή της ασυνέχειας (διαστάσεις της στο χώρο)
- **Aperture** : πάχος της ασυνέχειας

- **Dip and dip direction** : κλίση & διεύθυνση κλίσης που είναι οι δύο αριθμοί σε μοίρες που εκφράζουν τον προσανατολισμό στο χώρο ενός επιπέδου ασυνέχειας
- **Spacing** : απόσταση δύο γειτονικών ασυνεχειών κατά μήκος μιας γεώτρησης (borehole) ή μετροταινίας (scanline)
- **Block size** : το χαρακτηριστικό μέγεθος (όγκος ή μέγεθος βροχίδας κοσκίνου) ενός ογκοτεμαχίου πετρώματος που απομονώνεται από αλληλοτεμνόμενα επίπεδα ασυνεχειών

Οι παραπάνω ιδιότητες των ασυνεχειών έχουν τυχαίο χαρακτήρα με αποτέλεσμα να μην είναι σταθερές και να παρουσιάζουν μεταβλητότητα. Έτσι θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές και άρα περιγράφονται στατιστικά. Μερικές ερευνητικές εργασίες που συνεισέφεραν στο παρελθόν για τη στατιστική ανάλυση των ιδιοτήτων των ασυνεχειών των πετρωμάτων είναι οι Priest (1993), Priest και Hudson (1976), Hudson και Priest (1979), Priest και Hudson (1981), Hudson και Priest (1983) και άλλες στη συνέχεια.

Ο προσανατολισμός μιας ασυνέχειας στον τρισδιάστατο χώρο εκφράζεται με δύο αριθμούς που μετρώνται σε μοίρες ($^{\circ}$) και περιγράφουν την κλίση και τη διεύθυνση κλίσης της ασυνέχειας. Η κλίση εκφράζεται με ένα διψήφιο αριθμό και η διεύθυνση κλίσης με έναν τριψήφιο αριθμό.



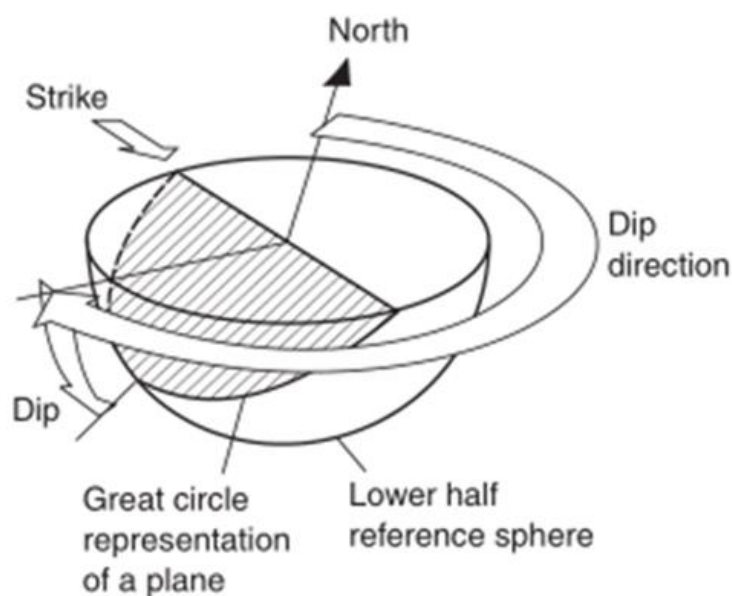
Εικόνα 21-Κλίση και διεύθυνση κλίσης επιπέδου ασυνέχειας (International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on Terminology, Symbols and Graphic Representation, Terminology Int. Soc. Rock Mech. Secretary, Lisbon, 1975)

Στο ύπαιθρο η μέτρηση του προσανατολισμού των επιπέδων των ασυνεχειών πραγματοποιείται με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας όπως στην παρακάτω εικόνα.

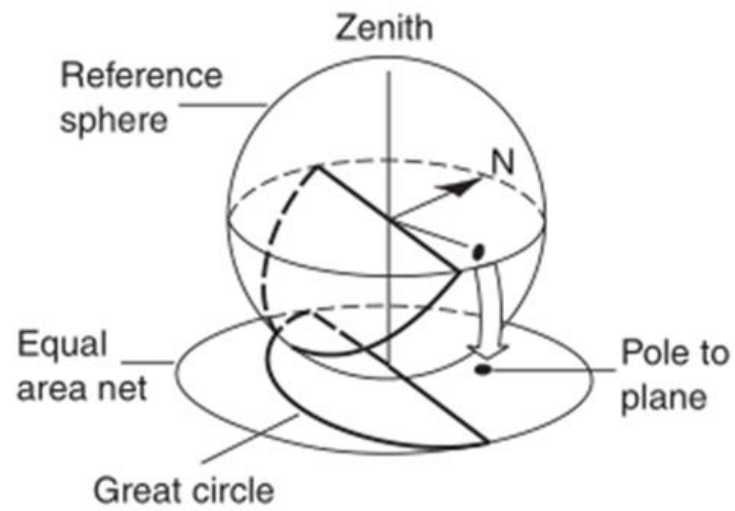


Εικόνα 22-Χρήση γεωλογικής πυξίδας για μέτρηση κλίσης και διεύθυνσης κλίσης μιας ασυνέχειας στο μέτωπο (Λόζιος, 2015)

Επόμενο στάδιο της διαδικασίας είναι η απεικόνιση του επιπέδου μιας ασυνέχειας με τη βοήθεια της στερεογραφικής προβολής στο κατώτερο ή στο ανώτερο ημισφαίριο της σφαίρας αναφοράς. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο προβολής όλες οι ασυνέχειες θεωρούνται ως επίπεδα που διέρχονται από το κέντρο της σφαίρας αναφοράς. Το ίχνος ενός τέτοιου επιπέδου πάνω στη σφαίρα είναι κύκλος με κέντρο το κέντρο της σφαίρας αναφοράς.



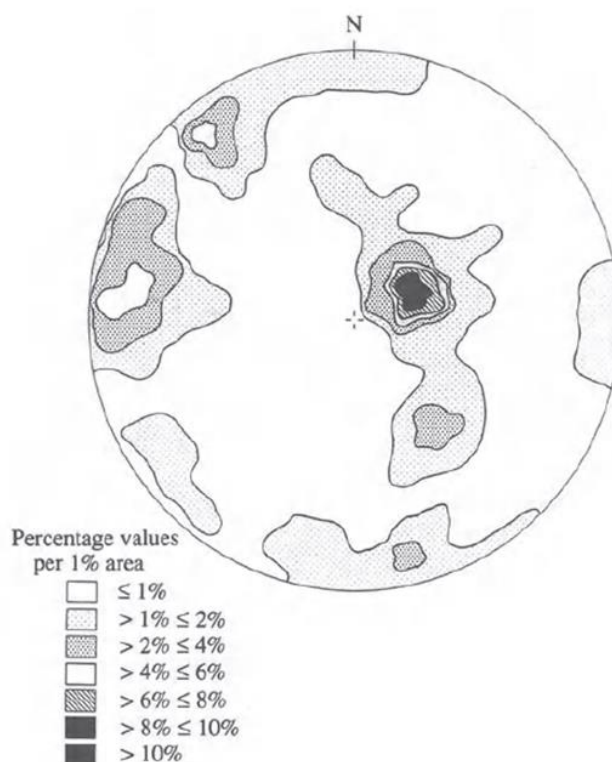
Εικόνα 23-Ασυνέχεια που περνά από το κέντρο της σφαίρας αναφοράς (Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah, Rock Slope Engineering, Civil and mining 4th edition)



Εικόνα 24-Στερεογραφική προβολή της ασυνέχειας με τη μορφή μεγάλου κύκλου και πόλου (ως προβολές του επιπέδου της ασυνέχειας και του κάθετου διανύσματος στο κατώτερο ημισφαίριο της σφαίρας αναφοράς)
(Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah, Rock Slope Engineering)

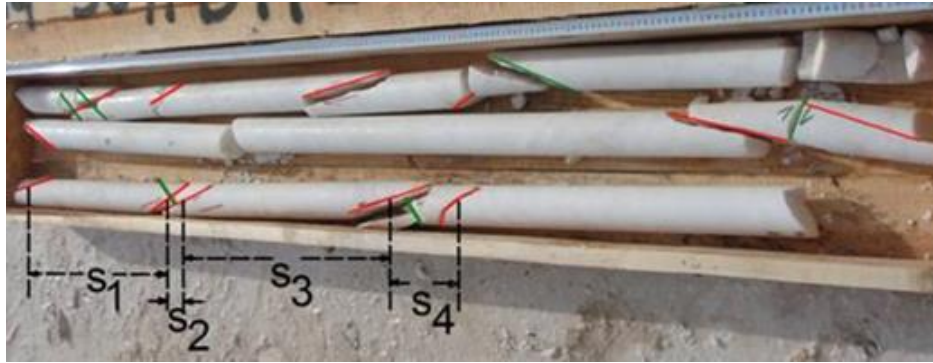
3.2 Στατιστικός χαρακτήρας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών

Για το διαχωρισμό των διαφόρων οικογενειών ασυνεχειών χρησιμοποιείται η στερεογραφική προβολή των πόλων των ασυνεχειών. Τα κοιτάσματα μαρμάρου συνήθως διασχίζονται από 3-5 οικογένειες ασυνεχειών και οι πόλοι κατανέμονται σε μία Γκαουσιανή δισδιάστατη κατανομή όπως η παρακάτω που φαίνεται στο σχήμα. Με αυτό τον τρόπο αποτυπώνονται οι κατανομές των συγκεντρώσεων των πόλων των ασυνεχειών που διασχίζουν το υπό μελέτη πέτρωμα. Με βάση αυτή την κατανομή μπορούν να ομαδοποιηθούν οι ασυνέχειες σε οικογένειες.



Εικόνα 25-Κατανομές των συγκεντρώσεων των πόλων των ασυνεχειών (Priest, 1993)

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ταυτοποίησης των οικογενειών των ασυνεχειών, κατόπιν μετρώνται οι αποστάσεις των διαδοχικών ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας κατά μήκος μιας ευθείας σάρωσης (scanline) ή ενός πυρήνα γεώτρησης.



Εικόνα 26-Μέτρηση αποστάσεων διαδοχικών ασυνεχειών σε πυρήνες γεώτρησης (Εξαδάκτυλος, σημειώσεις μαθήματος Μηχανικής Πετρωμάτων)

Στη συνέχεια απαιτείται διόρθωση των φαινόμενων αποστάσεων που μετρήθηκαν πάνω στους πυρήνες σε πραγματικές αποστάσεις χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

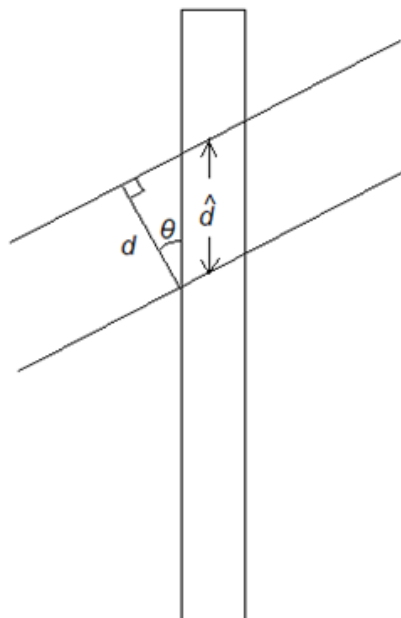
$$d = \hat{d} \cdot \cos\theta$$

Όπου

\hat{d} : φαινόμενη απόσταση διαδοχικών ασυνεχειών μιας οικογένειας

d : πραγματική απόσταση ασυνεχειών

θ : γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δύο αποστάσεων



Εικόνα 27-Φαινόμενη και πραγματική απόσταση διαδοχικών ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας

Σε περίπτωση που η υπό μελέτη γεώτρηση είναι κατακόρυφη τότε η γωνία θ ταυτίζεται με την κλίση της οικογένειας των ασυνεχειών, σε οποιαδήποτε άλλη

περίπτωση πρέπει να υπολογισθεί το εσωτερικό γινόμενο του πόλου της οικογένειας n και του προσανατολισμού της γεώτρησης m .

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{m} = |\mathbf{n}| \cdot |\mathbf{m}| \cdot \cos\theta \Rightarrow \cos\theta = \frac{n_x \cdot m_x + n_y \cdot m_y + n_z \cdot m_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \cdot \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}}$$

Το μοναδιαίο διάνυσμα του πόλου μιας οικογένειας ασυνεχειών με κλίση $\alpha = \text{dip}$ και διεύθυνση κλίσης $\beta = \text{dip direction}$ βρίσκεται από τη σχέση :

$$\mathbf{n} = [\sin\alpha \cdot \sin\beta \quad \sin\alpha \cdot \cos\beta \quad \cos\alpha]$$

Ακόμη το διάνυσμα της προσανατολισμένης γεώτρησης με $Az = \text{αζιμούθιο (Azimuth)}$ και $In = \text{κλίση (Inclination)}$ βρίσκεται από τη σχέση :

$$\mathbf{m} = [-\sin Az \cdot \cos In \quad -\cos Az \cdot \cos In \quad \sin In]$$

Τέλος μπορεί να βρεθεί

$$\cos\theta = \cos\alpha \cdot \sin In - \sin\alpha \cdot \cos In \cdot \cos(\beta - Az)$$

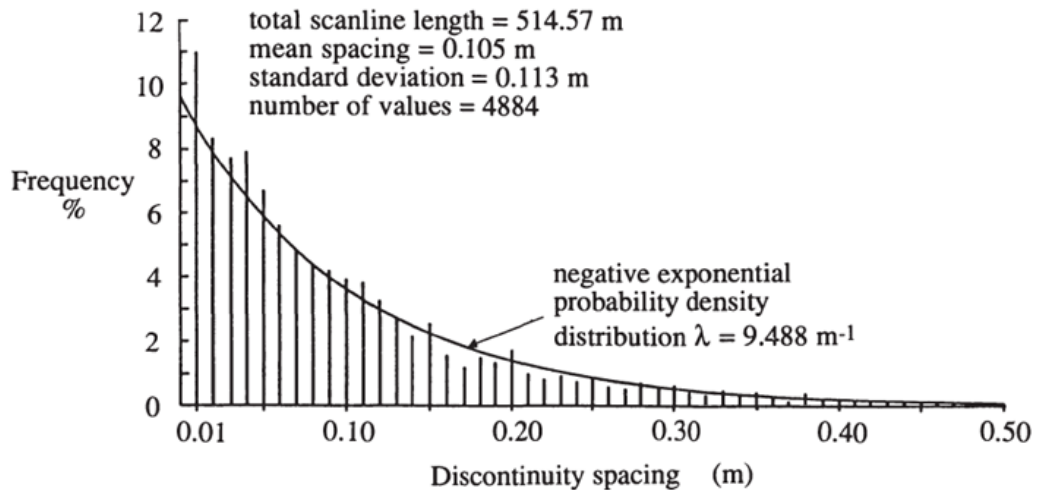
Οι φαινόμενες ή οι πραγματικές αποστάσεις ασυνεχειών μιας οικογένειας μπορούν να ακολουθούν την αρνητική εκθετική κατανομή, τη λογαριθμοκανονική, τη Γάμμα ή την κατανομή Weibull. Η αρνητική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(x)$ των αποστάσεων αποδίδεται με την παρακάτω εξίσωση:

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

Η παραπάνω κατανομή εξαρτάται μόνο από μια παράμετρο, την λ , που ονομάζεται συχνότητα της κατανομής. Η μέση τιμή και η διασπορά στη συγκεκριμένη κατανομή είναι ίσες και η αθροιστική της κατανομή δίνεται από την παρακάτω σχέση, λαμβάνοντας τιμές από 0-1.

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

Ένα παράδειγμα καλής προσαρμογής αρνητικής εκθετικής κατανομής πάνω σε πειραματικό ιστόγραμμα αποστάσεων ασυνεχειών είναι το παρακάτω :



Εικόνα 28-Ιστόγραμμα συχνότητας αποστάσεων ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας σε γραμμή σάρωσης συνολικού μήκους 514.57 m και προσαρμοσμένη αρνητική εκθετική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Priest, 1993)

Αντίστοιχα η συνάρτηση Γάμμα της πυκνότητας της πιθανότητας και η αθροιστική της συνάρτηση δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_g(x) = \frac{1}{a_g^{b_g} \Gamma(b_g)} x^{b_g-1} e^{-\frac{x}{a_g}},$$

$$F_g(x) = \frac{\gamma\left(b_g, \frac{x}{a_g}\right)}{\Gamma(b_g)}$$

Όπου

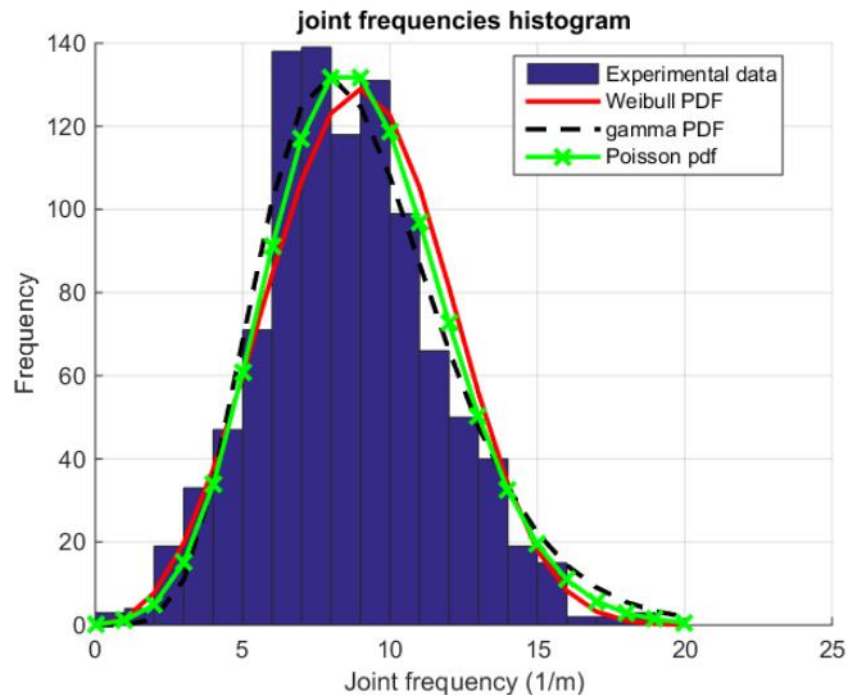
γ : συμβολίζει την ημιτελή συνάρτηση Gamma

a_g : παράμετρος κλίμακας

b_g : παράμετρος σχήματος της κατανομής

Η πυκνότητα των ασυνεχειών που διασχίζουν ένα κοίτασμα μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά και με άλλη μέθοδο. Αντί να χρησιμοποιηθούν οι αποστάσεις των διαδοχικών ασυνεχειών που ανήκουν στην ίδια οικογένεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αριθμός των ασυνεχειών ανά μονάδα μήκους της γραμμής σάρωσης (scanline) ή της γεώτρησης. Ο αριθμός αυτός ονομάζεται «Συχνότητα των ασυνεχειών» (Fracture Frequency, FF). Λόγω της ευκολότερης και συντομότερης μέτρησης, επιλέχθηκε η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα. Η συγκεκριμένη μέθοδος ακολουθεί την κατανομή Poisson. Ακολουθεί

παράδειγμα κατανομής Poisson που έχει προσαρμοσθεί σε πειραματικά δεδομένα μέτρησης συχνότητας ασυνεχειών (Fracture Frequency).



Εικόνα 29-Ιστόγραμμα FF και προσαρμοσμένη κατανομή Poisson

Με κατάλληλη επεξεργασία χρησιμοποιώντας τον προσανατολισμό των ασυνεχειών που μετρήθηκαν στα μέτωπα του λατομείου και γνωρίζοντας τους προσανατολισμούς των γεωτρήσεων προκύπτει ένα από τα καινοτόμα αποτελέσματα του συγκεκριμένου προγράμματος, αυτό της μετατροπής της συχνότητας των ασυνεχειών σε συχνότητα των αποστάσεων των ασυνεχειών. Η κατανομή της συχνότητας των αποστάσεων των ασυνεχειών βρέθηκε ότι ακολουθεί πάντα την κατανομή Weibull. Η αθροιστική κατανομή Weibull περιγράφεται με την παρακάτω εξίσωση:

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

Όπου:

a : παράμετρος κλίμακας

b : παράμετρος σχήματος κατανομής

Σημειώνεται ότι οι όγκοι μαρμάρου εμπορικών διαστάσεων που απομονώνονται μεταξύ των ασυνεχειών και συνεπώς η εκμεταλλευσιμότητα του κοιτάσματος εξαρτάται από:

- Τον αριθμό των οικογενειών των ασυνεχειών ,
- Τον προσανατολισμό τους,
- Τις αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών ασυνεχειών μιας οικογένειας.

Επομένως η μέθοδος που ακολουθείται στο συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα ακολουθεί τις κατευθύνσεις που αποτυπώθηκαν παραπάνω.

Κεφάλαιο 4 - Περιγραφή της διαδικασίας

4.1 Προσανατολισμός των ασυνεχειών που αποτυπώθηκαν στα μέτωπα του λατομείου

Πριν την όρυξη των προσανατολισμένων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, προσδιορίστηκαν με γεωλογική πυξίδα, οι προσανατολισμοί των ασυνεχειών που σχηματίζονταν στα εκτεθειμένα μέτωπα της βαθμίδας που απεικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία.



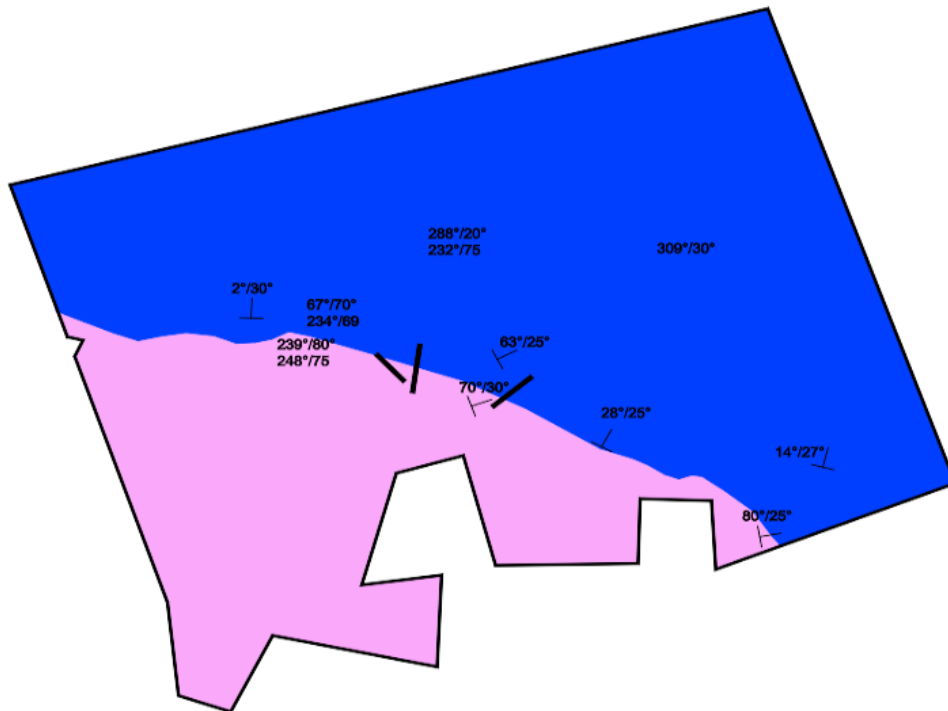
Εικόνα 30-Εκτεθειμένο μέτωπο

Οι μετρήσεις της κλίσης και της διεύθυνσης κλίσης με τη γεωλογική πυξίδα πριν την όρυξη γεωτρήσεων παραθέτονται στον πίνακα 2:

Σε αυτήν ανήκουν και τα κύρια ρήγματα (°)	Κατά στρώση (°)	Αρκετά εμφανείς στις διανοίξεις (°)	Άλλες (°)	Άλλες (°)
234/69	52/37	229/15	109/75	342/55
239/80	63/25		95/65	
248/75	92/40		98/85	
232/75	17/35		67/70	
238/80	70/30			
220/85	80/25			
210/80				
Παράταξη παταριού : 124 - 304				

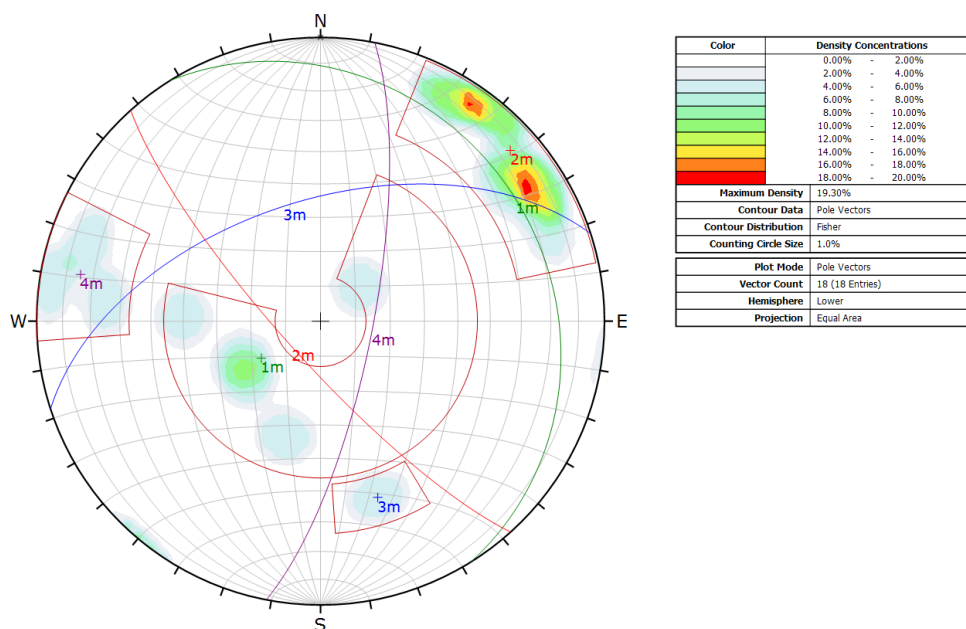
Πίνακας 2-Μετρήσεις προσανατολισμού στα μέτωπα με γεωλογική πυξίδα

Οι περιοχές αποτύπωσης φαίνονται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 31-Κάτοψη θέσεων που μετρήθηκαν οι ασυνέχειες στα εκτεθειμένα μέτωπα με γεωλογική πυξίδα (AutoCAD 2019)

Οι μετρήσεις με γεωλογική πυξίδα, εισάγονται σε στερεογραφική προβολή και πιο συγκεκριμένα στο πρόγραμμα Dips 6.0. Έτσι προκύπτει η παρακάτω στερεογραφική προβολή.



Διάγραμμα 1-Πόλοι και μεγάλοι κύκλοι οικογένειων ασυνεχειών από μετρήσεις με γεωλογική πυξίδα (Dips v6.0 (2016), Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data, Rocscience <https://www.rocscience.com/software/dips>)

Από την ανάλυση της παραπάνω στερεογραφικής προβολής μελετώντας την περιοχή εμφάνισης των πόλων αλλά και την πυκνότητα με την οποία εμφανίζονται οι πόλοι,

σχηματίζονται 4 οικογένειες ασυνεχειών. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τόσο στη στερεογραφική προβολή (Διάγραμμα 1), όσο και στον παρακάτω πίνακα, η οικογένεια 1,2 ακολουθούν την ίδια παράταξη αλλά έχουν αντίθετη κλίση. Επιπλέον οι οικογένειες 2 και 4 είναι συζυγείς μεταξύ τους, ενώ η οικογένεια 3 έχει κάθετη παράταξη στις οικογένειες 1,2.

Ο παρακάτω πίνακας στηρίζεται στις μετρήσεις που έγιναν στα εκτεθειμένα μέτωπα του λατομείου και ομαδοποιούν τις οικογένειες που δημιουργήθηκαν με βάση την παραπάνω στερεογραφική προβολή.

Οικογένεια	Όνομα	Διεύθυνση κλίσης (Dip Direction) (°)	Κλίση (Dip) (°)	Σχόλια
1	Στρώση	58	20	Η 1 αποτελεί τη στρώση του μαρμάρου και εμφανίζεται συχνότερα
2	Κεφάλια	228	79	Η 2 έχει την ίδια παράταξη με την 1 αλλά αντίθετη κλίση
3	Μουρέλα	342	55	Η 3 έχει παράταξη κάθετη στις οικογένειες 1,2
4	Συζυγη κεφάλια	101	75	

Πίνακας 3-Μέσες κλίσεις και διευθύνσεις κλίσεων των οικογενειών ασυνεχειών

4.2 Προσανατολισμοί ασυνεχειών από μετρήσεις των γωνιών α, β από προσανατολισμένες γεωτρήσεις

Βασικός στόχος των προσανατολισμένων γεωτρήσεων είναι η ταυτοποίηση και ομαδοποίηση ασυνεχειών, ανάλογα με τον προσανατολισμό τους, σε οικογένειες. Όταν ολοκληρωθεί το στάδιο αυτό τότε μπορεί στη συνέχεια να μετρηθεί η συχνότητα των ασυνεχειών μιας οικογένειας (FF: Fracture Frequency) πάνω σε μία γραμμή μελέτης ή πάνω στον πυρήνα της γεώτρησης που έχει ληφθεί. Η τιμή FF ορίζεται ως ο αριθμός ασυνεχειών ανά μέτρο γεώτρησης με μονάδες (1/m) κάθε μιας οικογένειας ξεχωριστά. Επόμενο στάδιο της διαδικασίας, αφού έχουν συγκεντρωθεί τα FF είναι η στατιστική και γεωστατιστική ανάλυση τους με σκοπό τον προσδιορισμό της ποιότητας του κοιτάσματος μαρμάρου αλλά και της αποληψιμότητας του σε όγκους εμπορικών διαστάσεων (blocks).

Όλη η παραπάνω διαδικασία αφορά το λευκό δολομιτικό μάρμαρο που είναι εμπορεύσιμο και όχι το ασβεστολιθικό τεφρό μάρμαρο που υπέρκειται του πρώτου. Σε μία πληρέστερη ανάλυση θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και οι ίδιες μετρήσεις για το τεφρό ασβεστιτικό μάρμαρο.



Εικόνα 32-Άποψη από Βορρά του γεωτρυπάνου (Στο βάθος της φωτογραφίας φαίνεται το χωριό Οχυρό)



Εικόνα 33-Γεωτρύπανο που χρησιμοποιήθηκε

Στο συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα η όρυξη των προσανατολισμένων πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε, όπως προαναφέρθηκε, με μαρκάρισμα του πυρήνα στο επάνω του μέρος. Με τη βοήθεια της συσκευής προσανατολισμού REFLEX ACT III™ εκτελέσθηκαν 18 προσανατολισμένες γεωτρήσεις βάθους 50-60 μέτρων η κάθε μια, κεκλιμένες με μικρή κλίση από την κατακόρυφο. Ακολουθεί πίνακας με τον προσανατολισμό και το μήκος της κάθε γεώτρησης.

A/A	Γεώτρηση	Διεύθυνση κλίσης / αζιμούθιο (°)	Κλίση (°)	Τραβέρσα στο Dips™	Μήκος γεώτρησης (m)
1	MI-2	110	-85.5	-	60.5
2	MI-3	142	-85.5	10	60.5
3	MI-4	130	-87	9	63.3
4	MI-5	95	-85.5	8	60.5
5	MI-6	76	-85.5	7	60.5
6	MI-7	106	-85.5	2	50.1
7	MI-8	97	-85.5	4	50
8	MI-9	96	-85.5	1	50
9	MI-10	13	-85.5	3	50
10	MI-11	110	-85.5	6	50.5
11	MI-12	285	-85.5	5	50.5
12	MI-13	32	-85.5	11	50
13	MI-14	280	-85.5	12	50
14	MI-15	239	-85.5	13	50
15	MI-16	265	-85.5	14	50
16	MI-17	100	-85.5	15	50
17	MI-18	256	-85.5	16	48.7
18	MI-19	320	-87.5	17	51.4

Πίνακας 4-Προσανατολισμός δειγματοληπτικών γεωτρήσεων

4.2.1 Προσανατολισμός πυρήνα – REFLEX ACT III™

Η συσκευή REFLEX ACT III™ μπορεί να αποθηκεύει τα δεδομένα της διαδικασίας κατά τη διάρκεια της όρυξης της γεώτρησης. Η συσκευή περιλαμβάνει το κύριο όργανο και το χειριστήριο. (Εικόνα 35)



Εικόνα 34-Συσκευή REFLEX ACT III (<https://reflexnow.com/product/reflex-act-iii/>)

Η χρήση της συσκευής ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- 1) Αρχικοποίηση συσκευής πριν την όρυξη της προσανατολισμένης γεώτρησης:
Προτού ορυχθεί η γεώτρηση, τοποθετείται το κύριο όργανο της συσκευής στο πίσω μέρος του δειγματοσυλλέκτη. Για την αρχικοποίηση της συσκευής αφαιρείται το αριστερό μέρος του κυρίου οργάνου και στη θέση του τοποθετείται το χειριστήριο. Αφού αρχικοποιηθεί η συσκευή με το

χειριστήριο, επαναφέρεται το κύριο όργανο στην αρχική του διάταξη και ξεκινά η όρυξη της γεώτρησης.

- 2) Διάβασμα δεδομένων: Επόμενο βήμα είναι το διάβασμα των δεδομένων που αποθήκευσε το όργανο κατά την όρυξη της γεώτρησης. Για το διάβασμα, τοποθετείται το χειριστήριο στη θέση του αριστερού μέρους του κυρίου οργάνου.
- 3) Προσανατολισμός πυρήνα: Για τον προσανατολισμό του πυρήνα, βελάκια στην LCD οθόνη του χειριστηρίου κατήυθηναν τον χειριστή του οργάνου για κατάλληλη περιστροφή του πυρήνα έως ότου προσανατολισθεί.
- 4) Μαρκάρισμα πυρήνα: Αφού ολοκληρωθεί ο προσανατολισμός του πυρήνα ακολουθεί το μαρκάρισμά του. Προτού αφαιρεθεί ο πυρήνας από το δειγματοσυλλέκτη τοποθετείται αλφάδι στο πάνω μέρος του έτσι ώστε να μαρκαρισθεί το ανώτερο ή το κατώτερο σημείο του πυρήνα.
- 5) Αφαίρεση από το δειγματοσυλλέκτη και τοποθέτηση σε κασόνια: Αφού έχει μαρκαρισθεί ο πυρήνας αφαιρείται από το δειγματοσυλλέκτη και τοποθετείται σε κασόνια αποθήκευσης.

Όλη η παραπάνω διαδικασία πρέπει να εκτελείται με μεγάλη προσοχή για ελαχιστοποίηση του σφάλματος, κυρίως στην περίπτωση έντονα κατακερματισμένου πετρώματος.



Εικόνα 35-Περισυλλογή προσανατολισμένων γεωτρήσεων στη θέση Οχυρό Δράμας



Εικόνα 36-Μαρκάρισμα πυρήνα αφού έχει προσανατολισθεί



Εικόνα 37-Συσκευή υποδοχής των πυρήνων

4.3 Διαδικασία μετρήσεων

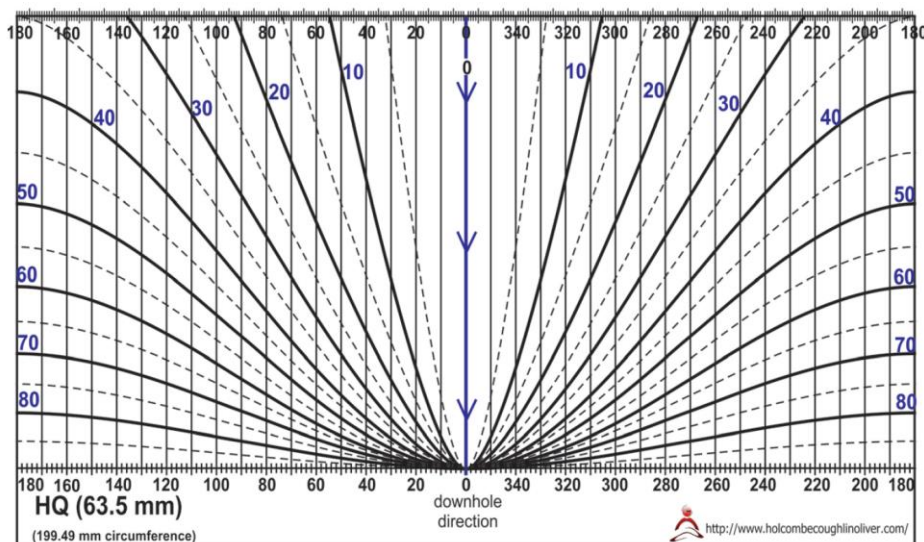
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα θραυσμένα δείγματα που είχαν τοποθετηθεί σε κασόνια σειρών μήκους 1 μέτρου ανά σειρά το καθένα. (Εικ.36) Χρησιμοποιήθηκε ειδικά βαθμονομημένη διαφάνεια που τυλίχθηκε γύρω από τους πυρήνες για την απευθείας μέτρηση των γωνιών α, β . (Εικ. 37)



Εικόνα 38-Κασόνια πυρήνων μαρμάρου που μεταφέρθηκαν από το χώρο των γεωτρήσεων στο λατομείο



Εικόνα 39-Κασόνι τοποθέτησης προσανατολισμένου πυρήνα και ίχνος στο πάνω μέρος του πυρήνα

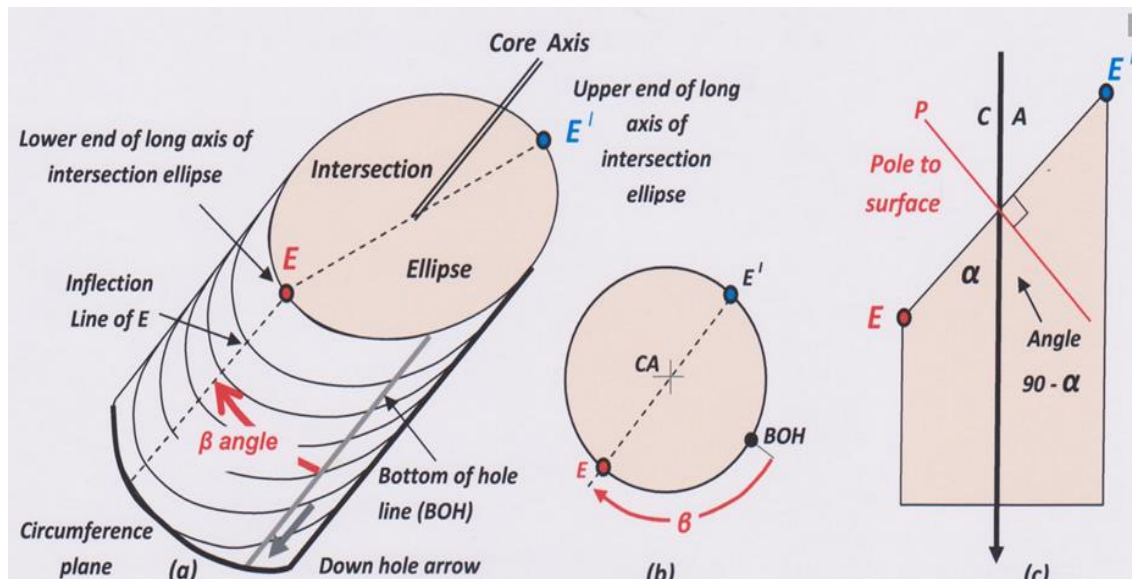


Εικόνα 40-Ειδικά βαθμονομημένη διαφάνεια με την οποία μετρώνται πάνω στο καρτό διαμέτρου HQ οι α, β

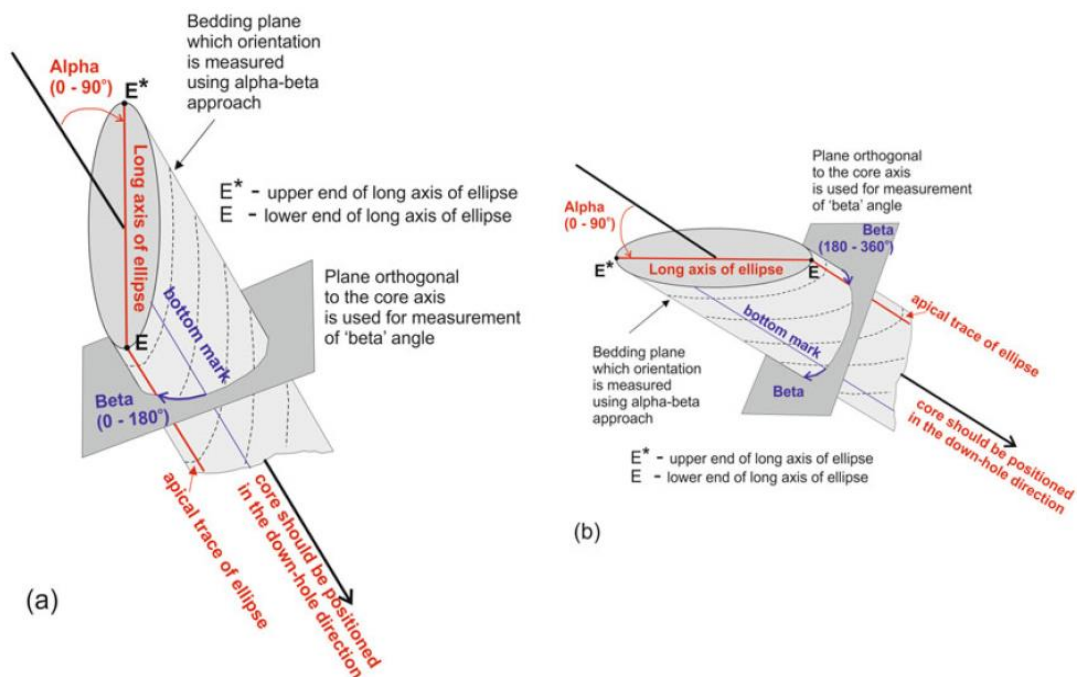
Γωνία α : Αποτελεί τη γωνία μεταξύ του άξονα του πυρήνα και του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης που σχηματίζεται από τη ρωγμή. Παίρνει τιμές 0° - 90° . Για τη μέτρηση της απαιτείται προσαρμογή της διαφάνειας με τρόπο έτσι ώστε να ταυτιστούν τα άκρα της ελλειπτικής επιφάνειας της ρωγμής με τις καμπύλες της διαφάνειας.

Γωνία β : Αποτελεί τη δεξιόστροφη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ίχνους του πυρήνα στο πάνω ή κάτω μέρος του με το ανώτερο ή κατώτερο άκρο του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης που σχηματίζει η ρωγμή. Παίρνει τιμές 0° - 360° . Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή το ίχνος του πυρήνα έχει μαρκαριστεί στο ανώτερο μέρος του, γίνεται προσαρμογή της διαφάνειας πάνω στο ίχνος που έχει μαρκαριστεί του πυρήνα και μετράται απευθείας η δεξιόστροφη γωνία που σχηματίζεται με το υψηλότερο σημείο της έλλειψης.

Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων θα πρέπει να γίνεται σωστή προσαρμογή της διαφάνειας στο ίχνος του πυρήνα, με τα βελάκια της να δείχνουν προς την κατεύθυνση όρυξης του πυρήνα.



Εικόνα 41-Υπολογισμός α, β γωνιών πάνω στον πυρήνα (Abzalov, 2016)



Εικόνα 42-Μετρηση α, β όταν το ίχνος βρίσκεται στο κατώτερο σημείο του πυρήνα όταν: α) η γωνία β είναι μεταξύ $0-180^\circ$, β) η γωνία β είναι μεταξύ $180-360^\circ$ (Abzalov, 2016)

Σε περίπτωση που το ίχνος έχει μαρκαριστεί στο κάτω μέρος του πυρήνα όπως αυτός εξέρχεται από τη γεώτρηση, η δεξιόστροφη γωνία β μετράται από το ίχνος ως το χαμηλότερο άκρο της έλλειψης που σχηματίζεται από τη ρωγμή.

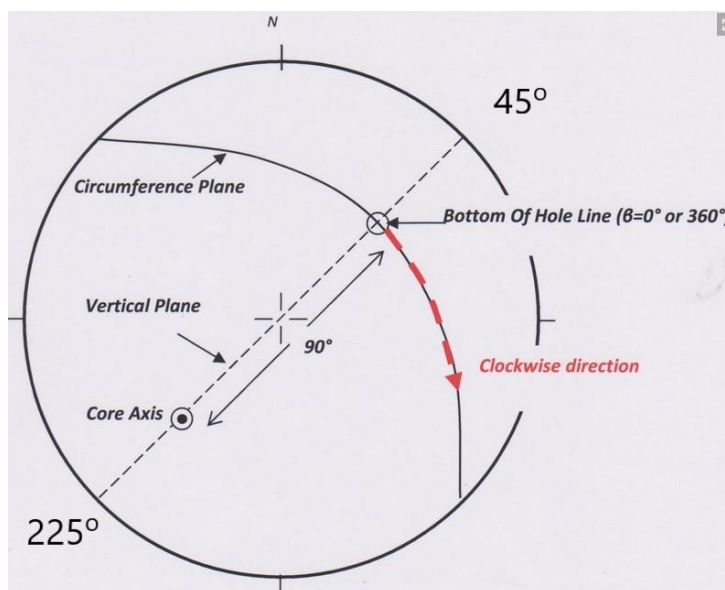
Οι μετρήσεις που έγιναν στο πεδίο καταγράφηκαν σε φύλλο Excel για την περαιτέρω επεξεργασία τους στο Εργαστήριο Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων.

Οι γωνίες α, β που μετρήθηκαν στους πυρήνες καθώς και ο προσανατολισμός της κάθε γεώτρησης (κλίση, διεύθυνση κλίσης), εισάγονται στη στερεογραφική προβολή

και ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία υπολογίζεται ο προσανατολισμός της κάθε ασυνέχειας.

Εύρεση πόλου ασυνέχειας με γωνίες $\alpha=60^\circ$, $\beta=315^\circ$ από προσανατολισμένη γεώτρηση με κλίση 45° και διεύθυνση κλίσης 225° :

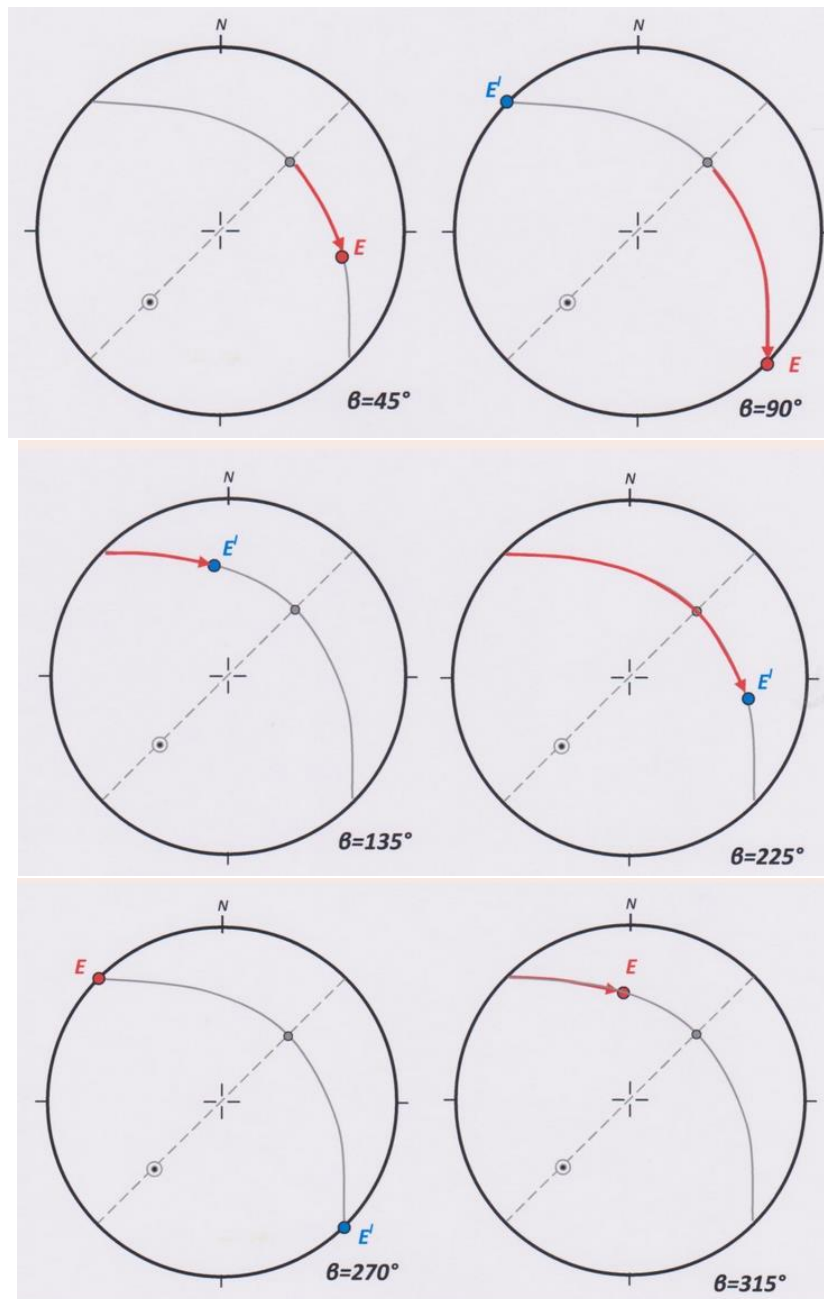
- 1) Αρχικά προβάλλεται πάνω στο δίκτυο το ίχνος της κατώτερης γραμμής αναφοράς της γεώτρησης (Bottom Of Hole, BOH), ο πόλος της γεώτρησης (Core Axis, CA), το κατακόρυφο επίπεδο που τα ενώνει (Vertical Plane) καθώς και το κάθετο στον άξονα της γεώτρησης επίπεδο (Circumference Plane).



Εικόνα 43-Απεικόνιση BOH, CA, Vertical Plane, Circumference Plane (<http://rogermarjoribanks.info/stereonet-solution-alpha-beta-angles-oriented-drill-core>)

Στην παραπάνω απεικόνιση το CA εμφανίζεται σαν πόλος, το Vertical Plane ενώνει το CA με το BOH και από το BOH περνά με τη μορφή τόξου κύκλου το κάθετο στον άξονα της γεώτρησης επίπεδο.

- 2) Εφόσον έχει μαρκαριστεί το BOH, θα χρησιμοποιηθεί το κατώτερο άκρο της ελλειπτικής επιφάνειας (E) που σχηματίζεται από τη ρωγμή, όπως φαίνεται παρακάτω:

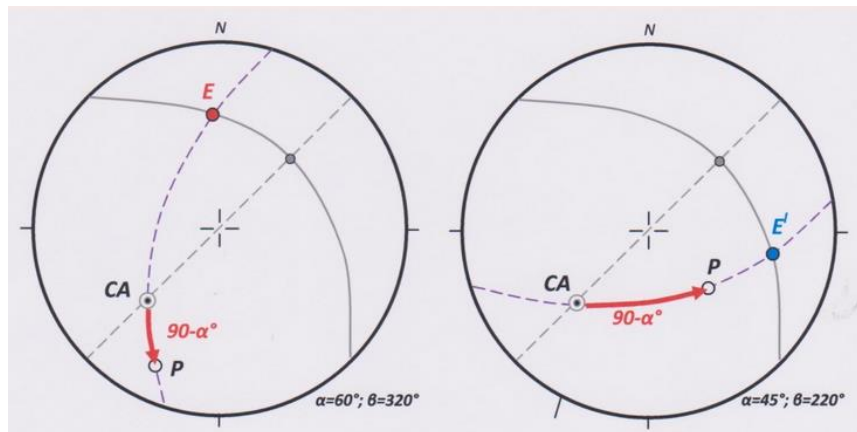


Εικόνα 44-Τρόπος εύρεσης των E , E' (<http://rogermarjoribanks.info/stereonet-solution-alpha-beta-angles-oriented-drill-core>)

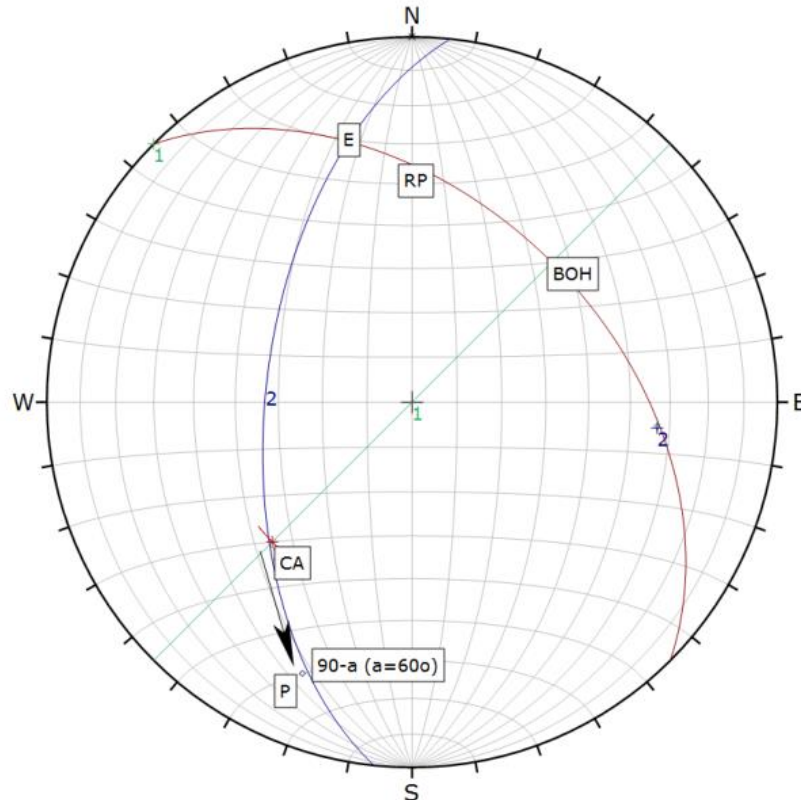
Στο συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα δε χρησιμοποιήθηκε το ίχνος στο κατώτερο άκρο του μεγάλου ημιάξονα της ρωγμής (BOH) αλλά αυτό στο ανώτερο. Έτσι για την εύρεση του προσανατολισμού των ασυνεχειών βρέθηκαν τα E' και όχι τα E , με γραμμή αναφοράς το ανώτερο άκρο του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης και όχι του BOH.

- 3) Στη συνέχεια επιλέγεται και σχεδιάζεται ο μοναδικός μεγάλος κύκλος που διέρχεται από τα CA και E.

- 4) Έχοντας ολοκληρώσει τα παραπάνω βήματα, ξεκινώντας από το σημείο CA κατά μήκος του μεγάλου κύκλου μετράται η γωνία $90^\circ - \alpha$. Αν στη στερεογραφική προβολή έχει γίνει χρήση του BOH και κατ'επέκταση του σημείου E τότε η γωνία $90^\circ - \alpha$ μετράται από το CA προς την αντίθετη κατεύθυνση από το E. Στην περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί το ανώτερο άκρο της ελλειπτικής επιφάνειας του πυρήνα και του σημείου E', η γωνία $90^\circ - \alpha$ μετράται προς την κατεύθυνση του E'.



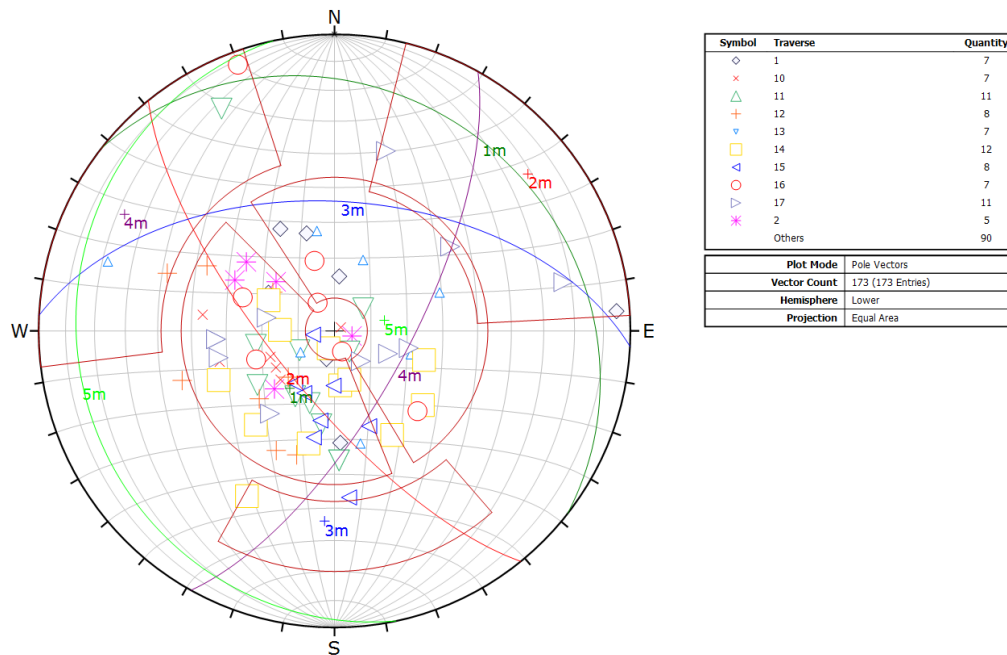
Εικόνα 45-Κατασκευή μεγάλου κύκλου και εύρεση γωνίας $90^\circ - \alpha$ για τις 2 περιπτώσεις (<http://rogermarjoribanks.info/stereonet-solution-alpha-beta-angles-oriented-drill-core>)



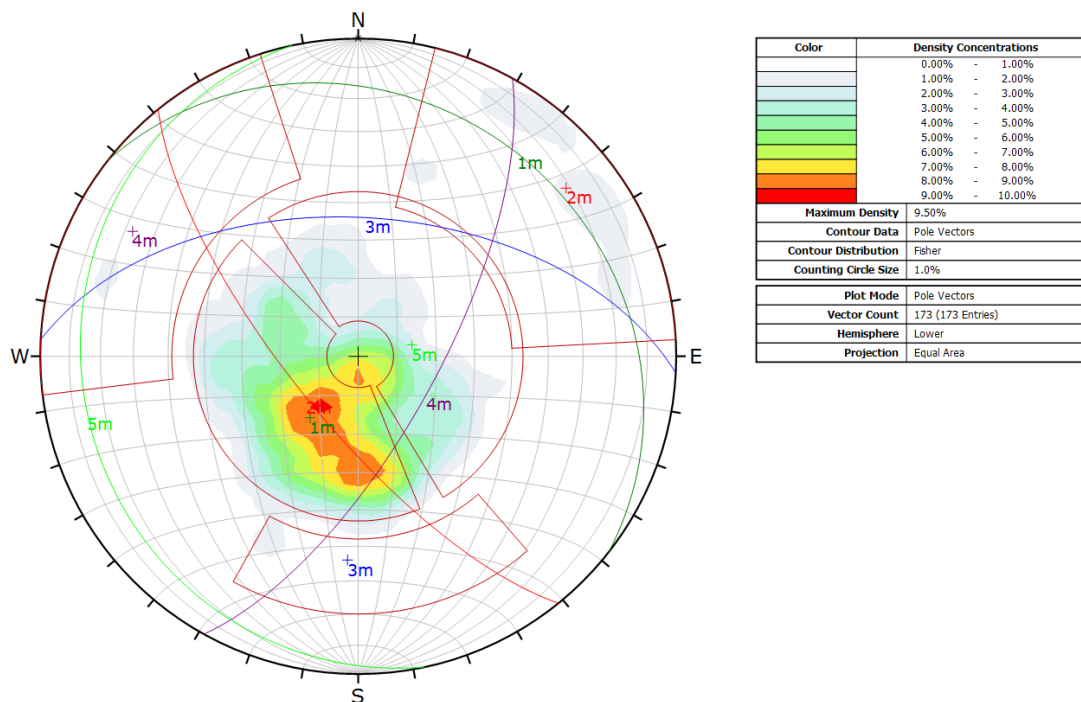
Διάγραμμα 2-Εύρεση του πόλου P της ασυνέχειας

Τέλος γνωρίζοντας τον πόλο της ασυνέχειας μπορεί εύκολα να υπολογισθεί ο προσανατολισμός της (κλίση, διεύθυνση κλίσης).

Η παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις ασυνέχειες που μετρήθηκαν στο πεδίο. Με την εισαγωγή των γωνιών α, β των ασυνεχειών που μετρήθηκαν και τον προσανατολισμό των αντίστοιχων γεωτρήσεων, στο πρόγραμμα Dips 6.0, βρέθηκαν οι πόλοι όλων των ασυνεχειών. Οι προβολές αυτές των πόλων καθώς και η συχνότητα εμφάνισης τους φαίνονται στην παρακάτω συγκετρωτική ισο-εμβαδική προβολή.



Διάγραμμα 3-Κατανομή πόλων ασυνεχειών



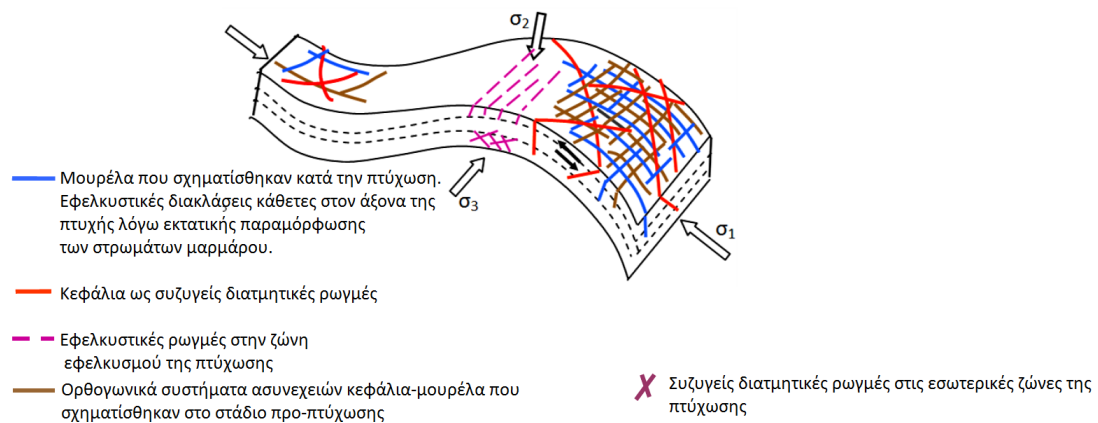
Διάγραμμα 4-Προβολές των ασυνεχειών που μετρήθηκαν από τις γεωτρήσεις

Όπως φαίνεται στην παραπάνω στερεογραφική προβολή, ταυτοποιήθηκαν 5 οικογένειες ασυνεχειών. Ακολουθεί πίνακας των οικογενειών που προέκυψαν μετά την όρυξη των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων.

Οικογένεια	Διεύθυνση κλίσης (°)	Κλίση (°)	Παρατηρήσεις
1	38	20	Στρώσεις
2	231	73	Κεφάλια
3	3	54	Μουρέλα
4	119	70	Συζυγή κεφάλια
5	258	14	Στρώσεις με αντίθετη κλίση με την 1

Πίνακας 5-Οικογένειες ασυνεχειών που προέκυψαν από προσανατολισμένες γεωτρήσεις

Με προσεκτική παρατήρηση μπορεί κάποιος να φτάσει στο συμπέρασμα ότι οι οικογένειες 1 και 5 έχουν ίδια παράταξη και αντίθετη κλίση, ενώ και οι οικογένειες 2 και 4 αποτελούν το συζυγές σύστημα των κεφαλιών. Άρα θεωρούνται 3 κύρια συστήματα ασυνεχειών. Οι στρώσεις (1), τα κεφάλια (2) και τα μουρέλα (3), οι προσανατολισμοί των οποίων φαίνονται στον παραπάνω πίνακα (Πιν. 5). Οι παραπάνω θεωρήσεις έγιναν λόγω της έντονης πτύχωσης και κάμψης των στρωμάτων του μαρμάρου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 43.



Εικόνα 46- Συστήματα ασυνεχειών που αναπτύσσονται σε πτυχωμένα στρώματα μαρμάρου

Κεφάλαιο 5 - Επεξεργασία δεδομένων

5.1 Μαθηματικό μοντέλο

Ένας από τους στόχους της διαδικασίας είναι η κατάστρωση μίας μεθοδολογίας για την εκτίμηση της κατανομής των όγκων ενός κοιτάσματος μαρμάρου *in situ*, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις συχνότητας ασυνεχειών με βάση τον προσανατολισμό τους. (Εξαδάκτυλος)

Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα της διαδικασίας: (Maria Stavropoulou, PhD; George Xiroudakis. "Fracture frequency and block volume distribution in rock masses". Springer Journals. Rock Mechanics and Rock Engineering, sub. 2019)

1^ο Βήμα : Εύρεση κατανομής συχνότητας ασυνεχειών (FF) ανά 1 μέτρο γεώτρησης, κάθε οικογένειας. Για να προχωρήσει η διαδικασία γίνεται η εξής παραδοχή, η κατανομή των συχνοτήτων ασυνεχειών πάνω στον πυρήνα είναι ένα τελείως τυχαίο φαινόμενο δηλαδή η ύπαρξη μιας ασυνέχειας σε μια θέση στον πυρήνα δεν επηρεάζεται από τις γειτονικές της. Σε αυτή την περίπτωση η κατανομή συχνότητας είναι η κατανομή Poisson με μία παράμετρο (Priest & Hudson, 1979), δηλαδή η κατανομή που δίνει την πιθανότητα να υπάρχουν k ρωγμές σε διάστημα x επί του καρότου είναι :

$$P\left(\frac{k \text{ events}}{\text{interval } x}\right) = e^{-\lambda \cdot x} \cdot \frac{(\lambda \cdot x)^k}{k!} \quad (4.1)$$

Στην κατανομή Poisson η μοναδική σταθερή παράμετρος είναι το λ που ονομάζεται γραμμική συχνότητα ασυνεχειών (linear joint frequency).

Έτσι μπορεί να υπολογισθεί η αθροιστική κατανομή των αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών x . Από την εξίσωση (4.1) προκύπτει :

$$P(r \leq x) = 1 - P(r > x) = 1 - P(\text{no discontinuities in distance } x) \Rightarrow$$

$$P(r \leq x) = 1 - P\left(\frac{k}{x} = 0\right) = 1 - e^{-\lambda \cdot x} \quad (4.2)$$

Η παραπάνω έκφραση αθροιστικής πιθανότητας των αποστάσεων διαδοχικών ασυνεχειών μιας οικογένειας είναι η γνωστή αρνητική εκθετική κατανομή (negative exponential distribution).

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda \cdot x} \quad (4.3)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των αποστάσεων x της αρνητικής εκθετικής κατανομής είναι :

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} \quad (4.4)$$

2^ο Βήμα : Μετατροπή κατανομής συχνότητας ασυνεχειών σε κατανομή αποστάσεων διαδοχικών ασυνεχειών.

Αυτό πραγματοποιήθηκε γνωρίζοντας από προηγούμενη εκτεταμένη ανάλυση των συχνοτήτων εμφάνισης ασυνεχειών σε πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις άλλων κοιτασμάτων μαρμάρου, ότι η βασική γραμμική συχνότητα λ της κατανομής μιας οικογένειας ασυνεχειών δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το f_λ , δηλαδή τον αριθμό των ρωγμών σε διάστημα x ,

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha_0 f_\lambda \quad (4.5)$$

αλλά και επιπροσθέτως από το μήκος δειγματοληψίας x με την παρακάτω μορφή εξίσωσης δύναμης, (Yakovlev et al., 2008)

$$\lambda(x) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{b-1} + \frac{1}{\alpha'} \left(\frac{x}{\alpha'} \right)^{b'-1} f_\lambda \quad (4.6)$$

Με βάση τις σχέσεις (4.5) και (4.6), η αθροιστική κατανομή των αποστάσεων ασυνεχειών για την περίπτωση της ανομοιόμορφης κατανομής Poisson που δίνεται από την (4.1), με μεταβλητή παράμετρο συχνότητας λ προκύπτει ότι είναι η κατανομή Weibull όπου για $b=1$ μετατρέπεται σε αρνητική εκθετική κατανομή. Άρα λοιπόν η αθροιστική κατανομή των αρχικών αποστάσεων μεταξύ ασυνεχειών και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των αρχικών αποστάσεων που μετρώνται πρώτες σε μια γεώτρηση παίρνει τη μορφή της συνάρτησης Weibull με 2 παραμετρους.

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

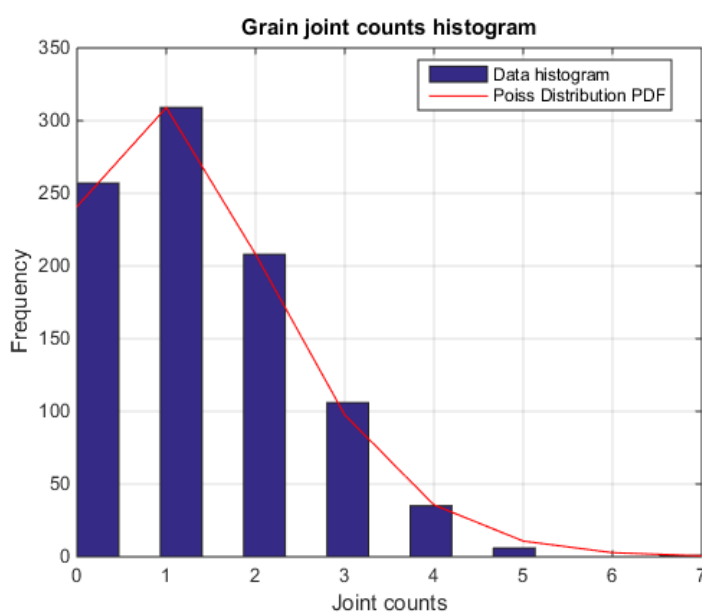
$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (4.7)$$

5.2 Κατανομές των αποστάσεων των ασυνεχειών σε κάθε οικογένεια από μετρήσεις των συχνοτήτων των ασυνεχειών

Για την εύρεση των κατανομών των αποστάσεων των ασυνεχειών κάθε οικογένειας από τις μετρήσεις της συχνότητας των ασυνεχειών (FF) πάνω στους πυρήνες, κατασκευάστηκε αλγόριθμος σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab (2019). Ο αλγόριθμος στηρίχθηκε στις εξισώσεις του μοντέλου που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η εύρεση των κατανομών των αποστάσεων έγινε ξεχωριστά για κάθε ένα από τα 3 κύρια συστήματα ασυνεχειών που προαναφέρθηκαν σε άλλη παράγραφο.

5.2.1 1η οικογένεια ασυνεχειών – Στρώσεις

Για την 1^η οικογένεια ασυνεχειών που έχει και τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, όπως και για τις υπόλοιπες 2 οικογένειες βρίσκεται αρχικά η κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης ρωγμών ανά μέτρο γεώτρησης. Η κατανομή συχνότητας των ασυνεχειών της οικογένειας 1 φαίνεται στο παρακάτω ιστόγραμμα:



Διάγραμμα 5-Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών ανά 1 m της οικογένειας 1 (στρώση)

Από τον υπολογιστικό κώδικα που κατασκευάζεται στη Matlab δημιουργούνται άλλες 9 κατανομές συχνότητας εμφάνισης για $x=2, \dots, 10m$ ανά 1m κάθε φορά με σκοπό να βρεθούν 3 παράμετροι της προσαρμοσμένης ανομοιόμορφης κατανομής ασυνεχειών που δίνεται από τις εξισώσεις (4.1) και (4.5). Η προσαρμοσμένη ανομοιόμορφη κατανομή Poisson πάνω στα πειραματικά δεδομένα φαίνεται με μία συνεχή κόκκινη γραμμή στο διάγραμμα 4. Στο διάγραμμα 5 όπως φαίνεται παρακάτω, παρουσιάζεται η αθροιστική κατανομή των δεδομένων καθώς και η συνεχής καμπύλη της ανομοιόμορφης κατανομής Poisson που προσαρμόστηκε.

Οι παράμετροι που βρέθηκαν από τις 10 προσαρμογές καμπύλων μπορούν να διαμορφωθούν όπως στη σχέση (4.6) και στη συνέχεια να εξετασθεί αν τα νέα δεδομένα της μορφής $\lambda_0^{b_0}$ που παρουσιάζονται ως σημεία στο διάγραμμα 6, μπορούν να προσαρμοσθούν με συνάρτηση του x υψωμένο σε δύναμη, δηλαδή :

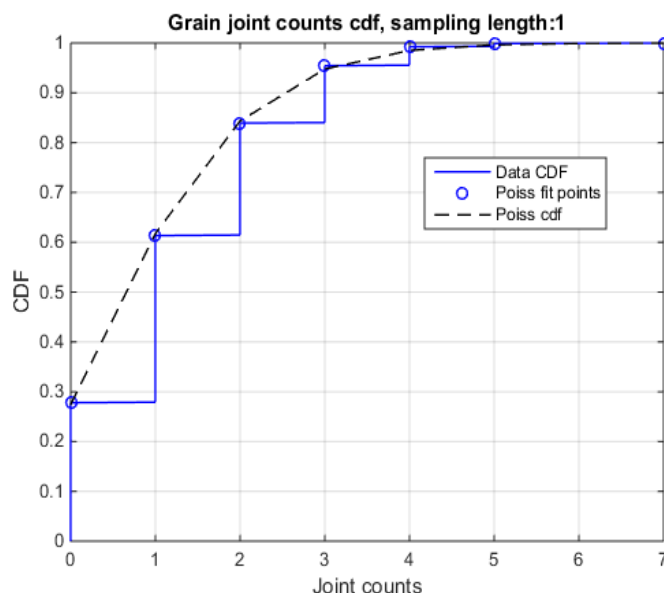
$$\lambda_0^{b_0} = \frac{x^{b-1}}{a^b}$$

Με τη συγκεκριμένη προσαρμογή βρίσκονται εύκολα οι παράμετροι a, b , κλίμακας και σχήματος αντίστοιχα, της κατανομής των αποστάσεων μεταξύ των διαδοχικών ασυνεχειών της συγκεκριμένης οικογένειας σύμφωνα με τη σχέση (4.7).

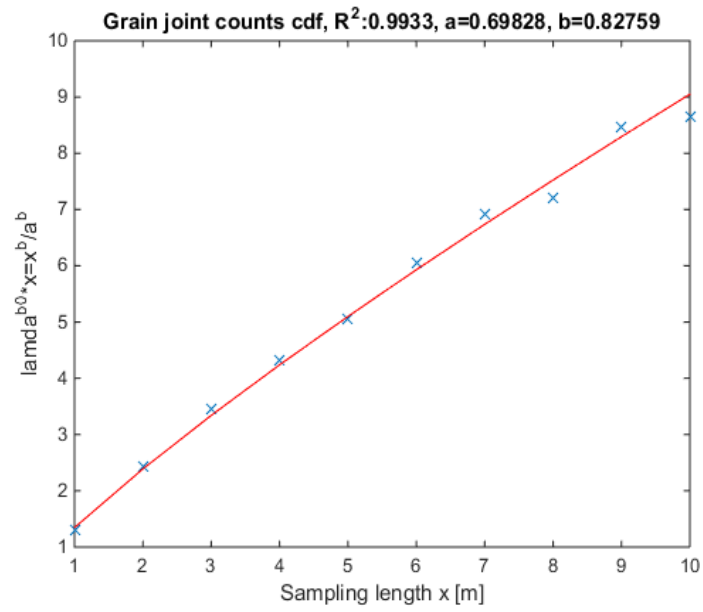
Η εξαχθείσα αθροιστική κατανομή των αποστάσεων των ασυνεχειών της 1^{ης} οικογένειας φαίνεται στο διάγραμμα 5. Όμως οι γεωτρήσεις που είναι σχεδόν κατακόρυφες δεν τέμνουν κάθετα τις ασυνέχειες της συγκεκριμένης οικογένειας, καθώς εμφανίζει μέση κλίση 20°, επομένως απαιτείται διόρθωση προσανατολισμού.

Η τελική εξαχθείσα πραγματική κατανομή των αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών της στρώσης (Interarrivals) φαίνεται στο διάγραμμα 8. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα προκύπτει ότι η πιθανότητα να υπάρχουν αποστάσεις μεγαλύτερες από 1 μέτρο είναι περίπου 25%. Δηλαδή το 25% των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών της στρώσης είναι μεγαλύτερες του 1 μέτρου.

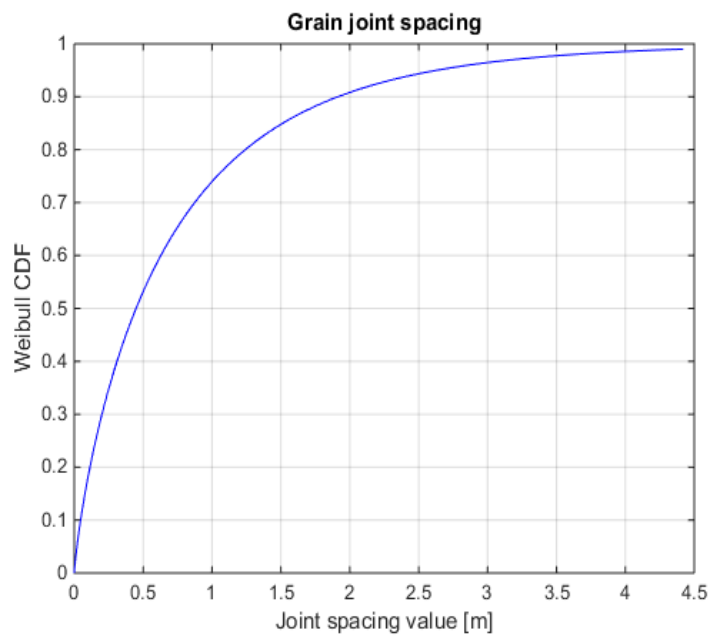
Όλα τα παρακάτω διαγράμματα προέκυψαν από γλώσσα προγραμματισμού Matlab.



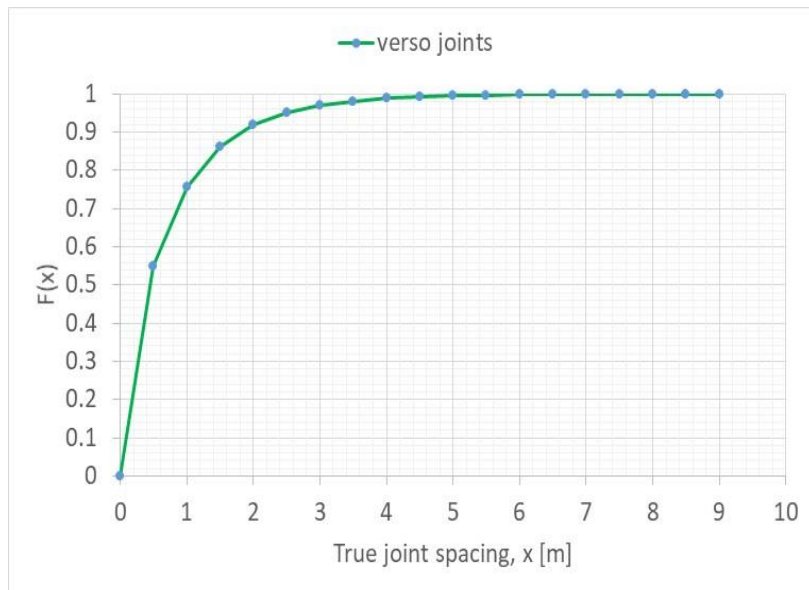
Διάγραμμα 6-Αθροιστική κατανομή και προσαρμοσμένη κατανομή τροποποιημένης Poisson για συχνότητα ανά μέτρο (CDF=αθροιστική κατανομή)



Διάγραμμα 7-Προσαρμογή συνάρτησης x με σχέση δύναμης



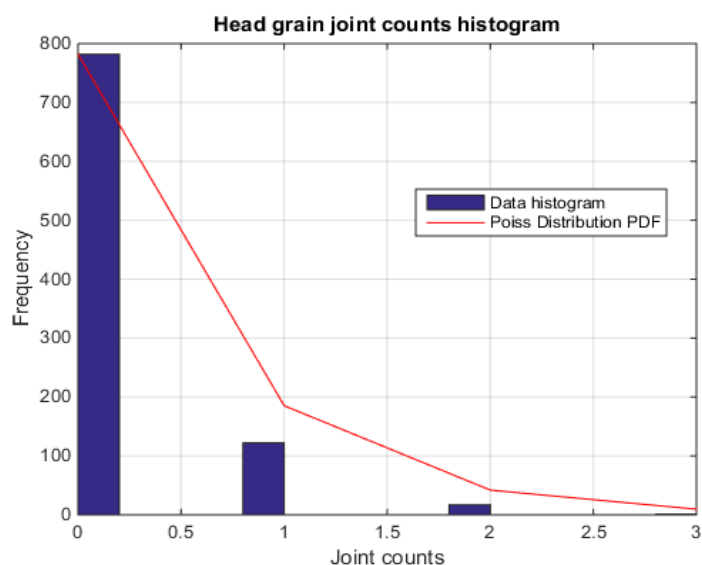
Διάγραμμα 8-Κατανομή Weibull φαινόμενων αποστάσεων (CDF Weibull=αθροιστική κατανομή κατά Weibull)



Διάγραμμα 9-Κατανομή Weibull πραγματικών αποστάσεων (Yakovlev, G., Rundle, J. B., Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2005). Inter-arrival time distribution for the non-homogeneous Poisson process. *arXiv preprint cond-mat/0507657*)

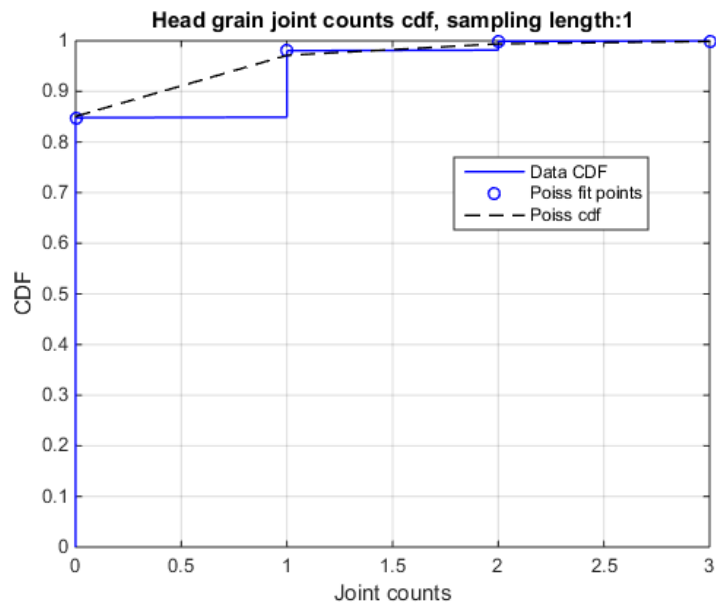
5.2.2 2η οικογένεια ασυνεχειών – Κεφάλια

Σε αντίθεση με τις στρώσεις, τα κεφάλια έχουν σημαντικά μικρότερες συχνότητες εμφάνισης στους πυρήνες των γεωτρήσεων λόγω των μεγαλύτερων κλίσεων που εμφανίζουν (80°) σε σχέση με τις στρώσεις. Αυτό φαίνεται και στο ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης ρωγμών παρακάτω.

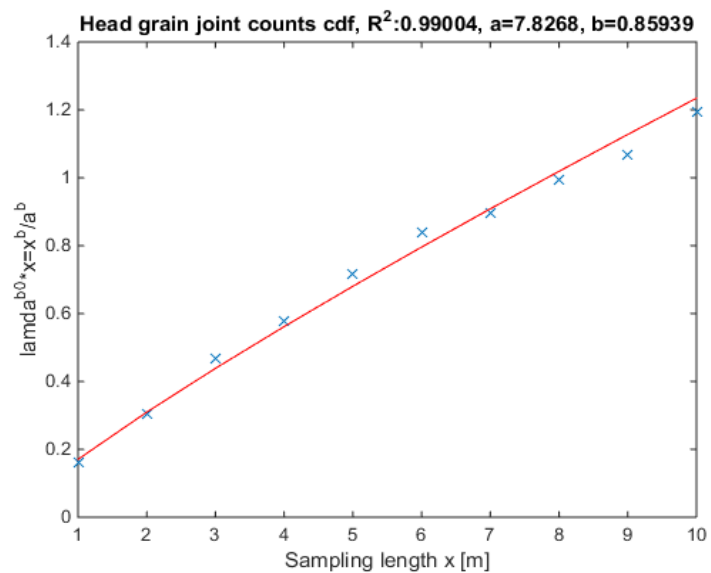


Διάγραμμα 10-Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών ανά 1 m της οικογένειας 2 (κεφάλια)

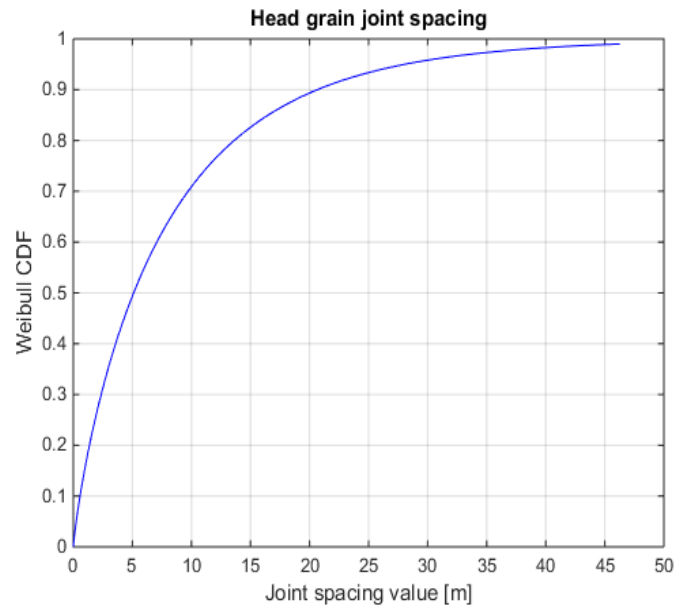
Στα παρακάτω διαγράμματα 10-13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας για την οικογένεια 2, όπως αυτά περιγράφηκαν και ανωτέρω για την οικογένεια 1.



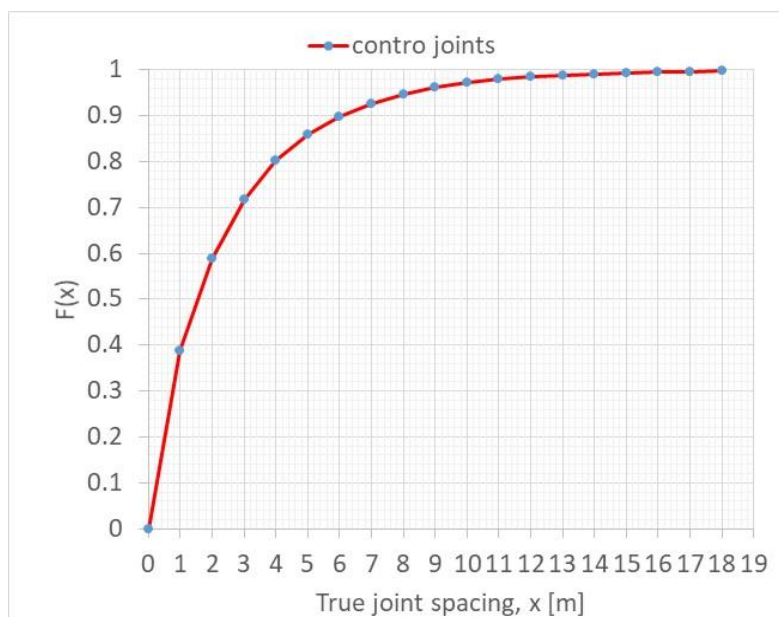
Διάγραμμα 11-Αθροιστική κατανομή και προσαρμοσμένη κατανομή τροποποιημένης Poisson για συχνότητα ανά μέτρο (CDF=αθροιστική κατανομή)



Διάγραμμα 12-Προσαρμογή συνάρτησης x με σχέση δύναμης



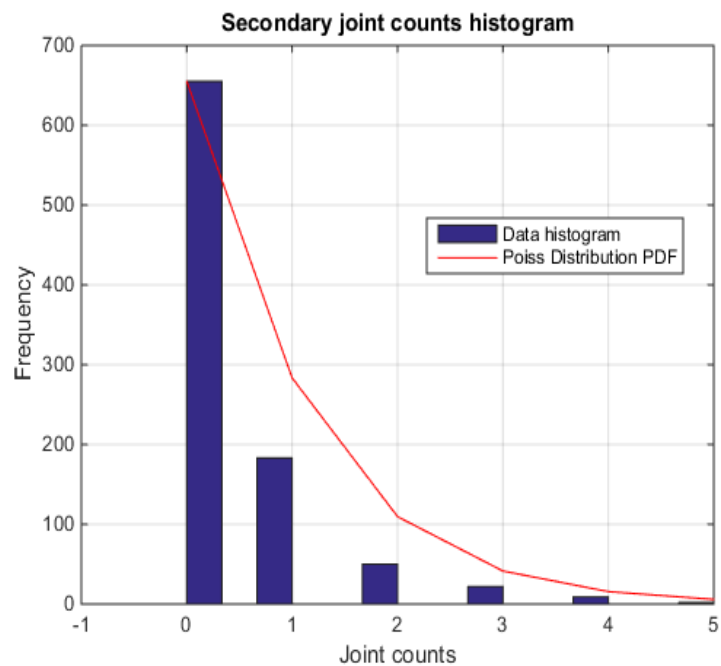
Διάγραμμα 13-Κατανομή Weibull φαινόμενων αποστάσεων (Weibull CDF=αθροιστική κατανομή κατά Weibull)



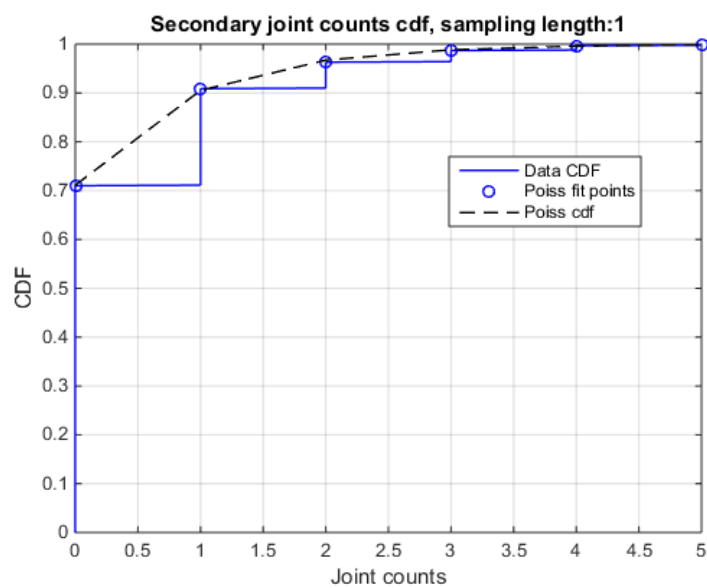
Διάγραμμα 14-Κατανομή Weibull πραγματικών αποστάσεων (Yakovlev, G., Rundle, J. B., Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2005). Inter-arrival time distribution for the non-homogeneous Poisson process. *arXiv preprint cond-mat/0507657*)

5.2.3 3η οικογένεια ασυνεχειών – Μουρέλα

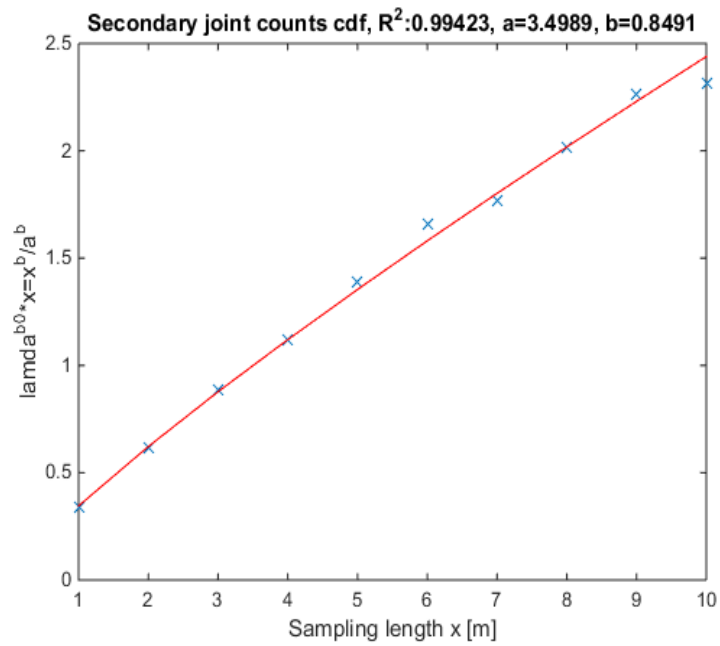
Η 3^η οικογένεια ασυνεχειών παρουσιάζει μέση κλίση 55°. Παρουσιάζονται με την ίδια σειρά τα αποτελέσματα για την 3^η και τελευταία οικογένεια ασυνεχειών.



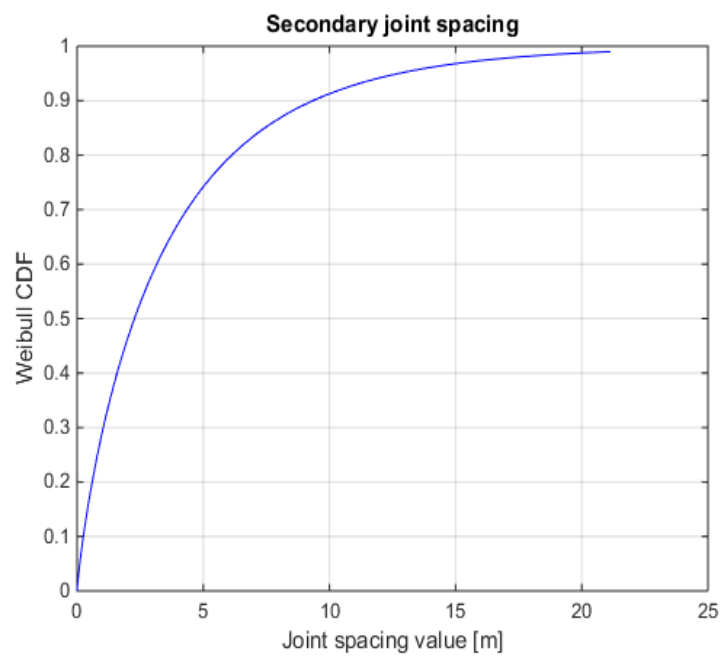
Διάγραμμα 15-Κατανομή συχνότητας ασυνεχειών ανά 1 m της οικογένειας 3 (μουρέλα)



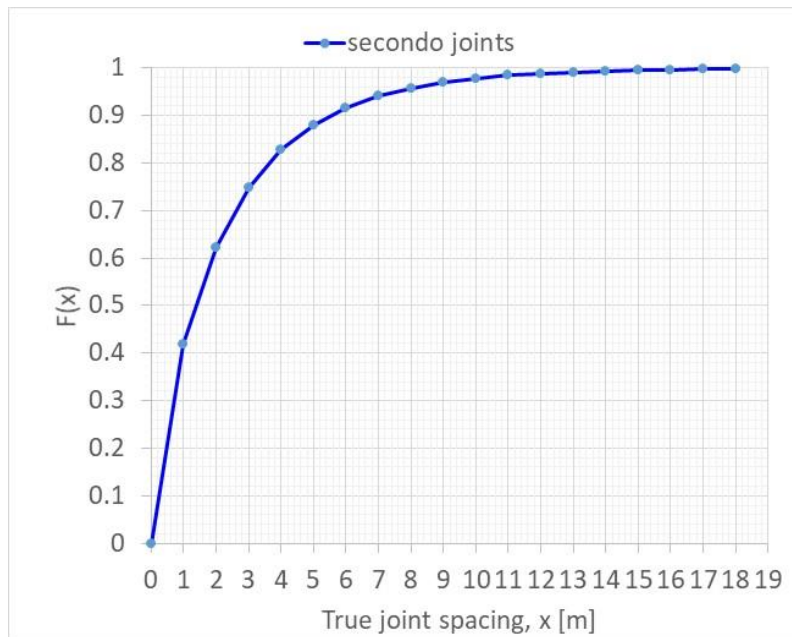
Διάγραμμα 16-Αθροιστική κατανομή και προσαρμοσμένη κατανομή τροποποιημένης Poisson για συχνότητα ανά μέτρο (CDF=αθροιστική κατανομή)



Διάγραμμα 17-Προσαρμογή της συνάρτησης x με σχέση δύναμης



Διάγραμμα 18-Κατανομή Weibull φαινόμενων αποστάσεων (Weibull CDF=αθροιστική κατανομή κατά Weibull)



Διάγραμμα 19-Κατανομή Weibull πραγματικών αποστάσεων (Yakovlev, G., Rundle, J. B., Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2005). Inter-arrival time distribution for the non-homogeneous Poisson process. *arXiv preprint cond-mat/0507657*)

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα

Εμπορεύσιμοι όγκοι μαρμάρου είναι αυτοί από τους οποίους μπορούν να παραχθούν πλάκες διαστάσεων συνήθως της τάξης των $2 \times 1.5 \text{ m}^2$, $2 \times 2 \text{ m}^2$. Η τρίτη διάσταση των εξαχθέντων όγκων μαρμάρου πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 1 μέτρου, έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στη βάση του τελάρου (gangsaw) και να κοπούν σε πλάκες πάχους 2-4 cm.

Από την επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και τις κατανομές των αποστάσεων των ασυνεχειών που προέκυψαν, μπορεί να εκτιμηθεί το ποσοστό των εμπορεύσιμων όγκων μαρμάρου. Αν τα μέτωπα του λατομείου είναι προσανατολισμένα κατά την παράταξη της 1^{ης} οικογένειας ασυνεχειών (στρώσεις) και κάθετα προς αυτήν και δεδομένου ότι τα μωρέλα έχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, τότε η πρώτη διάσταση των όγκων θα είναι η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών τεχνητών επιφανειών κοπής με συρματοκοπή που είναι της τάξης των 2 μέτρων. Η δεύτερη διάσταση τους προκύπτει από την κατανομή των πραγματικών αποστάσεων της 2^{ης} οικογένειας ασυνεχειών (κεφάλια), όπως φαίνεται στο διάγραμμα 13.

Αν τεθεί κάτω όριο εμβαδού επιφάνειας, του εξαχθέντος ογκομαρμάρου, τα 3 m^2 , έχοντας μία σταθερή διάσταση κοπής 2m και μία ακόμη 1.5m και άνω, τότε προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα 19 ότι η πιθανότητα αυτού του ενδεχομένου είναι περίπου 50% ή 0.5.

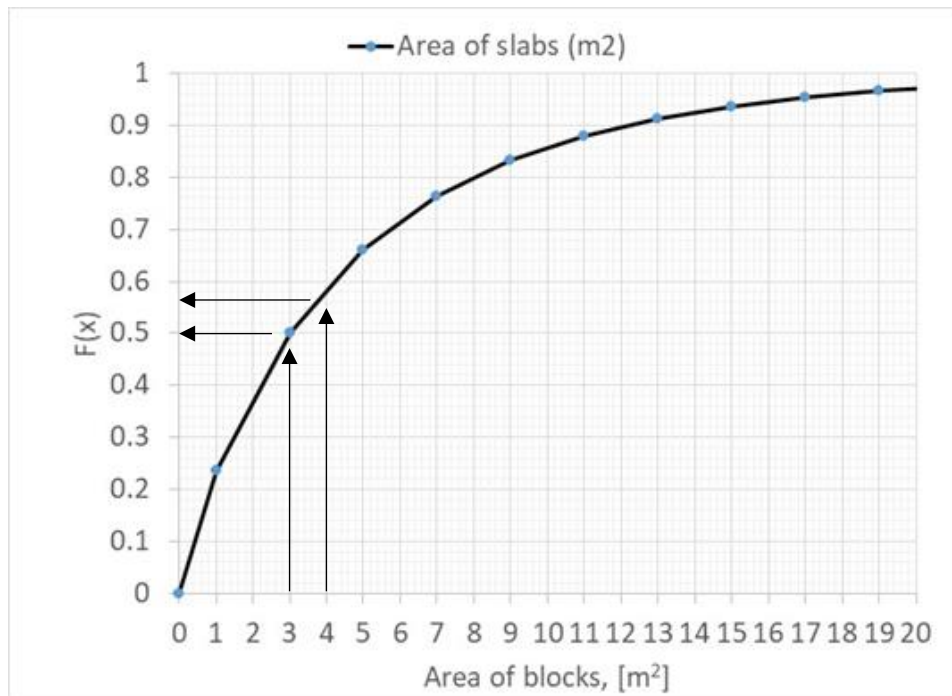
Αν τεθεί κάτω όριο εμβαδού πλάκας τα 4 m^2 , τότε η πιθανότητα να παραχθούν εμπορεύσιμοι όγκοι μειώνεται περίπου στο 45% ή 0.45.

Η τρίτη διάσταση των ογκομαρμάρων που είναι οι πραγματικές αποστάσεις μεταξύ των ασυνεχειών της 1^{ης} οικογένειας (στρώσεις), πρέπει όπως προαναφέραμε να είναι από 1 μετρο και πάνω. Βάσει του διαγράμματος 8 προκύπτει ότι η πιθανότητα του συγκεκριμένου ενδεχομένου είναι περίπου 25% ή 0.25.

Άρα η πιθανότητα να εξαχθούν όγκοι των παραπάνω προδιαγραφών

- με όριο εμβαδού επιφάνειας τα 3 m^2 είναι το γινόμενο των πιθανοτήτων $0.5 \times 0.25 = 0.125$ ή 12.5%
- με όριο εμβαδού επιφάνειας τα 4 m^2 είναι το γινόμενο των πιθανοτήτων $0.45 \times 0.25 = 0.11$ ή 11%

Συμπερασματικά αν δεν ληφθεί υπόψιν το χρώμα, η μέγιστη αποληψιμότητα του κοιτάσματος είναι της τάξης του 12.5%.



Διάγραμμα 20-Αθροιστική κατανομή εμβαδών πλακών μαρμάρου που δυνητικά μπορούν να παραχθούν από το λατομείο

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Abzalov, M. (2016). Applied mining geology (Vol. 12). Springer International Publishing.
- Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6), 319-368.
- Hudson, J. A., & Priest, S. D. (1979, December). Discontinuities and rock mass geometry. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 16, No. 6, pp. 339-362). Pergamon.
- Hudson, J. A., & Priest, S. D. (1983, April). Discontinuity frequency in rock masses. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 20, No. 2, pp. 73-89). Pergamon.
- Laskaridis, K. (2004). Greek marble through the ages: an overview of geology and the today stone sector. *Dimension stone*, 67-72.
- Stavropoulou, M. (PhD) & Xiroudakis, G. (sub. 2019). Fracture frequency and block volume distribution in rock masses. In *Springer Journals. Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- 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.
- 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. (2012). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.
- Yakovlev, G., Rundle, J. B., Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2005). Inter-arrival time distribution for the non-homogeneous Poisson process. arXiv preprint cond-mat/0507657.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. (2014). Rock slope engineering. CRC Press.

- Χατζηπαναγής, Ι., and Δ. Βουγιούκας (2004). "The significance of the lithostratigraphic position and the tectonic deformation for the location and the exploitation of the dolomitic marbles of Falacron Mountain." Bulletin of the Geological Society of Greece 36.1 (2004): 63-71.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Δηλγεράκη, Ζ. (2014). *Μελέτη πετρογραφικών και φυσικομηχανικών ιδιοτήτων μαρμαροφόρων κοιτασμάτων από περιοχές των νομών Δράμας και Σερρών*, Διπλωματική Εργασία.
- Διαμάντη, Φ. (2019). *Σχεδιασμός υπόγειας εκμετάλλευσης σε λατομείο μαρμάρου βάσει πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων*, Διπλωματική Εργασία
- Εμμανουήλ, Ζ. (2019). *Απεικόνιση του δικτύου ασυνεχειών του πετρώματος σε υπόγειο λατομείο μαρμάρου*, Διπλωματική Εργασία
- Εξαδάκτυλος, Γ. *Σημειώσεις του μαθήματος 'Μηχανική Πετρωμάτων'*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Εξαδάκτυλος, Γ. (2019) *Σημειώσεις του μαθήματος 'Σχεδιασμός Υπαίθριων Εκμεταλλεύσεων'*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Λόζιος, Σ., Σούκης, Κ., & Αντωνίου, Β. (2015). *Η χρήση της γεωλογικής πυξίδας*.
- Μπαχά, Μ. (2019). *Σχεδιασμός τρισδιάστατου κοιτασματολογικού μοντέλου και επέκταση υπαίθριας εκμετάλλευσης σε λατομείο στην Β. Ελλάδα*, Διπλωματική Εργασία.
- Μανούτσογλου, Ε. (2008). *Σημειώσεις του μαθήματος 'Εισαγωγή στην Γεωλογία Ελλάδος'*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Μανούτσογλου, Ε. (2013). *Σημειώσεις του μαθήματος 'Εισαγωγή στη Γεωλογία'*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Μόδης, Κ., & Σταματάκη, Σ. (2015). *Εισαγωγή στη μεταλλευτική έρευνα*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

- Παππάς, Κ. (2016). *Εισαγωγή και ανάλυση δεδομένων φυσικών-μηχανικών-τεχνικών ιδιοτήτων μαρμάρων με τη βοήθεια ειδικής σχεσιακής βάσης δεδομένων*, Διπλωματική Εργασία.
- Πέννος, Χ. (2009). *Γεωμορφολογική μελέτη της λεκάνης του Αγγίτη ποταμού*, Διατριβή ειδίκευσης.
- Χατζηπαναγής Ι., 1991. Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό. Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών. Αθήνα 1991.
- Χατζηπαναγής, Ι., Φυρολάκης, Ν., & Μπόσκος, Ε. (1993). Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού και η τεκτονική σχέση της Δ. Ροδόπης με τη Σερβομακεδονική μάζα. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 28(1), 151-163.
- Χριστόπουλος, Δ. (2016). *Σημειώσεις του Προπτυχιακού μαθήματος 'Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς'*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Ιστοσελίδες

- Dips v6.0 (2016), Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data , Rocscience <https://www.rocscience.com/software/dips>
- <https://www.boartlongyear.com/>
- <http://rogermarjoribanks.info/stereonet-solution-alpha-beta-angles-oriented-drill-core/>
- Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, <http://www.geo.auth.gr/>
- Ορυκτές πρώτες ύλες Ελλάδας, <https://www.orykta.gr/>
- REFLEX ACT III, <https://reflexnow.com/product/reflex-act-iii/>