

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σχεδιασμός υπόγειας εκμετάλλευσης σε λατομείο μαρμάρου βάσει
πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων**

Φωτεινή Διαμάντη

Εξεταστική Επιτροπή:

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής

Δρ. Γεώργιος Σαράτσης

Χανιά

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο. Η πραγμάτωση της εργασίας δε θα μπορούσε να υλοποιηθεί δίχως τη βοήθεια και τις οδηγίες από όλους εκείνους που οφείλω να ευχαριστήσω.

Αναλυτικότερα:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κύριο Εξαδάκτυλο Γεώργιο, για την επιλογή και ανάθεση του θέματος, τις συμβουλές του, τις διορθώσεις του και την συμπαράσταση του.

Τον καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Γαλετάκη Μιχαήλ, για τον χρόνο που διέθεσε στην διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας, τις υποδείξεις του καθώς και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιστημονικό συνεργάτη, κύριο Σαράτση Γεώργιο, για την πολύτιμη συνεισφορά του στην πραγμάτωση της εργασίας σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της και την υποστήριξη του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την συμπαράσταση που έδειξαν στη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και τους φίλους μου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο σχεδιασμός υπόγειας εκμετάλλευσης μαρμάρου με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων με βάση τα αποτελέσματα γεωτρήσεων πυρηνοληψίας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του μαρμάρου με στόχο την εξασφάλιση της ασφάλειας και της μέγιστης απολήψεως του κοιτάσματος. Για τον σχεδιασμό της εξόρυξης γίνεται χρήση σχεδιαστικών και λογισμικών προγραμμάτων όπως το AutoCAD™ και το FLAC3D™. Με τη βοήθεια των παραπάνω, γίνεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς του πετρώματος κατά τα διάφορα στάδια της εξόρυξης, τα οποία έχουν οριστεί αρχικά.

Τα δεδομένα των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων στην περιοχή, χρησιμοποιήθηκαν ώστε να γίνει η επιλογή των ορίων της υπόγειας εκμετάλλευσης που θα αποδώσει τη μέγιστη απόληψη δολομιτικού μαρμάρου. Αυτό που καθόρισε την προχώρηση της εξόρυξης, ήταν η παρουσία ασβεστιτικού μαρμάρου στο λατομείο και το οποίο θεωρείται στείρο υλικό για τη συγκεκριμένη εκμετάλλευση. Έτσι, σχεδιάστηκε η επαφή ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου, σύμφωνα με την οποία διαχωρίστηκε το κοίτασμα από το άγονο υλικό. Στη συνέχεια, διαμορφώθηκαν τα στάδια της εκμετάλλευσης, επιλέχθηκε η μέθοδος εξόρυξης του δολομιτικού μαρμάρου και καθορίστηκαν οι διαστάσεις των ογκομαρμάρων που θα εξορυχθούν καθώς και των στύλων υποστήριξης που εγκαταλείπονται στο κοίτασμα. Σε επόμενο στάδιο, κατασκευάστηκε μοντέλο στο οποίο δόθηκαν συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής, κλπ.) του πετρώματος. Σύμφωνα με τη θέση και τη γεωμετρία της επαφής που δημιουργήθηκε νωρίτερα, το μοντέλο χαρακτηρίστηκε σε περιοχές ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου, έχοντας την αντίστοιχη πυκνότητα και τις αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες. Τέλος, η προσομοίωση της εξόρυξης πραγματοποιήθηκε αφότου τέθηκαν στο μοντέλο οι συνοριακές συνθήκες και η επιλογή του κριτηρίου Mohr – Coulomb ως κριτήριο αστοχίας.

Κατόπιν, μελετήθηκε η συμπεριφορά του πετρώματος με το πέρας της εξόρυξης και ειδικότερα η κατακόρυφη μετατόπιση που παρατηρήθηκε σε δεδομένα σημεία των τεσσάρων στύλων υποστήριξης. Συμπερασματικά, το μοντέλο της προσομοίωσης κατέδειξε ότι το σύστημα των υπογείων παραμένει ευσταθές μέχρι το πέρας της εκμετάλλευσης.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	9
1.1 Μάρμαρο	9
1.2 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής.....	11
1.3 Η Μάζα της Ροδόπης.....	12
1.4 Λατομείο της περιοχής μελέτης	16
1.4.1 Υπαίθρια Εκμετάλλευση.....	16
1.4.2 Υπόγεια Εκμετάλλευση.....	21
Κεφάλαιο 2 : Σχεδιασμός υπόγειας εκμετάλλευσης.....	23
2.1 Πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις	23
2.2 Γεωλογικοί χάρτες περιοχής	28
2.3 Δεδομένα πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων.....	31
2.4 Σχεδιασμός επιφάνειας επαφής μεταξύ ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου.....	32
2.5 Επιλογή διαστάσεων στύλων και ογκομαρμάρων	36
Κεφάλαιο 3 : Εισαγωγή στο πρόγραμμα FLAC 3D™	40
3.1 Πρόγραμμα μοντελοποίησης FLAC 3D™	40
3.2 Εισαγωγή της επιφάνειας επαφής μεταξύ ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου στο μοντέλο	42
3.3 Επίλυση του προβλήματος.....	45
3.3.1 Εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος.....	45
3.3.2 Συνοριακές συνθήκες.....	49
3.4 Επίλυση του προβλήματος.....	50
3.5 Αποτελέσματα επίλυσης του προβλήματος.....	58
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	66
4.1 Συμπεράσματα	66
4.2 Προτάσεις.....	67

Κατάλογος Σχημάτων και Πινάκων

Σχήμα 1. 1: Υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου (Foshan Imark Building Materials Co., Ltd).	9
Σχήμα 1. 2: Σχήμα με τις Ελληνικές γεωτεκτονικές ζώνες. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιροδοπική μάζα, (Pe : Υποζώνη Παιονίας , Pa: Υποζώνη Πάικου, Al: Υποζώνη Αλμωπίας)= Ζώνη Αξιού, Pl: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόρου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παζών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα <<Πλακώδεις ασβεστόλιθοι –Ταλέα όρη>> πιθανόν της Ιονίου ζώνης. (Μουντράκης,2010). ...	11
Σχήμα 1. 3: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Φαλακρού Όρους. (Χατζηπαναγής και Βουγιούκας, I.G.M.E. 2004).	12
Σχήμα 1. 4: Η ενότητα των μαρμάρων (Χατζηπαναγής,1991).	14
Σχήμα 1. 5: Λιθοστρωματογραφική στήλη της περιοχής μελέτης στην οποία φαίνεται η θέση των ποιοτικών και εμπορικών τύπων μαρμάρου (Βουγιούκας Δ. και Χατζηπαναγής Ι., 2009)	15
Σχήμα 1. 6: Φωτογραφία του Λατομείου στην περιοχή της-Βόρειας-Ελλάδας.	16
Σχήμα 1. 7: Αλυσοπρίονο διάνοιξης στοών τύπου Fantini.	17
Σχήμα 1. 8: Υπόγειες εξορυκτικές εργασίες με την χρήση σύγχρονου εξοπλισμού (αλυσοπρίονου), FHL Κυριακίδης ABEE	18
Σχήμα 1. 9: Διαδοχικές φάσεις κοπής μαρμάρου σε μέτωπα στοάς με αλυσοπρίονο.	19
Σχήμα 1. 10: Φωτογραφία από την έναρξη εξόρυξης στοάς στον κάτω υπόγειο θάλαμο σε υψόμετρο 1158m (Βόλακας, ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.).	20
Σχήμα 1. 11: Φωτογραφία από το λατομείο όπου διακρίνεται και η υπαίθρια και η υπόγεια εκμετάλλευση.	21
Σχήμα 1. 12: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων (πηγή: Atlas Corco)....	22
Σχήμα 2. 1: Τοπογραφικό της περιοχής μελέτης.	23
Σχήμα 2. 2: Απεικόνιση των γεωτρήσεων με τα ονόματα τους στο τοπογραφικό του λατομείου. .	24
Σχήμα 2. 3: Επιφάνεια εργασίας AutoCAD™ κατά την εισαγωγή των σημείων των γεωτρήσεων στο τοπογραφικό.	25
Σχήμα 2. 4: Απεικόνιση των γεωτρήσεων κοντά στο μέτωπο της εξόρυξης.	26
Σχήμα 2. 5: Παράδειγμα οριζόντιας γεώτρησης.	26
Πίνακας 1: Υπόμνημα γεώτρησης G 20.	26
Σχήμα 2. 6: Όψη της κατακόρυφης γεώτρησης G 30.	27
Πίνακας 2: Υπόμνημα γεώτρησης G 30.	27
Σχήμα 2. 7: Γεωλογικός χάρτης του λατομείου με την αντίστοιχη κλίμακα.....	29
Πίνακας 3:Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη.	29
Σχήμα 2. 8: Γεωλογική τομή στην περιοχή μελέτης υπό κλίμακα.	30
Πίνακας 4: Υπόμνημα γεωλογικής τομής.....	30
Σχήμα 2. 9: Αποψη των γεωτρήσεων στο τοπογραφικό του λατομείου.	30
Σχήμα 2. 10: Κάτοψη στην οποία φαίνεται ο σχηματισμός της επιφάνειας σε σχέση με τη γεωλογία της περιοχής.....	32
Σχήμα 2. 11: Αποψη επιφάνειας με τη μορφή mesh.....	34

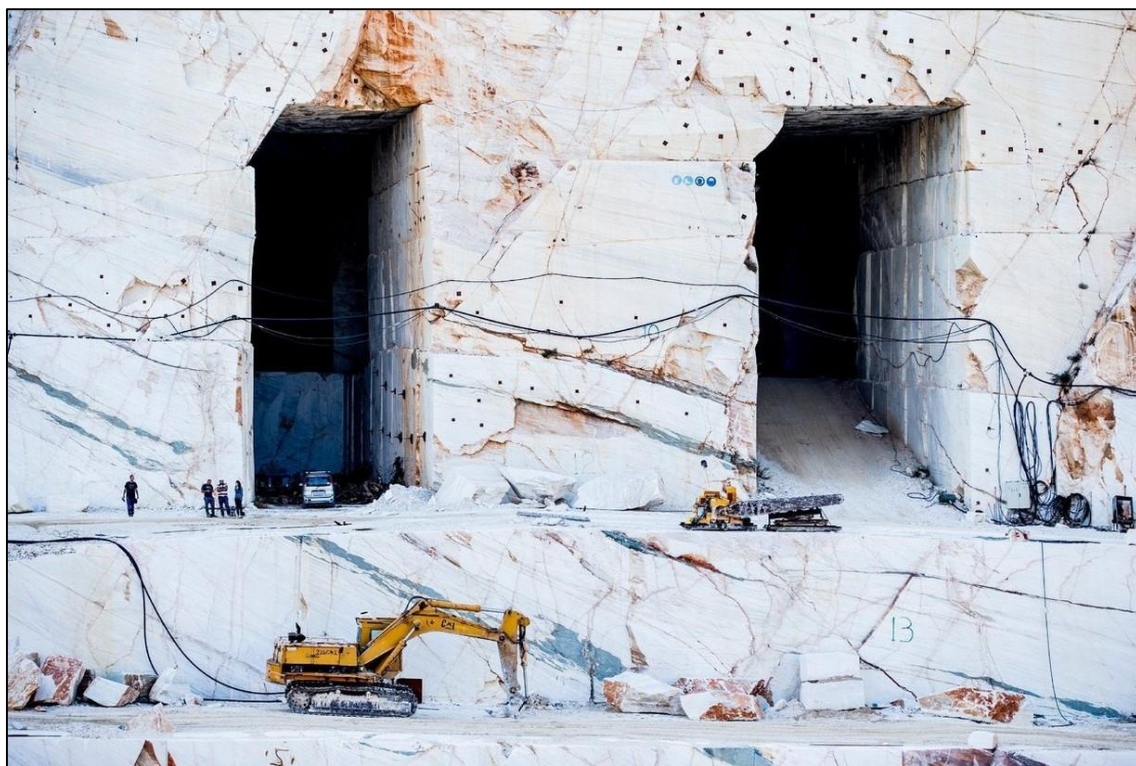
Σχήμα 2. 12: Πλάγια όψη της επιφάνειας επιφάνειας στην περιοχή μελέτης.....	34
Σχήμα 2. 13: Άποψη της επιφάνειας με τη μορφή polyface mesh στην επιφάνεια εργασίας του FLAC3D.....	35
Σχήμα 2. 14: Σχηματική παράσταση τυπικού δικτύου θαλάμων και στύλων(Mine Design, Queen's University).....	36
Σχήμα 2. 15: Κάτοψη όπου με τα διάφορα χρώματα αντιστοιχούν σε μια περίοδο εξόρυξης ξεκινώντας από τα δεξιά.....	37
Σχήμα 2. 16: Άποψη της εκμετάλλευσης στο υψόμετρο + 888 m όπου φαίνονται οι τέσσερις περίοδοι εξόρυξης.....	38
Σχήμα 2. 17: Άποψη των στύλων ύψους 24 m στην τελική φάση της εκμετάλλευσης.....	38
Σχήμα 2. 18: Κάτοψη όπου φαίνονται οι στύλοι στην τελική φάση της εκμετάλλευσης.....	39
Σχήμα 3. 1: Διάγραμμα ροής της ακολουθίας υπολογισμών που εκτελούνται στο FLAC 3D™....	40
Σχήμα 3. 2: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών.....	41
Σχήμα 3. 3: Άποψη του μοντέλου μετά την εισαγωγή της επιφάνειας.....	43
Σχήμα 3. 4: Χρωματική διαφοροποίηση της πυκνότητας στο μοντέλο.....	44
Πίνακας 5: Ιδιότητες του δολομιτικού μαρμάρου.....	46
Πίνακας 6: Ιδιότητες του ασβεστιτικού μαρμάρου.....	46
Σχήμα 3. 5: Κριτήριο αντοχής του δολομιτικού μαρμάρου για GSI=88.....	47
Σχήμα 3. 6: Κριτήριο αντοχής του ασβεστιτικού μαρμάρου για GSI=78.....	48
Πίνακας 7: Σημεία που ορίστηκαν οι συνθήκες κύλισης.....	49
Σχήμα 3. 7: Πλάγια όψη του μοντέλου στην αρχική φάση της εκμετάλλευσης σε υψόμετρο + 888 m, όπου το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στο δολομιτικό μάρμαρο και το κίτρινο σε ασβεστιτικό.....	50
Σχήμα 3. 8: Άποψη του λατομείου όπου με πράσινο χρώμα φαίνονται οι στύλοι ύψους 6 m στην πρώτη φάση.....	51
Σχήμα 3. 9: Σχέδιο του πρώτου σταδίου της εκμετάλλευσης στο AutoCAD.....	52
Σχήμα 3. 10: Άποψη του λατομείου κατά το μέτωπο της εξόρυξης μετά το πέρας του δεύτερου σταδίου της εκμετάλλευσης.....	53
Σχήμα 3. 11: Απεικόνιση της δεύτερης φάσης της εξόρυξης με οροφή τα +882 m.....	53
Σχήμα 3. 12: Στάδια εξόρυξης μαρμάρου που εξορύσσονται κατά το τρίτο στάδιο της εκμετάλλευσης.....	54
Σχήμα 3. 13: Άποψη του λατομείου στην τρίτη φάση του σταδίου εκμετάλλευσης σε υψόμετρο + 870 m.....	55
Σχήμα 3. 14: Άποψη του λατομείου στο τελικό στάδιο της εκμετάλλευσης, όπου οι στύλοι έχουν ύψος 24 m.....	56
Σχήμα 3. 15: Απεικόνιση του σχεδιασμού του τέταρτου ορόφου εξόρυξης.....	57
Σχήμα 3. 16: Άποψη των στύλων με το πέρας της εξόρυξης.....	57
Σχήμα 3. 17: Άποψη του μοντέλου με χρωματική κλίμακα που αντιστοιχεί στο μέγεθος της κατακόρυφης μετατόπισης μετά την εξόφληση του 4 ^{ου} ορόφου (οι μετατοπίσεις σε m).....	58
Σχήμα 3. 18: Άποψη των στύλων στην τελική φάση με τον πρώτο να βρίσκεται στα αριστερά και τον τέταρτο στα δεξιά.....	59

Πίνακας 8: Συντεταγμένες σημείων των τεσσάρων στύλων υποστήριξης.	59
Σχήμα 3. 19: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα χρονικά βήματα για σημείο του πρώτου στύλου μέχρι την εξόφληση του 4 ^{ου} ορόφους στο 59807 ^ο χρονικό βήμα επίλυσης.	60
Σχήμα 3. 20: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα βήματα επίλυσης για το σημείο του δεύτερου στύλου.	61
Σχήμα 3. 21: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα βήματα επίλυσης για σημείο του τρίτου στύλου.	62
Σχήμα 3. 22: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα βήματα επίλυσης για σημείο του τέταρτου στύλου.	63
Σχήμα 3. 23: Διάγραμμα όπου φαίνονται οι μετατοπίσεις και στα σημεία των τεσσάρων στύλων σε σχέση με τα βήματα της επίλυσης.	64
Σχήμα 3. 24: Κατακόρυφη τομή του μοντέλου όπου φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις (κατά τον z άξονα σε μέτρα).	65
Σχήμα Α. 1: Η επιφάνεια επαφής σε μορφή τύπου mesh.	70

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Μάρμαρο

Το μάρμαρο (marble) είναι πέτρωμα περιοχικής μεταμόρφωσης ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων (ασβεστόλιθων, δολομιτών). Αποτελείται αποκλειστικά από ανθρακικά ορυκτά (ασβεστίτη, δολομίτη). Σε μικρές αναλογίες περιέχει προσμίξεις πυριτικών ή αργιλικών ορυκτών όπως χαλαζία, μαρμαρυγία, χλωρίτη, σερπεντίνη, κ.ά.. Είναι γνωστό σαν διακοσμητικό πέτρωμα και χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα για την κατασκευή διαφόρων μνημείων (Παρθενώνας) και καλλιτεχνικών έργων όπως αγαλμάτων. Επιλέγεται σαν πρώτη ύλη για την εξυπηρέτηση αρχιτεκτονικών σκοπών αλλά και κατασκευαστικών χάρη στις ιδιότητες του. Από τις διασημότερες παραγωγές μαρμάρου στον κόσμο, είναι αυτές της Ελλάδας και της Ιταλίας. Στον ελλαδικό χώρο υπάρχει μεγάλη ποικιλία μαρμάρου διαφορετικού χρώματος και τύπου από λευκά άριστης ποιότητας ως μαύρα και πράσινα, παγκόσμιας φήμης. Η εκμετάλλευσή τους πραγματοποιείται είτε υπαίθρια είτε υπόγεια (σχήμα 1.1), με την υπόγεια εκμετάλλευση να εξελίσσεται διαρκώς τα τελευταία χρόνια. Σήμερα, στο λατομείο της περιοχής μελέτης γίνεται συνδυασμός των δυο προηγούμενων εκμεταλλεύσεων με σύγχρονες μεθόδους.



Σχήμα 1. 1: Υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου (Foshan Imark Building Materials Co., Ltd).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που προσδίδουν στα μάρμαρα την αντίστοιχη εμπορική τους αξία είναι :

- Η χρωματική και αισθητική τους εμφάνιση
- Ο ιστός τους
- Η παρουσία ή μη φλεβιδίων, καθώς και η διάταξη και το χρώμα αυτών
- Η παρουσία εγκλεισμάτων, η εμφάνιση και η συχνότητα των λεγόμενων «λεκέδων»
- Οι φυσικές, χημικές, μηχανικές και τεχνικές τους ιδιότητες (Εξαδάκτυλος, 2007).

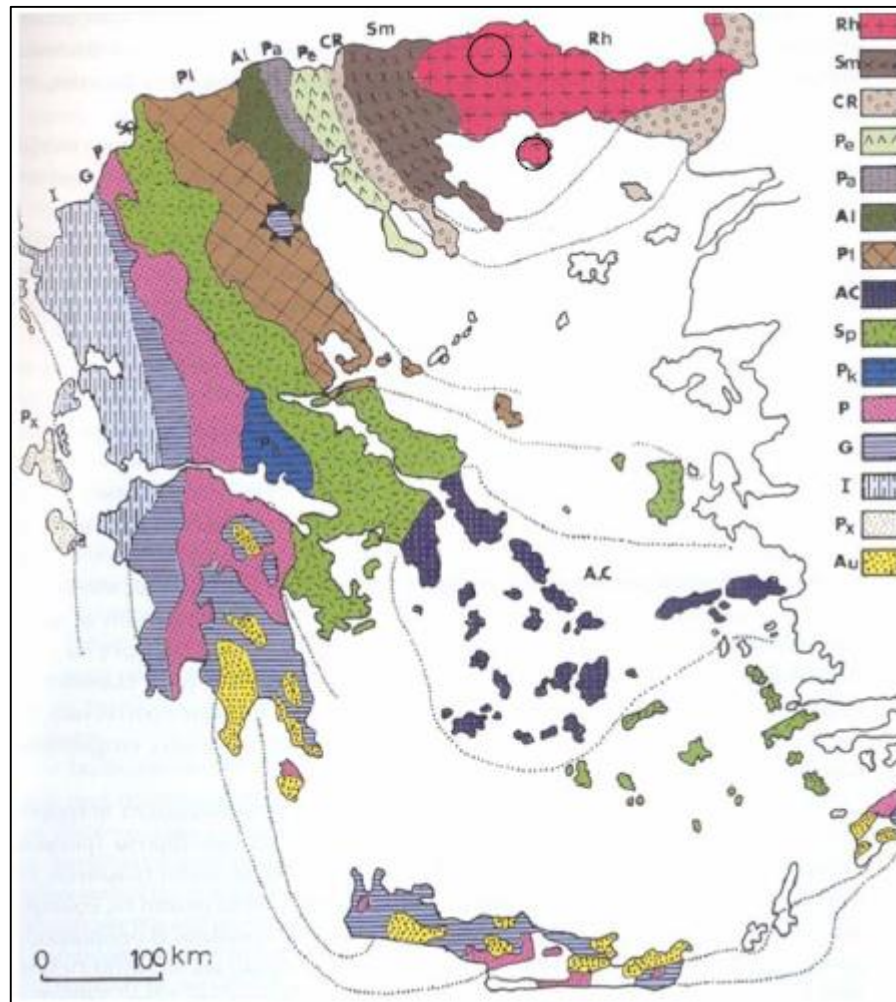
Βασική αιτία αύξησης της εμπορικής αξίας του μαρμάρου, αποτελεί το χρώμα του επειδή χρησιμοποιείται ως δομικός και αισθητικός λίθος. Το χρώμα του, επηρεάζεται από την παρουσία ορυκτών, και όταν αυτά αποτελούνται από καθαρό ασβεστίτη ή δολομίτη τότε του αποδίδουν λευκό χρώμα. Έκτος από τα κύρια ορυκτά που εμφανίζονται στη σύσταση ενός μαρμάρου, πολλές φορές υπάρχουν και προσμίξεις διάφορων ξένων ουσιών, οι οποίες αποδίδουν χρωματικές αποχρώσεις στο μάρμαρο. Οι προσμίξεις αυτές, είναι πιθανόν να αποτυπώνονται στο μάρμαρο είτε με ομοιόμορφη μορφή είτε με τη μορφή ζωνών σε διάφορους χρωματισμούς. Οι ερυθρωπές ταινίες που παρουσιάζονται σε ορισμένους εμπορικούς τύπους της περιοχής μελέτης, οφείλουν τον χρωματισμό τους στην παρουσία οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου τα οποία εμποτίζουν το υπερλεπτόκοκκο (μυλωνίτης) δολομιτικό υλικό (Χατζηπαναγής & Βουγιούκας, 2004).

Η χημική – ορυκτολογική σύσταση των μαρμάρων, διαμορφώνει τις φυσικοχημικές ιδιότητες που έχουν καθώς και την αισθητική και το χρώμα τους. Η παρουσία μεταλλικών ορυκτών, είτε με τη μορφή ταινιών είτε κατά τόπους μέσα στο πέτρωμα διαφοροποιεί την εμπορική αξία του μαρμάρου.

Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων, παίζουν βασικό ρόλο στην επιλογή του τρόπου εκμετάλλευσής τους, αλλά και στην μεταποίηση τους όταν αυτά εξορυχθούν. Ο συντελεστής απορροφητικότητας στα ασβεστίτικα μάρμαρα είναι ~0,08wt%, ενώ στα δολομιτικά μάρμαρα κυμαίνεται μεταξύ 0,14 - 0,24. Η αντοχή στη θλίψη για μεν τα ασβεστίτικα μάρμαρα είναι 50-90N/mm² για δε τα δολομιτικά 100-174 N/mm². Η αντοχή στην κάμψη, η αντοχή στη φθορά από τριβή και η αντοχή στην πρόσκρουση είναι σχεδόν ίδιες τόσο για τα δολομιτικά όσο και για τα ασβεστίτικα μάρμαρα (Βουγιούκας κ. α., 2001 β).

1.2 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής

Το λατομείο μαρμάρου στο οποίο πραγματοποιείται η μελέτη βρίσκεται στην Αν. Μακεδονία και το κοίτασμα ανήκει στην γεωτεκτονική ζώνη της Μάζας της Ροδόπης των Ελληνίδων Οροσειρών (Δηλγεράκη, 2014). Το σχήμα 1.2, δείχνει τις ελληνικές γεωτεκτονικές ζώνες.

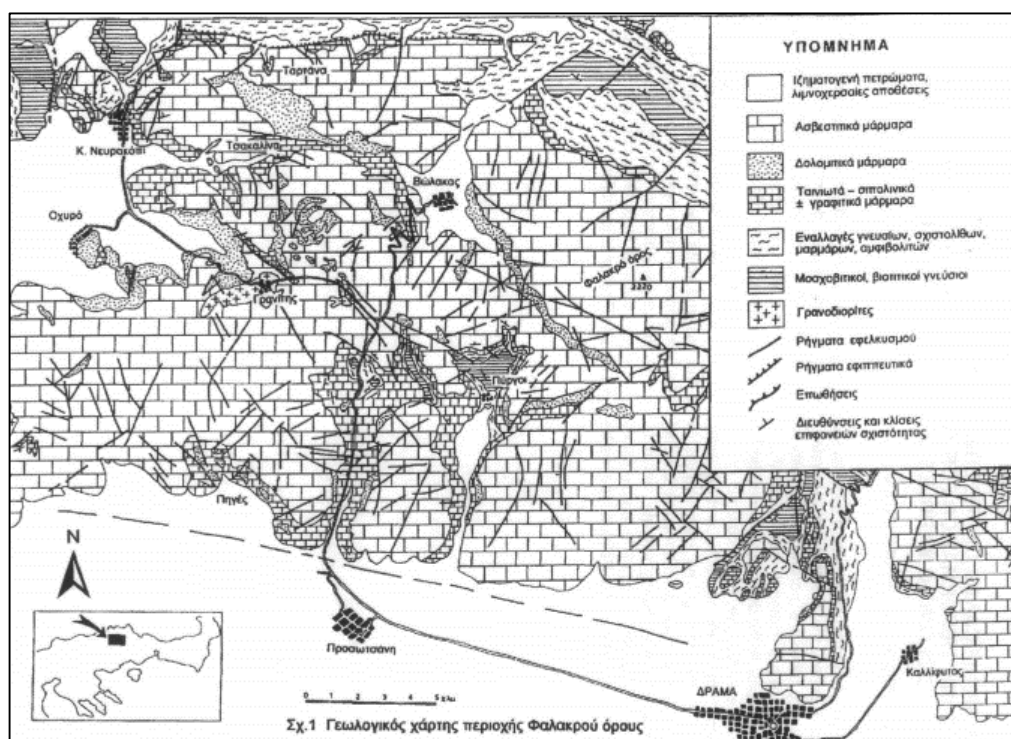


Σχήμα 1. 2: Σχήμα με τις Ελληνικές γεωτεκτονικές ζώνες. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιτροπική μάζα, (Pe : Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου, Al: Υποζώνη Αλμωπίας)= Ζώνη Αξιού, Pl: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόρου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα <<Πλακώδεις ασβεστόλιθοι –Ταλέα όρη>> πιθανόν της Ιονίου ζώνης. (Μουντράκης, 2010).

1.3 Η Μάζα της Ροδόπης

Τα νεότερα μοντέλα των λιθοσφαιρικών πλακών για την εξέλιξη της Μεσογείου, αποδίδουν στη μάζα της Ροδόπης ηπειρωτικό γεωτεκτονικό χαρακτήρα, και υποστηρίζεται ότι η προέλευση της μάζας προέρχεται είτε από την πλάκα της Ευρασίας είτε από τα Κιμμερικά ηπειρωτικά τεμάχια που αποσπάστηκαν από την Gondwana, κινήθηκαν Βορειοανατολικά και ενσωματώθηκαν στην Ευρασία (Μουντράκης,2010).

Τα πετρώματα που συνιστούν τη μάζα είναι κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή ηλικίας Προκάμβριος έως κάτω Παλαιοζωϊκή σύμφωνα με τον Osswald (1938). Η περιοχή του Φαλακρού υπάγεται στην κατώτερη τεκτονική ενότητα της Ροδόπης, την ενότητα Παγγαίου, η οποία συγκροτείται από έναν κατώτερο ορίζοντα με ορθογνεύσιους, σχιστόλιθο και αμφιβολίτες, ένα μεσαίο ορίζοντα μαρμάρων μεγάλου πάχους και έναν ανώτερο ορίζοντα με εναλλαγές σχιστολίθων και μαρμάρων. Κατά κύριο λόγο η ενότητα Παγγαίου αποτελείται από μάρμαρα και στην ουσία είναι ένας μεταμορφικός πυρήνας (metamorphic core complex) που η εκταφή του έλαβε χώρα κατά το Μειόκαινο (Μουντράκης,2010).



Σχήμα 1. 3: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Φαλακρού Όρους. (Χατζηπαναγής και Βουγιούκας, Ι.Γ.Μ.Ε. 2004).

Πιο συγκεκριμένα, το Φαλακρό όρος δομείται από μεταμορφωμένα πετρώματα τα οποία χωρίζονται στις εξής λιθολογικές ενότητες την ενότητα γνευσίων, την ενότητα γνευσίων – σχιστολίθων – μαρμάρων και την ενότητα μαρμάρων (Χατζηπαναγής, 1990, Μουντράκης, 2010). Οι παραπάνω ερευνητές υποστηρίζουν ότι η ενότητα των μαρμάρων διακρίνεται σε ταινιωτά – σιπολονικά, σε δολομιτικά μάρμαρα και σε ασβεστιτικά μάρμαρα.

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες λιθολογικές ενότητες (Βουγιούκας και Χατζηπαναγής, 2009):

- Ενότητα γνευσίων
- Ενότητα λιθολογικών εναλλαγών
- Ενότητα μαρμάρων

I. Ενότητα Γνευσίων

Οι γνεύσιοι, αποτελούν τον κατώτερο σχηματισμό των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Δυτικής Ροδόπης (Osswald, 1938) . Οι περισσότεροι από αυτούς αντιστοιχούν σε ορθογνεύσιους παλαιοζωικής ηλικίας.

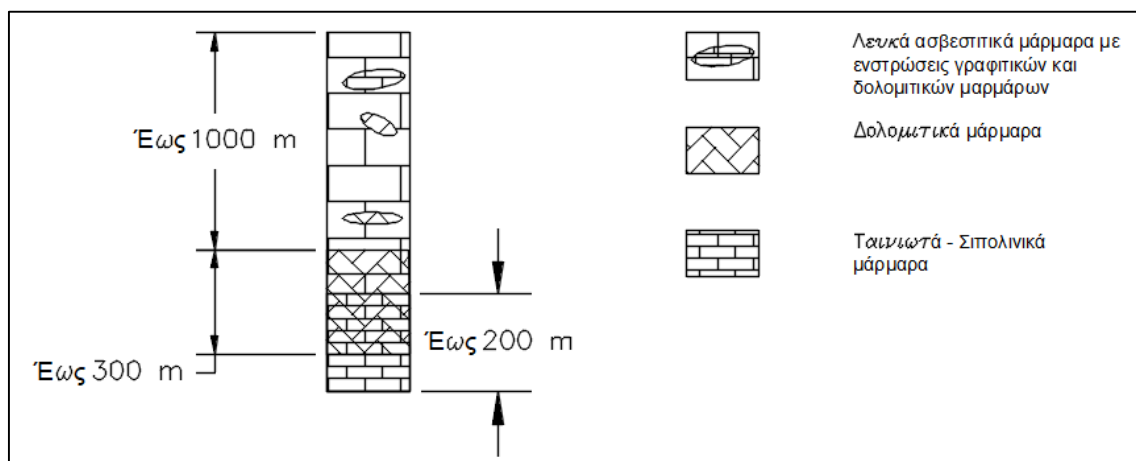
II. Ενότητα λιθολογικών εναλλαγών

Η ενότητα των λιθολογικών εναλλαγών στρωματογραφικά, είναι υπερκείμενη της ενότητας των γνευσίων. Οι εναλλαγές που εμφανίζονται, είναι στη βάση γνεύσιοι και σχιστόλιθοι, ιζηματογενούς προέλευσης, και στα ανώτερα τμήματα παρεμβολές πάγκων ή φακών ανθρακικών πετρωμάτων (Δηλγεράκη, 2014).

III. Ενότητα μαρμάρων

Η ενότητα των μαρμάρων, με την αντίστοιχη σχηματική τους απεικόνιση στην εικόνα του σχήματος 1.4, αντιστοιχεί στην ανώτερη λιθολογική ενότητα της αλπικής ροδοπικής, και καλύπτει 650 km² της επιφανειακής έκτασης του Φαλακρού όρους (Δηλγεράκη, 2014). Σύμφωνα με τη χημική σύσταση, χωρίζονται σε τρεις σειρές, με σειρά από κάτω προς τα πάνω να είναι (Χατζηπαναγής, 1991) :

- Σειρά των ταινιωτών – σιπολινικών μαρμάρων
- Σειρά των δολομιτικών μαρμάρων
- Σειρά των λευκών ασβεστιτικών μαρμάρων (τύπου Φαλακρού όρους).



Σχήμα 1. 4: Η ενότητα των μαρμάρων (Χατζηπαναγής, 1991).

Σειρά των ταινιωτών – σιπολινικών μαρμάρων

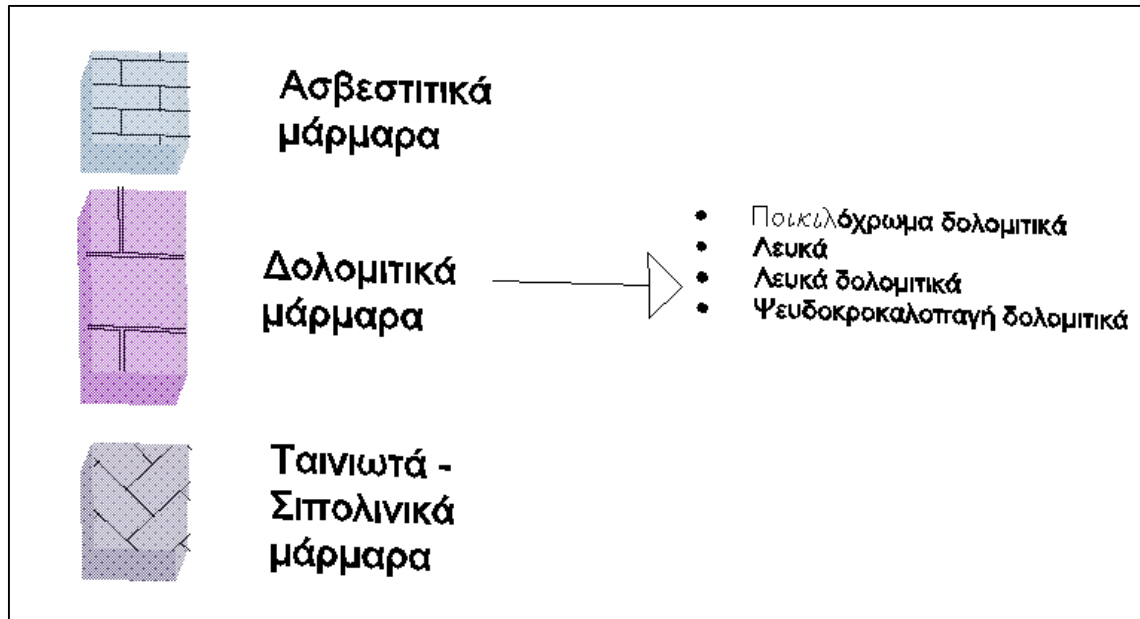
Η σειρά των ταινιωτών – σιπολινικών μαρμάρων, αποτελείται από ασβεστίτικά μάρμαρα. Η ορυκτολογική τους σύσταση, χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά ασβεστίτη (90 – 92 %) και μικρότερα ποσοστά χαλαζία (4 - 5%), δολομίτη (2 - 3%) και γραφίτη (1 - 2%). Ακόμα εμφανίζονται επουσιώδη ορυκτά, όπως είναι ο μοσχοβίτης, ο φλογοπίτης, ο απατίτης, ο χλωρίτης, οι άστριοι, το επίδοτο και διάφορα μεταλλικά ορυκτά. Η επιφανειακή έκταση που καλύπτουν υπολογίζεται γύρω στα 100 km², και το μέγιστο πάχος τους περίπου 200 m. Κατά τόπους στους λιθοστρωματογραφικούς ορίζοντες της σειράς, γίνεται διακριτή η ύπαρξη σωμάτων δολομιτικού μαρμάρου (Δηλγεράκη, 2014).

Σειρά των δολομιτικών μαρμάρων

Τα δολομιτικά μάρμαρα εμφανίζονται ανάμεσα σε αυτά των ταινιωτών – σιπολινικών μαρμάρων και των λευκών ασβεστίτικων μαρμάρων του όρους Φαλακρού. Η ανάπτυξη τους περιορίζεται στο δυτικό μέρος του όρους Φαλακρού, με τη μορφή φακών και μέγιστο πάχος 300 m. Το χρώμα τους είναι λευκό και η ορυκτολογική τους σύσταση αποτελείται κυρίως από δολομίτη σε ποσοστό 92 – 99 %. Το υπόλοιπο ποσοστό της σύστασης τους, συμπληρώνεται από διάσπαρτους κόκκους ασβεστίτη (1 - 8%) στη δομή των κρυστάλλων του δολομίτη. Έχουν καθορισμένο λιθοστρωματογραφικό σχηματισμό με σταθερή λιθοστρωματογραφική θέση και σταθερή χημική και ορυκτολογική σύσταση. Τα χαρακτηριστικά των δολομιτικών μαρμάρων της περιοχής του Φαλακρού όρους, δηλαδή το λευκό χρώμα τους, η ορυκτολογική ομοιογένεια τους, η απουσία οξειδίων του σιδήρου και η δυνατότητα επεξεργασίας τους, τα καθιστούν αξιόλογα για λατομικές εκμεταλλεύσεις (Δηλγεράκη, 2014).

Σειρά των λευκών ασβεστιτικών μαρμάρων (τύπου Φαλακρού όρους)

Τα μάρμαρα της ασβεστιτικής σειράς, καλύπτουν πάνω από 500 km² της περιοχής του Φαλακρού. Αποτελούν τη νεότερη σειρά των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της περιοχής και εξαιτίας των επωθήσεων και των επιπτεύσεων που πραγματώθηκαν κατά την τεκτονική και μεταμορφική εξέλιξη της περιοχής, το φαινόμενο πάχος τους, της τάξης των 1000 m είναι αυξημένο σε σχέση με το πραγματικό τους πάχος. Πρόκειται για ολοκρυσταλλικά μάρμαρα με γρανοβλαστικό ιστό, χρώματος γκριζόλευκου έως τεφρόφαιου, ανάλογα με την παρουσία γραφίτη. Στη σύστασή τους, περιέχονται και μικρά ποσοστά δολομίτη της τάξης 2 – 3 % (Δηλγεράκη, 2014).



Σχήμα 1. 5: Λιθοστρωματογραφική στήλη της περιοχής μελέτης στην οποία φαίνεται η θέση των ποιοτικών και εμπορικών τύπων μαρμάρου (Βουγιούκας Δ. και Χατζηπαναγής Ι., 2009)

Στο σχήμα 1.5, παρουσιάζεται η λιθοστρωματογραφική στήλη της περιοχής μελέτης, όπου εμφανίζονται οι εμπορικοί τύποι μαρμάρων για τα οποία σχεδιάζεται η εκμετάλλευση. Αναλυτικότερα οι εμπορικές ονομασίες των δολομιτικών μαρμάρων Δράμας είναι οι εξής (Βουγιούκας Δ. και Χατζηπαναγής Ι., 2009):

- Λευκά δολομιτικά,
- Λευκά,
- Ποικιλόχρωμα δολομιτικά,
- Ψευδοκροκαλοπαγή δολομιτικά.

1.4 Λατομείο της περιοχής μελέτης

1.4.1 Υπαίθρια Εκμετάλλευση

Στη μαρμαροφόρο περιοχή διεξάγεται υπαίθρια και υπόγεια εκμετάλλευση. Η υπαίθρια εκμετάλλευση είναι σαφώς οικονομικότερη σε σχέση με την υπόγεια, όμως επιφέρει μεγάλο περιβαλλοντικό κόστος. Για τον σχεδιασμό της λαμβάνονται σοβαρά υπόψη η κλίση του κοιτάσματος, το πάχος των υπερκείμενων στείρων πετρωμάτων και η ομοιομορφία των στρωμάτων μαρμάρου. Όλες οι ενέργειες που εκτελούνται στην εκμετάλλευση, πρέπει να τηρούν τον Κανονισμό Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (Κ. Μ. Λ. Ε.) της ελληνικής νομοθεσίας. Αξίζει να αναφερθεί, η νομοθετική πράξη που ισχύει στην Ελλάδα περί ασφάλειας και υγείας του εργαζομένου, με το νόμο 1568/1985 «Υγιεινή και ασφάλεια των εργαζομένων». Ο στόχος επιβολής τέτοιων νόμων στις εκμεταλλεύσεις, είναι η μείωση των ανθρώπινων ατυχημάτων/δυστυχημάτων, καθώς και η διατήρηση της ασφάλειας κατά την διεξαγωγή των έργων. Μια βασική αρχή σε διεθνές επίπεδο, η οποία πρέπει να ισχύει σε οποιαδήποτε εξορυκτική δραστηριότητα, είναι αυτή που υποστήριξε ο γιατρός Georg Bauer, γνωστός ως Georg Agricola, και είναι η εξής «Πρώτα η Ασφάλεια» (Safety first) (Γαλετάκης, 2014).



Σχήμα 1. 6: Φωτογραφία του Λατομείου στην περιοχή της-Βόρειας-Ελλάδας.

Η επιλογή της μεθόδου που εφαρμόζεται στην περιοχή εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι η τήρηση των κανονισμών του Κ.Μ.Λ.Ε., η σχέση αποκάλυψης, η τοπογραφία, η τεκτονική, οι μηχανικές ιδιότητες του κοιτάσματος και των περιβαλλόντων πετρωμάτων καθώς και περιβαλλοντικοί λόγοι και η εμπορική αξία του μαρμάρου (Εξαδάκτυλος, 2007). Για κάθε εξόρυξη, επιλέγεται η κατάλληλη κλίση των στρωμάτων, σύμφωνα με το πάχος των υπερκείμενων στρώσεων πετρωμάτων και την ομοιομορφία δεδομένου στρώματος μαρμάρου. Οι παραπάνω λόγοι, συντέλεσαν στον συνδυασμό υπαίθριας και υπόγειας εκμετάλλευσης στο λατομείο της περιοχής μελέτης.

Στην υπαίθρια εκμετάλλευση, κάθε βαθμίδα χαρακτηρίζεται από το υψόμετρο της που αντιστοιχεί στο δάπεδο εργασίας της. Απαραίτητη είναι η διάνοιξη κατάλληλων δρόμων, σε κάθε βαθμίδα, έτσι ώστε να μπορούν να εκτελεστούν με ασφάλεια οι εργασίες εξόρυξης, φόρτωσης και μεταφοράς. Ιδιαίτερα σημαντική, είναι η διασφάλιση των καλών συνθηκών στους δρόμους μεταφοράς των βαθμίδων, για να γίνεται με ευχέρεια η μεταφορά των ογκομαρμάρων που εξορύσσονται. Η φωτογραφία του σχήματος 1.6, απεικονίζει την υπαίθρια εκμετάλλευση του λατομείου μαρμάρου.

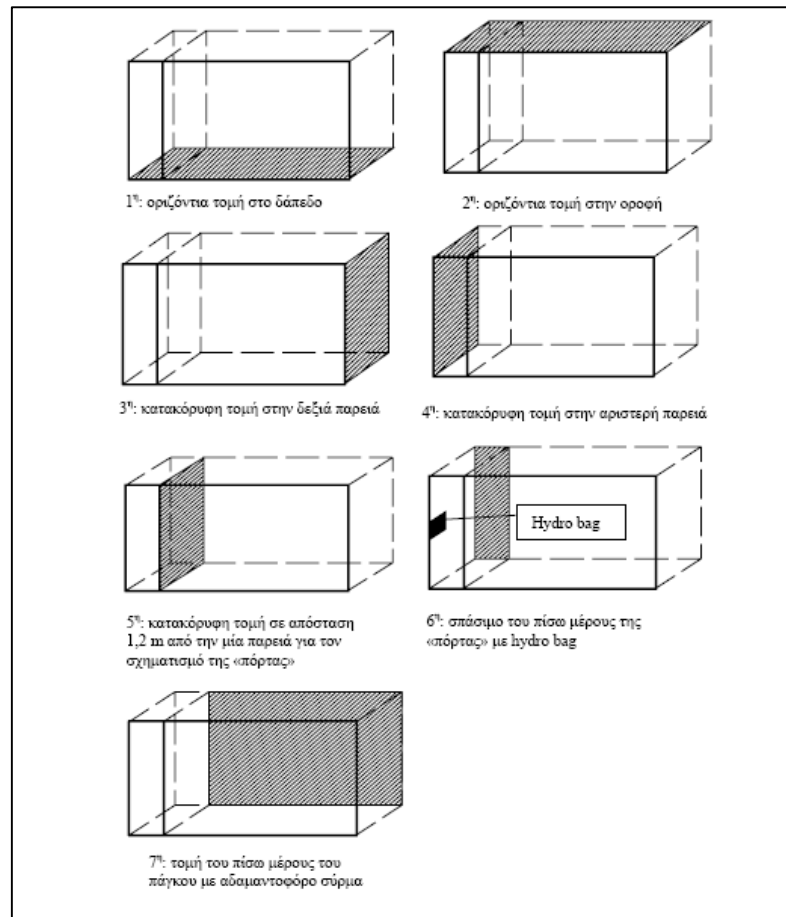


Σχήμα 1. 7: Αλυσοπρίονο διάνοιξης στοών τύπου Fantini.

Η υπόγεια εξόρυξη μαρμάρου στον 1^ο όροφο (ανώτερο) πραγματοποιείται με χρήση του αλυσοπρίονου (σχήμα 1.7) για την αποκοπή των «πάγκων» μεγάλων διαστάσεων από το μητρικό πέτρωμα, οι οποίοι στη συνέχεια τεμαχίζονται σε όγκους εμπορεύσιμων διαστάσεων. Στην εικόνα του σχήματος 1.8, απεικονίζονται οι οριζόντιες και οι κάθετες κοπές που θα πραγματοποιηθούν κατά τις υπόγειες εξορυκτικές διαδικασίες.



Σχήμα 1. 8: Υπόγειες εξορυκτικές εργασίες με την χρήση σύγχρονου εξοπλισμού (αλυσοπρίονου), FHL Κυριακίδης ΑΒΕΕ



Σχήμα 1. 9: Διαδοχικές φάσεις κοπής μαρμάρου σε μέτωπα στοάς με αλυσοπρίονο.

Στο σχήμα 1.9, φαίνονται οι διαδοχικές φάσεις κοπής μαρμάρου με αλυσοπρίονο. Οι δύο πρώτες τομές είναι οριζόντιες, η πρώτη γίνεται στο δάπεδο και η δεύτερη στην οροφή. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται δυο κατακόρυφες τομές, μια στη δεξιά παρειά και μια στην αριστερή. Στο επόμενο στάδιο, πραγματοποιείται κατακόρυφη τομή σε απόσταση 1.2 m από την μία παρειά για τον σχηματισμό της λεγόμενης «πόρτας» και έπειτα με τη χρήση hydro bag αποκολλάτε το πίσω μέρος της «πόρτας». Τέλος, πραγματοποιείται κοπή στο πίσω μέρος του πάγκου χρησιμοποιώντας αδαμαντοφόρο σύρμα.

Σε κατώτερους ορόφους η εξόρυξη των πάγκων γίνεται με ορθά μέτωπα μορφής υπαίθριας βαθμίδας με το αλυσοπρίονο για την οριζόντια κοπή και τις κατακόρυφες με τη συρματοκοπή. Η φωτογραφία του σχήματος 1.10, απεικονίζει την έναρξη της διάνοιξης υπόγειας στοάς με τη χρήση αλυσοπρίονου.



Σχήμα 1. 10: Φωτογραφία από την έναρξη εξόρυξης στοάς στον κάτω υπόγειο θάλαμο σε υψόμετρο 1158m (Βώλακας, ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.)

Στο συγκεκριμένο λατομείο προκειμένου να μην ξεπεραστεί η μέγιστη γωνία πρανούς και να γίνει η μέγιστη δυνατή απόληψη δολομιτικού μαρμάρου, ξεκίνησε ο σχεδιασμός της υπόγειας εξόρυξης. Οι κύριοι λόγοι που οδήγησαν στο πέρας της υπαίθριας εκμετάλλευσης, είναι η εμφάνιση ασβεστιτικού μαρμάρου και η διατήρηση της τιμής της γωνίας πρανούς στην επιτρεπόμενη τιμή, όπως ορίζει ο Κ. Μ. Α. Ε.. Τα όρια της υπαίθριας, σταματούν σε υψόμετρο + 888 m όπου αρχίζει η υπόγεια εκμετάλλευση και η οποία έχει τελικό υψόμετρο τα + 864 m.

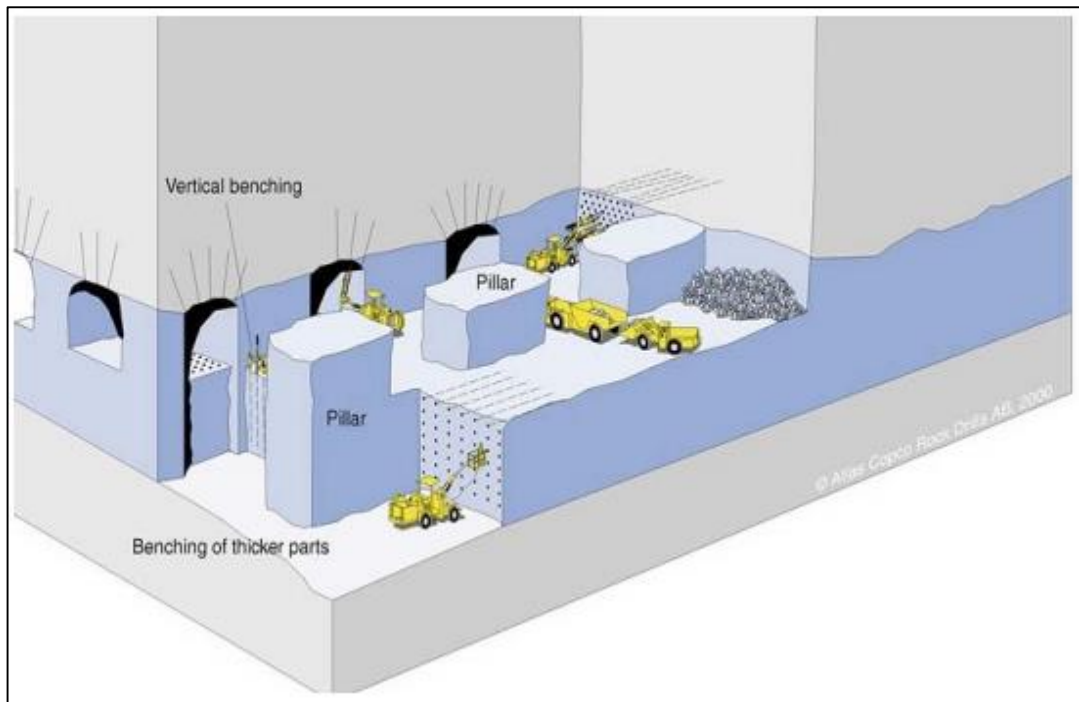
1.4.2 Υπόγεια Εκμετάλλευση

Στη φωτογραφία του σχήματος 1.11, φαίνεται ο συνδυασμός της υπόγειας με την υπαίθρια εκμετάλλευση σε περιοχή της Βόρειας Ελλάδας.



Σχήμα 1. 11: Φωτογραφία από το λατομείο όπου διακρίνεται και η υπαίθρια και η υπόγεια εκμετάλλευση.

Η υπόγεια εκμετάλλευση του μαρμάρου γίνεται με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων (σχήμα 1.12) καθώς το πέτρωμα το επιτρέπει με τις μηχανικές ιδιότητες τις οποίες διαθέτει. Οι θέσεις και οι διαστάσεις των στύλων επιλέγονται βάση των χαρακτηριστικών του κοιτάσματος (ασυνέχειες, ανομοιογένεια, χρώμα κ.ά.). Οι εγκαταλελειμμένοι στύλοι κατανέμονται με συμμετρική διάταξη, έτσι ώστε να είναι ομαλότερη η κατανομή των τάσεων και έτσι να διασφαλίζεται μεγαλύτερη ασφάλεια.



Σχήμα 1. 12: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων (πηγή: Atlas Copco).

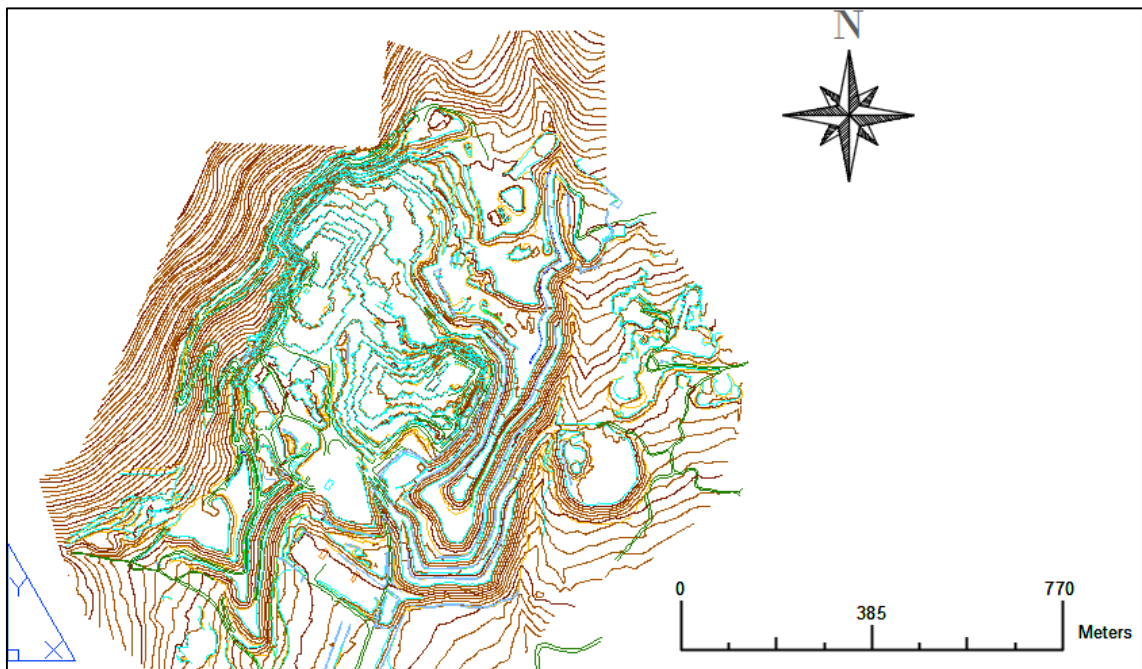
Ο σχεδιασμός της στηρίζεται στη γεωλογική μελέτη της περιοχής, η οποία προκύπτει από την ανάλυση των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων και των υφιστάμενων γεωλογικών δεδομένων της υπαίθριας εκμετάλλευσης. Οι γεωτρήσεις πυρηνοληψίας λογίζονται αρκετά σημαντικές για τον σχεδιασμό της εκμετάλλευσης καθώς μέσω αυτών προσδιορίζονται τα όρια της εκμετάλλευσης αλλά και η πορεία της.

Οι στοές των υπογείων έχουν δάπεδο στα + 882m και από εκεί ξεκινά η εξόρυξη των ογκομαρμάρων. Αρχικά γίνονται όλες οι απαραίτητες εγκοπές ώστε να σχηματισθούν οι θάλαμοι. Οι διαστάσεις των θαλάμων έχουν πλάτος 10 m και ύψος 6 m. Συνεχίζοντας την διάνοιξη κατά μήκος του μετώπου, δημιουργείται ένα δίκτυο θαλάμων και στύλων οι οποίοι έχουν εγκαταλειφθεί σύμφωνα με τις διαστάσεις του σχεδιασμού. Οι στύλοι έχουν πλάτος ίσο με 10 m, με εξαίρεση τον τελευταίο στύλο όπου το πλάτος του αντιστοιχεί σε 20 m. Η επιλογή των διαστάσεων τους γίνεται τόσο με βάση τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος όσο και με τις επί τόπου τάσεις και τις επαγόμενες τάσεις κατά την διάνοιξη των θαλάμων. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι στύλοι μπορεί να μην έχουν τετραγωνική διατομή λόγω των εκάστοτε χαρακτηριστικών του πετρώματος. Γενικότερα, επιλέγονται να εγκαταλειφθούν ως στύλοι περιοχές του πετρώματος που παρουσιάζουν χαμηλή ποιότητα, όπως στην περίπτωση του λατομείου, ογκομάρμαρα που έχουν χαμηλή λευκότητα ή προσμίξεις μετάλλων. Η εξόρυξη εκτελείται σε τέσσερις ορόφους των 6 m ο καθένας με τελικό υψόμετρο εκμετάλλευσης τα + 864 m. Τα ογκομάρμαρα εξορύσσονται είτε με αλυσοπρίονα είτε με αδαμαντοματοφόρες συρματοκοπές.

Κεφάλαιο 2 : Σχεδιασμός υπόγειας εκμετάλλευσης

2.1 Πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις

Όπως είναι γνωστό σε κάθε εντοπισμό ενός κοιτάσματος καθώς και στον σχεδιασμό της εκμετάλλευσής του, οι γεωτρήσεις παίζουν καθοριστικό ρόλο. Η γεωτρητική έρευνα, αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο κατά την κοιτασματολογική μελέτη. Η διάνοιξη τους γίνεται με σκοπό να δοθούν λεπτομέρειες και δεδομένα για την περιοχή ενδιαφέροντος. Έτσι και στην συγκεκριμένη περίπτωση ο σχεδιασμός έχει στηριχθεί σε αυτές. Πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις κατά μήκος των μετώπων της υπαίθριας εκμετάλλευσης άλλες οριζόντιες, άλλες κατακόρυφες και άλλες με δεδομένη κλίση. Σε συνδυασμό με τους γεωλογικούς χάρτες της περιοχής προέκυψαν πληροφορίες για την ανάπτυξη και τη μορφή του κοιτάσματος. Ο συνολικός αριθμός των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων που αξιοποιήθηκαν στην περιοχή είναι 86 και ιδιαίτερη σημασία δόθηκε σε αυτές που έγιναν στην περιοχή της σχεδιαζόμενης υπόγειας εξόρυξης. Ο συνδυασμός των δειγμάτων μαζί με προ υπάρχουσες γεωλογικές τομές οδήγησαν στην καλύτερη κατανόηση της ανάπτυξης του κοιτάσματος.

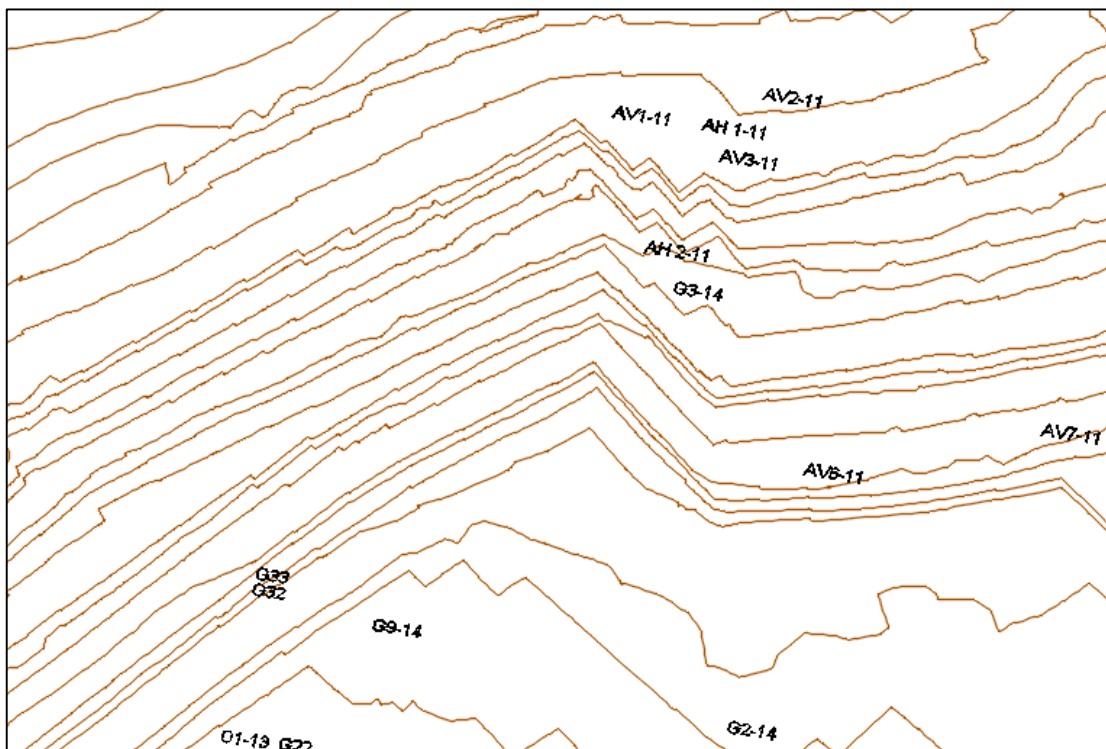


Σχήμα 2. 1: Τοπογραφικό της περιοχής μελέτης.

Η γεωλογία της περιοχής κατά κύριο λόγο αποτελείται από τα ακόλουθα:

- καρστικά έγκοιλα,
- ασβεστίτικά μάρμαρα,
- φαιόλευκος δολομίτης με παρεμβολές πάγκων ασβεστίτικών μαρμάρων,
- λευκός έως γαλακτόχρωμος δολομίτης,
- δολομίτης με κατά θέσεις λεπτές σκουρόχρωμες ταινίες ,
- λευκός δολομίτης με κατά θέσεις νησίδες ή συννεφάκια ασβεστίτικής σύστασης.

Σημαντικό να αναφερθεί, είναι ότι δεν παραλείπονται τα ρήγματα και οι διακλάσεις με λατυποπαγή και σιδηροξείδια από τη γεωλογία της περιοχής, τα οποία αποτυπώνονται σε παλαιότερους γεωλογικούς χάρτες και τα οποία επιβεβαίωσαν οι πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις. Στην εικόνα του σχήματος 2.1, φαίνεται το τοπογραφικό της περιοχής στο οποίο αποτυπώθηκαν έπειτα οι γεωτρήσεις όπως δείχνουν τα σχήματα 2.2 και 2.3.



Σχήμα 2. 2: Απεικόνιση των γεωτρήσεων με τα ονόματά τους στο τοπογραφικό του λατομείου.

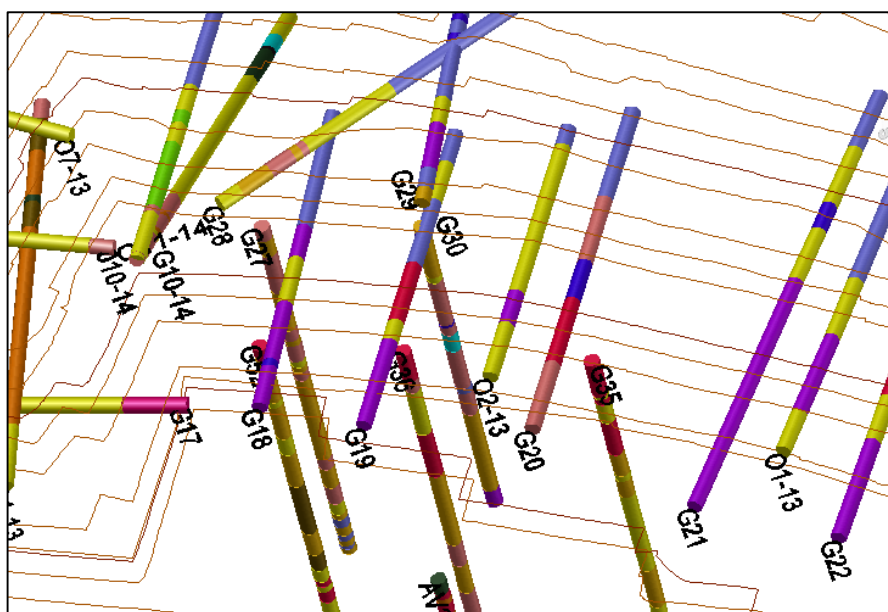
Σήμερα γίνεται χρήση εξειδικευμένων λογισμικών για την άμεση καταγραφή και καταχώρηση των δεδομένων που συλλέγονται από τη γεωτρητική έρευνα. Όσον αφορά, την κοιτασματολογική μελέτη στο λατομείο, τα δεδομένα των γεωτρήσεων δόθηκαν στο πρόγραμμα EXCEL™ και στη συνέχεια σχεδιάστηκαν μέσω του προγράμματος AutoCAD™. Τα στοιχεία που καταγράφονται για την αναγνώριση κάθε γεώτρησης, είναι ο κωδικός τους, οι συντεταγμένες τους (x, y, z), η ημερομηνία εκτέλεσης τους, ο τύπος του γεωτρήσανου και επιπρόσθετα σχόλια όπου επιβάλλεται. Η εικόνα του σχήματος 2.4, δείχνει τις χαρακτηριστικές γεωτρήσεις στο τοπογραφικό της περιοχής.



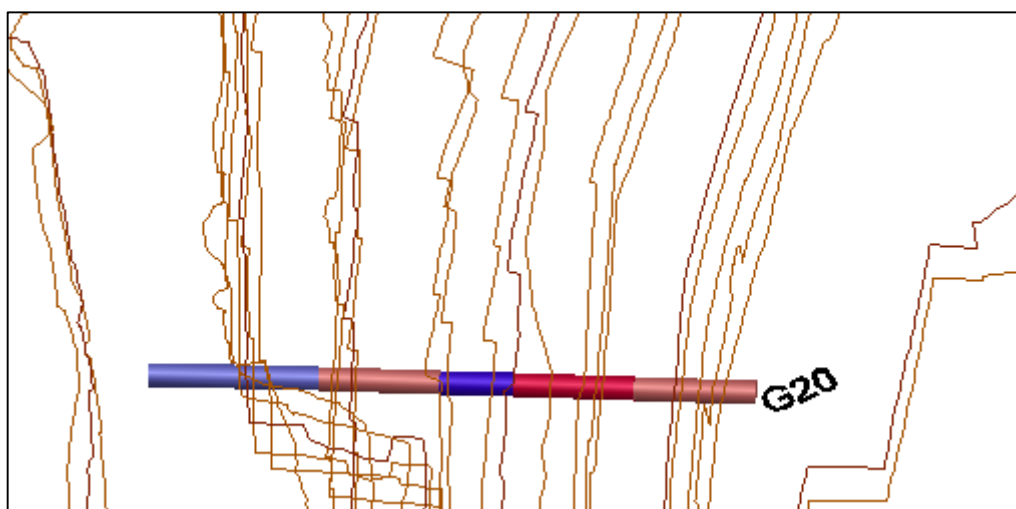
Σχήμα 2. 3: Επιφάνεια εργασίας AutoCAD™ κατά την εισαγωγή των σημείων των γεωτρήσεων στο τοπογραφικό.

Αρχικά, προστέθηκαν στο τοπογραφικό τα σημεία των 86 γεωτρήσεων στις αντίστοιχες συντεταγμένες τους. Εν συνεχεία, κατασκευάστηκαν κύκλοι ίδιας διαμέτρου στους οποίους δόθηκε και η τρίτη διάσταση, η οποία αντιστοιχεί στο βάθος της κάθε γεώτρησης. Κάθε κύκλος αποθηκεύτηκε σε μια συγκεκριμένη γεωλογική ομάδα, η οποία αποτυπώνεται με διαφορετικό χρώμα και όνομα.

Παρατίθενται δυο χαρακτηριστικές γεωτρήσεις, σχήμα 2.5 και 2.6 από αυτές που αποτυπώθηκαν στο τοπογραφικό προκειμένου να γίνει κατανοητή η σχεδίαση τους. Έγινε επιλογή μιας κατακόρυφης και μιας οριζόντιας γεώτρησης. Η απεικόνιση των διάφορων γεωλογιών που εντοπίστηκαν κατά μήκος των γεωτρήσεων αποδόθηκε με τη χρήση χρωματικής κλίμακας, όπως φαίνεται. Μέσω των διαφόρων χρωμάτων για τα αντίστοιχα γεωλογικά δεδομένα, δίνεται η προοπτική στο μηχανικό να αντιληφθεί καλύτερα τη γεωλογία και να έχει μια πιο ρεαλιστική άποψη για την ανάπτυξη του κοιτάσματος.



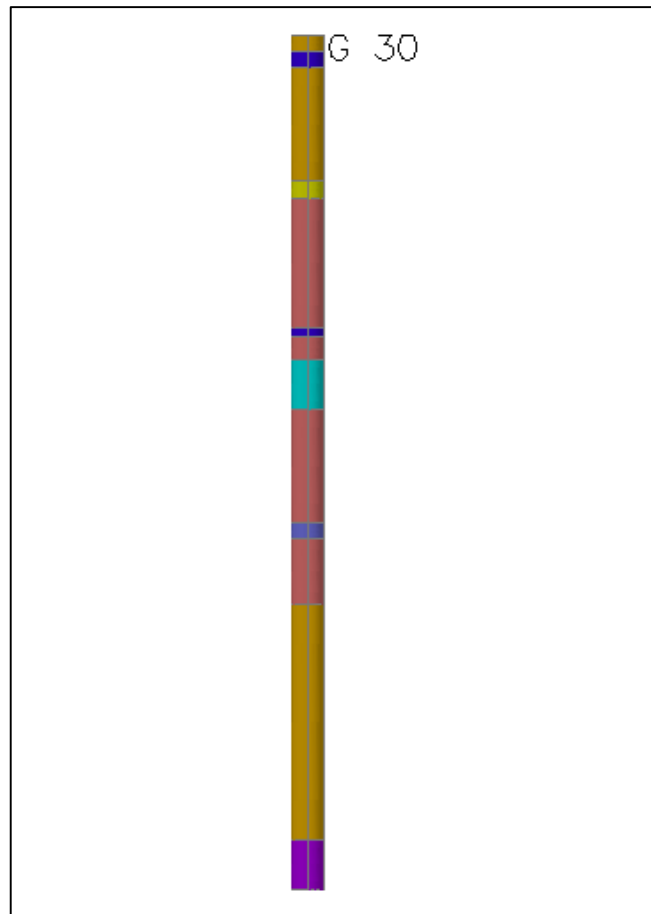
Σχήμα 2. 4: Απεικόνιση των γεωτρήσεων κοντά στο μέτωπο της εξόρυξης.



Σχήμα 2. 5: Παράδειγμα οριζόντιας γεώτρησης.

Πίνακας 1: Υπόμνημα γεώτρησης G 20.

ΓΕΩΤΡΗΣΗ G 20			
Αρχή στήλης (m)	Τέλος στήλης (m)	Γεωλογία και ποσοστό λευκότητας	Χρωματική κλίμακα
0	10	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 70 %	
10	20	ΧΙΟΝΟΛΕΥΚΟ 100%	
20	26	ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟΣ ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ(ΚΑΡΣΤ)	
26	40	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 70%	
40	54	ΓΚΡΙ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟ ΠΕΤΡΩΜΑ	



Σχήμα 2. 6: Όψη της κατακόρυφης γεώτρησης G 30.

Πίνακας 2: Υπόμνημα γεώτρησης G 30.

ΓΕΩΤΡΗΣΗ G 30			
Αρχή στήλης (m)	Τέλος στήλης (m)	Γεωλογία και ποσοστό λευκότητας	Χρωματική κλίμακα
0	1	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 50%	
1	2	ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟΣ ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ(ΚΑΡΣΤ)	
2	9	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 50%	
9	10	ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟΣ ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ (ΜΕ ΟΞΕΙΔΙΑ)	
10	18	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 70%	
18	18.5	ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟΣ ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ(ΚΑΡΣΤ)	
18.5	20	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 70%	
20	23	ΑΛΛΟΙΩΜΕΝΟ ΓΚΡΙ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟ ΜΑΡΜΑΡΟ	
23	30	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 70%	
30	31	ΓΚΡΙ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟ ΜΑΡΜΑΡΟ	
31	35	ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 70%	
35	49.5	ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟΣ ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ (ΜΕ ΟΞΕΙΔΙΑ)	
49.5	52.5	ΧΙΟΝΟΛΕΥΚΟ – ΛΕΥΚΟ ΤΑΙΝΙΩΤΟ 80%	

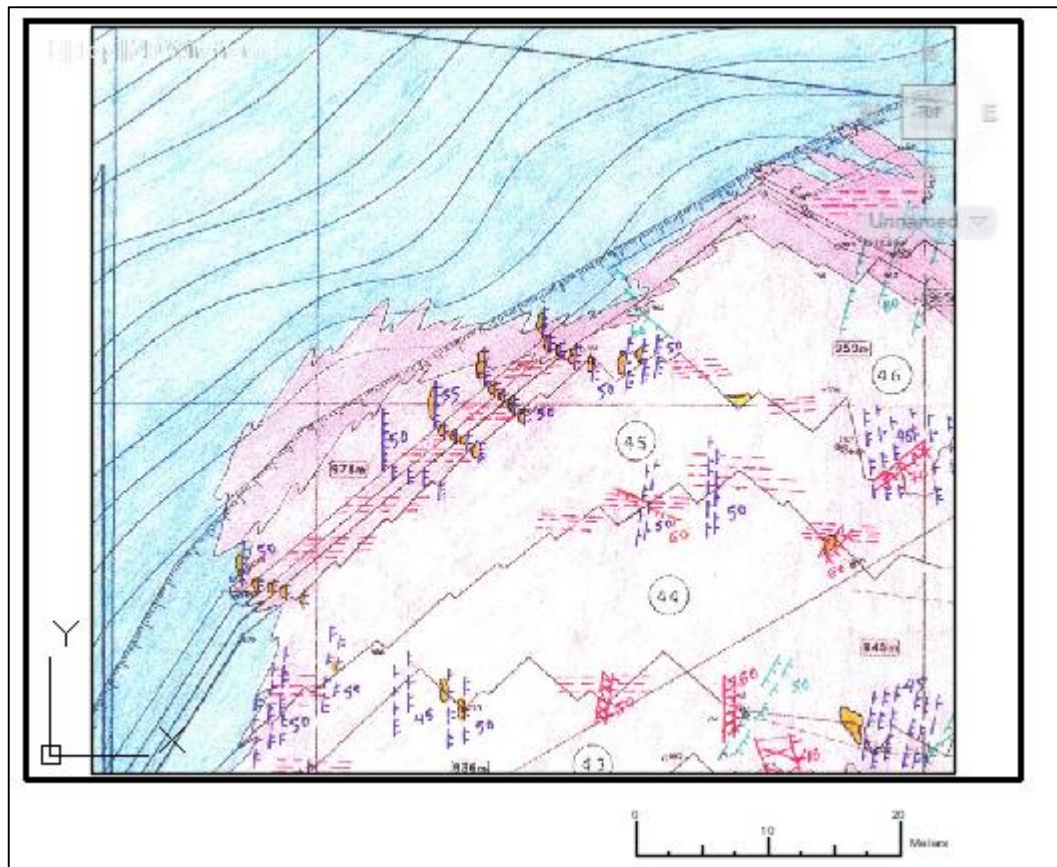
2.2 Γεωλογικοί χάρτες περιοχής

Για την διεξαγωγή της κοιτασματολογικής έρευνας, απαιτούνται χάρτες και τοπογραφικά γεωγραφικά δεδομένα της περιοχής όπου αναπτύσσεται το κοιτάσμα και όπου έχουν γίνει οι ερευνητικές γεωτρήσεις. Τα δεδομένα αυτά, συλλέγονται μέσω των γεωτρήσεων και γίνεται προσδιορισμός πληροφοριών όπως :

- Η γεωλογική δομή της μαρμαροφόρου περιοχής (τεκτονική, στρωματογραφία)
- Η φυσική περιγραφή, το σχήμα και το μέγεθος του κοιτάσματος
- Ποσοτικά στοιχεία σχετικά με την ποιότητα και τα αποθέματα του κοιτάσματος
- Η ορυκτολογική σύσταση, τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος που επηρεάζουν άμεσα τις προτεινόμενες χρήσεις του καθώς και την εμπορική του αξία
- Τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά αγόνων και μεταλλεύματος
- Υδρογεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία.

Εξαιτίας προ υπάρχουσας υπαίθριας εκμετάλλευσης στο λατομείο, υπήρχαν η γεωλογική μελέτη και οι αντίστοιχοι γεωλογικοί χάρτες της περιοχής. Σε οποιαδήποτε μεταλλευτική έρευνα είναι αναγκαίοι χάρτες όπως το τοπογραφικό της περιοχής μελέτης, γεωλογικοί χάρτες και ο χάρτης χρήσεων γης. Οι χάρτες αυτοί, συντέλεσαν στην διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ανάπτυξη του κοιτάσματος και τον εντοπισμό του ασβεστιτικού μαρμάρου. Για την συγκεκριμένη έρευνα ο γεωλογικός χάρτης δίνεται στο σχήμα 2.7 και η γεωλογική τομή στην περιοχή ενδιαφέροντος φαίνεται στο σχήμα 2.8. Ο στόχος αυτής της έρευνας, είναι να προσδιοριστεί η θέση στην οποία σταμάτα η ανάπτυξη δολομιτικού μαρμάρου και εμφανίζεται το γκρι ασβεστιτικό μάρμαρο. Με τον προσδιορισμό αυτό καθορίζονται τα όρια της εκμετάλλευσης στο κοιτάσμα.

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη και την αντίστοιχη τομή, στην περιοχή υπάρχει δολομιτικό μάρμαρο σε διάφορα χρώματα και γκρι ασβεστιτικό μάρμαρο. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη, διακρίνεται λευκός έως γαλακτόχρωμος δολομίτης (Χιονόλευκο), λευκός δολομίτης με κατά θέσεις νησίδες ασβεστιτικής σύστασης (Ταινιωτό), φαιόλευκος δολομίτης με παρεμβολές πάγκων ασβεστιτικών μαρμάρων και ασβεστιτικό μάρμαρο.

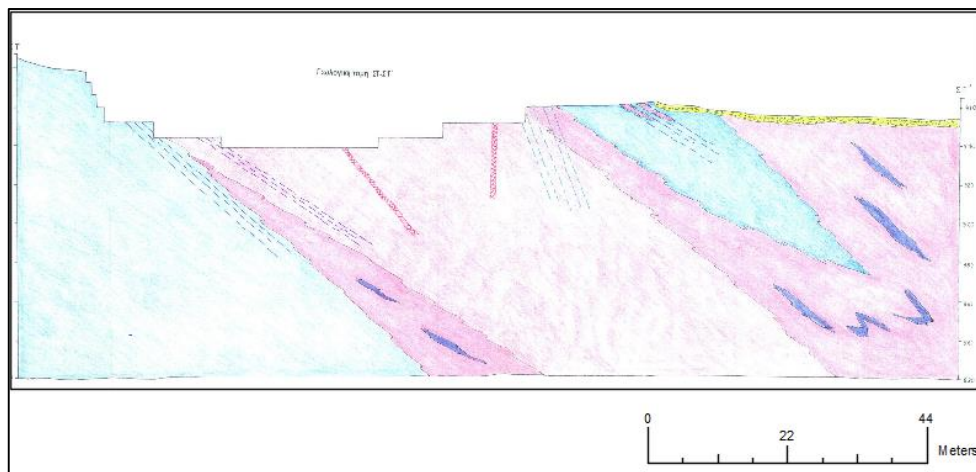


Σχήμα 2. 7: Γεωλογικός χάρτης του λατομείου με την αντίστοιχη κλίμακα.

Πίνακας 3:Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ	ΧΡΩΜΑ
Λευκός έως γαλακτόχρωμος δολομίτης (Χιονόλευκο)	
Λευκός δολομίτης με κατά θέσεις νησίδες ασβεστιτικής σύστασης (Ταινιωτό)	
Ασβεστιτικά μάρμαρα	

Κατά την γεωλογική χαρτογράφηση, πραγματοποιείται διακριτοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών με βάση την λιθολογία, την τεκτονική τους κατάσταση, την δομή τους και την αποσάρθρωση τους. Επιπλέον, αποτυπώνεται η γεωμετρία στρώσεων, ρηγμάτων, επωθήσεων και διατμήσεων.

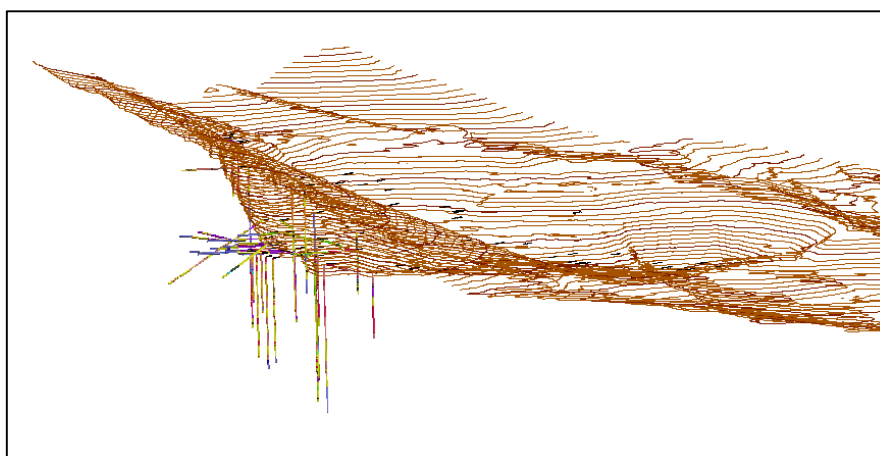


Σχήμα 2. 8: Γεωλογική τομή στην περιοχή μελέτης υπό κλίμακα.

Πίνακας 4: Υπόμνημα γεωλογικής τομής.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΤΟΜΗΣ	ΧΡΩΜΑ
Λευκός έως γαλακτόχρωμος δολομίτης (Χιονόλευκο)	
Λευκός δολομίτης με κατά θέσεις νησίδες ασβεστιτικής σύστασης (Ταινιωτό)	
Φαιόλευκος δολομίτης με παρεμβολές πάγκων ασβεστιτικών μαρμάρων	
Ασβεστιτικά μάρμαρα	
Αδρομερή μπάζα λατομείου	

Επισυνάπτεται στη μελέτη και η γεωλογική τομή, σχήμα 2.8, κατά μήκος του τεχνικού έργου, στην οποία αποτυπώνονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί με τις επαφές τους, ρήγματα και τα προφίλ των γεωτρήσεων. Στην επόμενη εικόνα, σχήμα 2.9, δίδεται μια πλάγια όψη των γεωτρήσεων στο τοπογραφικό.



Σχήμα 2. 9: Άποψη των γεωτρήσεων στο τοπογραφικό του λατομείου.

2.3 Δεδομένα πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων

Με στόχο την σχεδίαση υπόγειας εκμετάλλευσης, η οποία παρέχει μεγάλη αποληψιμότητα κοιτάσματος, δεν ήταν αρκετά τα στοιχεία των παλαιότερων γεωτρήσεων και των γεωλογικών χαρτών και χρειάστηκε να γίνουν περισσότερες ερευνητικές γεωτρήσεις στην περιοχή.

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας αποτέλεσε η αποτύπωση των γεωτρήσεων στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD™. Τοποθετήθηκαν τα σημεία των γεωτρήσεων στο τοπογραφικό της περιοχής σύμφωνα με τις πραγματικές συντεταγμένες τους. Σε επόμενο βήμα, σχεδιάστηκαν οι πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις με το πραγματικό τους βάθος και την αντίστοιχη κλίση τους. Οι γεωτρήσεις, με βάση τα πετρώματα που εντοπίστηκαν στους πυρήνες τους διαμορφώθηκαν και αποθηκεύτηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να διακρίνονται οι αλλαγές στην γεωλογία κατά μήκος της γεώτρησης.

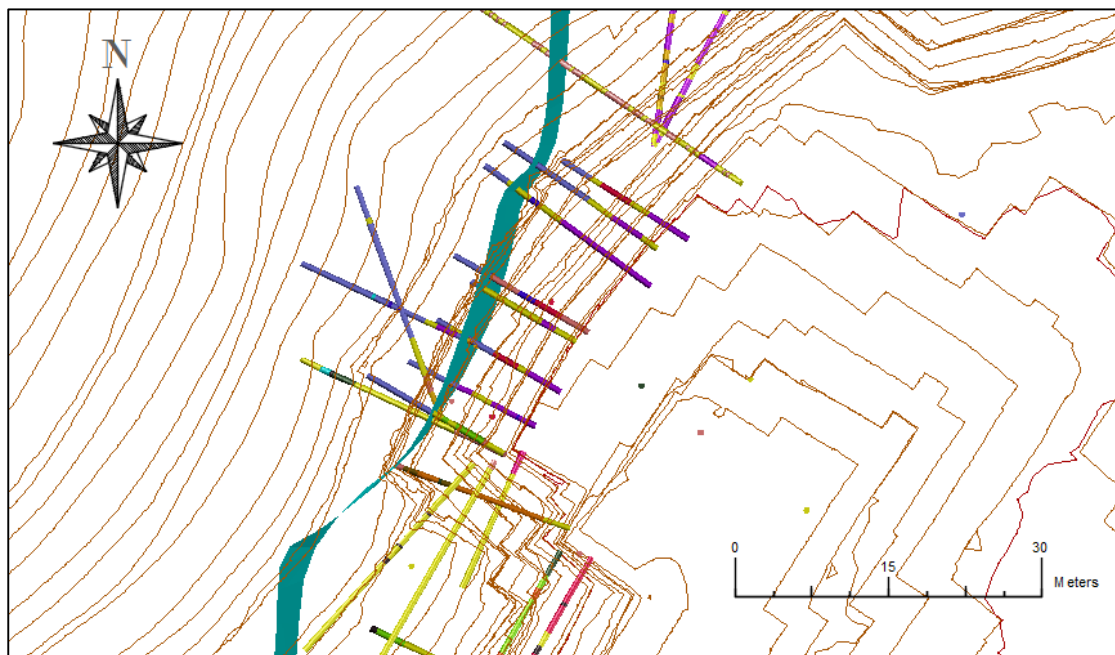
Με την αύξηση του πλήθους των γεωτρήσεων, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την δημιουργία των γεωλογικών τομών. Στην περιοχή μελέτης, ήταν δυνατή η εκτίμηση του γεωλογικού μοντέλου καθώς έχουν γίνει αρκετές γεωτρήσεις, οι οποίες παρέχουν τα απαραίτητα γεωλογικά δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο, εντοπίστηκε με σχετική ακρίβεια η επαφή ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου. Τέλος, έγινε χαρακτηρισμός των μηχανικών ιδιοτήτων, σύμφωνα με τα δεδομένα των πυρήνων των γεωτρήσεων, για το ασβεστιτικό και το δολομιτικό μάρμαρο που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης.

Με το πέρας των γεωτρήσεων, έγινε τεχνική περιγραφή των πυρήνων μαρμάρου και ταξινομήθηκε η ποιότητα στο βάθος. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο βαθμό αποσαθρώσεως, τη δομή, το χρώμα και τις ασυνέχειες του πετρώματος, καθώς τα παραπάνω επηρεάζουν άμεσα τον σχεδιασμό της εκμετάλλευσης.

2.4 Σχεδιασμός επιφάνειας επαφής μεταξύ ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου

Η διαμόρφωση της επιφάνειας αυτής στο σχεδιασμό κρίνεται σημαντική για την εκμετάλλευση, καθώς συντελεί στην επιλογή των ορίων της προκειμένου να μην εξορυχθεί στείρο υλικό, δηλαδή στην περίπτωση αυτή ασβεστιτικό μάρμαρο. Τα δεδομένα των γεωτρήσεων πυρηνοληψίας οδήγησαν σε μια αντιπροσωπευτική μορφή της επιφάνειας επαφής, η οποία σχεδιάστηκε στο AutoCAD™ και καθόρισε την έκταση της εκμετάλλευσης στο κοίτασμα.

Στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD™ σχεδιάστηκε η επιφάνεια επαφής μεταξύ ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου. Σαν σημεία αναφοράς για την αποτύπωση της επιφάνειας επαφής, επιλέχθηκαν οι περιοχές όπου εμφανιζόταν ασβεστιτικό μάρμαρο στις πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις και στους γεωλογικούς χάρτες.



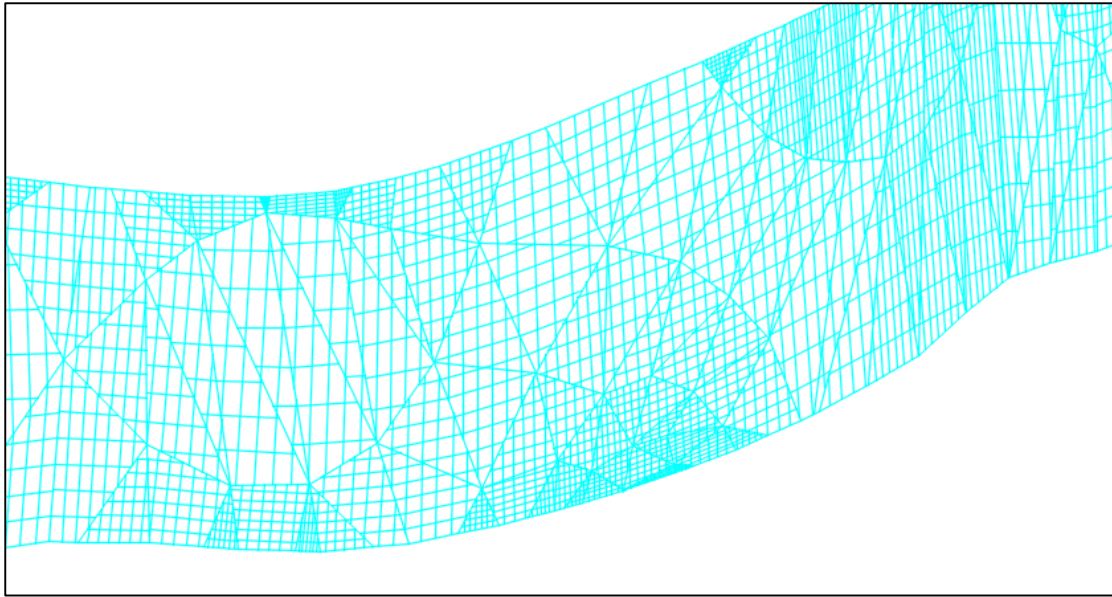
Σχήμα 2. 10: Κάτοψη στην οποία φαίνεται ο σχηματισμός της επιφάνειας σε σχέση με τη γεωλογία της περιοχής.

Στην παραπάνω κάτοψη, σχήμα 2.10, αποτυπώνονται οι γεωτρήσεις δειγματοληψίας και η επιφάνεια που κατασκευάστηκε. Το ασβεστιτικό μάρμαρο αποδίδεται με το απαλό γαλάζιο χρώμα στο σχέδιο και τα υπόλοιπα χρώματα αντιπροσωπεύουν δολομιτικό μάρμαρο διαφορετικής ποιότητας, σύμφωνα με τη λευκότητα του.

Αρχικά, χρησιμοποιώντας ως οδηγό τις θέσεις των γεωτρήσεων με ασβεστιτικό μάρμαρο, σχεδιάστηκε μια κλειστή γραμμή που αποδίδει τον διαχωρισμό του ασβεστιτικού και του δολομιτικού μαρμάρου. Η κλειστή αυτή γραμμή, έγινε επιφάνεια χωρισμένη σε γεωμετρικά τρίγωνα. Απαραίτητη κρίθηκε η μετατροπή της επιφάνειας σε μορφή πλέγματος, ώστε να γίνει καλύτερη η απόδοση της και δυνατή η εισαγωγή της στο πρόγραμμα FLAC 3D™. Η μορφή πλέγματος (mesh), δίνει την επιλογή στο χρήστη να μετακινούνται τα σημεία της επιφάνειας όπου επιθυμεί αυτός.

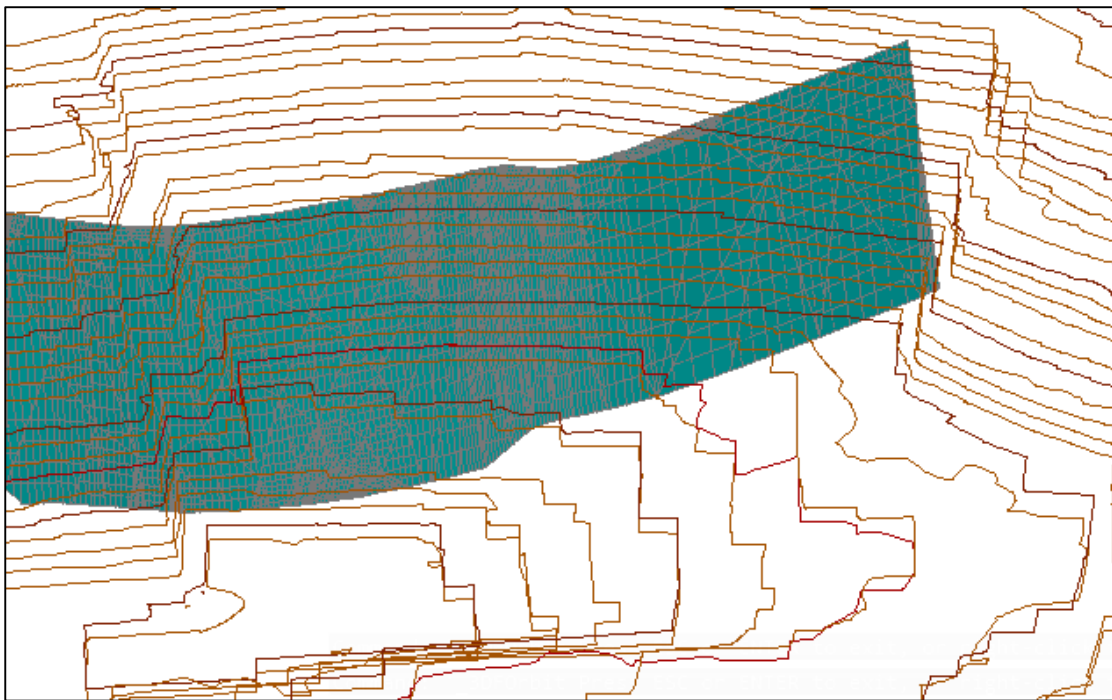
Ένα μοντέλο της μορφής αυτής, αποτελείται από κορυφές, ακμές και πλευρές που χρησιμοποιούν πολυγωνική αναπαράσταση εμπεριέχοντας τρίγωνα και τετράπλευρα προκειμένου να ορίσουν ένα τρισδιάστατο σχήμα. Οι μετατροπές που μπορούν να επιτευχθούν μέσω της μορφής αυτής, δεν δύνανται να πραγματοποιηθούν για ένα τρισδιάστατο στερεό ή μια απλή επιφάνεια στο πρόγραμμα AutoCAD™. Για παράδειγμα, είναι εφικτή η μετακίνηση των στοιχείων που συντελούν ένα μοντέλο mesh (ακμές, κορυφές, πλευρές), έτσι ώστε να σχεδιαστεί με ευκολία οποιοδήποτε σχήμα είτε σε δυσδιάστατη είτε σε τρισδιάστατη μορφή.

Τέλος, η επιφάνεια που αποτελείται από χωριστές τριγωνικές επιφάνειες μετατράπηκε στην επιθυμητή μορφή, δηλαδή με τη μορφή πλέγματος (mesh). Στο σχήμα 2.11, φαίνεται η χαρακτηριστική αποτύπωση της επιφάνειας με τη μορφή mesh.



Σχήμα 2. 11: Άποψη επιφάνειας με τη μορφή mesh.

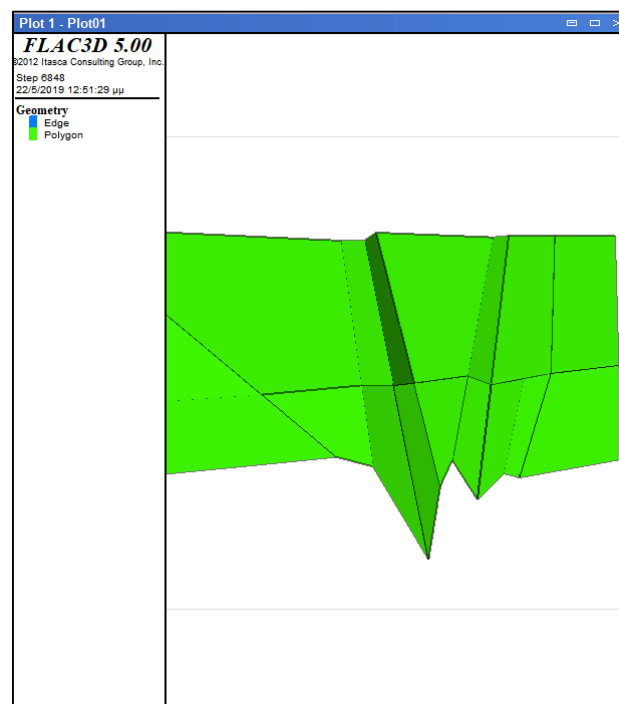
Στο σχήμα 2.11, φαίνεται η επιφάνεια επαφής μεταξύ δολομιτικού και ασβεστιτικού μαρμάρου με διαφορετική όψη από αυτή του σχήματος 2.12.



Σχήμα 2. 12: Πλάγια όψη της επιφάνειας επιφάνειας στην περιοχή μελέτης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η επιφάνεια επαφής σχεδιάστηκε με ιδιαίτερη προσοχή στα σημεία των γεωτρήσεων όπου παρατηρείται ασβεστίτικο μάρμαρο, προκειμένου η σχεδίαση των υπογείων να είναι ακριβής και να εξορυχθεί μόνο δολομιτικό μάρμαρο

Προκειμένου να γίνει η αναγνώριση της επιφάνειας που σχεδιάστηκε στο AutoCAD™ από το υπολογιστικό πρόγραμμα FLAC 3D™, που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη μελέτη της ευστάθειας των θαλάμων και των στύλων που περιγράφεται σε μεταγενέστερη παράγραφο, ήταν απαραίτητη η μετατροπή της επιφάνειας από mesh σε polyface mesh στο AutoCAD™. Σε διαφορετική περίπτωση, δε θα μπορούσε να αποδοθεί σωστά η γεωμετρία της επιφάνειας επαφής στο πρόγραμμα FLAC 3D™. Πιο συγκεκριμένα, η μορφή mesh όταν αποθηκευτεί σαν αρχείο της μορφής “.dxf”, δεν αποτυπώνει σωστά τη γεωμετρία της επιφάνειας επαφής, σε αντίθεση με την μορφή polyface mesh στην οποία φαίνονται με ακρίβεια όλα τα στοιχεία της επιφάνειας (ακμές, κορυφές, πλευρές), όταν αυτή αποθηκευτεί σαν αρχείο “.dxf”. Στην επόμενη εικόνα, (σχήμα 2.13), φαίνεται επιφάνεια επαφής στο πρόγραμμα FLAC 3D™.



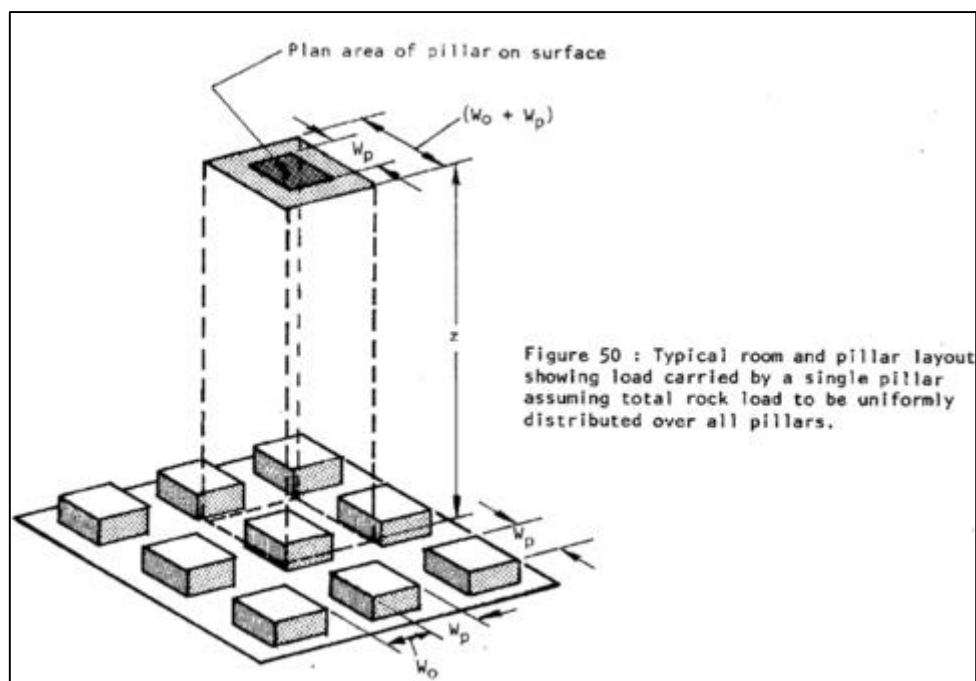
Σχήμα 2. 13: Άποψη της επιφάνειας με τη μορφή polyface mesh στην επιφάνεια εργασίας του FLAC3D.

2.5 Επιλογή διαστάσεων στύλων και ογκομαρμάρων

Η διαστασιολόγηση των στύλων είναι μια εξαιρετικά σημαντική επιλογή καθώς καθορίζει την ασφάλεια των εργασιών κατά την εκμετάλλευση αλλά και μετά το πέρας της. Το σχήμα 2.14, δείχνει ένα τυπικό δίκτυο θαλάμων και στύλων καθώς και το πλάτος w_p και το ύψος z ενός στύλου και το πλάτος ανοίγματος του θαλάμου w_0 . Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη απόληψη μαρμάρου που επιθυμούμε να επιτευχθεί. Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο έχουν οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος για την καλύτερη δυνατή υποστήριξη της οροφής. Ο προσδιορισμός των διαστάσεων των στύλων επιλέχθηκε να γίνει μέσω εμπειρικών σχέσεων και σύμφωνα με τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος για την ασφαλή εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Στη δεδομένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η σχέση που δίνει το πλάτος του στύλου w_p σύμφωνα με τους Brandy και Brown (1985) και είναι η εξής:

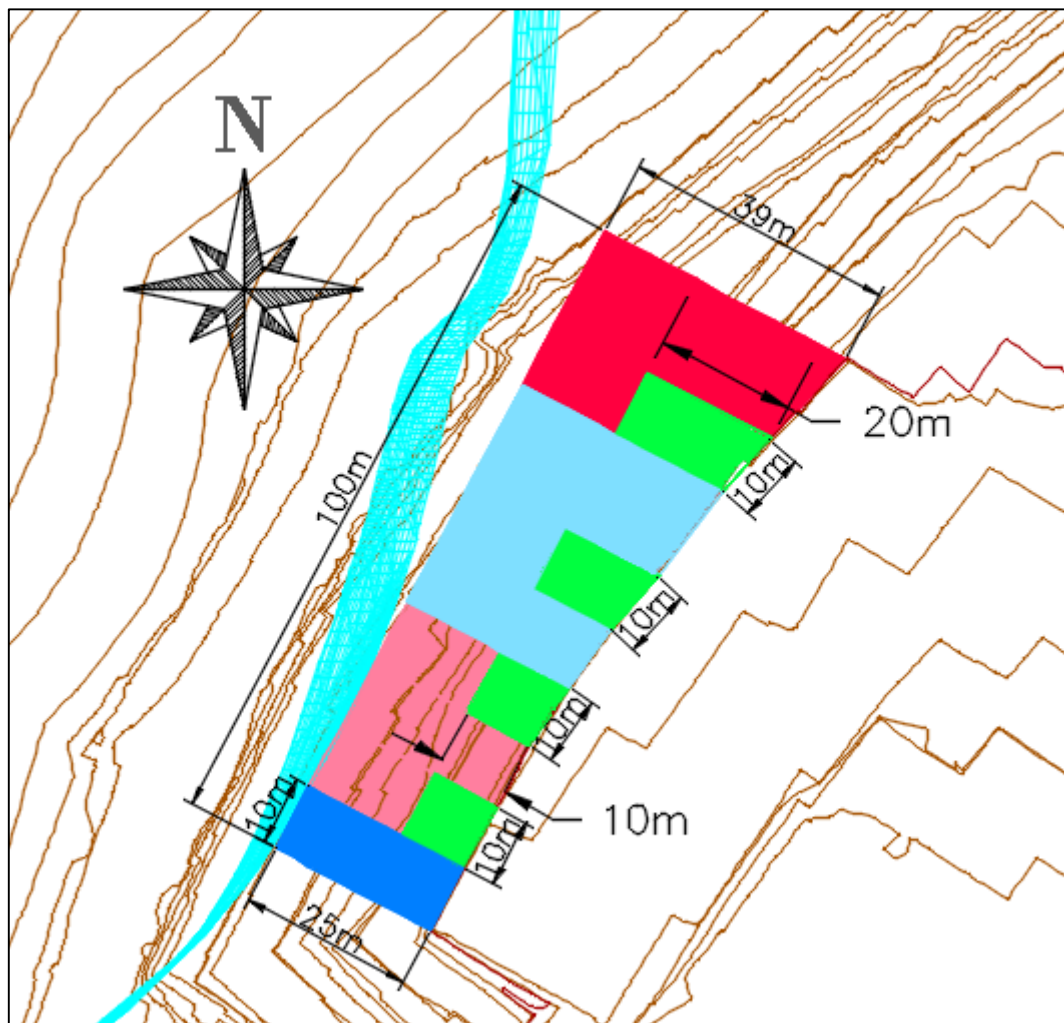
$$w_p = 4A_p / C \quad (2.5)$$

όπου A_p το εμβαδόν του στύλου και C η περίμετρος του στύλου.



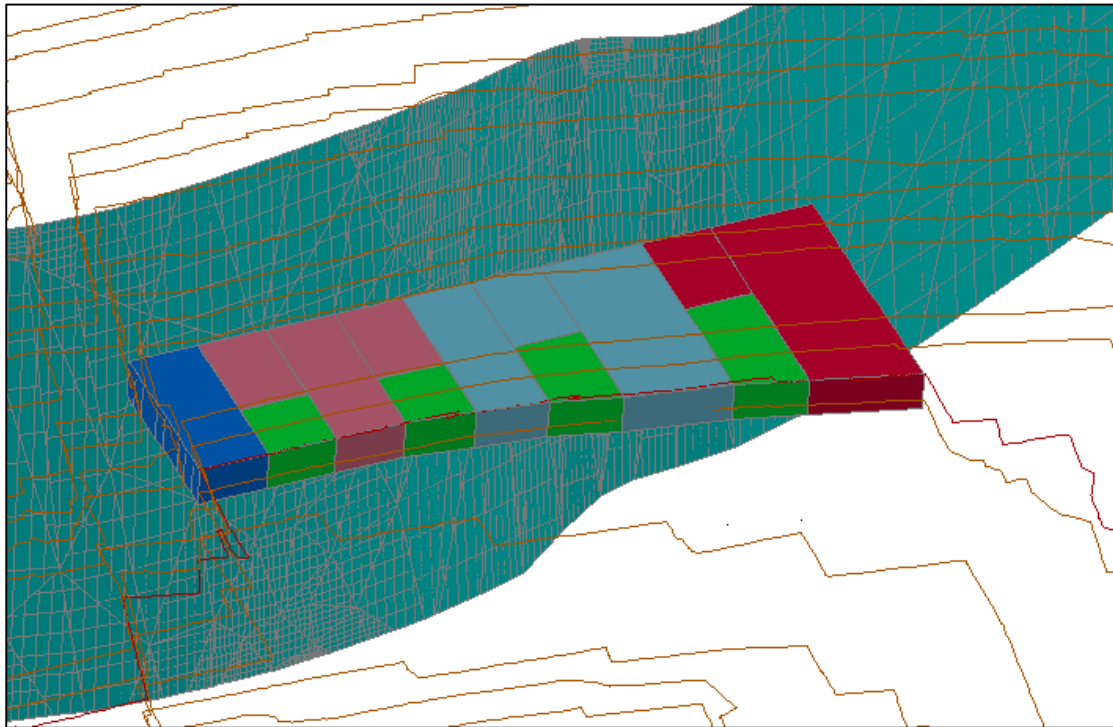
Σχήμα 2. 14: Σχηματική παράσταση τυπικού δικτύου θαλάμων και στύλων(Mine Design, Queen's University).

Οι παράγοντες αυτοί οδήγησαν στην επιλογή στύλων με διαστάσεις πλάτους 10 m, εκτός του τελευταίου στύλου που έχει πλάτος 20 m και ύψος ανάλογο με το βάθος που θα συνεχιστεί η εκμετάλλευση σε πρώτη φάση. Η εκμετάλλευση εκτείνεται σε βάθος μέχρι το υψόμετρο των + 864 m. Στο σχήμα 2.15, δίδεται μια κάτοψη του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης του πρώτου ορόφου, όπου είναι ίδια και τους υπόλοιπους τρεις ορόφους, με τα τέσσερα διαφορετικά χρώματα να αναλογούν σε τέσσερις περιόδους εξόρυξης για κάθε όροφο και με πράσινο χρώμα να απεικονίζονται οι τέσσερις στύλοι υποστήριξης. Η εικόνα του σχήματος 2.16, απεικονίζει μια πλάγια όψη του σχεδιασμού για τον πρώτο όροφο.

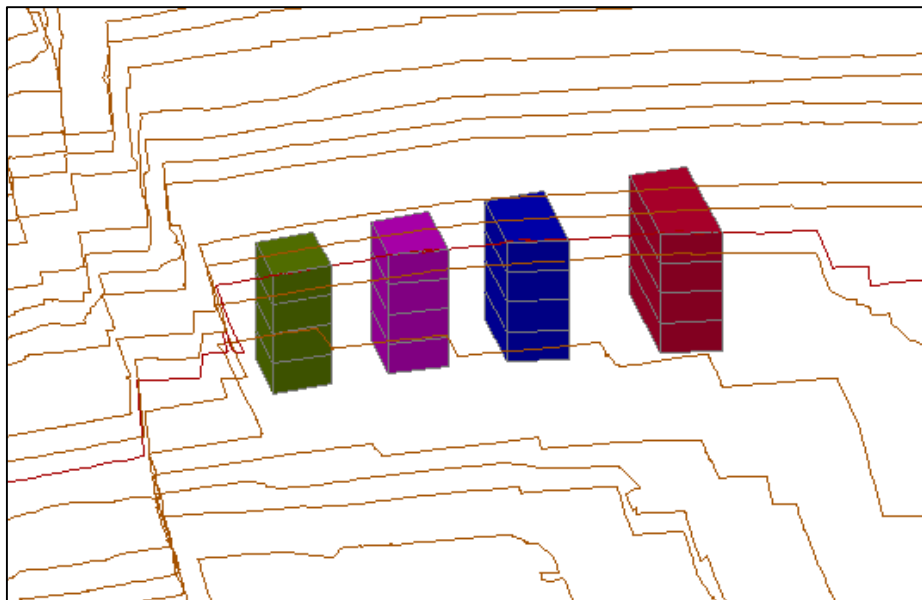


Σχήμα 2. 15: Κάτοψη όπου με τα διάφορα χρώματα αντιστοιχούν σε μια περίοδο εξόρυξης ξεκινώντας από τα δεξιά.

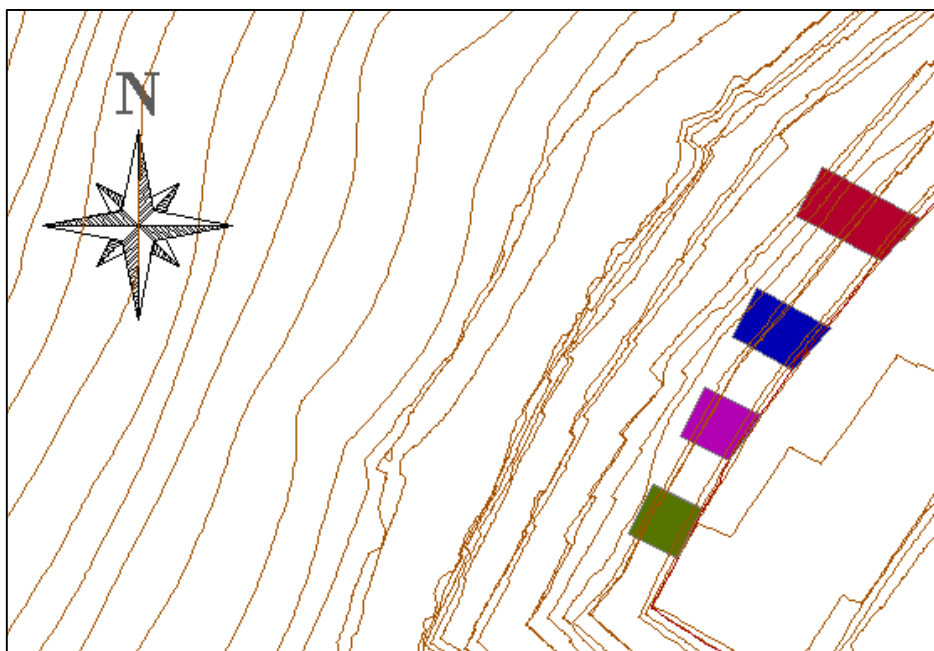
Το μήκος που εκτείνεται η διάνοιξη των στοών οριστικοποιήθηκε στο σημείο εμφάνισης ασβεστίτικού μαρμάρου.



Σχήμα 2. 16: Άποψη της εκμετάλλευσης στο υψόμετρο + 888 m όπου φαίνονται οι τέσσερις περίοδοι εξόρυξης.



Σχήμα 2. 17: Άποψη των στύλων ύψους 24 m στην τελική φάση της εκμετάλλευσης.



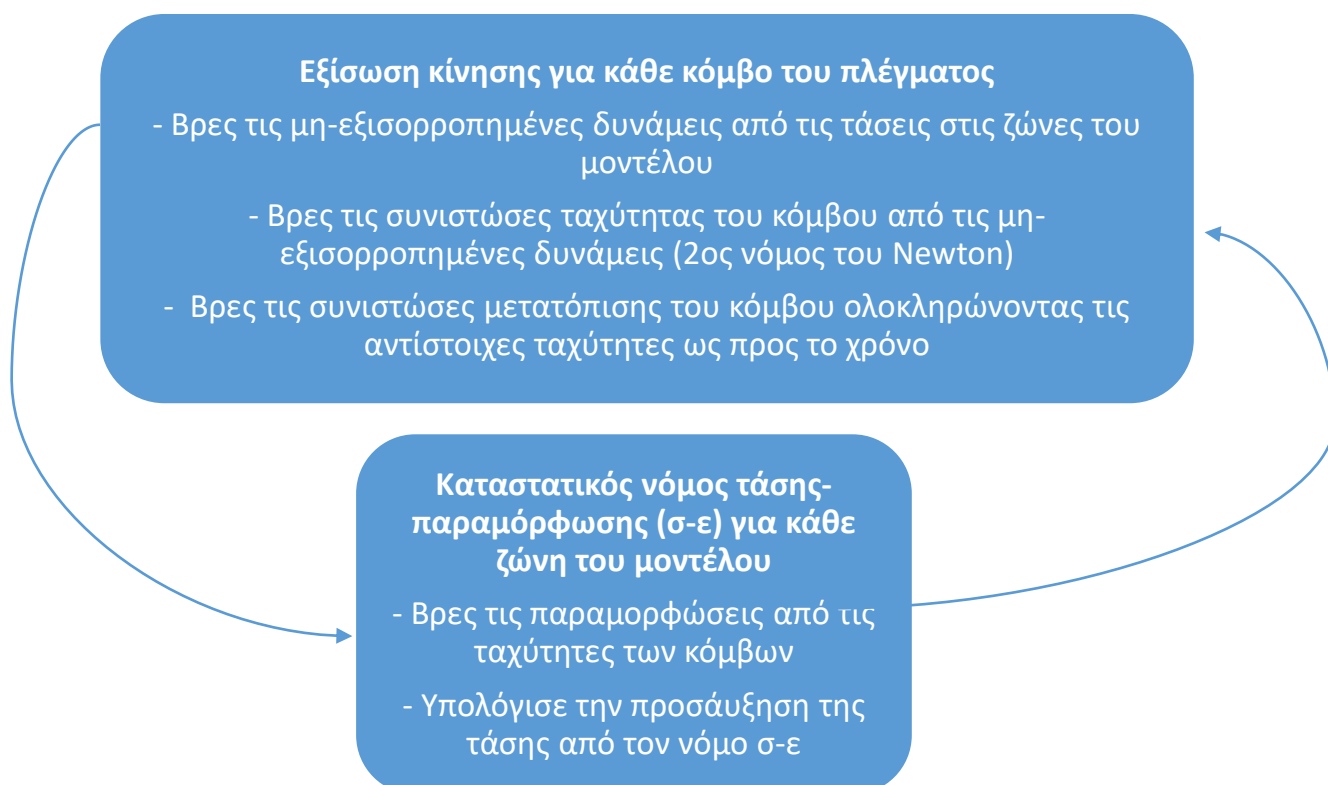
Σχήμα 2. 18: Κάτοψη όπου φαίνονται οι στύλοι στην τελική φάση της εκμετάλλευσης.

Τα σχήματα 2.17 και 2.18, απεικονίζουν σε πλάγια όψη και κάτοψη τους στύλους υποστήριξης πλάτους 10-20 m και μήκους 10m στην τελική φάση της εκμετάλλευσης, με τελικό ύψος των στύλων ίσο με 24 μέτρα.

Κεφάλαιο 3 : Εισαγωγή στο πρόγραμμα *FLAC 3DTM*

3.1 Πρόγραμμα μοντελοποίησης *FLAC 3DTM*

Το υπολογιστικό πρόγραμμα *FLAC 3DTM* μπορεί να επιλύσει τις δυναμικές εξισώσεις του δεύτερου νόμου του Newton¹ στους κόμβους του τρισδιάστατου πλέγματος που έχει διακριτοποιηθεί το στερεό σώμα και στη συνέχεια να υπολογίσει τις ταχύτητες των κόμβων μέσω κατάλληλου καταστατικού μοντέλου. Κατόπιν, με ολοκλήρωση στο χρόνο υπολογίζονται οι μετατοπίσεις των κόμβων και στη συνέχεια οι παραμορφώσεις με παραγωγή. Μετά από τον καταστατικό νόμο παραμορφώσεων – τάσεων υπολογίζονται οι τάσεις και αυτός ο κύκλος υπολογισμών συνεχίζεται μέχρι να εξασφαλισθεί η ισορροπία του συστήματος μετά από έναν αριθμό χρονικών βημάτων. Η ακολουθία υπολογισμών που εκτελούνται από το υπολογιστικό πρόγραμμα φαίνονται στο σχήμα 3.1. Είναι κατάλληλο για την επίλυση στατικών και δυναμικών προβλημάτων της Μηχανικής Πετρωμάτων γιατί 1) διαθέτει πλούσια βιβλιοθήκη καταστατικών νόμων πετρωμάτων και 2) γιατί μπορεί να προσομοιώσει τις διαδοχικές εκσκαφές κατά την υπαίθρια ή υπόγεια εξόρυξη πετρωμάτων.



Σχήμα 3. 1: Διάγραμμα ροής της ακολουθίας υπολογισμών που εκτελούνται στο *FLAC 3DTM*.

¹Ο Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα μας λέει ότι η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα ισούται με τη μάζα του σώματος επί την επιτάχυνση του. Δηλαδή: $F = m \times y$.

3.2 Κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου στο *FLAC 3DTM*

Προκειμένου να υλοποιηθεί η κατασκευή του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν τα όρια της εκμετάλλευσης που σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα AutoCADTM. Ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης με τα όρια της, αποτέλεσαν το σχέδιο για την δημιουργία του κάναβου των πεπερασμένων διαφορών.



Σχήμα 3. 2: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών.

Σε πρώτη φάση, έγινε εισαγωγή στο πρόγραμμα, σαν γεωμετρικό δεδομένο, ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης με τη μορφή αρχείου “dxf”. Κατόπιν, ορίστηκαν τα όρια του μοντέλου και οι στύλοι με σημεία. Τα σημεία αυτά, ενώνονται με γραμμές και χωρίζουν το μοντέλο σε μικρότερα μέρη, μέσω τριγώνων και τετράπλευρων. Σε κάθε γεωμετρικό τρίγωνο και τετράπλευρο μπορούν να οριστούν ζώνες και να δοθεί ύψος με στόχο την δημιουργία του στερεού. Η διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες, είναι σημαντική και δίνει σημαντικές δυνατότητες στο χρήστη για περαιτέρω επεξεργασία του μοντέλου.

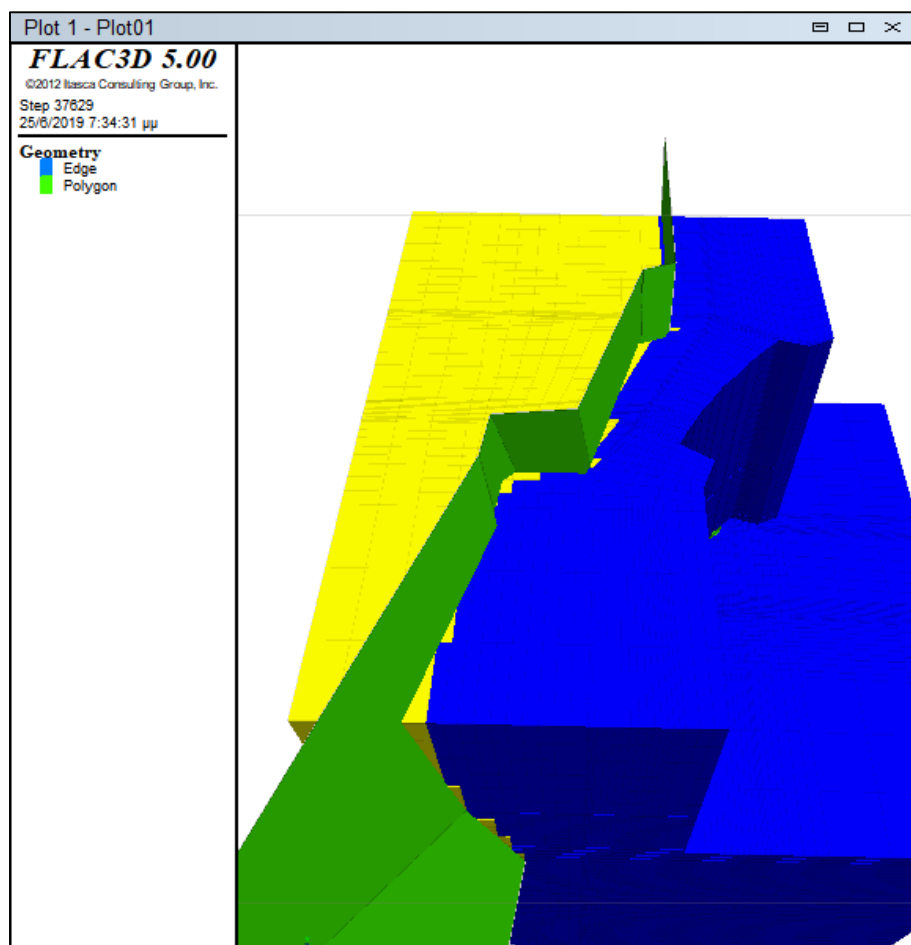
Η γεωμετρία του καννάβου, χωρίστηκε μέσω της διακριτοποίησης σε ομάδες (groups), οι οποίες αντιστοιχούν στις φάσεις της εκμετάλλευσης, τους στύλους υποστήριξης και τους θαλάμους που θα διανοιχτούν, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Συνολικά, οι ζώνες του μοντέλου είναι 125200 και εμφανίζονται πιο πυκνές κοντά στην περιοχή όπου θα γίνει η εισαγωγή της επιφάνειας επαφής. Τέλος, δόθηκε και η τρίτη διάσταση στον κάνναβο μέσω της εντολής Extrude στο ανάλογο ύψος της εκμετάλλευσης.

3.2 Εισαγωγή της επιφάνειας επαφής μεταξύ ασβεστιτικού και δολομιτικού μαρμάρου στο μοντέλο

Το πρόγραμμα μοντελοποίησης FLAC 3D™, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισαγάγει επιφάνειες και διάφορα γεωμετρικά σχήματα στα μοντέλα που δημιουργεί μέσω συγκεκριμένων εντολών. Στη μελέτη αυτή, η παραπάνω δυνατότητα κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ήταν δυνατός ο διαχωρισμός του μοντέλου σε μέρη με διαφορετικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, η κύρια διαφοροποίηση που παρατηρείται μέσα στο λατομείο, είναι η ορυκτολογική σύσταση του μαρμάρου, καθώς υπάρχει δολομιτικό και ασβεστιτικό. Αξιόλογη χαρακτηρίζεται η ανομοιογενής πυκνότητα, η οποία διακρίνει τα δυο είδη μαρμάρου.

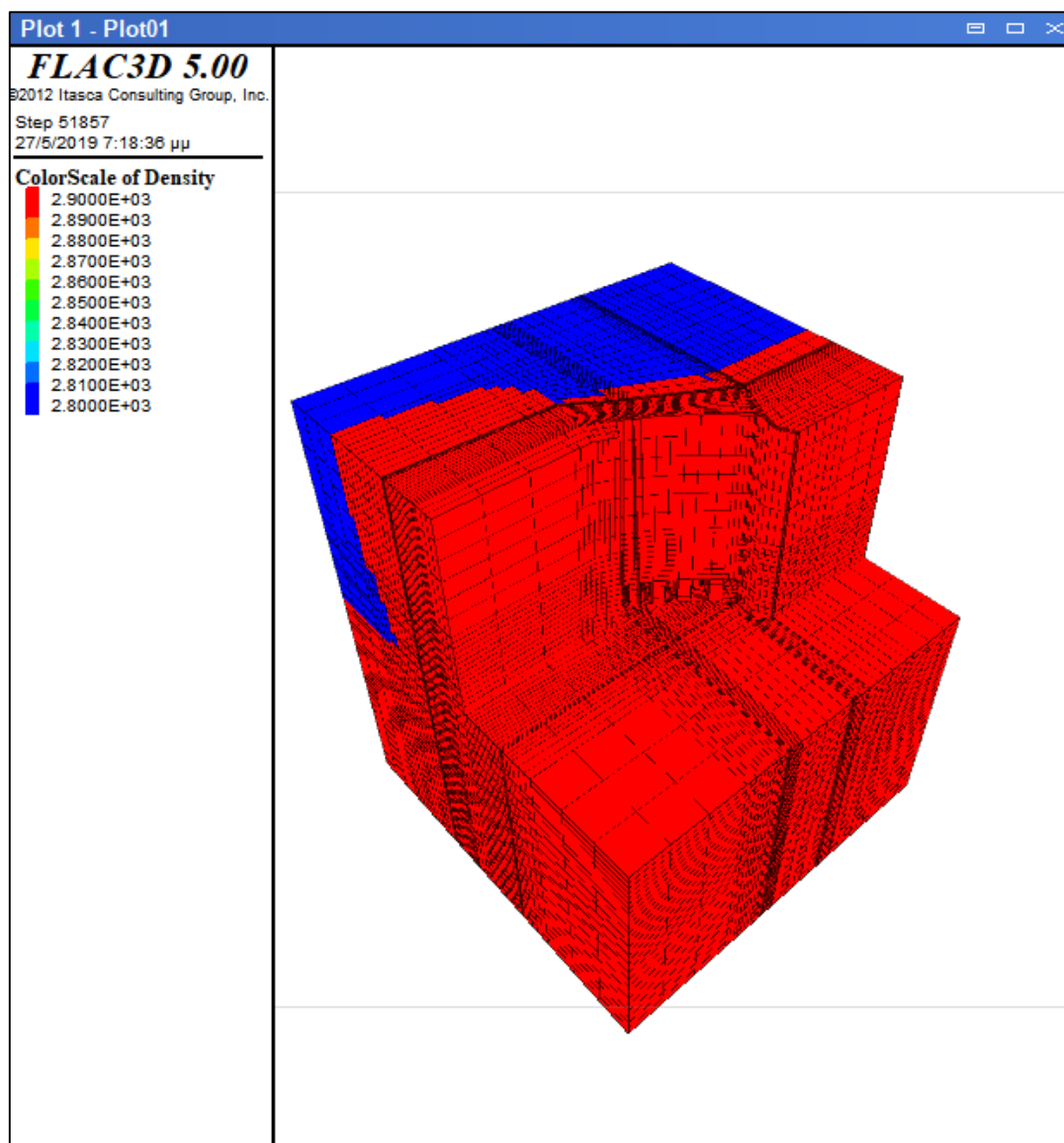
Η εισαγωγή της επιφάνειας επαφής, έχει ως στόχο τον διαχωρισμό των ιδιοτήτων του μοντέλου με βάση την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, δηλαδή του ασβεστιτικού και του δολομιτικού μαρμάρου. Παρουσιάστηκαν δυσκολίες όσον αφορά το διαχωρισμό αυτό, λόγω της γεωμετρίας της επιφάνειας. Ύστερα από τις προσπάθειες που έγιναν, προκύπτει ότι οι έδρες πρέπει να ορίζονται ανά τέσσερις κορυφές όταν δημιουργείται το polyface mesh. Κάτι εξίσου σημαντικό που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε τέτοιες διαδικασίες και το οποίο παρατηρήθηκε κατά την σχεδίαση του μοντέλου, είναι ότι το μοναδιαίο διάνυσμα, το οποίο ορίζεται για να διαχωρίσει το μοντέλο σε ομάδες (group) σύμφωνα με την επιφάνεια που εισάγεται στο μοντέλο, δε θα πρέπει να είναι παράλληλο με αυτή την επιφάνεια. Σε διαφορετική περίπτωση, δε γίνεται αντιληπτή η γεωμετρία της επιφάνειας από το πρόγραμμα και δεν επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του μοντέλου βάσει αυτής της γεωμετρίας.

Στην επόμενη φωτογραφία, σχήμα 3.3, φαίνεται με μπλε χρώμα το δολομιτικό μάρμαρο, με κίτρινο χρώμα το ασβεστιτικό μάρμαρο και με πράσινο χρώμα η επιφάνεια.



Σχήμα 3. 3: Άποψη του μοντέλου μετά την εισαγωγή της επιφάνειας.

Προκειμένου να γίνει εισαγωγή της επιφάνειας στο FLAC 3D™, που είχε δημιουργηθεί προηγουμένως στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD™, ήταν αναγκαία η μετατροπή της επιφάνειας σε μορφή polyface mesh, όπως ονομάζεται. Με στόχο να ληφθούν σωστά αποτελέσματα στην επίλυση του προβλήματος, κρίνεται απαραίτητη η ταύτιση των ηλεκτρονικών αρχείων όταν αυτά μεταβαίνουν από μια επιφάνεια εργασίας σε μία άλλη.



Σχήμα 3. 4: Χρωματική διαφοροποίηση της πυκνότητας στο μοντέλο.

Αφού έγινε η προσομοίωση της επιφάνειας στο μοντέλο και φανερώθηκαν τα όρια της εκμετάλλευσης, διαχωρίστηκαν τα μέρη τα οποία αποτελούν το ασβεστιτικό από αυτά του δολομιτικού μαρμάρου. Μέσω αυτής της εισαγωγής της επιφάνειας, ορίστηκαν και οι ιδιότητες του πετρώματος στις αντίστοιχες περιοχές. Στην προηγούμενη εικόνα, σχήμα 3.4, φαίνεται το μοντέλο, όπου διακρίνονται οι περιοχές του δολομιτικού μαρμάρου με κόκκινο χρώμα και πυκνότητα ίση με 2900 kg/m^3 και οι περιοχές του ασβεστιτικού με μπλε χρώμα και πυκνότητα 2800 kg/m^3 αντίστοιχα.

3.3 Επίλυση του προβλήματος

3.3.1 Εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος

Για να επιτευχθεί η ανάλυση της συμπεριφοράς του στερεού σώματος που μελετάται κάτω από εντατική καταπόνηση, απαιτείται ένα θεωρητικό πρότυπο (μοντέλο) και οι εξισώσεις που εκφράζουν τις σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης του υλικού (constitutive relationships). Η γενική μορφή των καταστατικών εξισώσεων που περιγράφει τη σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης και δεν εξαρτώνται από τον παράγοντα χρόνο είναι (Αγιουτάντης,2002) :

$$\sigma_{ij} = f(e_{ij}) \quad (3.1)$$

Σύμφωνα με τον γενικευμένο νόμο του Hooke, σχετικά με την ελαστική συμπεριφορά ενός υλικού σε τρεις διαστάσεις, διατυπώνεται η εξής καταστατική εξίσωση:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}e_{kl} \quad (3.2)$$

όπου c_{ijkl} είναι ένας τανυστής τέταρτης τάξης εξαρτώμενος από τις ελαστικές σταθερές του σώματος. Απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος, είναι οι παράμετροι ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, δίνονται αρχικά σαν δεδομένα ο λόγος του Poisson (ν) και το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), προκειμένου να υπολογιστούν το μέτρο διάτμησης G (shear modulus) και το μέτρο συμπίεσης K (bulk modulus). Στο πρόγραμμα, δίνονται το μέτρο διάτμησης G και το μέτρο συμπίεσης K , τα οποία υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\alpha) G = \frac{E}{2(\nu+1)} \text{ και } \beta) K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.3)$$

Η θεωρία που περιγράφει τις συνθήκες αστοχίας του υλικού στις δεδομένες καταστάσεις, επιλέχθηκε να είναι αυτή του Mohr-Coulomb, η οποία είναι ευρέως γνωστή και αποδεκτή. Για κάθε υλικό, έχει διατυπωθεί ότι η ορθή και η διατμητική τάση σε ένα επίπεδο συνδέονται με την εξής γενική συνάρτηση (Jaeger and Cook,1979) :

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (3.5)$$

Σχετικά με εδαφικούς σχηματισμούς και πετρώματα αναπτύχθηκε από τον Coulomb το 1773 η θεωρία της εσωτερικής τριβής (internal friction theory) ή αλλιώς θεωρία της αστοχίας σε διάτμηση (shear failure theory). Μέσω της θεωρίας αυτής, συνδέθηκαν γραμμικά οι έννοιες

της διατμητικής αντοχής με τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού. Τη σχέση διατύπωσαν οι Jaeger και Cook το 1979 και είναι η ακόλουθη:

$$|\tau| = c + \sigma \tan \varphi \quad (3.6)$$

όπου c η συνοχή και φ η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού και σ η κάθετη τάση στο επίπεδο ολίσθησης/αστοχίας.

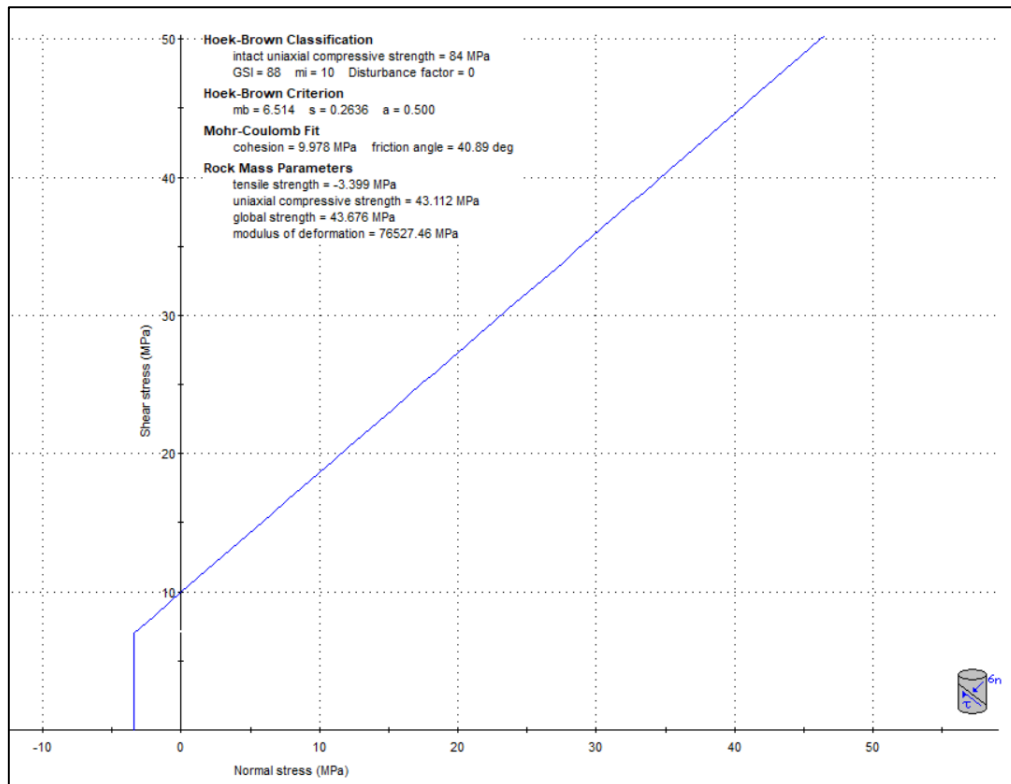
Τα εισαγόμενα αριθμητικά δεδομένα που αντιστοιχούν στο δολομιτικό μάρμαρο και στο ασβεστιτικό μάρμαρο δίδονται στους πίνακες 5 και 6, αντίστοιχα. Αυτά προέκυψαν από την υποβάθμιση των αντίστοιχων παραμέτρων ελαστικότητας και αντοχής που βρέθηκαν από εργαστηριακές δοκιμές θεωρώντας $GSI=88$ για το λιγότερο προ-ρηγματωμένο δολομιτικό μάρμαρο και $GSI=78$ για το ασβεστιτικό μάρμαρο μικρότερης αντοχής σύμφωνα με τα Σχ.3.5.α,β και Σχ.3.6.α,β αντίστοιχα, που κατασκευάστηκαν με λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης του Hoek και της Rocscience™. Αξίζει να αναφερθεί, ότι το GSI είναι ένα σύστημα ταξινόμησης και αξιολόγησης των ιδιοτήτων του πετρώματος το οποίο προτάθηκε από τον Hoek και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικά φτωχής ποιότητας βραχομάζες.

Πίνακας 5: Ιδιότητες του δολομιτικού μαρμάρου.

<u>Ιδιότητες</u>	<u>Τιμή</u>	<u>Μονάδες</u>
Μέτρο ελαστικότητας Young (E)	10	GPa
Λόγος Poisson (ν)	0.3	-
Συνοχή (c)	10	Mpa
Γωνία εσωτερικής τριβής (φ)	40°	
Πυκνότητα (d)	2900	kg/m ³
Μέτρο διάτμησης (G)	3.8	Gpa
Μέτρο συμπίεσης (K)	8.3	Gpa
Αντοχή σε εφελκυσμό (σ)	3.5	Mpa

Πίνακας 6: Ιδιότητες του ασβεστιτικού μαρμάρου.

<u>Ιδιότητες</u>	<u>Τιμή</u>	<u>Μονάδες</u>
Μέτρο ελαστικότητας Young (E)	7	GPa
Λόγος Poisson (ν)	0.3	-
Συνοχή (c)	5	Mpa
Γωνία εσωτερικής τριβής (φ)	36°	
Πυκνότητα (d)	2800	kg/m ³
Μέτρο διάτμησης (G)	2.7.	Gpa
Μέτρο συμπίεσης (K)	5.8	Gpa
Αντοχή σε εφελκυσμό (σ)	1.4	Mpa

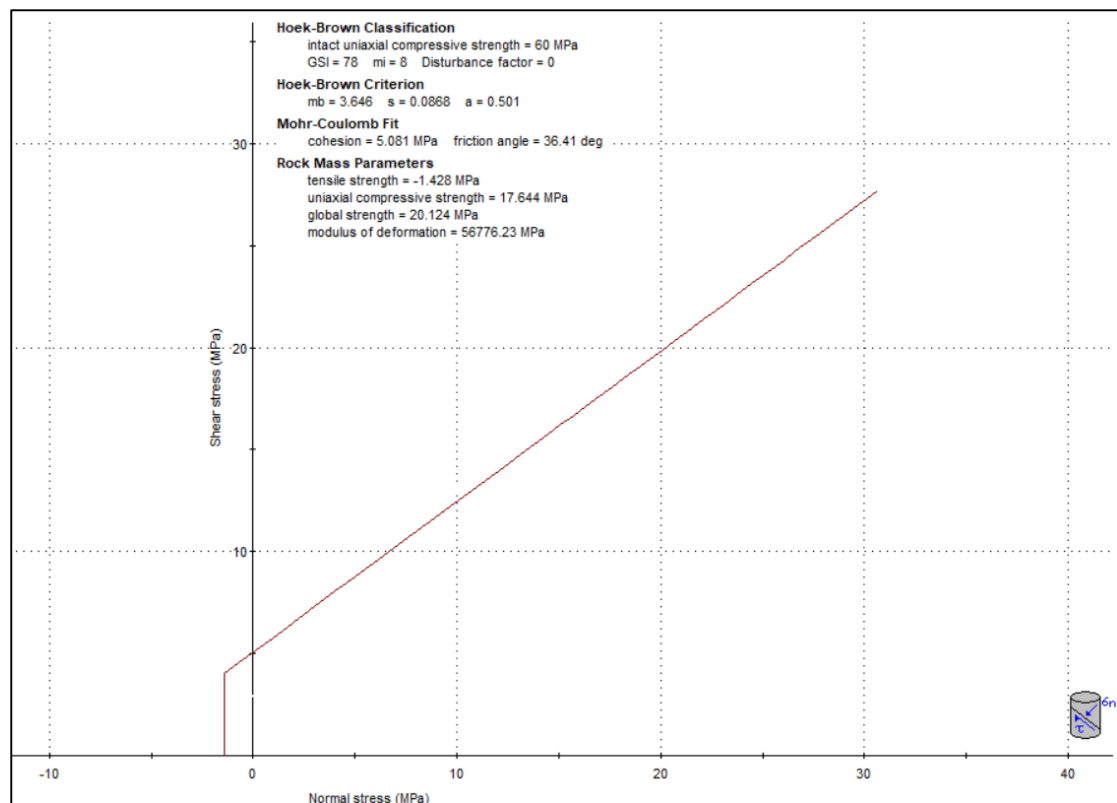


α)

Hoek-Brown Classification	
sigci	84 MPa
GSI	88
m_i	10
D	0
Hoek-Brown Criterion	
m_b	6.514
s	0.2636
a	0.500
Failure Envelope Range	
Application:	General
sig3max	21.0000 MPa
Mohr-Coulomb Fit	
c	9.978 MPa
phi	40.89 deg
Rock Mass Parameters	
sigt	-3.399 MPa
sigc	43.112 MPa
sigcm	43.676 MPa
Em	9946.31 MPa

β)

Σχήμα 3. 5: Κριτήριο αντοχής του δολομιτικού μαρμάρου για GSI=88.



α)

Hoek-Brown Classification	
sigci	60 MPa
GSI	78
m_i	8
D	0
Hoek-Brown Criterion	
m_b	3.646
s	0.0868
a	0.501
Failure Envelope Range	
Application:	General
sig3max	15.0000 MPa
Mohr-Coulomb Fit	
c	5.081 MPa
phi	36.41 deg
Rock Mass Parameters	
sigt	-1.428 MPa
sigc	17.644 MPa
sigcm	20.124 MPa
E_m	56776.23 MPa

β)

Σχήμα 3. 6: Κριτήριο αντοχής του ασβεστίτικού μαρμάρου για GSI=78.

3.3.2 Συνοριακές συνθήκες

Κατά την δημιουργία του, το μοντέλο χωρίστηκε σε ομάδες (groups) εξόρυξης οι οποίες χαρακτηρίζουν τα επιμέρους στάδια εξόρυξης πάγκων της εκμετάλλευσης. Για την επίλυση του προβλήματος, είναι απαραίτητη η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίστηκε η αντικειμενικότητα των συνθηκών σε σχέση με την πραγματική κατάσταση στο χώρο της εκμετάλλευσης. Οι συνοριακές συνθήκες κύλισης, σταθεροποιούν το μοντέλο στις 5 πλευρικές επιφάνειες, με μόνη ελεύθερη την άνω επιφάνεια. Εκτενέστερα, ορίστηκαν μηδενικές μετατοπίσεις κατά x , y και z άξονα στις ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους (δηλαδή για $x=x_{\min}$ και $x=x_{\max}$, για $y=y_{\min}$ και $y=y_{\max}$ και για $z=z_{\min}$). Πιο συγκεκριμένα, στον επόμενο πίνακα (πίνακας 7), παρατίθενται οι τιμές που ορίστηκαν ως συνθήκες.

Πίνακας 7: Σημεία που ορίστηκαν οι συνθήκες κύλισης.

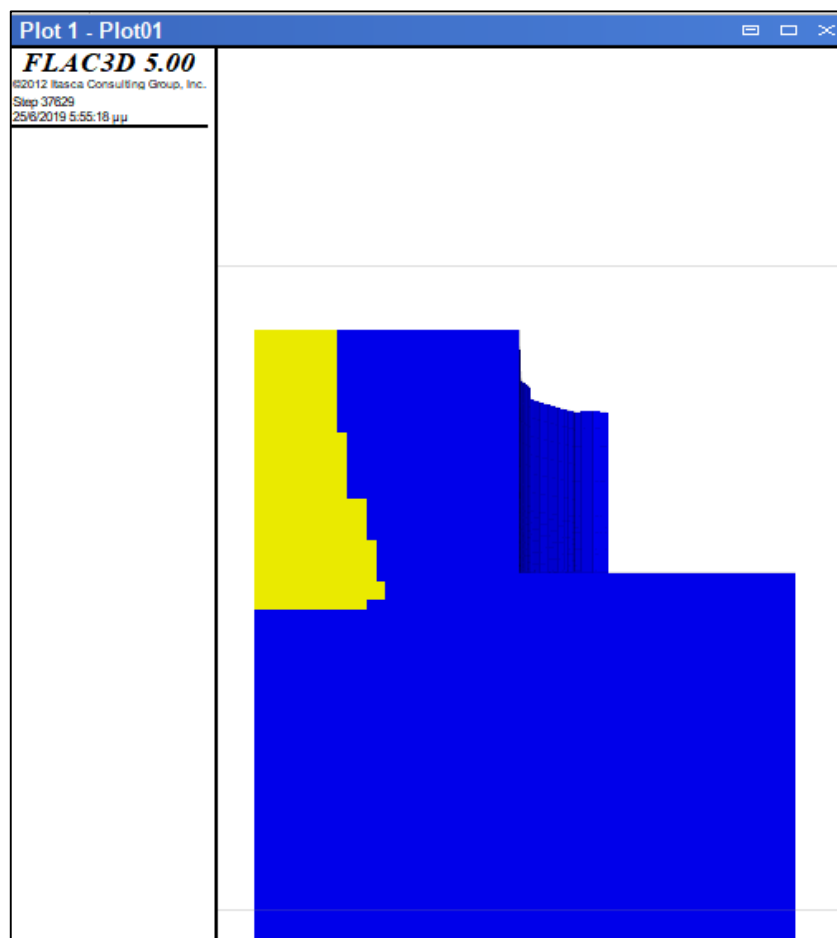
Άξονας	x	y	z
Σημεία	0	0	0
	495050	4572210	640
	494698	4572566	

Για λόγους ακρίβειας, όπως φαίνεται από το μέρος του κώδικα που επισυνάπτεται στο παράρτημα, επιλέγεται ένα εύρος τιμών πολύ κοντά στο σημείο που ορίζεται κάθε φορά. Επιπρόσθετα, με στόχο να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των στύλων υποστήριξης με το πέρας της εκμετάλλευσης, ορίστηκαν μηδενικές οι μετατοπίσεις κατά τους άξονες x , y και z .

Ακόλουθο βήμα, είναι η επιβολή των συνοριακών συνθηκών φόρτισης, όπως είναι η βαρύτητα και άλλες τάσεις που προσομοιάζουν το τασικό πεδίο που επικρατεί στην πραγματικότητα. Εισάγεται η επιτάχυνση της βαρύτητας ($g = 9.81 m/s^2$) με αρνητικό πρόσημο στον κατακόρυφο άξονα z και η πυκνότητα του κοιτάσματος προκειμένου να προσδιοριστεί η βαρυτική δύναμη που του ασκείται. Απαιτούμενη είναι και η πυκνότητα του ασβεστιτικού μαρμάρου στην συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς το μοντέλο με την εισαγωγή της επιφάνειας χωρίζεται σε περιοχές με δυο διαφορετικές ορυκτολογικές συστάσεις, όπου η εφαρμογή της θα γίνει όταν χωριστεί το κοίτασμα βάση της επιφάνειας διαχωρισμού των πετρωμάτων.

3.4 Επίλυση του προβλήματος

Μέσω της επίλυσης του προβλήματος, έγινε η παρατήρηση της μετατόπισης των στύλων κατά τα διάφορα στάδια της εξόρυξης αλλά και με το πέρας αυτής. Η μετατόπιση των στύλων κατά τους άξονες x , y , z σε επιλεγμένα σημεία των στύλων, δίνει την ευχέρεια στο χρήστη να κατανοήσει τον τρόπο με τον οποίο το πέτρωμα αντιδρά όταν αφαιρούνται μέρη από το σώμα του πετρώματος. Η συμπεριφορά με την οποία αντιμετωπίζει το πέτρωμα τις μεταβολές στη μάζα του χαρακτηρίζεται ελαστικό-πλαστική και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε το πρότυπο μοντέλο του Mohr-Coulomb. Η εικόνα του σχήματος 3.7, δείχνει την πλάγια όψη του μοντέλου που κατασκευάστηκε στην αρχική φάση της εκμετάλλευσης, με το κίτρινο χρώμα να χαρακτηρίζει το πέτρωμα σαν ασβεστιτικό και το μπλε χρώμα σαν δολομιτικό μάρμαρο. Η επαφή των δύο σωμάτων θεωρούμε ότι έχει πολύ μεγαλύτερη συνοχή από τη συνοχή των δύο σωμάτων και ως εκ τούτου δεν αποκολλάται ποτέ. Σε επόμενη μελέτη θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση της ορθής και διατμητικής ακαμψίας της επαφής των δύο σωμάτων στην ευστάθεια.

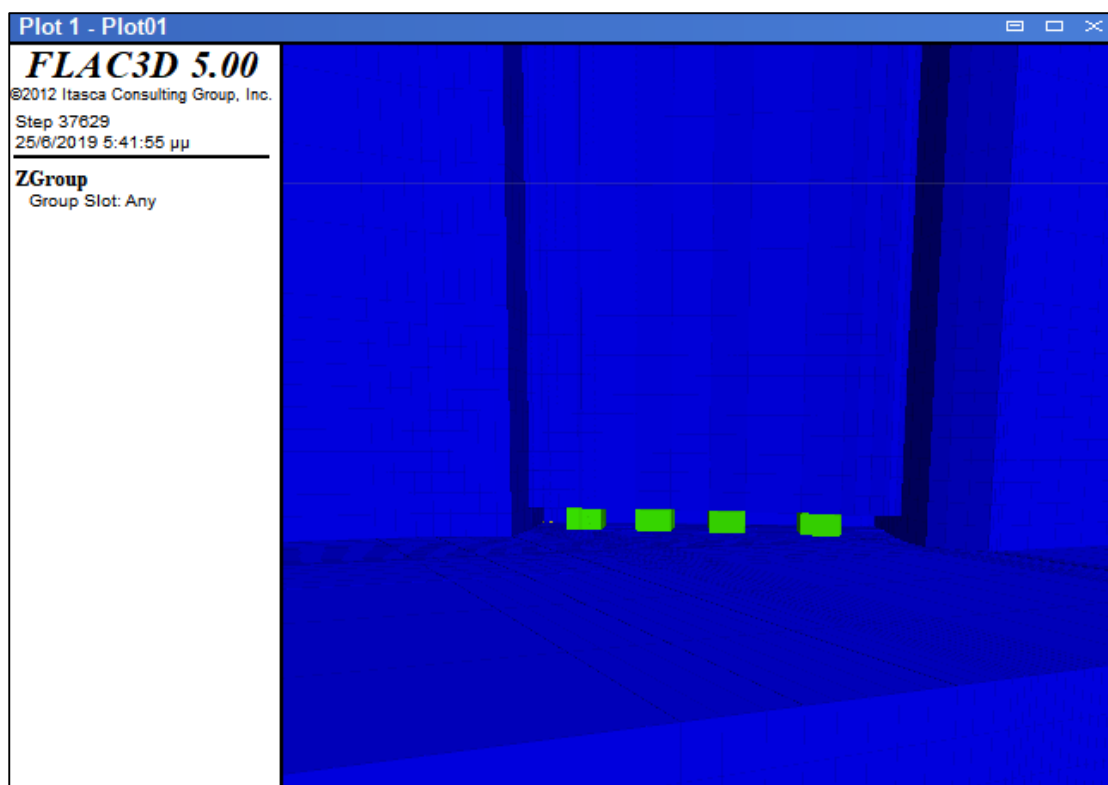


Σχήμα 3. 7: Πλάγια όψη του μοντέλου στην αρχική φάση της εκμετάλλευσης σε υψόμετρο + 888 m, όπου το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στο δολομιτικό μάρμαρο και το κίτρινο σε ασβεστιτικό.

Στο λατομείο πραγματοποιήθηκε υπόγεια εκμετάλλευση τεσσάρων ορόφων, συνολικού ύψους εικοσιτεσσάρων μέτρων (24m) και σε κάθε στάδιο, εκτελέστηκε ξεχωριστή επίλυση του προβλήματος, προκειμένου να αποτυπωθούν όλες οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν.

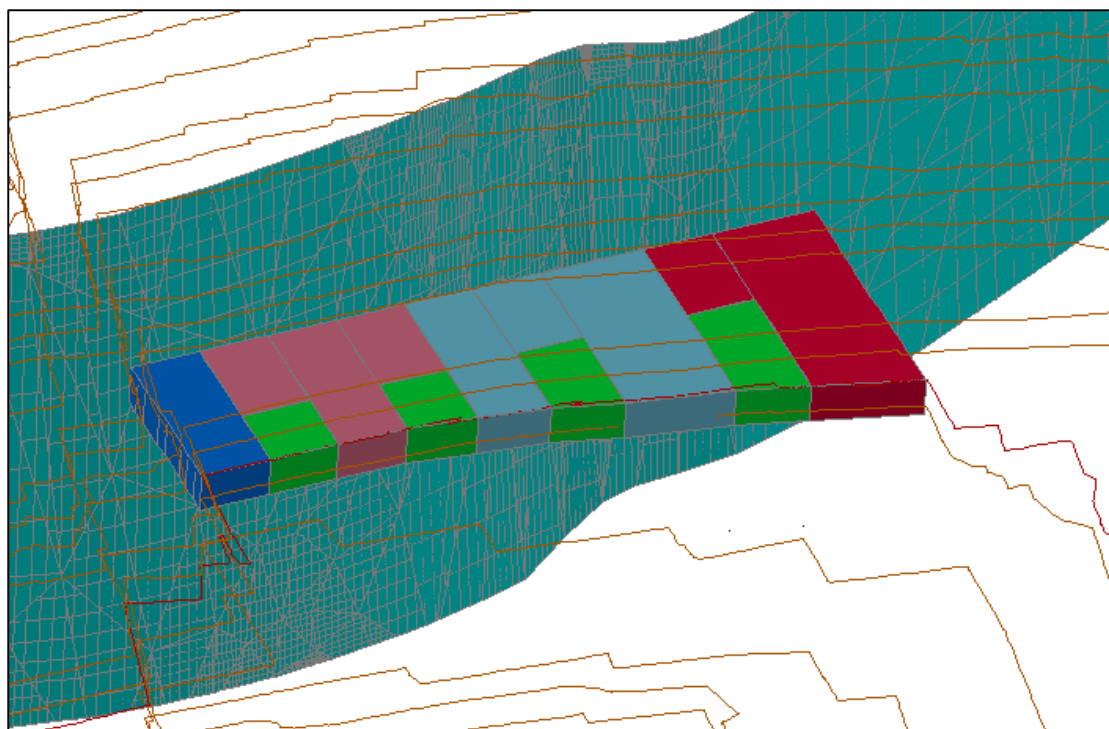
1^ο Στάδιο Εκμετάλλευσης

Το υψόμετρο το οποίο ξεκινά η εξόρυξη είναι στα + 888m και ταυτίζεται με την οροφή του πρώτου σταδίου της εκμετάλλευσης. Ανοίγονται κατά μέτωπο του κοιτάσματος στοές και αφήνονται στύλοι ύψους έξι μέτρων (6m) σε πρώτη φάση. Ταυτόχρονα, στο διάγραμμα όπου αποτυπώνεται η μετατόπιση των επιλεγμένων σημείων των στύλων σε σχέση με την εξόρυξη των όγκων μαρμάρου, φαίνεται το πρώτο σημείο το οποίο δηλώνει την έναρξη των μετατοπίσεων και στους τρεις άξονες x, y, z. Στην παρακάτω εικόνα, σχήμα 3.8, αποτυπώνονται με πράσινο χρώμα οι στύλοι που υποστήριξης, με δάπεδο + 882 m και οροφή + 888 m.



Σχήμα 3. 8: Άποψη του λατομείου όπου με πράσινο χρώμα φαίνονται οι στύλοι ύψους 6 m στην πρώτη φάση.

Η διάνοιξη των στοών ξεκινά από τα αριστερά προς τα δεξιά, με την εξόρυξη του κοιτάσματος σε ογκομάρμαρα διαστάσεων μήκους 10 m, πλάτους 2.5 m και ύψους 6 m και μήκους 15 m, πλάτους 2.5 m και ύψους 6 m στις δυο στοές αριστερά εξαιτίας της ανάπτυξης του κοιτάσματος στην περιοχή αυτή.



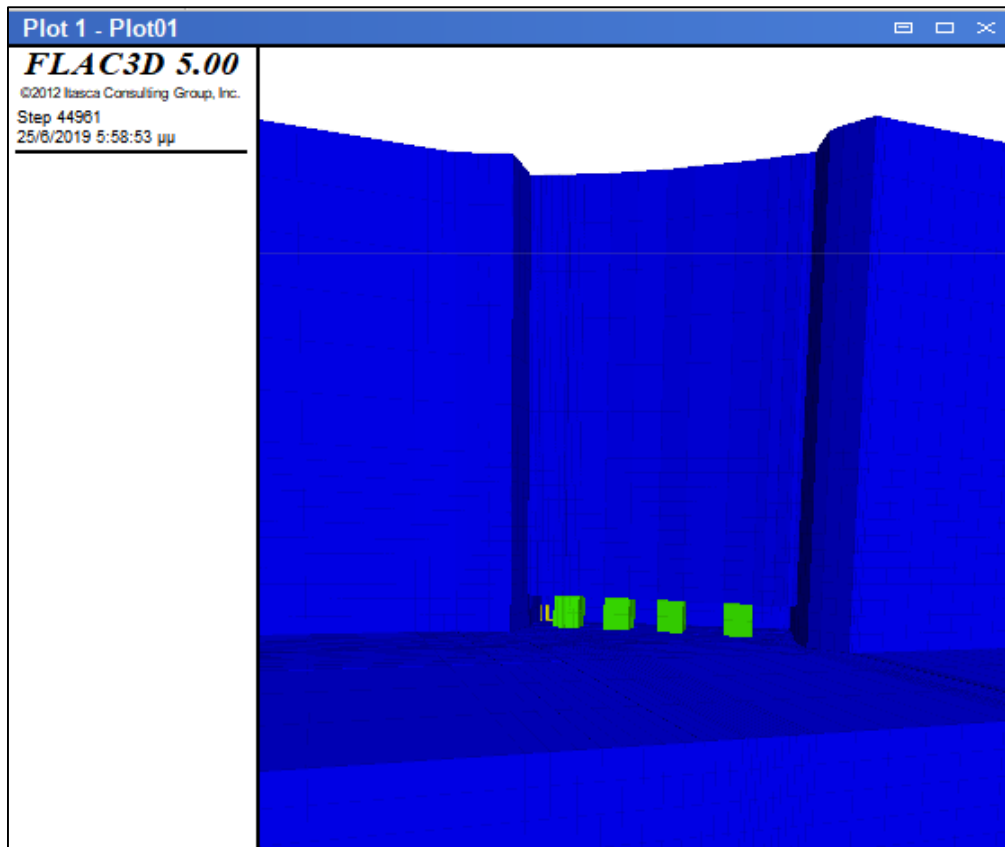
Σχήμα 3. 9: Σχέδιο του πρώτου σταδίου της εκμετάλλευσης στο AutoCAD.

Το σχήμα 3.9, απεικονίζει με διάφορα χρώματα τα στάδια εξόρυξης που θα εξορυχθούν στον 1^ο όροφο της εκμετάλλευσης και με πράσινο χρώμα του στύλους υποστήριξης ύψους 6 μέτρων. Ακόμη, στην παραπάνω εικόνα, είναι φανερή και η επιφάνεια επαφής δολομιτικού και ασβεστιτικού μαρμάρου (με σκούρο πράσινο χρώμα).

2^ο Στάδιο Εκμετάλλευσης

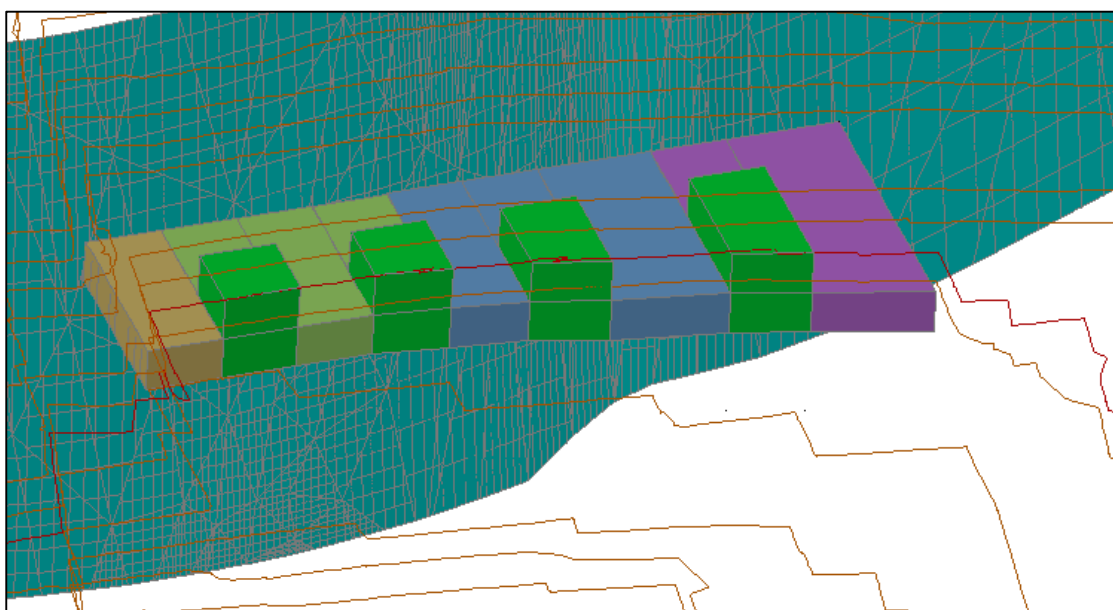
Στη δεύτερη φάση, η οροφή έχει υψόμετρο +882 m και δάπεδο +876 m. Η σειρά με την οποία εξορύσσονται τα μπλοκ μαρμάρου είναι όμοια με αυτή της προηγούμενης φάσης και το ύψος των στύλων γίνεται ίσο με δώδεκα μέτρα (12m). Στη φάση αυτή, στα διαγράμματα μετατόπισης σε σχέση με την εξόρυξη ογκομαρμάρων, προστίθενται ένα σημείο στις τέσσερις καμπύλες των αντίστοιχων στύλων.

Στο σχήμα 3.10, διακρίνεται η αύξηση του ύψος των στύλων που εγκαταλείπονται κατά 6 m, καθώς και η κατακόρυφη εξόρυξη του κοιτάσματος προς τα κάτω. Απαραίτητο ώστε να εκτελούνται οι διαδικασίες διάνοιξης των στοών σε επόμενο υψομετρικό στάδιο, είναι η διασφάλιση των δρόμων προσπέλασης για να μεταφέρεται το εξορυσσόμενο υλικό.



Σχήμα 3. 10: Άποψη του λατομείου κατά το μέτωπο της εξόρυξης μετά το πέρας του δεύτερου σταδίου της εκμετάλλευσης.

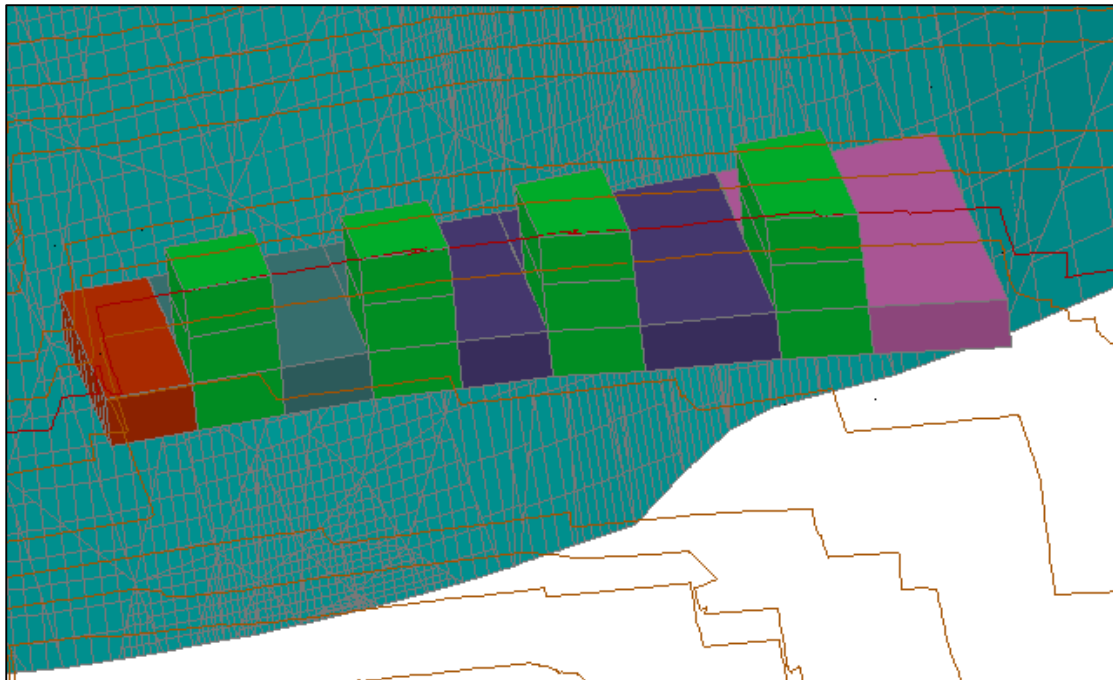
Η επόμενη εικόνα, σχήμα 3.11, δείχνει τους όγκους μαρμάρου που θα εξορυχθούν στον δεύτερο όροφο της υπόγειας εκμετάλλευσης στην επιφάνεια εργασίας του AutoCAD™. Διακρίνεται και η επιφάνεια επαφής καθώς και οι στύλοι υποστήριξη με πράσινο χρώμα, όπου σε αυτή τη φάση έχουν ύψος ίσο με 12 m.



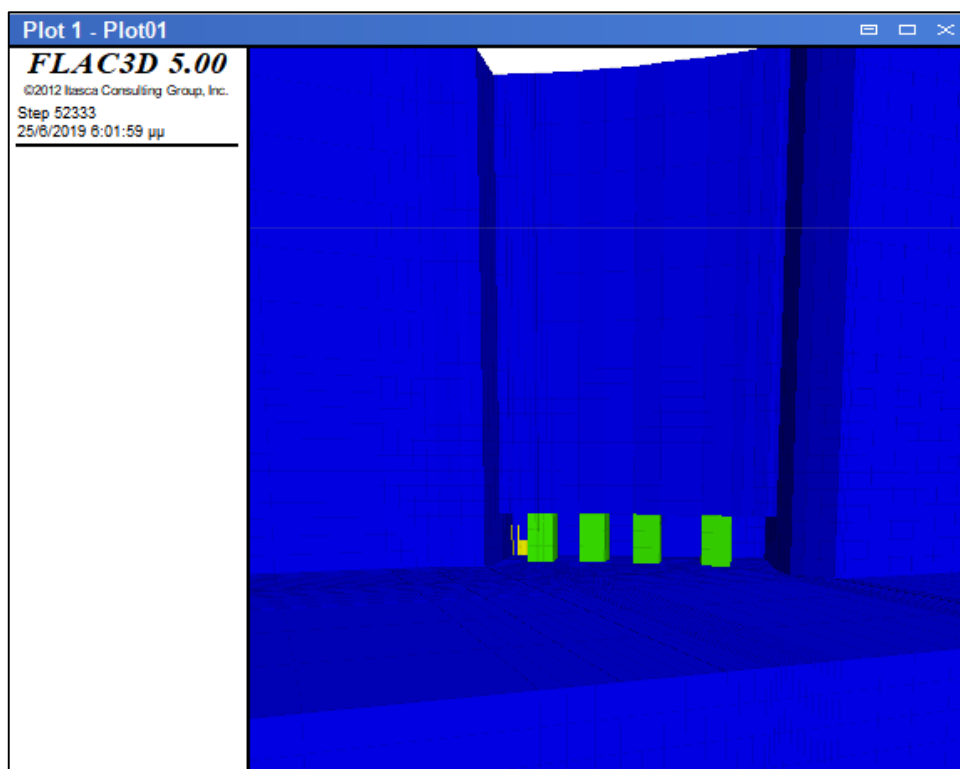
Σχήμα 3. 11: Απεικόνιση της δεύτερης φάσης της εξόρυξης με οροφή τα +882 m.

3^ο Στάδιο Εκμετάλλευσης

Επόμενη είναι η επίλυση κατά το τρίτο στάδιο της εκμετάλλευσης, σχήμα 3.12, δηλαδή τον τρίτο όροφο με οροφή +876 m και δάπεδο +870 m. Όπως και στα προηγούμενα στάδια, η εξόρυξη ακολουθεί την ίδια σειρά εξόρυξης και το ύψος των στύλων αυξάνεται στα δεκαοκτώ μέτρα (18m). Η επίλυση προσδίδει την εξέλιξη της καμπύλης στα γραφήματα μετατόπισης των αξόνων και για τους τέσσερις στύλους. Η σχεδίαση του τρίτου σταδίου της εξόρυξης δίνεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 3. 12: Στάδια εξόρυξης μαρμάρου που εξορύσσονται κατά το τρίτο στάδιο της εκμετάλλευσης.

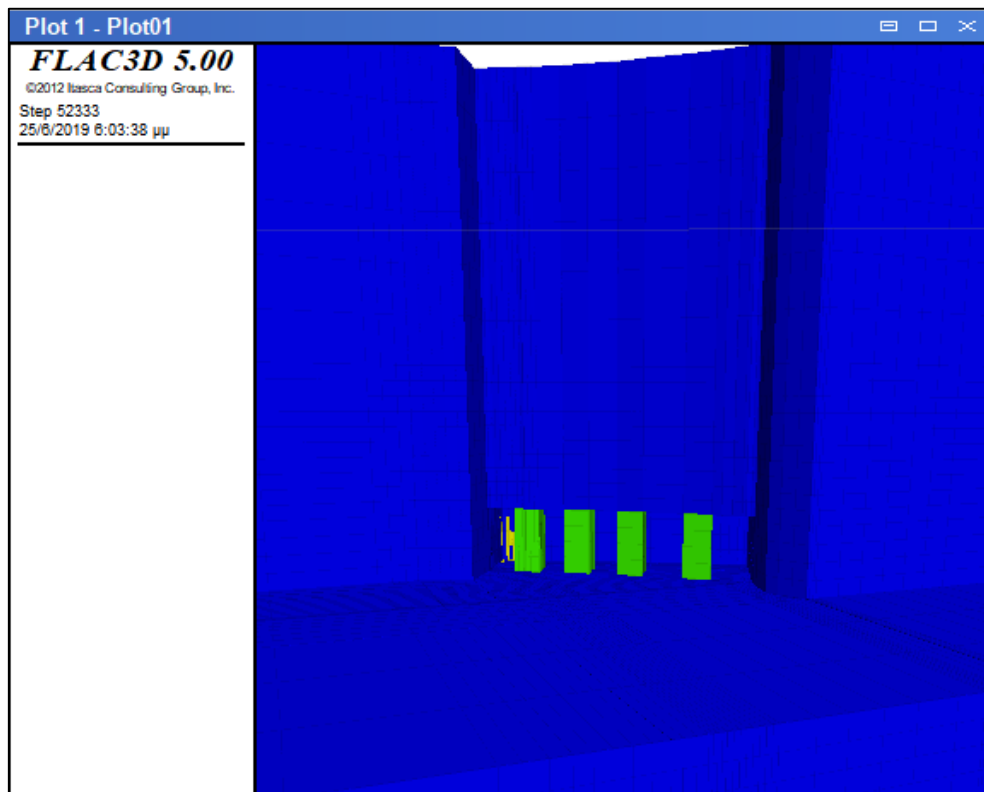


Σχήμα 3. 13: Άποψη του λατομείου στην τρίτη φάση του σταδίου εκμετάλλευσης σε υψόμετρο + 870 m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το κίτρινο χρώμα που φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 3.13, το οποίο χαρακτηρίζει το ασβεστιτικό μάρμαρο, αποτελεί πρόβλημα διακριτοποίησης του μοντέλου. Οφείλεται, πέρα από την διακριτοποίηση και στο γεγονός ότι η επιφάνεια βρίσκεται πολύ κοντά στην περιοχή αυτή αλλά και στη γεωμετρία της επιφάνειας επαφής που διαχωρίζει το κοίτασμα.

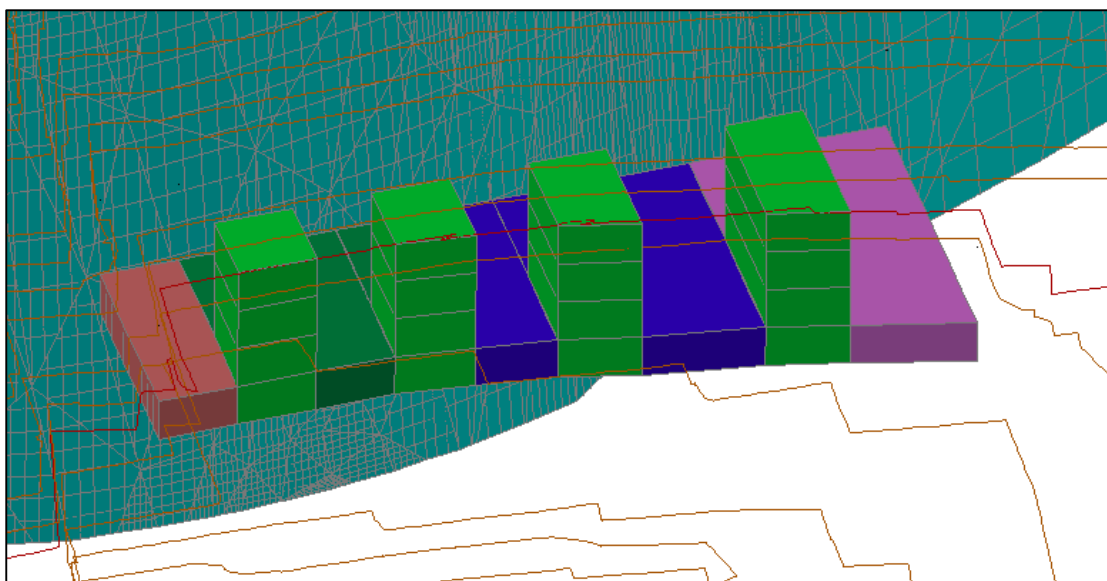
4^ο Στάδιο Εκμετάλλευσης

Τέλος, το κατώτερο υψόμετρο της εκμετάλλευσης είναι στα +864 m, δάπεδο του ορόφου, με οροφή της τέταρτης φάσης τα +870 m, σχήμα 3.14. Για τελευταία φορά, εκτελείται επίλυση του προβλήματος, και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις μετατόπισης των στύλων αποκτούν ένα ακόμα σημείο και ολοκληρώνονται.



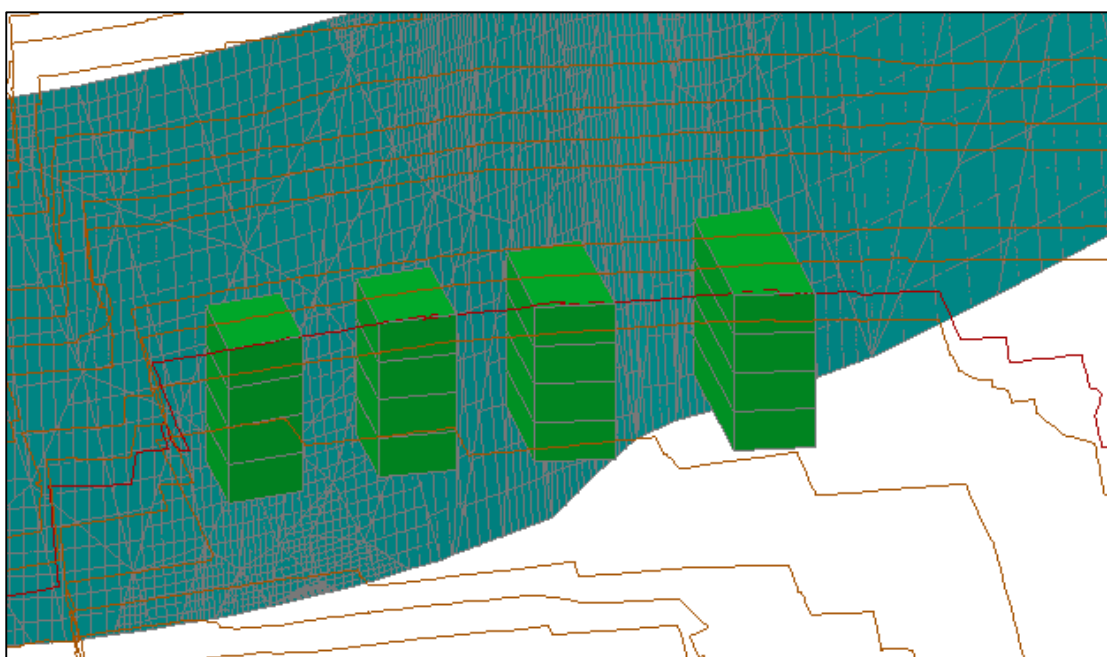
Σχήμα 3. 14: Αποψη του λατομείου στο τελικό στάδιο της εκμετάλλευσης, όπου οι στύλοι έχουν ύψος 24 m.

Όπως προαναφέρθηκε το πρόγραμμα αποδίδει τέσσερις γραφικές παραστάσεις, όπου κάθε μια από αυτές αντιστοιχούν στους τέσσερις στύλους του έργου. Για κάθε έναν από αυτούς, ορίστηκε ένα σημείο ώστε να μελετηθεί η μετατόπιση του και αυτό το σημείο βρίσκεται στο κέντρο κάθε στύλου. Μέσω αυτών των γραφημάτων, γίνεται αντιληπτό αν οι στύλοι έχουν αποτύχει ή όχι, καθώς και το μέγεθος των αλλαγών που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια της αφαίρεσης όγκων μαρμάρου από το κοίτασμα.



Σχήμα 3. 15: Απεικόνιση του σχεδιασμού του τέταρτου ορόφου εξόρυξης.

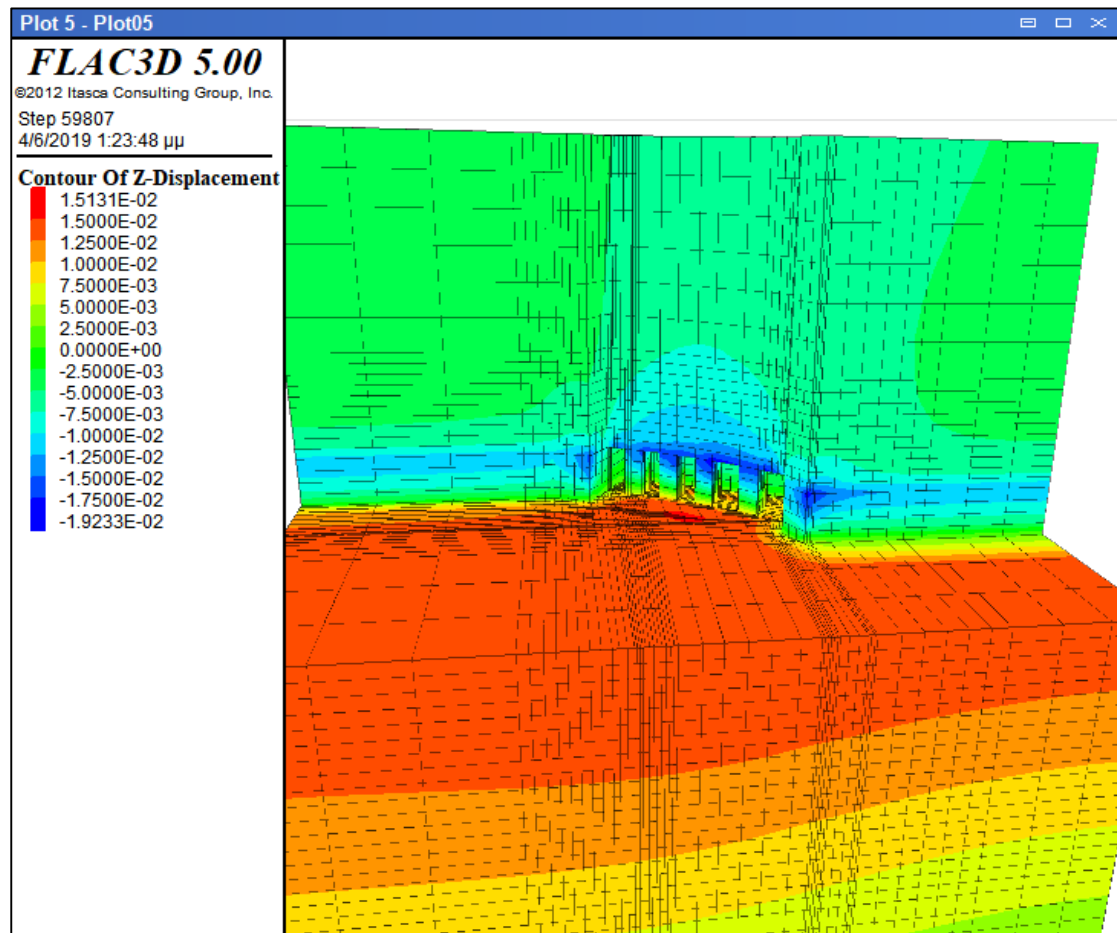
Η ακριβώς παραπάνω εικόνα, σχήμα 3.15, δείχνει το τελικό στάδιο της εξόρυξης, όπου αφαιρούνται τα τελευταία πάνελ μαρμάρου ύψους 6 m. Τέλος, το σχήμα 3.16, απεικονίζει την τελική φάση της εκμετάλλευσης και την τελική μορφή των στύλων υποστήριξης, οι οποίοι έχουν ύψος 24 m.



Σχήμα 3. 16: Αποψη των στύλων με το πέρας της εξόρυξης.

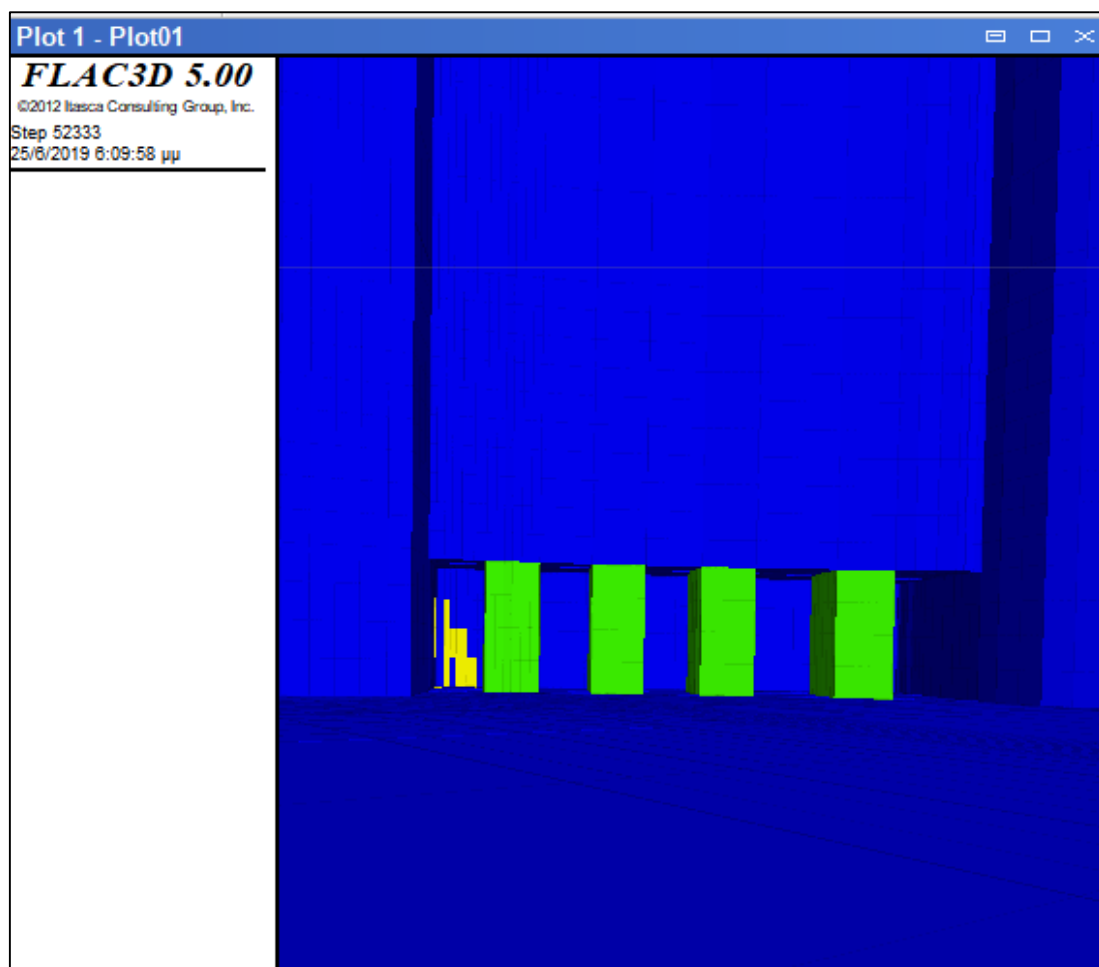
3.5 Αποτελέσματα επίλυσης του προβλήματος

Με την ολοκλήρωση της επίλυσης, αποδόθηκαν οι γραφικές παραστάσεις για τις κατακόρυφες μετατοπίσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Σχηματίστηκαν τέσσερις γραφικές παραστάσεις, μια για κάθε στύλο και εν συνεχεία μια ακόμη, η οποία αποτυπώνει τις καμπύλες για όλους τους στύλους.



Σχήμα 3. 17: Άποψη του μοντέλου με χρωματική κλίμακα που αντιστοιχεί στο μέγεθος της κατακόρυφης μετατόπισης μετά την εξόφληση του 4^{ου} ορόφου (οι μετατοπίσεις σε m).

Στην εικόνα του σχήματος 3.17, είναι φανερό ότι δεν παρατηρούνται κατακόρυφες μετατοπίσεις στο πάνω μέρος του μοντέλου και σύμφωνα με το υπόμνημα αυτές αποτυπώνονται με πράσινο χρώμα. Το μεγαλύτερο ποσοστό των θέσεων του μοντέλου, όπου παρατηρούνται κατακόρυφες μετατοπίσεις, βρίσκονται στο τελικό υψόμετρο της εκμετάλλευσης (+864 m) και πάνω, με κόκκινο έως μπλε χρώμα. Η τάξη μεγέθους των μετατοπίσεων αυτών κυμαίνεται από 7.5 mm έως 1.9 cm.



Σχήμα 3. 18: Άποψη των στύλων στην τελική φάση με τον πρώτο να βρίσκεται στα αριστερά και τον τέταρτο στα δεξιά.

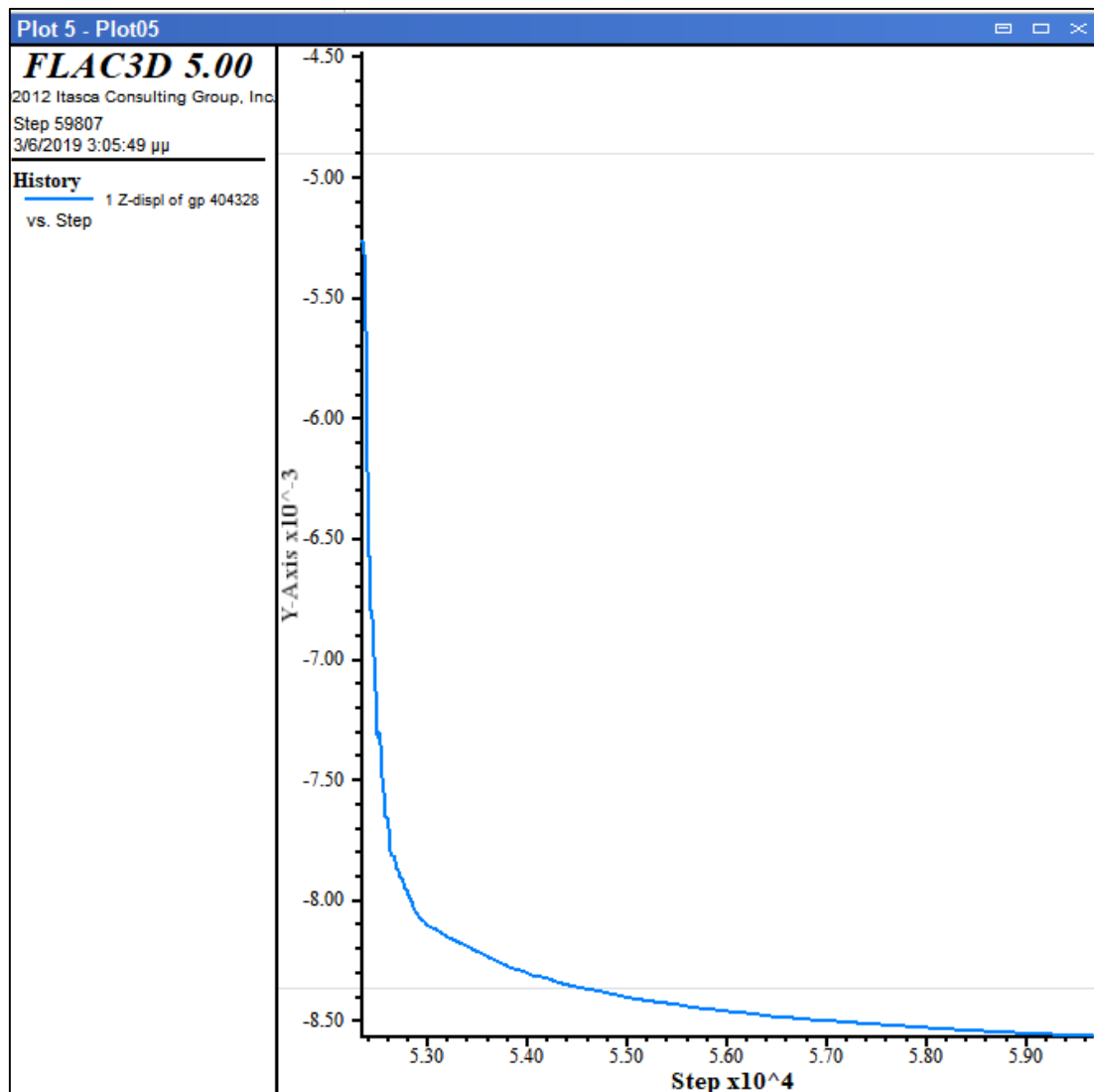
Στο σχήμα 3.18, φαίνονται οι στύλοι, αριθμώντας τους από τα αριστερά προς τα δεξιά, στους οποίους γίνεται η ανάλυση στις επόμενες σελίδες. Τα σημεία των στύλων που επιλέχθηκαν με στόχο να παρατηρηθεί η κατακόρυφη μετατόπιση αυτών, δίδονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8: Συντεταγμένες σημείων των τεσσάρων στύλων υποστήριξης.

<u>Συντεταγμένες Σημείων</u>			
	x	y	z
1ος Στύλος	494866.338	4572376.73	876
2ος Στύλος	494879.15	4572397.635	876
3ος Στύλος	494891.77	4572414	876
4ος Στύλος	494901.02	45724261	876

1^{ος} Στύλος Υποστήριξης

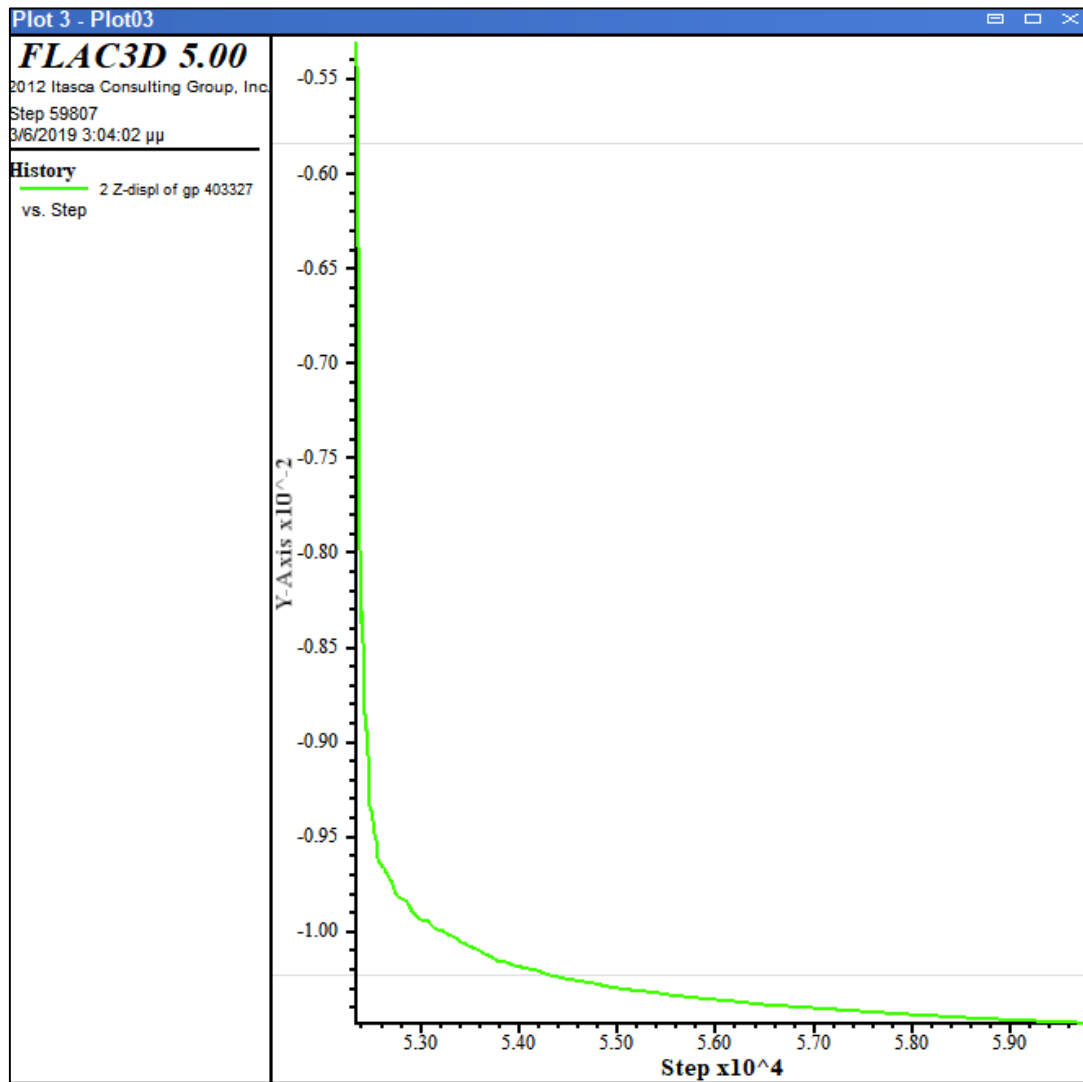
Στο παρακάτω γράφημα, σχήμα 3.19, στον άξονα y απεικονίζεται η μετατόπιση του σημείου του πρώτου στύλου κατά τον z άξονα, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο βάρους του στύλου στύλου όταν αυτός έχει το ύψος του 1^{ου} ορόφου και στον x άξονα είναι τα βήματα που εκτελέστηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος. Εννοείται ότι εξασφαλίζεται ισορροπία του συστήματος για να πάμε στο επόμενο βήμα άρα το μοντέλο είναι ευσταθές γιατί συγκλίνει σε κάθε χρονικό βήμα. Τα βήματα της επίλυσης αυξάνονται καθώς αφαιρούνται οι πάγκοι μαρμάρου. Παρατηρείται, ότι όσο προχωρούν τα στάδια της εκμετάλλευσης, το σημείο μετατοπίζεται προς τα κάτω προφανώς λόγω της συμπίεσης του στύλου που προκαλείται από τη μεταφορά των τάσεων από τις εξορυγμένες περιοχές σ' αυτόν. Όταν τα βήματα της επίλυσης είναι ίσα με 52000 το σημείο μετατοπίζεται κατακόρυφα προς τα κάτω κατά 5.50 mm και παρουσιάζει μέγιστη μετατόπιση – 8.5 mm στα 59000 βήματα της επίλυσης όπου και σταθεροποιείται.



Σχήμα 3. 19: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα χρονικά βήματα για σημείο του πρώτου στύλου μέχρι την εξόφληση του 4^{ου} ορόφους στο 59807^ο χρονικό βήμα επίλυσης.

2^{ος} Στύλος Υποστήριξης

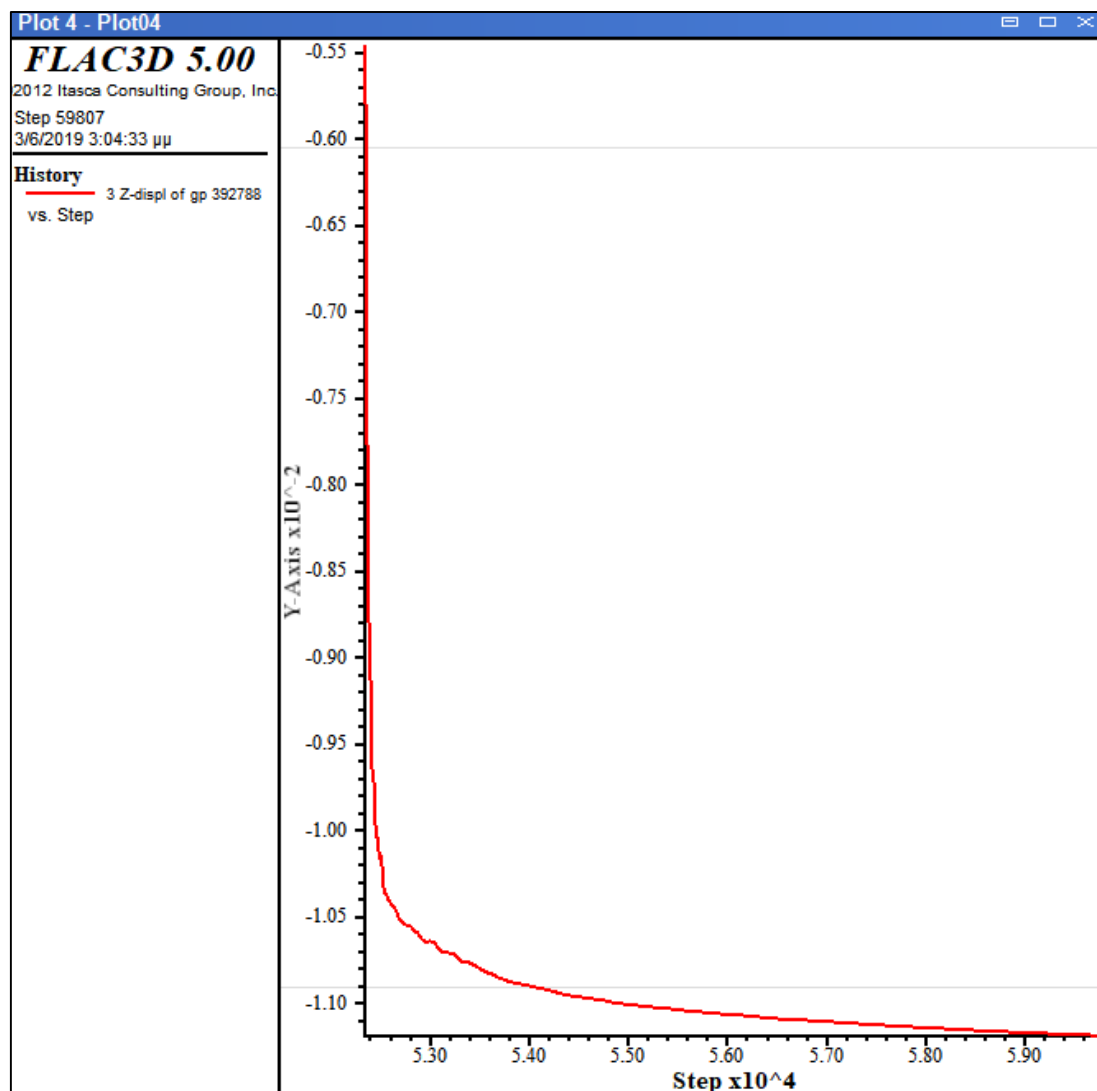
Στο γράφημα του σχήματος 3.20, δίνεται η κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου βάρους του δεύτερου στύλου συναρτήση των βημάτων επίλυσης του προβλήματος. Σημειώνεται ότι, στα 52400 βήματα της επίλυσης, η κατακόρυφη μετατόπιση του σημείου είναι 5.5 mm με φορά προς τα κάτω. Στα 59000 βήματα της επίλυσης, η κατακόρυφη μετατόπιση έχει πάρει τη μέγιστη τιμή της, ίση με -10 mm και παραμένει σε αυτή την τιμή.



Σχήμα 3. 20: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα βήματα επίλυσης για το σημείο του δεύτερου στύλου.

3^{ος} Στύλος Υποστήριξης

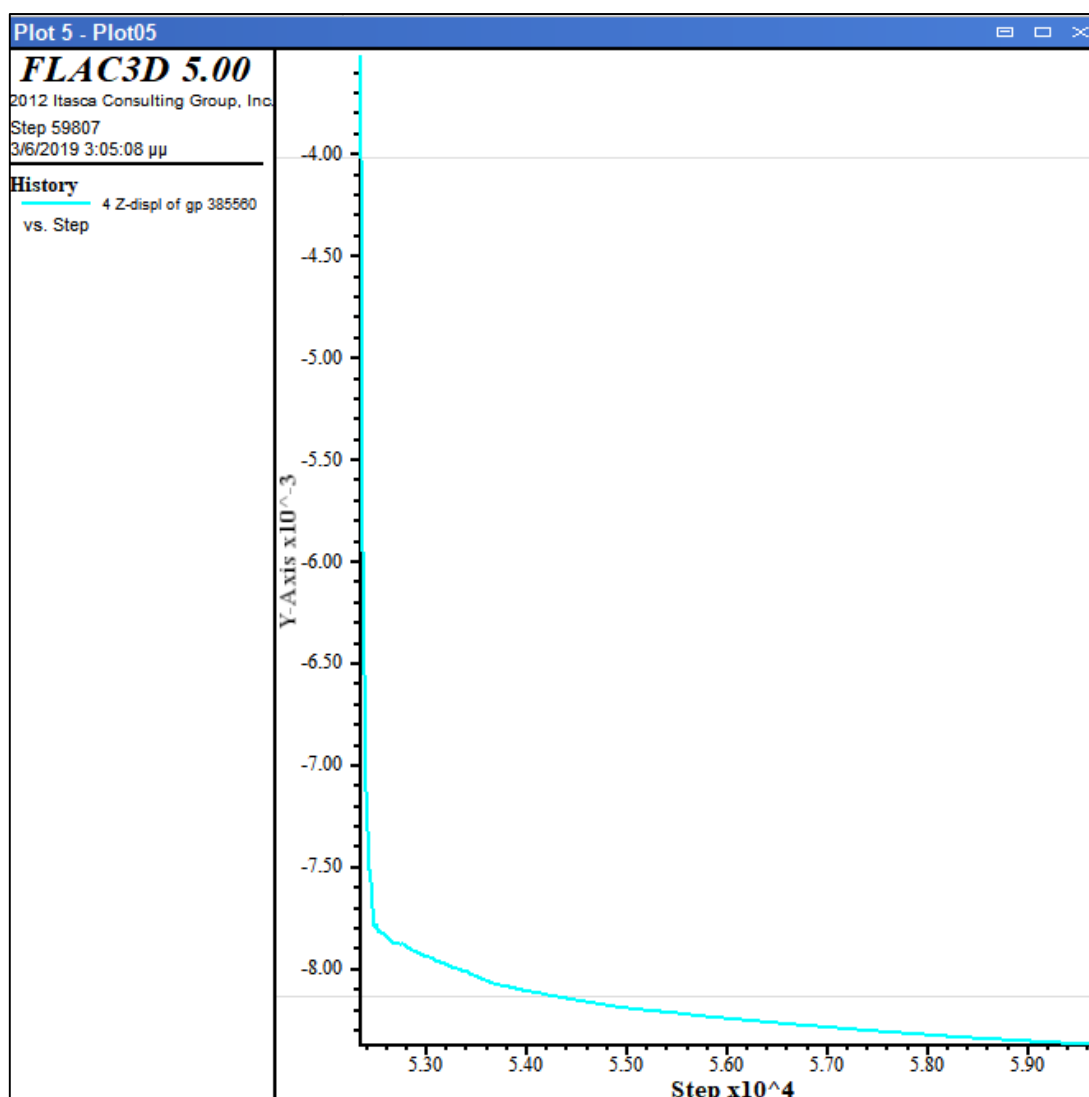
Η γραφική παράσταση του σχήματος 3.21, δίνει την αντίστοιχη μετατόπιση σχετικά με τα βήματα της επίλυσης, για τον τρίτο στύλο υποστήριξης. Κατά τα πρώτα στάδια της εκμετάλλευσης, όπου δεν έχει ολοκληρωθεί η εξόρυξη όλων των ογκομαρμάρων, η κατακόρυφη μετατόπιση για το κέντρο βάρους του τρίτου στύλου είναι -5.5 mm. Σύμφωνα με το διάγραμμα, από τα 59000 βήματα και έπειτα η μετατόπιση παραμένει ίδια και βρίσκεται να είναι -11 mm, όπου αντιστοιχεί και στην μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση του σημείου.



Σχήμα 3. 21: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα βήματα επίλυσης για σημείο του τρίτου στύλου.

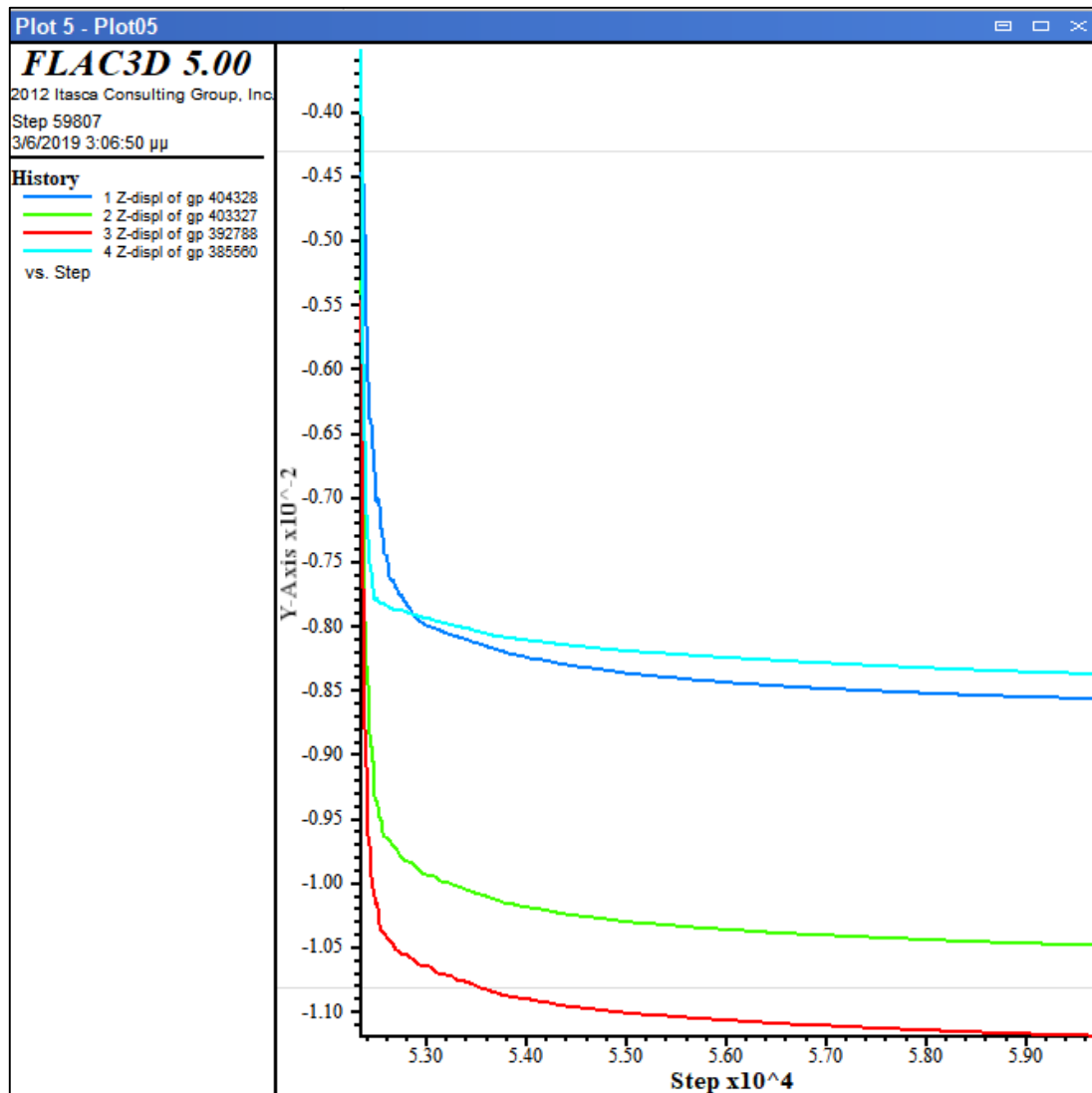
4^{ος} Στόλος Υποστήριξης

Όσον αφορά τον τέταρτο και τελευταίο στόλο υποστήριξης, δίδεται παρακάτω το ανάλογο γράφημα, σχήμα 3.22, για την κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου βάρους του στόλου. Όπως αναπαριστάται από τη γραφική παράσταση, στις πρώτες φάσεις της εξόρυξης, η κατακόρυφη μετατόπιση του σημείου είναι -4 mm, με συνεχή αύξηση έως τα -7.9 mm, όπου αλλάζει η κλίση του γραφήματος. Από τα 57000 έως τα 59000 βήματα, η κατακόρυφη μετατόπιση αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό από ότι προηγουμένως και αποκτά την τιμή -8.3 mm.



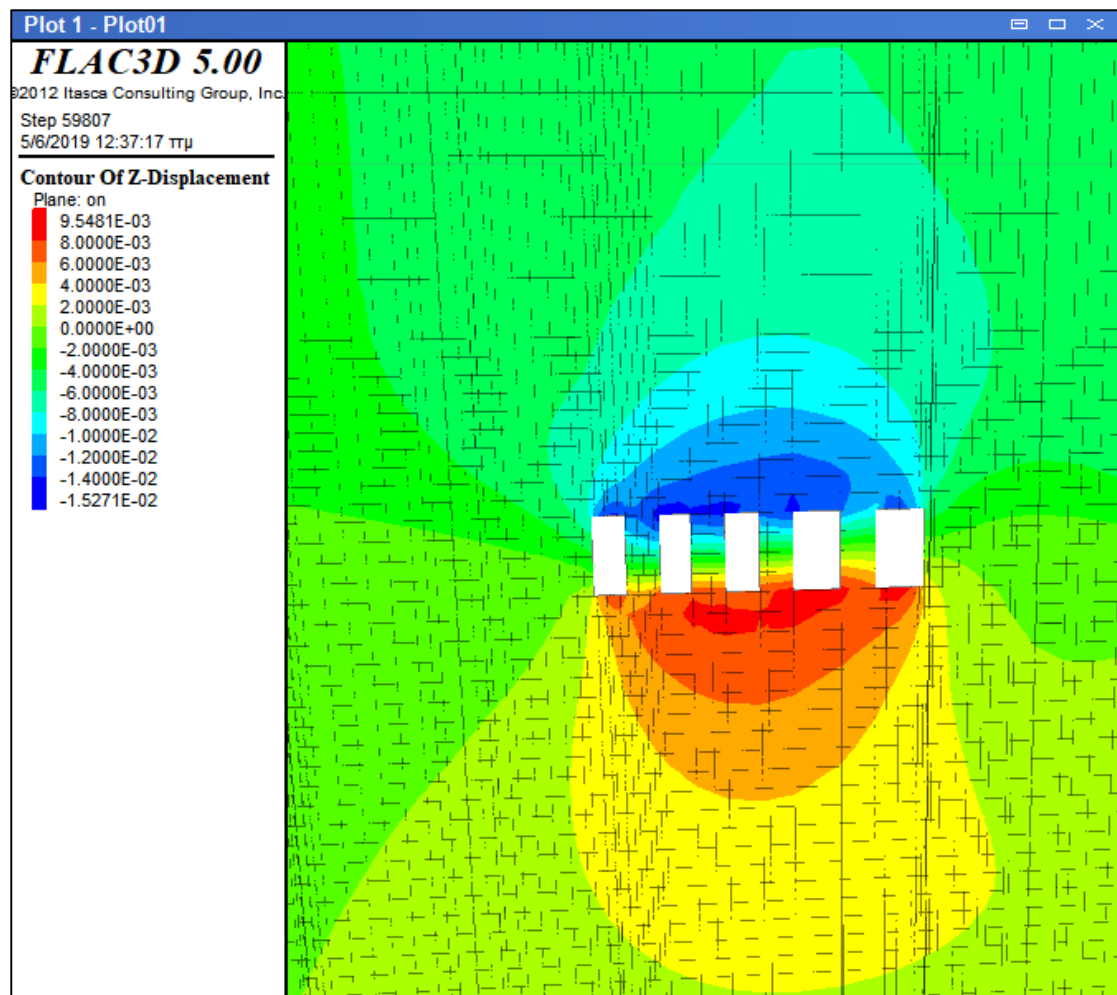
Σχήμα 3. 22: Γράφημα της κατακόρυφης μετατόπισης (m) σε σχέση με τα βήματα επίλυσης για σημείο του τέταρτου στόλου.

Παρατίθενται στο σχήμα 3.23, το γράφημα με τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων των τεσσάρων στύλων υποστήριξης. Τα σημεία του πρώτου (καμπύλη μπλε χρώματος) και του τέταρτου στύλου (καμπύλη γαλάζιου χρώματος), παρουσιάζουν μικρότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σύγκριση με τους άλλους δυο για τα ίδια βήματα επίλυσης. Η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση είναι αυτή του σημείου του τρίτου στύλου (καμπύλη κόκκινου χρώματος) στα -11 mm και η ελάχιστη στα -8.3 mm του σημείου του τέταρτου στύλου, μεταξύ των σημείων των τεσσάρων στύλων.



Σχήμα 3. 23: Διάγραμμα όπου φαίνονται οι μετατοπίσεις και στα σημεία των τεσσάρων στύλων σε σχέση με τα βήματα της επίλυσης.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι οι διαστάσεις του πρώτου και του δεύτερου στύλου είναι τετραγωνικές, με μήκος και πλάτος 10 m, ενώ των άλλων δυο το μήκος είναι 10 m και το πλάτος ξεκινά από 12.5 m για τον τρίτο στύλο και 20 m για τον τέταρτο στύλο.



Σχήμα 3. 24: Κατακόρυφη τομή του μοντέλου όπου φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις (κατά τον z άξονα σε μέτρα).

Η τομή του σχήματος 3.24, απεικονίζει την κατανομή των τελικών μετατοπίσεων που αναπαρίστανται με χρωματική κλίμακα στο κατακόρυφο επίπεδο. Στις περιοχές με πράσινο χρώμα, δεν παρουσιάζονται μετατοπίσεις, σε αντίθεση με τις περιοχές κόκκινου χρώματος, οι οποίες αντιστοιχούν στο τελικό δάπεδο της εκμετάλλευσης, όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές μετατοπίσεων της τάξης των + 9.00 mm. Τέλος, παρουσιάζονται κατακόρυφες μεταβολές, αντίθετης φοράς στην οροφή της εκμετάλλευσης με μπλε χρώμα με τιμές έως και - 1.50 cm.

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα – Προτάσεις

4.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο σχεδιασμός υπόγειας εκμετάλλευσης δολομιτικού μαρμάρου βάσει πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων και με υπολογιστικό πρόγραμμα ελέγχου στατικότητας του υπογείου μέχρι την εξόφληση του με το πρόγραμμα FLAC 3D™. Αποτυπώθηκαν οι ερευνητικές γεωτρήσεις στο τοπογραφικό του λατομείου, στο πρόγραμμα AutoCAD™ και με βάση τα αποτελέσματα τους, διαμορφώθηκε μια επιφάνεια επαφής η οποία διαχωρίζει το δολομιτικό και το ασβεστιτικό μάρμαρο. Εν συνεχεία, κατασκευάστηκε τρισδιάστατο μοντέλο στο οποίο ορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες, οι συνθήκες φόρτισης, τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των δύο ασβεστιτικών σωμάτων, η ακολουθία της υπόγειας εξόρυξης με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων και στη συνέχεια με ορθές βαθμίδες μέχρι το ύψος των στύλων περίπου 24m. Ο πρώτος όροφος ορύσσεται με τη μορφή στοών και ενδιάμεσων στύλων και οι υπόλοιποι τρείς προς τα κάτω με τη μορφή ορθών βαθμίδων.

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου, προκύπτει ότι ο σχεδιασμός είναι επιτυχής καθώς οι στύλοι, παραλαμβάνουν ασφαλώς το νέο τασικό πεδίο μετά την εξόρυξη του κοιτάσματος. Οι τελικές μετακινήσεις που έλαβαν χώρα κατά τον κατακόρυφο άξονα, επηρεάζονται από τις διαστάσεις των στύλων άλλα δε θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια του έργου.

4.2 Προτάσεις

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε, επιδέχεται βελτιώσεις ώστε να αποδώσει καλύτερα αποτελέσματα και να ξεπεράσει διάφορα προβλήματα που εντοπίστηκαν κατά την διεξαγωγή της εργασίας. Αρχικά, όσο αφορά τη γεωλογική χαρτογράφηση του λατομείου, η αύξηση του πλήθους των γεωτρήσεων κοντά στα όρια της εκμετάλλευσης και στα ανάλογα υψόμετρα, οδηγεί στη βέλτιστη σκιαγράφηση της δομής του κοιτάσματος, επομένως σε αποδοτικότερο σχεδιασμό και υψηλότερη απόληψη μεταλλεύματος. Επιπρόσθετα, παρουσιάστηκαν εμπόδια τόσο στην απόδοση της επιφάνειας επαφής ασβεστιτικού – δολομιτικού μαρμάρου στο AutoCAD™ όσο και στην επιφάνεια εργασίας του FLAC 3D™. Στη φάση του σχεδιασμού στο AutoCAD™ έπρεπε να αποδοθεί η επιφάνεια με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να είναι δυνατή η προσαρμογή της στο επόμενο πρόγραμμα, χωρίς να μεταβληθεί η γεωμετρία της. Αυτό κατορθώθηκε με την δημιουργία της επιφάνειας επαφής σε μορφή πλέγματος (mesh) και εν συνεχεία σε ειδικευμένη μορφή πλέγματος (γνωστή ως polyface mesh) στο AutoCAD™. Το κυριότερο εμπόδιο, που εμφανίστηκε κατά την διεξαγωγή της εργασίας, αποτέλεσε η κατασκευή του μοντέλου σε τρισδιάστατη μορφή στο FLAC 3D™. Η μοντελοποίηση κρίθηκε ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς ο κάνναβος πάνω στο οποίο αναπτύχθηκε το μοντέλο, αντιστοιχεί στο σχεδιασμό της εκμετάλλευσης και στη γεωμετρία του κοιτάσματος. Η γεωμετρία του καννάβου λοιπόν, έκανε δύσκολη τη διακριτοποίηση του μοντέλου και τον διαχωρισμό του σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών, καθώς αντιστοιχεί σε μη κανονικοποιημένα γεωμετρικά σχήματα αλλά σε πραγματικές μορφές που συναντώνται στη φύση. Χρειάστηκε η πύκνωση των ζωνών των πεπερασμένων διαφορών στον κάνναβο του μοντέλου, για να αποδοθούν στα κατάλληλα σημεία του πετρώματος, οι αντίστοιχες φυσικομηχανικές του ιδιότητες. Τέλος, το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης επηρεάζεται σημαντικά με την πύκνωση των ζωνών των πεπερασμένων διαφορών.

Πιο συγκεκριμένα, δίνονται οι παρακάτω προτάσεις:

- ❖ Εκτενής γεωτρητική ερευνητική μελέτη πριν από κάθε έργο για την καλύτερη κατανόηση της ανάπτυξης της δομής και της κατάστασης του κοιτάσματος.
- ❖ Κατασκευή διεπιφανειών, γεωλογικών σχηματισμών, ρηγμάτων κλπ., σε μορφές πλεγμάτων ώστε να επιτυγχάνεται η άρτια απόδοση τους σε σχέση με την πραγματικότητα και να είναι δυνατή η μεταχείριση τους σε διάφορα προγράμματα (FLAC 3D™).
- ❖ Χρήση εξειδικευμένων λογισμικών διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών (π.χ. KUBRIX).
- ❖ Επίλυση της προσομοίωσης σε υπολογιστικά συστήματα υψηλής απόδοσης, με επεξεργαστές υψηλής μνήμης RAM , για την επιτάχυνση της επίλυσης, μειώνοντας τον υπολογιστικό χρόνο.
- ❖ Μελέτη προσομοίωσης με διαφορετικούς καταστατικούς νόμους και κριτήρια αστοχίας.
- ❖ Δημιουργία μοντέλου με διαχωρισμό του μαρμάρου συναρτήσει του ποσοστού λευκότητας του.
- ❖ Εισαγωγή ρωγματώσεων και περιοχές στις οποίες εμφανίζεται αποσασθρωμένο υλικό και επίλυση της προσομοίωσης βάσει αυτών των συνθηκών.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Bullock, R.L., 1994, 'Underground hard rock continuous mining', Mining Engineering, November 1994
2. Brady B. H. G. and Brown E. T. (1993), 'Rock Mechanics for underground mining', 3rd Edition, Kluwer Academic Publishers.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Γαλετάκης Μ. (2014), Υγιεινή και Ασφάλεια σε Μεταλλευτικά και Υπόγεια Έργα, Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Γαλετάκης Μ. (2013), Σχεδιασμός Εκμεταλλεύσεων Ορυκτών Πόρων με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Δηλγεράκη Ζ., (2014), Μελέτη Πετρογραφικών και Φυσικοχημικών Ιδιοτήτων Μαρμαροφόρων Κοιτασμάτων από Περιοχές των Νομών Δράμας και Σερρών, Πτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
4. Εξαδάκτυλος Γ. (2005), Σχεδιασμός Συστημάτων Υπόγειων Έργων για την Εκμετάλλευση Μεταλλευτικών Κοιτασμάτων, Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
5. Μαρίνος Β. , Γεωλογικές και Περιβαλλοντικές Μελέτες Τεχνικών Έργων, Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
6. Μπενάρδος Α. (2014), Μέθοδοι Υπόγειας Εκμετάλλευσης – Ελληνικές Εκμεταλλεύσεις, Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. Παπαχρήστος Ε. (2011), Τρισδιάστατη Αριθμητική Διερεύνηση Εντατικοπαραμορφωσιακού Πεδίου Σήραγγας σε Ημίσκληρα Πετρώματα, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. Χατζηπαναγής Ιωάν., (1991), Η Γεωλογική Δομή της Ευρύτερης Περιοχής Του Φαλακρού Όρους, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Διαδίκτυο

<https://knowledge.autodesk.com>

<https://www.orykta.gr>

<https://www.itasca.com>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

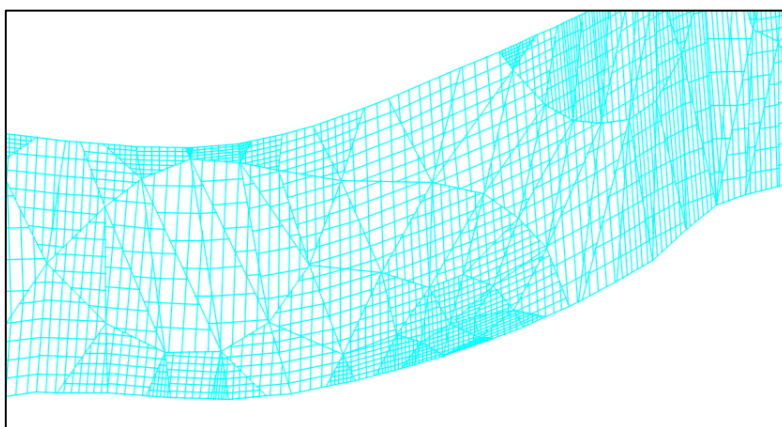
Κατασκευή επιφάνειας επαφής μεταξύ δολομιτικού και ασβεστιτικού μαρμάρου

Αρχικά, χρησιμοποιώντας ως οδηγό τις θέσεις των γεωτρήσεων με ασβεστιτικό μάρμαρο, σχεδιάστηκε μια κλειστή γραμμή που αποδίδει τον διαχωρισμό του ασβεστιτικού και του δολομιτικού μαρμάρου. Η κλειστή αυτή γραμμή, έγινε απλή επιφάνεια στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος με την εντολή “surface”.

Για να γίνει η μετατροπή της επιφάνειας σε επιφάνεια τύπου mesh, έγιναν τα παρακάτω βήματα:

- Επιλέχθηκε η εντολή “extract objects from surface”, ώστε να χωριστεί η επιφάνεια σε γεωμετρικά τρίγωνα.
- Έπειτα, με την εντολή “convert objects to a surface” (CONVTOSSURFACE) τα τρίγωνα μετατρέπονται σε τριγωνικές επιφάνειες..
- Χρησιμοποιήθηκε το “union”, για να ενωθούν οι τριγωνικές επιφάνειες σε μια επιφάνεια.
- Η τελική μορφή πλέγματος mesh, έγινε με την χρήση της εντολής “smooth object”(MESHSMOOTH).

Προκειμένου να γίνει η αναγνώριση της επιφάνειας που σχεδιάστηκε στο AutoCADTM από το FLAC 3DTM, ήταν απαραίτητη η μετατροπή της επιφάνειας από mesh σε polyface mesh στο AutoCADTM. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω της αντίστοιχης εντολής “polyface mesh” του προγράμματος, ορίζοντας 4 κορυφές της επιφάνειας για κάθε έδρα της. Στην επόμενη εικόνα, Σχήμα Α.1, φαίνεται η επιφάνεια επαφής στο πρόγραμμα AutoCADTM.



Σχήμα Α. 1: Η επιφάνεια επαφής σε μορφή τύπου mesh.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Εισαγωγή επιφάνειας επαφής στο πρόγραμμα FLAC 3D™

Για να γίνει η εισαγωγή της επιφάνειας στο μοντέλο, γράφεται στον κώδικα της επίλυσης η εντολή “geometry import” και το όνομα του αρχείου σε μορφή “dxf” που περιέχει την επιφάνεια επαφής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Κώδικας επίλυσης του προβλήματος στο FLAC 3D™

Παρατίθεται ο κώδικας με τον οποίο εκτελέστηκε η προσομοίωση της εξόρυξης. Οι γραμμές που ξεκινούν με ερωτηματικό (;), θεωρούνται σχόλια και δεν επηρεάζουν την διαδικασία της επίλυσης.

```
>>
```

```
new
```

```
restore 'Fotini_Diamanti.f3sav'
```

```
geometry import pfacemesh_diamanti.dxf
```

```
group zone LIMESTONE range geometry pfacemesh_diamanti count 1 direction(1,0,0)
```

Αρχικά, καλείται το μοντέλο με το όνομα του με την εντολή “restore” και στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή της επιφάνειας τύπου πλέγματος (polyface mesh) αποθηκευμένη σαν dxf αρχείο στο AutoCAD™, με την εντολή “ geometry import”. Τέλος, το μοντέλο χωρίζεται σε δολομιτικό και ασβεστιτικό μάρμαρο, σύμφωνα με τη γεωμετρία της επιφάνειας επαφής, χρησιμοποιώντας το μοναδιαίο διάνυσμα.

```
model mech mohr
```

```
prop bulk=8.3333e9 shear =3.84615385e9 fric=40
```

```
prop coh 10e6 tens=6e6
```

```
set grav 0 ,0 ,-9.81
```

```
ini dens = 2900
```

Στο σημείο αυτό, ορίζεται το μοντέλο να είναι Mohr Coulomb για το δολομιτικό μάρμαρο και ορίζονται οι αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες που είναι απαραίτητες για την επίλυση και η πυκνότητα του μαρμάρου.

```
model mech mohr range group LIMESTONE
```

```
prop bulk=5.8333e9 shear =2.69230769e9 fric=36 range group LIMESTONE
```

```
prop coh 5e6 tens=7e6 range group LIMESTONE
```

```
set grav 0 ,0 ,-9.81
```

```
ini dens = 2800 range group LIMESTONE
```

Αντίστοιχα, για το ασβεστίτικο μάρμαρο, επιλέγεται το μοντέλο να είναι Mohr Coulomb και προσδίδονται σε αυτό οι ανάλογες μηχανικές ιδιότητες του.

```
fix x range x -0.001,0.001
```

```
fix x range x 4.95049e5,4.95051e5
```

```
fix x range x 4.94697e5,4.94699e5
```

```
fix y range y -0.001,0.001
```

```
fix y range y 4.572209e6,4.57221e6
```

```
fix y range y 4.572565e6,4.572567e6
```

```
fix z range z -0.001,0.001
```

```
fix z range z 639,641
```

Γράφοντας της εντολή “fix” και την επιθυμητή συντεταγμένη, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες για το μοντέλο.

```
;pause
```

```
solve
```

```
save 'Boundaries.f3sav'
```

```
;pause
```

Στο στάδιο αυτό γίνεται η πρώτη επίλυση του προβλήματος και αποθηκεύεται το αντίστοιχο μοντέλο.

```
group zone T1 range group Front_1 z 887.9 1040.1
```

```
model mech mohr null range group T1
```

```
solve
```

```
save 'Latomeio.f3sav'
```

```
ini xdisp 0 ydisp 0 zdisp 0
```

Μετονομάστηκε μια επιλεγμένη περιοχή του μοντέλου γράφοντας την εντολή “ group zone T1 range group ” με το νέο όνομα να είναι το T1. Αμέσως μετά, έγινε αφαίρεση του συγκεκριμένου τμήματος του μοντέλου, μέσω της εντολής “null” και επιλύθηκε πάλι το πρόβλημα.

Πολύ σημαντικό για την παρατήρηση των μετατοπίσεων των σημείων των στύλων που επιλέχθηκαν αργότερα, είναι ο μηδενισμός των μετατοπίσεων των σημείων κατά x, y και z, όπως φαίνεται στην παραπάνω γραμμή του κώδικα.

```
;Extraction from 888m to 882m
```

```
group zone Stage1 range group L876 Z 881.9 888.1 x 4.94870400e5 4.95050e5 y  
4.572210e6 4.572346900e6
```

```
group zone Stage1 range group L876 Z 881.9 888.1 x 4.94873953e5 4.95050e5 y  
4.572346900e6 4.572350e6
```

```
group zone Stage1 range group L876 Z 881.9 888.1 x 4.94950048e5 4.95050500e5 y  
4.572447517e6 4.572566e6
```

```
group zone Stage1 range group Front_2e Z 881.9 888.1
```

```
group zone Stage1 range group Front_1b Z 881.9 888.1
```

```
group zone Stage1 range group Front_1 Z 881.9 888.1
```

```
group zone Stage1 range group PORTALS z 881.9 888.1
```

```
group zone Stage1 range group Un_exc z 881.9 888.1
```

```
model mech mohr null range group Stage1
```

```
solve
```

```
save ' Fotini_Diamanti _STAGE1.f3sav'
```

```
;Extraction from 882m to 876m
```

```
group zone Stage2 range group L870 Z 875.9 882.1 x 4.94870400e5 4.95050e5 y  
4.572210e6 4.572346900e6
```

```
group zone Stage2 range group L870 Z 875.9 882.1 x 4.94873953e5 4.95050e5 y  
4.572346900e6 4.572350e6
```

```
group zone Stage2 range group L870 Z 875.9 882.1 x 4.94950048e5 4.95050500e5 y  
4.572447517e6 4.572566e6
```

```
group zone Stage2 range group Front_2e Z 875.9 882.1
```

```
group zone Stage2 range group Front_1b Z 875.9 882.1
```

```

group zone Stage2 range group Front_1 Z 875.9 882.1 x 4.95050e5 4.94859280e5 y
4.572446e6 4.572351e6
group zone Stage2 range group PORTALS Z 875.9 882.1
group zone Stage2 range group Un_exc Z 875.9 882.1
model mech mohr null range group Stage2
;pause
solve
save 'Fotini_Diamanti _STAGE2.f3sav'

```

```

;Extraction from 876m to 870m
group zone Stage3 range group L864 Z 869.9 876.1 x 4.94870400e5 4.95050e5 y
4.572210e6 4.572346900e6
group zone Stage3 range group L864 Z 869.9 876.1 x 4.94873953e5 4.95050e5 y
4.572346900e6 4.572350e6
group zone Stage3 range group L864 Z 869.9 876.1 x 4.94950048e5 4.95050500e5 y
4.572447517e6 4.572566e6
group zone Stage3 range group Front_1 Z 869.9 876.1 x 4.94859280e5 4.94950048e5
y 4.572350e6 4.572447517e6
group zone Stage3 range group Front_1 Z 869.9 876.1 x 4.94948102e5 4.95050e5 y
4.572350e6 4.572447517e6
group zone Stage3 range group PORTALS Z 869.9 876.1
group zone Stage3 range group Un_exc Z 869.9 876.1
model mech null range group Stage3
;pause

```

```

solve
save 'Fotini_Diamanti _STAGE3.f3sav'
;Extraction from 870m to 864m

```

```

group zone Stage4 range group Front_2c Z 863.9 870.1 x 4.94870400e5 4.95050e5 y
4.572210e6 4.572352667e6
group zone Stage4 range group Front_2c Z 863.9 870.1 x 4.94873953e5 4.95050e5 y
4.572346900e6 4.572350e6

```



```

group zone Stage4 range group Front_1b Z 863.9 870.1 x 4.94950048e5 4.95050500e5
y 4.572447517e6 4.572566e6
group zone Stage4 range group Front_1 Z 863.9 870.1 x 4.94869360e5 4.95050e5 y
4.572317956e6 4.572350e6
group zone Stage4 range group Front_1c Z 863.9 870.1 x 4.94948963e5 4.95050500e5
y 4.572210e6 4.572316e6
group zone Stage4 range group Front_1 Z 863.9 870.1 x 4.94859280e5 4.94950048e5
y 4.572350e6 4.572447517e6
group zone Stage4 range group Front_1 Z 863.9 870.1 x 4.94948102e5 4.95050e5 y
4.572350e6 4.572447517e6
group zone Stage4 range group PORTALS Z 863.9 870.1
group zone Stage4 range group Un_exc Z 863.9 870.1
model mech null range group Stage4
;pause

save 'Fotini_Diamanti _STAGE4.f3sav'

```

Στις προηγούμενες σειρές του κώδικα επίλυσης, επαναλαμβάνεται η διαδικασία αφαίρεσης των μπλοκ μαρμάρων για κάθε όροφο και ακριβώς μετά την κάθε αφαίρεση ογομαρμάρων γίνεται επίλυση του προβλήματος και αποθήκευση του αντίστοιχου μοντέλου.

```

hist add gp zdisp 4.94866338e5,4.572376730e+06,876
hist add gp zdisp 4.94879150e5,4.572397635e+06,876
hist add gp zdisp 4.94891770e5,4.572414e+06,876
hist add gp zdisp 4.94901020e5,4.572426100e+06,876
hist add ratio
solve
plot hist 1
plot hist 2
plot hist 3
plot hist 4

```

Στις τελευταίες γραμμές του κώδικα, ορίζονται τα σημεία των στύλων στα οποία γίνεται η μελέτη των μετατοπίσεων τους κατά τον z άξονα, πραγματοποιείται για τελευταία φορά η επίλυση του προβλήματος και δίνεται εντολή (plot) να παραχθούν οι ανάλογες γραφικές παραστάσεις.

