



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ
ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Τομέας Δυναμικής
Τεκτονικής και
Εφαρμοσμένης Γεωλογίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΑΙΘΡΙΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ



Εκπόνηση: Σαράντου Ευαγγελία
Υπεύθυνη Καθηγήτρια: Σταυροπούλου Μαρία

Αθήνα 2021

Ευχαριστίες

Για την πραγματοποίηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κα. Μαρία Σταυροπούλου, Αναπληρώτρια καθηγήτρια, του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την συνεργασία, την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Δάφνη, για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν όλα τα χρόνια της ζωής μου και που είναι μαζί μου σε κάθε βήμα.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Κύριο αντικείμενο της είναι η ανάλυση πιθανής σφηνοειδούς αστοχίας σε λατομείου δολομιτικού μαρμάρου της Βόρειας Ελλάδας κατά την υπόγεια και υπαίθρια εκμετάλλευση του.

Αρχικά στα πρώτα κεφάλαια περιγράφονται αναλυτικά οι γεωτεκτονικές ενότητες που δομούν την περιοχή μελέτης και η πλούσια ρηξιγενής και πτυχωσιγενής τεκτονική της, οι οποίες επηρεάζουν την διαδικασία εξόρυξης του μαρμάρου. Έπειτα γίνεται αναφορά στην σεισμικότητα της περιοχή.

Με βάση αυτά τα στοιχεία προχωράμε στην ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας και στην εκτενή περιγραφή των ασυνεχειών και των χαρακτηριστικών τους. Εν συνεχεία περιγράφονται οι καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών με εκτενέστερη αναφορά στις σφηνοειδείς αστοχίες. Ακολούθως κάνοντας χρήση όλων των παραπάνω πληροφοριών αναλύονται οι σφήνες που μορφώνονται τόσο κατά την υπόγεια εκμετάλλευση του λατομείου, όσο και κατά την υπαίθρια και υπολογίζονται οι συντελεστές ασφαλείας.

Λέξεις Κλειδιά

Λατομείο, Μάρμαρο, Ευστάθεια, Βραχομάζα, Σφήνα, Συντελεστής Ασφαλείας, Υπόγεια Εκμετάλλευση

Abstract

This graduate work was carried out within the framework of the undergraduate program of the Department of Geology and Geoenvironment of the National and Kapodistrian University of Athens. Its main object is the analysis of a possible wedge failure in a quarry of dolomite marble of Northern Greece during its underground and surface exploitation. Initially, the first chapters describe in detail the geotectonic units that structure the study area and its tectonic that affect the process of marble extraction. Then reference is made to the seismicity of the area. Based on these data we proceed to the analysis of the mechanical properties of the rock and the extensive description of their discontinuities and characteristics. The rock falls are then described with a more extensive reference to wedge failures. Subsequently, using all the above information, the wedges that form both during the underground exploitation of the quarry and outdoor exploitation, and the safety factors are calculated.

Key words

Quarry, Marble, Stability, Rock mass, Wedge, Factor of Safety, Underground excavation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>1.</u> Εισαγωγή.....	1
1.1. Λατομικά ορυκτά.....	1
<u>2.</u> Γεωλογία.....	2
2.1. Γενικά.....	3
2.2. Γεωλογία περιοχής εργασίας	4
2.2.1. Περιροδοπική Ενότητα.....	5
2.2.2. Σύμπλεγμα Σερβομακεδονικής.....	7
2.2.3. Σύμπλεγμα Ροδόπης.....	7
2.2.4. Λεκάνη Στρυμών.....	8
2.2.5. Μολασσική λεκάνη Έβρου- Θράκης (Ροδόπης).....	8
<u>3.</u> Τεκτονική.....	9
3.1. Γενικά.....	9
3.2. Τεκτονική ανάλυση της ευρύτερης περιοχής του μελέτης.....	10
<u>4.</u> Σεισμική επικινδυνότητα.....	13
<u>5.</u> Βραχομάζα και Ιδιότητες.....	14
5.1. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (uniaxial compress strength).....	14
5.2. Δείκτης Κερματισμού Βραχομάζας (Rock Quality Designation - RQD).....	15
5.3. Ασυνέχειες.....	15
5.4. Επιρροή Νερού.....	16
<u>6.</u> Περιγραφή των ασυνεχειών και των επιπέδων εξόρυξης.....	17
<u>7.</u> Ανάλυση ευστάθειας σφηνών κατά την υπόγεια εκμετάλλευση.....	19
7.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο κατολισθήσεων.....	19
7.2. Καταπτώσεις.....	21
7.3. Αστοχίας Σφήνας.....	22
7.4. Αστοχία Επιπέδου.....	24
7.5. Γεωμετρία Σφήνας.....	25
7.6. Συντελεστής Ασφαλείας.....	26
7.7. Ανάλυση των σφηνών της οροφής του λατομείου.....	27
<u>8.</u> Ανάλυση ευστάθειας του πρσανούς κατά την εκμετάλλευση δολομτικού μαρμάρου.....	35
<u>9.</u> Συμπεράσματα.....	42
<u>10.</u> Βιβλιογραφία.....	43
Παράρτημα	

1. Εισαγωγή

Για την υλοποίηση ενός τεχνικού έργου απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή κατασκευή και την ασφαλή λειτουργία του είναι η παρατήρηση και η μελέτη των γεωλογικών συνθηκών καθώς και η ορθή εκτίμηση των γεωλογικών παραμέτρων της ευρύτερης περιοχής που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του. Πιο συγκεκριμένα για την επιλογή της καταλληλότερης τοποθεσίας για την δημιουργία ενός λατομείου, τα απαραίτητα κριτήρια που πρέπει να εκτιμηθούν είναι, η παρουσία του κατάλληλου πετρώματος, το απόθεμα, το κόστος παραγωγής, η ζήτηση του προϊόντος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής. Οι ιδιότητες της βραχομάζας συχνά δημιουργούν δυσκολίες στην ανάλυση της ευστάθειας των ορυγμάτων. Μια περίπτωση είναι η δημιουργία σφηνών, καθώς το εύρος των γεωλογικών και γεωμετρικών παραγόντων κάτω από το οποίο σχηματίζονται, είναι πολύ μεγάλο και δύσκολα προσδιορίσιμο. Όσο αφορά την μελέτη της ευστάθειας των σφηνών αποτελεί κλάδο της βραχομηχανικής γι' αυτό και έχει εκτενώς μελετηθεί και συζητηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία (Hoek and Bray, 1981; Goodman, 1989; Jimenez & Sitar 2007).

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύεται η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής που πρόκειται να γίνει η εξόρυξη του κοιτάσματος δολομιτικού μαρμάρου, καθώς και η ευστάθεια των σφηνών που σχηματίζονται εξαιτίας των ασυνεχειών που διατρέχουν την βραχομάζα του λατομείου.

1.1. *Λατομικά ορυκτά*

Λατομικά ορυκτά ονομάζονται τα ορυκτά τα οποία δεν είναι μεταλλεύματα ή μεταλλευτικά ορυκτά, κατά τις διατάξεις του Μεταλλευτικού Κώδικα. Ως λατομικά ορυκτά, επιφυλασσομένων των διατάξεων της παραγράφου 2 του άρθρου 2 του Ν.Δ. 210/1973, θεωρούνται οι κάτωθι ορυκτές ύλες: τα μάρμαρα, οι ασβεστόλιθοι παντός είδους, οι δολομίτες περιεκτικότητας σε οξείδιο μαγνησίου όχι μεγαλύτερης του 21%, οι σχιστόλιθοι, οι μάργες, οι άργιλοι, οι καολίνες, οι ιλλίτες, οι μοντμοριλονίτες, οι μπεντονίτες, η κιμωλία, η γύψος, το αλάβαστρο, οι τόφφοι, οι αμφιβολίτες, οι πρασινίτες, οι χαλαζίτες, οι οφίτες, οι ολιβίνες, οι περιδοτίτες, οι σηϊνίτες, οι διορίτες, οι γρανίτες, οι τραχείτες, οι βασάλτες, οι ρυόλιθοι, οι δακίτες, οι ανδεσίτες, οι διαβάσες, οι οψιδιανοί, οι περλίτες, η κίσσηρι, η θηραϊκή γή, οι ψαμμίτες, οι άμμοι και κάθε πέτρωμα παραπλήσιο προς το ανωτέρω. (orykta.gr)

Γενικά τα **μάρμαρα** (δολομιτικά μάρμαρα, ασβεστιτικά μάρμαρα), δημιουργούνται κυρίως σε μεταμορφικές επαρχίες οι οποίες συνδέονται με ορογενετικές ζώνες. Βρίσκονται επίσης στην άλωσ επαφής γύρω από μαγματικές διεισδύσεις μικρού βάθους μέσα σε δολομιτικές και ασβεστολιθικές ακολουθίες. Από την μεταμόρφωση των ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων προκύπτουν τα μάρμαρα, τα οποία έχουν έντονη κρυσταλλικότητα. Τα μάρμαρα αποτελούν τα μεταμορφικά ισοδύναμα των ιζηματογενών ασβεστιτικών πετρωμάτων και δομούνται κυρίως από ασβεστιτικά ορυκτά (δολομίτης, ασβεσίτης, χαλαζίας). Οι κατηγορίες των ασβεστιτικών πετρωμάτων είναι οι δολομίτες, στους οποίους επικρατεί κατά σύσταση ο δολομίτης $[CaMg(CO_3)_2]$ και οι ασβεστόλιθοι, στους οποίους επικρατεί ο ασβεσίτης ($CaCO_3$). Τα μάρμαρα ανήκουν στην κατηγορία των λατομικών

ορυκτών. Στην κατηγορία των μαρμάρων υπάγονται διάφορα πετρώματα ποικίλων χρωμάτων, τα οποία εξορύσσονται σε όγκους και είναι επιδεκτικά κοπής, λειάνσεως και στιλβώσεως, καθώς και ο πορόλιθος, το αλάβαστρο, και ο όνυχας.

Τεχνικά ως μάρμαρα ορίζουμε κάθε πέτρωμα που μπορεί να εξορυχτεί σε όγκους ικανών διαστάσεων και μπορεί να κοπεί, να λειανθεί και να στιβλωθεί. Οι ασβεστόλιθοι με κάποιο ποσοστό κρυσταλλικής δομής μπορούν να πουληθούν ως μάρμαρα με πολύ καλή στίβλωση. Με την εμπορική ονομασία «μάρμαρα» χαρακτηρίζονται, εκτός από αυτά που η γεωλογική επιστήμη χαρακτηρίζει ως μάρμαρα, και μια σειρά από άλλα πετρώματα, τα οποία επιδέχονται κοπή και λείανση σε σχετικά λεπτές πλάκες καθώς και λείανση. Τέτοια πετρώματα είναι οι ασβεστόλιθοι, δολομίτες, σερπεντινίτες, ορισμένα κροκαλοπαγή, γρανίτες κ.λ.π.

Η ποιότητα των μαρμάρων εξαρτάται, σε σημαντικό βαθμό, από τη σύσταση των πετρωμάτων από τα οποία προήλθαν, καθώς και από το βαθμό της μεταμόρφωσής τους. Τα χρώματα των μαρμάρων ποικίλουν. Ο καθαρός ασβεστίτης είναι λευκός, αλλά ορυκτές προσμίξεις προσθέτουν το χρώμα. Το χρώμα των μαρμάρων είναι, ως επί το πλείστον, λευκό - ημίλευκο έως γκρι σε διάφορους τόνους, με διακύμανση αποχρώσεων κατά ζώνες, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις το χρώμα μπορεί να είναι και μαύρο, πρασινωπό, ροζ, ερυθρωπό κ.λπ. και οφείλεται συνήθως στην παρουσία οργανικών ουσιών ή σιδηροξειδίων ή μαγγανιούχων οξειδίων.

Γνήσια κρυσταλλικά ελληνικά μάρμαρα είναι τα λευκά μάρμαρα Πεντέλης και Διονύσου, τα λευκά - ημίλευκα μάρμαρα της περιοχής Δράμας - Καβάλας - Θάσου, τα μάρμαρα Τρανοβάλτου Κοζάνης, τα μάρμαρα Νάξου, τα ροζ μάρμαρα Λαύκου Πηλίου κ.ά.

Ως **λατομεία** ονομάζονται οι τόποι, από τους οποίους εξορύσσονται τα λατομικά ορυκτά. (orykta.gr)

Εικόνα 1: Κατηγορίες μαρμάρου (orykta.gr)

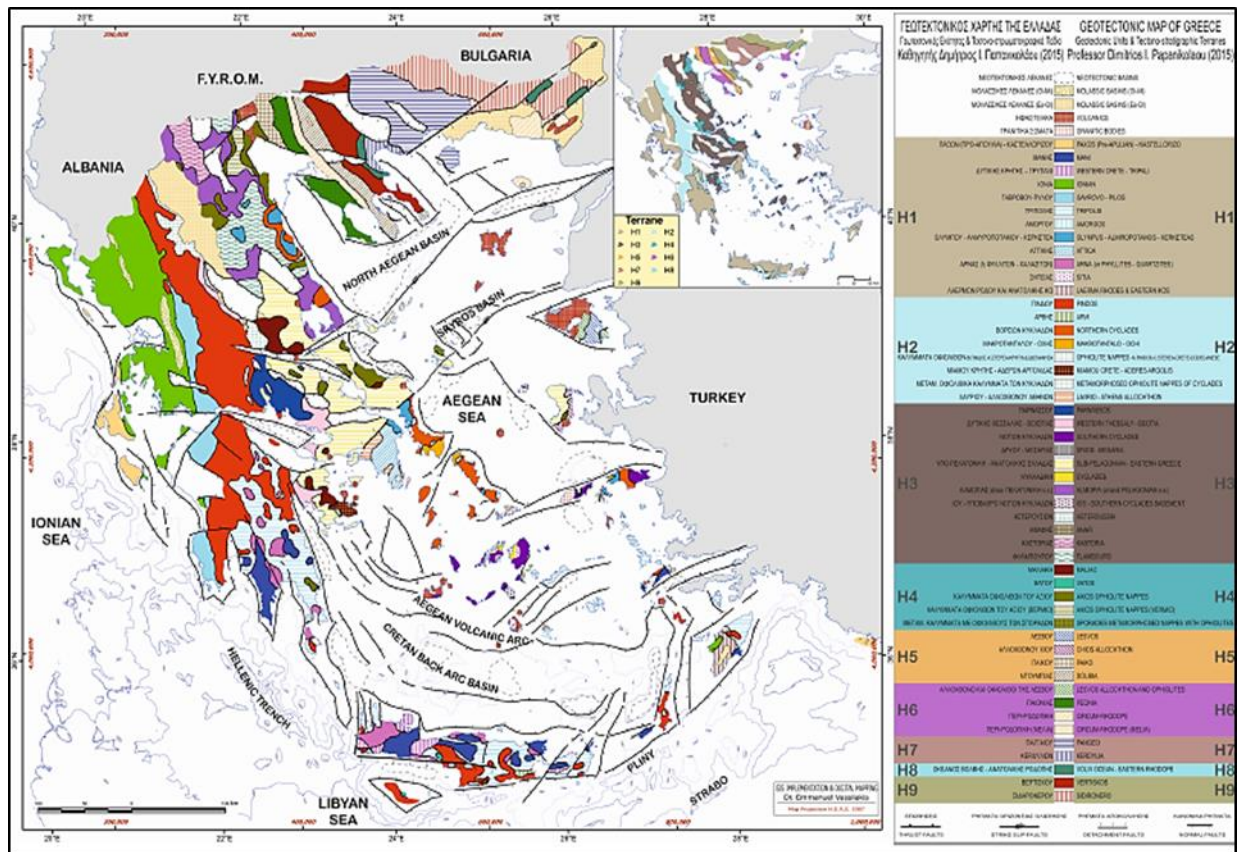


2. Γεωλογία

2.1 Γενικά

Η γεωλογική δομή του ελληνικού χώρου αποτελείται από γεωτεκτονικές ενότητες οι οποίες έχουν υποστεί διαφορετικά στάδια εξέλιξης. Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική καταπόνηση στους σχηματισμούς της, εξαιτίας των ορογενετικών κινήσεων που έλαβαν χώρα στον γεωλογικό χρόνο και συνεχίζονται έως σήμερα. Η παλαιογεωγραφική εξέλιξη των ενοτήτων αποτελείται από τρία στάδια: το Προ-ορογενετικό που περιλαμβάνει την απόθεση όλων των στρωμάτων εκτός από τον φλύσχη, το Συν-ορογενετικό όπου πραγματοποιείται η είσοδος της περιοχής στην τάφρο και αποτίθεται ο φλύσχη και το Μετα-ορογενετικό που πραγματοποιείται η απόθεση των μεταλλικών πετρωμάτων. Έπειτα οι ενότητες τεκτονίζονται (πτυχές, ρήγματα, εφιπτεύσεις). Κατά το μετα-ορογενετικό στάδιο, όπου έχουμε την ασύμφωνη απόθεση των μεταλλικών σχηματισμών πάνω στους αλπικούς, ενδέχεται να συμβεί δράση κανονικών ρηγμάτων τα οποία κόβουν τις συν-ορογενετικές επωθήσεις και ανεβάζουν τα μεταμορφωμένα πετρώματα στην επιφάνεια.

Πιο συγκεκριμένα γνωρίζουμε ότι ο Ελλαδικός χώρος δομείται από τις Εσωτερικές και τις Εξωτερικές Ελληνίδες. Οι **Εσωτερικές Ελληνίδες**, έχουν δεχθεί 2 ορογενετικές περιόδους (Ανώτερο Ιουρασικό- Κατώτερο Κρητιδικό και Ανώτερο Κρητιδικό-Ηώκαινο) με ταυτόχρονη παρουσία της κenoμάνιας ασυμφωνίας, Η γεωλογική τους ιστορία είναι αρκετά πολύπλοκη καθώς περιλαμβάνει δύο κύκλους ιζηματογένεσης, δύο ορογενετικούς κύκλους, επώθηση οφιολίθων και επίκλυση στο Κenoμάνιο. Οι **Εξωτερικές Ελληνίδες**, οι οποίες δομούν την περιφέρεια του Ελληνικού τόξου, έχουν δεχθεί έναν ορογενετικό κύκλο κατά την κύρια αλπική φάση (Ηώκαινο- Μειόκαινο) και αποτελούνται από συνεχείς στρωματογραφικές στήλες. Οι μεταλλικοί σχηματισμοί αποτελούν μεταγενέστερους σχηματισμούς, οι οποίοι επικαλύπτουν ασύμφωνα πτυχές, ρήγματα, επωθήσεις, εφιπτεύσεις και γενικότερα δομές των υποκείμενων πετρωμάτων που ανήκουν στον ορογενετικό κύκλο. Οι μολασσοί σχηματισμοί είναι ασύμφωνοι πάνω από τις αλπικές δομές αλλά αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της εξέλιξης του ορογενετικού τόξου.



Χάρτης 1: Γεωτεκτονικός χάρτης Ελλάδας. (Παπανικολάου, 2015)

2.2 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής μελέτης

Η θέση του λατομείου για το οποίο πραγματοποιείται η παρακάτω γεωλογική ανάλυση βρίσκεται στην Βόρεια Ελλάδα. Γενικά η ευρύτερη περιοχή δομείται από την ενότητα της Περιοδοπικής και την μάζα της Ροδόπης, που περιλαμβάνει τα συμπλέγματα της Σερβομακεδονικής και Ροδόπης. Επιπλέον συναντώνται η μεταλλική λεκάνη Στρυμώνα και η μολασσική λεκάνη Έβρου - Θράκης (Ροδόπη). Η μάζα αυτή, η οποία ονομάζεται και αλλιώς “Αλλόχθονο Ροδόπης”, γεωλογικά χωρίζεται από τις υπόλοιπες γεωτεκτονικές ενότητες της βαλκανικής χερσονήσου. Πιο συγκεκριμένα, με την ενότητα Srednogošie χωρίζεται μέσω μιας απότομης και σχεδόν κατακόρυφης επαφής στα δυτικά, ενώ οι υποενότητες της Strandzha και του Sakar στα ανατολικά υπέρκεινται τεκτονικά της Ανατολικής Ροδόπης. Επιπλέον, η Ροδοπική Μάζα χωρίζεται από τις Σερβο-μακεδονικές ενότητες (πετρώματα υποβάθρου της ενότητας Βερτίσκου, οφιόλιθοι της Βόλβης και υπόβαθρο Κερδυλίων μαζί με το κάλυμμα των μαρμάρων) μέσα από ένα ρήγμα αποκόλλησης (Αποκόλληση Στρυμώνα-Θάσου). Μέσα από την αποκόλληση αυτή, οι Σερβομακεδονικές ενότητες υπέρκεινται τεκτονικά της ενότητας Παγγαίου (αυτόχθονο Ροδόπης) (Χατζηπαναγής, 1991). Η περιοχή του λατομικού χώρου ανήκει από γεωλογικής άποψης στη μάζα της Ροδόπης που στον ελλαδικό χώρο καταλαμβάνει την ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη. Ο χώρος του λατομείου τοποθετείται στον ανώτερο ορίζοντα της μεταμορφωμένης ακολουθίας, όπως τις διαχωρίζει ο Χατζηπαναγής (1990). Το κύριο πέτρωμα που εξορύσσεται είναι το δολομιτικό μάρμαρο διάφορων αποχρώσεων, όπως

λευκό, υπόλευκο, τεφρό, υπότεφρο και δευτερευόντως το ασβεστιτικό μάρμαρο. Ο σχηματισμός των δολομιτικών και ασβεστιτικών μαρμάρων αποτελεί τον ανώτερο στρωματογραφικό ορίζοντα στην περιοχή του λατομείου κάτω από το οποίο βρίσκονται τα ταινιωτά – σιπολιτικά /μάρμαρα και οι εναλλαγές των γνευσίων, σχιστολίθων, μαρμάρων και αμφιβολιτών. Όσον αφορά τους δύο βασικούς λιθότυπους του λατομείου, το δολομιτικό μάρμαρο υπόκειται του ασβεστιτικού μαρμάρου. Αναλυτικότερη περιγραφή των γεωτεκτονικών ενοτήτων γίνεται παρακάτω.

2.2.1. Περιοδοπική Ενότητα

Η Περιοδοπική ενότητα είναι η πιο εσωτερική από τις Εσωτερικές Ελληνίδες. Απέκτησε το όνομα της από την υπόθεση ότι οι σχηματισμοί της περιβάλλουν την Ροδοπική Μάζα (Σερβομακεδονική ενότητα και ενότητα Ροδόπης) με την μορφή μια λωρίδας, πλάτους μερικών δεκάδων χιλιάδων χιλιομέτρων. Αποτελείται από χαμηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα, Πέρμο-Τριαδικής με Κάτω-Κρητιδικής ηλικίας. Εμφανίσεις της διακρίνονται σε δύο περιοχές: Στην Κεντρική Μακεδονία και στην Χαλκιδική (δυτική εμφάνιση), στην ανατολική Θράκη (ανατολική εμφάνιση). Στη Θράκη η ενότητα υπέρκειται τεκτονικά των ενοτήτων της Ροδόπης (εφελκυστικές τεκτονικές επαφές), ενώ στη Κεντρική Μακεδονία η ενότητα Βερτίσκου (Σερβομακεδονική) επωθείται στη Περιοδοπική. Στη Χαλκιδική και στη χερσόνησο του Άθου συμβαίνει το ανάποδο. Η ενότητα διακρίνεται σε έναν αριθμό από υπο-ενότητες, με σημαντικές διαφορές στη λιθοστρωματογραφία τους, οι οποίες ενότητες δυτικά είναι επωθημένες σε αυτές της Παιονίας. Παλαιογεωγραφικά θεωρείται ότι αποτελούσε κατά το Τριαδικό-Ιουρασικό την ηπειρωτική κατωφέρεια της ενδοχώρας των Ελληνίδων και κυρίως της Σερβομακεδονικής. Η κατωφέρεια κατέληγε σε έναν ωκεανό, αυτόν του Αξιού.

Η Περιοδοπική ενότητα αποτελείται από τρεις κύριες υπο-ενότητες, οι οποίες από τα δυτικά προς τα ανατολικά είναι: Η ενότητα Άσπρης Βρύσης-Χορτιάτη, που είναι η πιο εξωτερική (δυτική) υπο-ενότητα, η ενότητα Μελισσοχωρίου-Χολομώντα και η ενότητα Καμήλας –Δουμπιά. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί και οι ηλικίες των ενοτήτων.

1. Ενότητα Άσπρης Βρύσης-Χορτιάτη

Η πιο εξωτερική υποενότητα της Περιοδοπικής.

- Κατώτερο κομμάτι της να αποτελείται από μετακλαστικά και ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα που καταλήγουν σε νηριτικά ανθρακικά Μέσου Τριαδικού- Ανωτέρου Τριαδικού που στο Λιάσιο καταλήγουν σε πελαγικά.
- Το Ανώτερο τμήμα της αποτελείται από Κερατόλιθους, διαβάσεις, δολερίτες, ψαμμίτες και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους ηλικίας Μεταλιάσιου.
- Τεκτονικά εντοπίζονται όξινα μαγματικά πετρώματα, μεταμορφωμένα σε κυανοσχιστολιθική φάση σε εναλλαγές με μεταιζήματα ηλικίας Κατωτέρου Ιουρασικού. Η μεταμόρφωση είναι ηλικίας Κατωκρητιδικής. Η παραπάνω μαγματική ακολουθία αποτελεί την **ενότητα Χορτιάτη**.

2. Ενότητα Μελισσοχωρίου-Χολομώντα

- Το κατώτερο τμήμα αποτελείται από μάρμαρα, εναλλαγές μαρμάρων και σερικιτών, σχιστολίθων που τελικά καταλήγουν σε φυλλίτες, ηλικίας Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό
- Το ανώτερο τμήμα της ενότητας αποτελείται από μια μετακλαστική ακολουθία με μεταψαμμίτες, μάρμαρα και φυλλίτες με ολισθόλιθους τριαδικών μαρμάρων ηλικίας Κατώτερου- Μέσου Ιουρασικού (Σχηματισμός Σβούλας).

3. Ενότητα Καμήλας- Δουμιά

Η πιο εσωτερική ενότητα της Περιοδοπικής και αποτελείται από:

- Μεταψαμμίτες, Μετακροκαλοπαγή, χαλαζιακούς ασβεστόλιθους και χαλαζίτες πέρμιας ηλικίας (Σχηματισμός Εξαμηλίου)
- Μετά-ηφαιστό-ιζηματογενή σειρά από εναλλασσόμενα στρώματα πυροκλαστικών υλικών χαλαζιτών, σερικιτικών σχιστολίθων
- Ανθρακική πλατφόρμα με φύκη και βραχιονόποδα Μέσο Τριαδικό-Λαδίνιο
- Κλαστική ανθρακική ακολουθία Ανώτερο Λιάσιο.

Η ενότητα της Περιοδοπικής στην Ανατολική Θράκη είναι τεκτονικά υπερκείμενη των ενότητων της Ροδόπης. Οι επαφές αυτές είναι εφελκυστικές (ρήγματα αποκόλλησης και μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα). Εδώ διακρίνονται δύο υπο-ενότητες: η ενότητα Μάκρης και η ενότητα Δρυμού- Μελιάς. Πιο αναλυτικά:

4. Ενότητα Μάκρης (υποκείμενη ενότητα)

- Έναν κατώτερο ιζηματογενή σχηματισμό με μετακροκαλοπαγή, χλωριτικούς φυλλίτες, ασβεστιτικούς σχιστόλιθους και μάρμαρα. (Ανώτερο Τριαδικό)
- Μία ανώτερη μετα-ηφαιστειοιζηματογενή σειρά από φυλλίτες, πρασινοσχιστόλιθους που προέρχονται από μαφικές έως όξινες λάβες και πυροκλαστικά, και σωμάτων σερπεντινιτών. (Ιουρασικό).
- Ασύμφωνα σε αυτήν έχουν αποθεθεί ασβεστόλιθοι (Αλικής) (Βερριάσιο-Βαλαντζίνιο, Κατώτερο Κρητιδικό).
- Η ενότητα είναι μεταμορφωμένη σε πρασινοσχιστολιθική φάση.

5. Ενότητα Δρυμού-Μελιάς (ανώτερη ενότητα). Είναι μια ελαφρά μεταμορφωμένη ενότητα που αποτελείται από:

- Μετα-ιζήματα τα οποία παρεμβάλλονται εντός βασικών εκρηξιγενών πετρωμάτων. (Ανωτέρου Τριαδικού με Μέσου-Ανωτέρου Ιουρασικού).

Η μάζα της Ροδόπης αποτελείται από τα κρυσταλλικά συμπλέγματα της Σερβομακεδονικής και της Ροδόπης. Αποτελεί την πιο εσωτερική από τις Εσωτερικές Ελληνίδες και περιβάλλεται από την Περιοδοπική (ανατολικό περιθώριο της ωκεάνιας λεκάνης του Αξιού). Αποτελείται από πετρώματα έντονης παραμόρφωσης και πολυμεταμορφωμένα αλπικά και προαλπικά. Διακρίνονται γρανιτικές διεισδύσεις, κυρίως έντονα παραμορφωμένες, ηφαιστειακά πετρώματα Καινοζωικής ηλικίας. Τα αμεταμόρφωτα πετρώματα είναι μολασικά ιζήματα (back-arc), ενώ παρατηρούνται και Supra detachment

αποθέσεις Νεογενή-Τεταρτογενή. Οι μεταμορφικές φάσεις που χαρακτηρίζουν τα πετρώματα είναι κυρίως η αμφιβολιτική και κατά τόπους η γρανουλιτική οι οποίες συνοδεύονται και από μιγματιώση.

2.2.2. Σύμπλεγμα Σερβομακεδονικής

Η Σερβομακεδονική αποτελείται από την ενότητα Βερτίσκου, η οποία είναι ανώτερη. Η ηλικία μεταμόρφωσης της είναι 300 Ma (Βαρίσκια μεταμόρφωση) και έχει επηρεαστεί από την προαλπική και την αλπική ορογένεση. Επιπλέον περιλαμβάνει και την ενότητα Κερδυλλίων, που είναι υποκείμενη της ενότητας Βερτίσκου. Ανάμεσα στις δύο ενότητες υπάρχει αποκόλληση (τεκτονική επαφή) την αποκόλληση Κερδυλίων, ηλικίας Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου. Πιο αναλυτικά:

1. Ενότητα Βερτίσκου (Ανώτερη ενότητα)

- Περιλαμβάνει: γνεύσιους, μιγματίτες και γρανίτες (Άνω Προτεροζωικό - Κάτω Παλαιοζωικό).
- Μεγάλες μάζες από μεταμορφωμένα και σχιστοποιημένα μέλη του οφιολιθικού συμπλέγματος της Βόλβης, (στη βάση της στήλης της).
- Γρανίτες Τριαδικού.

2. Ενότητα Κερδυλλίων (Υποκείμενη ενότητα)

- Πετρώματα προ-αλπικού φλοιού και μάρμαρα στην οροφή.
- Κατώτερη ομάδα: γνεύσιοι, αμφιβολίτες, λεπτυνίτες και μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι..
- Ανώτερη ομάδα με μάρμαρα νηριτικής φάσης.
- Γρανιτικές φλέβες και πηγματίτες που διαπερνούν τις δύο ομάδες πετρωμάτων.

2.2.3. Σύμπλεγμα Ροδόπης

Το σύμπλεγμα Ροδόπης αποτελείται από την ενότητα Σιδηρόνερου, η οποία χαρακτηρίζεται από πολλά διαδοχικά στάδια μεταμόρφωσης με παλαιότερη την κυανοσχιστολιθική (Ιουρασικής ηλικίας), την επώθηση του Νέστου και την ενότητα Παγγαίου, ηλικίας Ανώτερο Παλαιοζωικό - Κατώτερο Μεσοζωικό. Πιο αναλυτική περιγραφή του συμπλέγματος της Ροδόπης:

1. Ενότητα Σιδηρόνερου (Υπερκείμενη ενότητα)

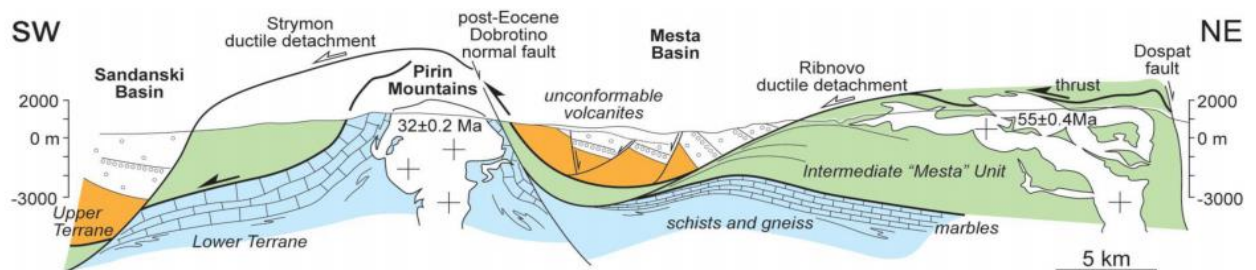
- Μεταμορφωμένα πετρώματα μετρίου - υψηλού βαθμού, όπως μοσχοβιτικοί γνεύσιοι, βιοτιτικοί γνεύσιοι, οφθαλμώδεις γνεύσιοι, βιοτιτικοί οφθαλμώδεις γνεύσιοι, αμφιβολίτες με ενδιαστρώσεις μαρμάρων και μοσχοβιτικοί γνεύσιοι, μιγματίτες και ανατηκτικοί γρανίτες.
- Μέγα-πτυχωσιγενής δομή.

2. Επώθηση Νέστου: Αποτελεί μια ζώνη διάτμησης με ανάστροφο χαρακτήρα, χωρίζει το κατώτερο τμήμα (μάρμαρα και ορθογνεύσιοι της ενότητας Παγγαίου-Πιριν) από το ανώτερο (ορθο- και παραγνεύσιοι μεταβασίτες και υπερβασικά του ενδιάμεσου τμήματος Σιδηρόνερο Μεστά).

3. Ενότητα Παγγαίου (Υποκείμενη ενότητα)

- Υψηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα ανθρακικής πλατφόρμας. Παλαιότερη ηλικία μεταμόρφωσης είναι πρασινοσχιστολιθικής φάσης ενώ η νεότερη ηλικία μεταμόρφωσης στο Κρητιδικό είναι αμφιβολιτικής φάσης.

Η Παραμόρφωση περιλαμβάνει τουλάχιστον δύο συμμεταμορφικές φάσεις ισοκλινών πλαστικοροϊκών πτυχών με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ασυμμετρία προς ΝΔ.



Σχήμα 1: Γεωλογική τομή εγκάρσια στη Ροδόπη και κατά τη διεύθυνση της τεκτονικής μεταφοράς (ΒΑ-ΝΔ). J.P.Burg 2012.

2.2.4. Λεκάνη Στρυμών

Η λεκάνη Στρυμών είναι συνδεδεμένη με μία μεγάλη τεκτονική επαφή, που σήμερα θεωρείται ως ένα μεγάλο κανονικό ρήγμα μικρής κλίσης, την αποκόλληση Στρυμών. Γενικότερα οι λεκάνες είναι πληρωμένες από σχηματισμούς που έχουν αποθεθεί ασύμφωνα πάνω στα αλπικά πετρώματα και στις αλπικές δομές κατά το Νεογενές –Τεταρτογενές. Οι μεταλλικοί σχηματισμοί, δίνουν πληροφορίες για την νεότερη γεωλογική εξέλιξη μιας περιοχής και την πρόσφατη εξέλιξη του ορογενούς. Η λεκάνη Στρυμών έχει πληρωθεί σε δύο φάσεις: Μια παλαιότερη ηλικίας Μέσο Μειόκαινο –Κατώτερο Πλειόκαινο (σύγχρονη της δράσης της αποκόλλησης), μία νεότερη (Ανώτερο Πλειόκαινο –Ολόκαινο).

2.2.5. Μολασσική λεκάνη Έβρου-Θράκης (Ροδόπης)

Η ιζηματογένεση της λεκάνης ξεκίνησε στο Μέσο Ηώκαινο και διήρκησε μέχρι το Κατώτερο Μειόκαινο. Έχει πάχος 3km στην δυτική Θράκη, ενώ φτάνει τα 9km στην ανατολική και στο Βόρειο Αιγαίο.

- Αποτελείται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, νομουλιτικούς ασβεστόλιθους, τουρβιδίτες και αργίλους. Αρχικά διακρίνονται ηπειρωτικές φάσεις (Μπαρτόνιο) οι οποίες εξελίσσονται σε θαλάσσιες στο Ανώτερο Ηώκαινο-Αν. Ολιγόκαινο.
- Ασύμφωνα πάνω τους αποτέθηκαν ιζήματα του Μέσου –Ανώτερου Μειοκαίνου-Τεταρτογενούς.
- Πολύπλοκη τεκτονική εξέλιξη




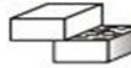





3. Τεκτονική

3.1. Γενικά

Τα συστήματα διακλάσεων αποτελούν τους κυριότερους δυσμενείς παράγοντες στην εκμετάλλευση μαρμάρου. Με τον όρο **διακλάσεις** ορίζονται θραυσιγενείς διαχωριστικές επιφάνειες κατά μήκος των οποίων τα υλικά του στερεού φλοιού της Γης έχουν χάσει την συνοχή τους. Οι διακλάσεις μπορεί να είναι εκτατικές διαρρήξεις (ρωγμές) ή διατμητικές διαρρήξεις (ρήγματα). Στην ύπαιθρο δεν εμφανίζονται μεμονωμένα, αλλά σχηματίζουν ομάδες, συστήματα και ζώνες σε όλες τις κλίμακες παρατήρησης. Αν ένα σύνολο διακλάσεων εμφανίζει παρόμοια γεωμετρία, τότε το σύνολο αυτών των ρωγμών χαρακτηρίζεται ως ομάδα διακλάσεων (join sets). Οι εκτατικές διαρρήξεις και οι διακλάσεις δημιουργούνται από εφελκυστικές ή από διατμητικές τάσεις. Η δημιουργία τους μπορεί να προκύψει από τεκτονικά αίτια, από ψύξη πυριγενών πετρωμάτων, από αποφόρτιση τάσεων των υποκείμενων πετρωμάτων λόγω διάβρωσης. Ως **ρήγματα** ορίζονται οι εντοπισμένες στο χώρο επιφάνειες διάρρηξης, που τέμνουν τα πετρώματα, τους γεωλογικούς σχηματισμούς και το στερεό φλοιό της Γης και εκτονώνουν την κίνηση παράλληλα με την επιφάνεια της διάρρηξης. Τα ρήγματα αποτελούν τις χαρακτηριστικότερες δομές θραυσιγενούς παραμόρφωσης, που σχηματίζονται ως αντίδραση στο πεδίο τάσεων που επικρατεί στο ανώτερο τμήμα του φλοιού (10-15km). Ο όρος ρήγματα αντιπροσωπεύει πολύ πιο σύνθετες δομές που εκτονώνουν μεγάλο ποσοστό της παραμόρφωσης στον ανώτερο φλοιό και προξενούν μεταθέσεις των σχηματισμών της τάξης του μέτρου, μέχρι και χιλιάδες μέτρα. Τα κεκλιμένα ή οριζόντια ρήγματα διαχωρίζουν τα πετρώματα που διέρχονται σε δύο ρηξιτεμάχη, ένα υπερκείμενο (hanging wall block) και ένα υποκείμενο τέμαχος (footwall block). Στα κατακόρυφα ρήγματα, δεν έχει νόημα η διάκριση αυτή.

Όσο αφορά την κλίση των ρηγμάτων αυτά μπορούν να λάβουν όλες τις τιμές κλίσεων, δηλαδή από 0° (οριζόντια ρήγματα), έως 90° (κατακόρυφα ρήγματα). Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (η κίνηση ανάμεσα στα δύο ρηξιτεμάχη είναι οριζόντια), είναι συνήθως (σχεδόν) κατακόρυφα, ενώ τα κανονικά ρήγματα έχουν συνήθως κλίσεις περίπου 50°-60°. Τα ανάστροφα ρήγματα, έχουν κλίσεις γύρω στις 30°-40°. Τα ρήγματα που είναι μικρής κλίσης, ανάστροφα και προκαλούν μετατόπιση δεκάδων ή και εκατοντάδων μέτρων ονομάζεται **εφιππεύσεις**, ενώ αυτά με μικρή κλίση και κανονικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλης κλίμακας μετακινήσεις ονομάζονται **επωθήσεις**.

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΝ

		Γραμμές προστριβής			
		Κατά κλίση	Κατά παράταξη	Πλάγια	
Επιφάνεια διάρρηξης	Κατακόρυφη	① ορθοκατακόρυφο 	② παρα-κατακόρυφο 	③ πλαγιο-κατακόρυφο 	
	Οριζόντια		④ οριζόντιο 		
	Κεκλιμένη	⑤ ορθοκανονικό 		⑥ πλαγιο-κανονικό 	Κανονικό
		⑦ ορθοανάστροφο 		⑧ πλαγιο-ανάστροφο 	Ανάστροφο
			⑨ παρα-κεκλιμένο 		
		Οριζόντιες μεταπτώσεις			

Πίνακας 1: Ταξινόμηση ρηγμάτων κατά Μαριολάκο και Δ. Παπανικολάου 1986

3.2. Τεκτονική ανάλυση της ευρύτερης περιοχής του λατομείου

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής του λατομείου χαρακτηρίζονται από έντονη πτυχωσιγενή και ρηξιγενή τεκτονική. Η αποτύπωση της πλαστικής παραμόρφωσης που έχουν υποστεί τα πετρώματα που παρουσιάζουν σχιστότητα και στρωμάτωση, όπως οι σχιστόλιθοι, οι γενέσιοι και τα ταινιωτά μάρμαρα είναι σε ικανοποιητικό βαθμό, ενώ στα δολομικά μάρμαρα η αποτύπωση είναι πιο δύσκολη εξαιτίας της ομοιογένειας που παρουσιάζουν. Τα δολομικά μάρμαρα αποτυπώνουν έντονα τη ρηξιγενή τεκτονική, η οποία αντιπροσωπεύεται από πλήθος ρηγμάτων και διακλάσεων (Χατζηπαναγής, 1991). Η ρηξιγενή τεκτονική, αυτής της περιοχής αντιπροσωπεύεται από τρία παραμορφωτικά γεγονότα, P1, P2, P3 που δημιουργούν πλήθος ρηγμάτων και διακλάσεων. Ανάλογα με το καθεστώς που έδρασαν τα ρήγματα διακρίνονται σε κανονικά ρήγματα εφελκυσμού και σε συμπιεστικού τύπου επωθητικά ρήγματα. Οι παλαιότερες ρηξιγενείς δομές βάθους επηρεάζονται από νεότερα τεκτονικά γεγονότα με αποτέλεσμα την μεταβολή και τον επαναπροσανατολισμό των τεκτονικών στοιχείων τους και την εμφάνιση σύνθετων τεκτονικών δομών. (Χατζηπαναγής, 1991). Παρά το γεγονός της κυρίαρχης επίδρασης της πτυχογόνου τεκτονικής στο λατομείο, τα σημαντικότερα προβλήματα δημιουργούνται από την ρηξιγενή τεκτονική της περιοχής. Στη στενή περιοχή του λατομείου η ρηξιγενής τεκτονική εκφράζεται με κανονικά ρήγματα, καθώς επίσης και με συστήματα διακλάσεων που αποτελούν τους κυριότερους δυσμενείς παράγοντες στην εκμετάλλευση του μαρμάρου, ενώ η ρηξιγενής τεκτονική συμπιεστικού χαρακτήρα απαντά σε πολύ χαμηλότερο βαθμό (Χατζηπαναγής, 1991). Οι παλαιότερες ρηξιγενείς δομές που

αναγνωρίστηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Φαλακρού όρους είναι αυτές που συνδέονται με τεκτονική σε συνθήκες πλαστικοθραυσιγενούς παραμόρφωσης και μπορούν να χαρακτηριστούν σαν εξελικτικό στάδιο της δεύτερης παραμορφωτικής φάσης συμπίεστικού τύπου. Πρόκειται για ανάστροφα ρήγματα με τεκτονικά λατυποπαγή και s-c τύπου μυλονίτες. Αυτά τα ρήγματα έχουν μικρές κλίσεις (20° - 50°) και δημιουργούνται κατά μήκος των επιφανειών επωθήσεων και εφίππεύσεων (πτυχωσιγενή ρήγματα) που αναγνωρίστηκαν στην περιοχή (Χατζηπαναγής, 1991).

Τα ρήγματα αυτά εντοπίζονται εντός του δολομιτικού μαρμάρου, χαρακτηρίζονται από μικρή χωρική ανάπτυξη μετρικής έως δεκατομετρικής κλίμακας, παρουσιάζουν μικρό άνοιγμα (μέγιστο 0,5m) και ίσως συνδέονται με την παραμορφωτική φάση συμπίεστικού τύπου και δεν παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα στην αποληψιμότητα του μαρμάρου (Χατζηπαναγής, 1991). Σε μικρή απόσταση μετρικής κλίμακας, οι διακλάσεις που απαντούν εγκάρσια ή και ημιπαράλληλα στις παραπάνω δομές, τροφοδοτούνται και πληρούνται με συνεκτικό υλικό πλούσιο σε οξειδία του σιδήρου και μαγγανίου με χαρακτηριστικό ροδόχροο έως καστανό χρώμα. Συχνά, μέσα στις ζώνες αυτές συναντώνται μικροκρύσταλλοι μεταλλικών ορυκτών, συνήθως σιδηροπυρίτη. Πιο συγκεκριμένα, ένα πρώτο σύστημα κανονικών ρηγμάτων εντοπίζεται στην ανατολική πλευρά του λατομείου η οποία χαρακτηρίζεται από την παρουσία ρηξιγενούς ζώνης με πυκνό δίκτυο κανονικών ρηγμάτων γενικής διεύθυνσης B10-20oA και κλίσεις από 70° κυρίως προς ΔΒΔ, αλλά και προς ΑΝΑ, έως κατακόρυφες. Αυτό το σύστημα των ρηγμάτων έχει έντονα κατακλαστικό χαρακτήρα και δημιουργεί τεκτονικό λατυποπαγές, ενώ ταυτόχρονα κατακερματίζει σχεδόν όλη την ανατολική πλευρά του λατομείου καθιστώντας, κατ'αυτόν τον τρόπο, απαγορευτική την απόληψη υγιών όγκων μαρμάρου στα επιφανειακά τουλάχιστον τμήματα. (Αρβανιτίδης Ν. και Θεοδωρούδης Α., 2001).

Το δεύτερο σύστημα ρηγμάτων, πιθανόν συζυγές του προηγούμενου, έχει κύρια διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και μεγάλες κλίσεις έως κατακόρυφες, χαρακτηρίζεται από κατοπτρικές επιφάνειες των μελών και σπάνια πληρούνται με ασύνδετο ερυθροπηλό (terra rossa) και λατύπες, καθώς και με δευτερογενή ασβεσίτη. Τα ρήγματα αυτά συναντώνται με μεγαλύτερη συχνότητα στη ΔΒΔ πλευρά του λατομείου και σπανιότερα στην ΑΝΑ πλευρά. Διατέμνουν το σύνολο των λιθολογικών σχηματισμών, σπάνια εμφανίζονται εντός του λευκού δολομιτικού μαρμάρου και σπανιότερα στην ΑΝΑ πλευρά του λατομείου, όπου μετατοπίζουν το πρώτο ΒΒΑ-ΝΝΔ σύστημα ρηγμάτων. Τα παραπάνω ρήγματα δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αποληψιμότητα του μαρμάρου, γιατί το διατέμνουν με πολύ χαμηλή συχνότητα (Αρβανιτίδης Ν. και Θεοδωρούδης Α., 2001).

Όσον αφορά το τρίτο σύστημα κανονικών ρηγμάτων το οποίο αναπτύσσεται αρκετά συχνά, έχει τη χαρακτηριστική ιδιότητα να ακολουθεί τις επιφάνειες σχιστότητας κατά την παράταξη και τη διεύθυνση βύθισης των διάφορων λιθοτύπων του λατομείου, γι' αυτό η διεύθυνση του συστήματος αυτού είναι ΒΔ-ΝΑ με κλίσεις της τάξης των 40° έως 70° προς ΒΑ. Αυτά τα ρήγματα απαντούν με μεγάλη συχνότητα μέσα στο τεφρό ασβεστιτικό και υπόλευκο-υπότεφρο δολομιτικό μάρμαρο ενώ στο λευκό δολομιτικό μάρμαρο παρατηρούνται σπάνια. Η δημιουργία αυτών των ρηγμάτων παράλληλα προς τη σχιστότητα πρέπει να αποδοθεί στο γεγονός ότι στις επιφάνειες σχιστότητας υπάρχει μικρότερη συνοχή και άρα επικρατεί μια γενικότερη διαφοροποίηση του υλικού. Η απουσία αυτών των ρηγμάτων στο λευκό δολομιτικό μάρμαρο οφείλεται στη μη ύπαρξη επιφανειών

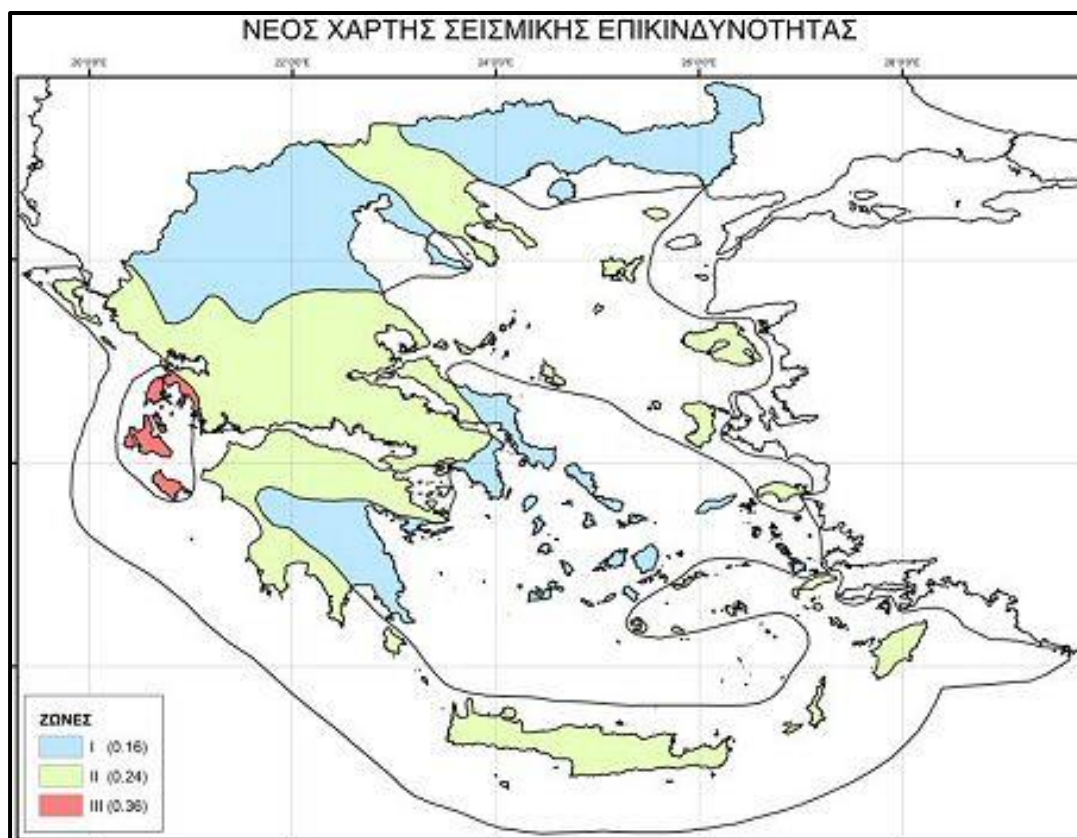
σχιστότητας, εξαιτίας της επαρκούς συνοχής του στο ομοιογενές δολομιτικό υλικό (Αρβανιτίδης Ν. και Θεοδωρούδης Α., 2001).

Μέσα στα ασβεστιτικά και σπανιότερα στα υπότεφρα δολομιτικά μάρμαρα του ΒΒΔ τμήματος του λατομείου, οι ισοκλινείς πτυχώσεις συγκλίνουν σε βαθμό τέτοιο ώστε τα σκέλη αυτών να είναι σχεδόν παράλληλα και τα αξονικά τους επίπεδα να είναι ρηξιγενείς επιφάνειες πάνω στις οποίες δημιουργείται συχνά τεκτονικό λατυποπαγές. Τα ρήγματα αυτά (ρήγματα τύπου fold and thrust) έχουν σημαντική ανάπτυξη ως προς το μήκος (>100 m πολλές φορές) και το εύρος τους φτάνει έως και το 1 m. Συνήθως, η πλήρωσή τους γίνεται με ασύνδετο αργιλικό υλικό και λατύπες ποικίλου μεγέθους.

Από τα ρηξιγενή συστήματα που περιεγράφηκαν, το υγιές δολομιτικό μάρμαρο επηρεάζεται σε χαμηλό βαθμό. Ωστόσο, διατέμνεται από κάποια κανονικά ρήγματα ΒΒΑ-ΝΝΔ διεύθυνσης (Αρβανιτίδης Ν. και Θεοδωρούδης Α., 2001) . Το μήκος ενός ρήγματος απ' αυτά φτάνει και υπερβαίνει τα 150 m διασχίζοντας σχεδόν όλο το δολομιτικό σώμα. Όσον αφορά το άνοιγμά του, αυτό φτάνει κατά θέσεις το 1 m και πληρείται με ασύνδετο αργιλικό υλικό (terra rossa) και λατύπες ποικίλου μεγέθους. Τα ρήγματα αυτά δημιουργούν πρόβλημα στην αποληψιμότητα του μαρμάρου στη στενή περιοχή του λατομείου.

4. Σεισμική επικινδυνότητα

Σύμφωνα με την τελευταία τροποποίηση του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ-2000) και το ΦΕΚ Β' 1154 / 12-08-2003, Απόφαση Αριθ. Δ17α/115/9/ΦΝ275 και ισχύει από 1-1-2004, η ευρύτερη περιοχή μελέτης όπου εδράζεται το λατομείο κατατάσσεται στην κατηγορία Ι σεισμικής επικινδυνότητας, επομένως πρόκειται για μια λιγότερο σεισμική περιοχή. Η σεισμική επιτάχυνση εδάφους είναι $A = a \times g$, όπου $a = 0,16$ και g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($g = 981 \text{ cm/sec}^2$).



Χάρτης 2 : Νέος Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, (ΟΑΣΠ)

Πίνακας 2: Σεισμική επιτάχυνση εδάφους $A = a * g$ (g =επιτάχυνση της βαρύτητας)

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
a	0.16	0.24	0.36

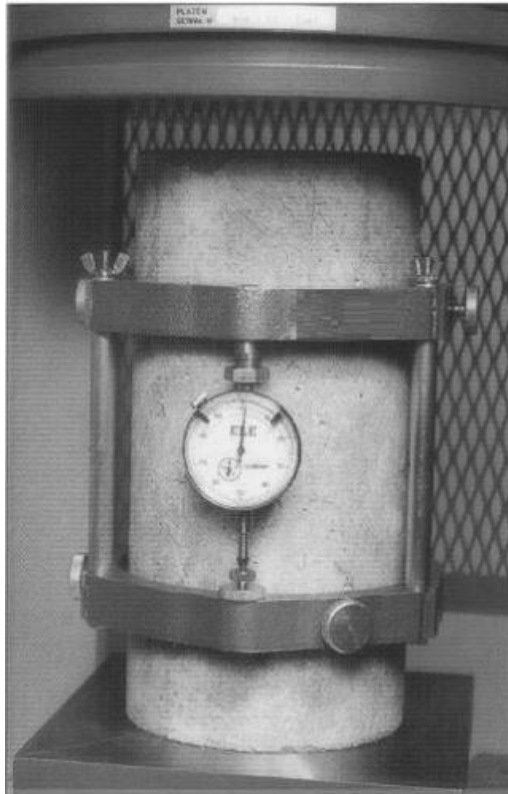
Γενικότερα η ανατολική Μακεδονία και η Θράκη, που αποτελούν την ευρύτερη περιοχή μελέτης, παρουσιάζουν μικρή σεισμική δραστηριότητα με λίγους δυνατούς ιστορικούς και πρόσφατους σεισμούς, αν και βρίσκονται πολύ κοντά στην ενεργή σεισμικά λεκάνη του Βορείου Αιγαίου (Pavlidis et al. 1990), αλλά και στην ρηξεγενή ζώνη Καβάλα- Ξάνθη- Κομοτηνή, και Μαρόνεια -Αλεξανδρούπολη.

5. Βραχομάζα

Η **βραχομάζα** (rock mass) ορίζεται ως ένα ασυνεχές στερεό μέσο το οποίο αποτελείται από βραχώδες υλικό που διατέμνεται από γεωλογικές ασυνέχειες και αποτελεί τη φυσική κατάσταση ενός πετρώματος, όπως αυτό συναντάται επιτόπου και σε μεγάλη έκταση. Σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη, αλλά εμφανίζεται ρηγματωμένη με ποικίλα συστήματα ασυνεχειών εμφανίζοντας έτσι διαφορετικό βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης αλλά και ανισότροπη συμπεριφορά από θέση σε θέση (Καββαδάς, 2014). Ως ασυνέχεια χαρακτηρίζεται μια επιφάνεια μηχανικής θραύσης που δημιουργείται λόγω της τεκτονικής, είτε λόγω επιβολής φορτίου πάνω σε ένα αρχικά άρρηκτο πέτρωμα. Η εκτίμηση των αντιπροσωπευτικών τιμών για τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας δεν γίνεται με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά έμμεσα, δηλαδή μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχομάζας σε κατηγορίες και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις. Για την περιγραφή και ταξινόμηση της ποιότητας της βραχομάζας συνήθως χρησιμοποιούνται έξι παράμετροι: η μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί τη βραχομάζα, ο δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD), οι οικογένειες ασυνεχειών, τα χαρακτηριστικά τους (υλικό πληρώσεως, προσανατολισμός, τραχύτητα κλπ) και η παρουσία υπόγειου νερού. (Πανεπιστημιακές σημειώσεις ΕΜΠ, Καββαδάς 2014).

5.1. *Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (uniaxial compress strength)*

Βασική ιδιότητα για την περιγραφή και ταξινόμηση της βραχομάζας αποτελεί η **αντοχή** της στην μονοαξονική θλίψη (uniaxial compression strength). Με τον όρο αντοχή (ή μέγιστη αντοχή), είναι η μέγιστη τάση που το πέτρωμα δύναται να αναλάβει για δεδομένες συνθήκες. Η μέτρηση πραγματοποιείται σε κυλινδρικά δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων συμπαγούς πετρώματος. Στόχος του υπολογισμού της είναι ο προσδιορισμός της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_c , και των ελαστικών σταθερών E και ν του άρρηκτου πετρώματος. Κύριος παράγοντας εξάρτησης της μηχανικής αντοχής είναι το είδος του πετρώματος και το βαθμό αποσάθρωσης. (Πανεπιστημιακές σημειώσεις ΕΜΠ Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων, ΑΙ Σοφιανός & ΠΠ Νομικός). Οι τιμές της μπορεί να μην είναι τόσες αξιόπιστες εξαιτίας ενδεχόμενων επιφανειών μικρής αντοχής σε δυσμενείς διευθύνσεις (επιφάνειες στρώσεις). (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΕΜΠ, Καββαδάς 2014). Η αντοχή των δοκιμών ακόμα και με την ίδια γεωλογική ονομασία μπορεί να διαφέρει σημαντικά.



Εικόνα 2: Κυλινδρικό δοκίμιο (Τσουτρέλης et al., 2000).

5.2. Δείκτης Κερματισμού Βραχομάζας (Rock Quality Designation - RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD), αποτελεί την ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχομάζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχίων μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης. Αποτελεί έναν από τους πιο χρησιμοποιούμενους δείκτες περιγραφής της βραχομάζας.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται είναι, οι μεγάλες μεταβολές των τιμών του σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Οι τιμές του δείκτη RQD είναι πολύ επιρρεπείς στον τρόπο της δειγματοληψίας, δηλαδή επηρεάζονται από το είδος της δειγματοληψίας, την διάμετρο του πυρήνα, αλλά και από τρόπο διάνοιξης την γεώτρησης. Σημαντικό ρόλο παίζει και ο προσανατολισμός της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες, αφού αν αυτός είναι παράλληλος δίνει πολύ υψηλότερο δείκτη RQD από ότι αν είναι κάθετος. (Καβαβάδας 2014).

5.3. Ασυνέχειες

Ο αριθμός των ασυνεχειών είναι μια ένδειξη του βαθμού ελευθερίας της βραχομάζας. Η παρουσία ασυνεχειών επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας μειώνοντας την ικανότητα της να παραλάβει φορτία σε αξονικές και διατμητικές κατευθύνσεις. (Exadaktylos et al, 2006). Η γεωμετρία και φυσική συμπεριφορά των ασυνεχειών μιας ρωγματωμένης βραχομάζας είναι διαφορετική από εκείνη του άρρηκτου βράχου, και η αμέλεια απόδοσης του κατάλληλου βαθμού σπουδαιότητας συχνά οδηγεί σε εσφαλμένη ερμηνεία της συμπεριφοράς της βραχομάζας. Ανάλογα με τον τρόπο γένεσης

των ασυνεχειών αυτές ταξινομούνται σε επιφάνειες στρώσεις, επιφάνειες σχιστότητας, διακλάσεις και ρήγματα. Οι **στρώσεις** αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα των ιζηματογενών πετρωμάτων και δημιουργούνται από αλλαγές στις διεργασίες απόθεσης, στην πηγή προέλευσης ή στο περιβάλλον απόθεσης. (Πανεπιστημιακές σημειώσεις μαθήματος Πετρολογία Ιζηματογενών Πετρωμάτων, Μ. Κατή).

Η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχομάζας καθορίζεται από την τραχύτητα (roughness) και τον βαθμό εξαλλοίωσης (alteration). Η τραχύτητα των ασυνεχειών συμβάλει θετικά στην ποιότητα της βραχομάζας. Αναλόγως του βαθμού τραχύτητας, οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως: πολύ τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες, ολισθηρές (slickensided). Ο βαθμός εξαλλοίωσης (alteration) των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζεται από τη σχετική ολίσθηση που απαιτείται να συμβεί κατά μήκος της ασυνέχειας ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχών:

(α) Μηδενική ολίσθηση (δηλαδή υφίσταται επαφή)

(β) Ολίσθηση έως 100 mm

(γ) Ολίσθηση άνω των 100mm

Εναλλακτικά, ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών (συνήθως προϊόν της εξαλλοίωσης του πετρώματος): πάχος 0, πάχος έως 1mm, πάχος 1-5mm, πάχος άνω των 5mm.

5.4. Επιρροή Νερού

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας επηρεάζονται από την παρουσία του υπόγειου νερού, προκαλώντας εξαλλοίωση και αποσάθρωση στο πέτρωμα. Το αποτέλεσμα είναι να προκαλείται υποβάθμιση της συνοχής, της δομής της βραχομάζας και της διατμητικής αντοχής. Σε πετρώματα με μεγάλη περατότητα μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα στην ευστάθεια των βραχωδών τεμαχών, εξαιτίας των μεγάλων υδατικών παροχών και των μεγάλων δυνάμεων διηθήσεως. (Καββαδάς 2014)

6. Περιγραφή των ασυνεχειών και των επιπέδων εξόρυξης

Ο προσανατολισμός των επιπέδων και των γραμμικών στοιχείων των πετρωμάτων μπορούν να μετρηθούν και να εκφραστούν με τα μεγέθη της **παράταξης**, της **κλίσης** και της **διεύθυνσης κλίσης**. Με τον όρο **παράταξη** μια επιφάνειας ορίζουμε την γραμμή που προκύπτει από την τομή της με τυχαίο οριζόντιο επίπεδο. Ουσιαστικά η παράταξη είναι η γραμμή που συνδέει σημεία μια κεκλιμένης επιφάνειας που βρίσκονται στο ίδιο υψόμετρο. Ως **διεύθυνση** ορίζουμε την οριζόντια αζιμουθιακή γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ μιας παράταξης του και της διεύθυνσης Βορράς-Νότος. **Κλίση** (dip) ενός επιπέδου ονομάζεται η οξεία γωνία που σχηματίζεται από αυτό και από ένα νοητό οριζόντιο επίπεδο μετρούμενη σε κατακόρυφο επίπεδο. Στην περίπτωση που το κατακόρυφο επίπεδο είναι κάθετο στην παράταξη του στρώματος υπολογίζεται την **μέγιστη κλίση** (true dip) η οποία είναι η πραγματική κλίση και παίρνει τιμές από 0°-90°. Όταν η διεύθυνση του κατακόρυφου επιπέδου δεν είναι κάθετη στην παράταξη του επιπέδου, τότε λαμβάνουμε την **φαινόμενη κλίση** (apparent dip), οι οποία παίρνει τιμές από $0 \leq \Phi.K. \leq M.K.$ **Φορά κλίσης** ενός επιπέδου ονομάζεται η κατεύθυνση προς την οποία μειώνεται του υψόμετρο ενός επιπέδου. Ως **φορά μέγιστης κλίσης** (dip direction) καλείται το οριζόντιο άνυσμα το οποίο είναι κάθετο στην παράταξη του επιπέδου και κατακόρυφο στο επίπεδο που μετριέται η μέγιστη κλίση. Η φορά μέγιστης κλίσης είναι όπως προαναφέρθηκε κάθετη στην παράταξη, συνεπώς θα είναι κάθετη και στην διεύθυνση. Ως **απόσταση** (spacing) των ασυνεχειών ορίζεται η μέση κάθετη απόσταση μεταξύ των διαδοχικών ασυνεχειών ενός συνόλου ασυνεχειών (ISRM 1978).

Οι παραπάνω έννοιες ισχύουν εξίσου και για τα γραμμικά στοιχεία, όπου **διεύθυνση** (trend), είναι η οριζόντια (αζιμουθιακή γωνία) που σχηματίζει το γραμμικό στοιχείο και η διεύθυνση Βορράς-Νότος, **βύθιση** (plunge) είναι η γωνία που σχηματίζει η γραμμή με το οριζόντιο επίπεδο, μετρούμενη σε κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει και την γραμμή και **φορά βύθισης** (plunge direction), είναι η κατεύθυνση κατά την οποία μειώνεται το υψόμετρο του γραμμικού στοιχείου.

Μια από τις κύριες εργασίες σε ένα λατομείο μαρμάρου είναι η περιγραφή των ασυνεχειών που διατρέχουν την βραχομάζα του. Με την χρήση της γεωλογικής πυξίδας μετράται η κλίση και ο προσανατολισμός τους, με αποτέλεσμα να προκύψει η ταυτοποίηση των οικογενειών τους. Στο επόμενο στάδιο υπολογίζεται η επιμονή τους, δηλαδή η έκταση τους στο χώρο (εμβαδόν) και οι αποστάσεις μεταξύ της κάθε οικογένειας.

Το μάρμαρο είναι ανισότροπο υλικό. Οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του μαρμάρου με την ονοματολογία που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία εξόρυξης των ογκομαρμάρων, είναι:

- **Πρόσωπο** (Ιταλικός όρος: verso, Αγγλ. όρος: rift or grain) ή τα «νερά» του μαρμάρου ορίζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την στρώση (παράλληλου ιστού) του μαρμάρου. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μικρότερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.
- **Κεφάλι** (Ιταλικός όρος: contro, Αγγλ. όρος: head-grain) είναι η επιφάνεια που έχει την ίδια παράταξη με το πρόσωπο αλλά αντίθετη κλίση
- **Μουρέλο** ή παρειά (Ιταλικός όρος: secondo, Αγγλ. όρος: Secondary) είναι η επιφάνεια που έχει παράταξη σχεδόν κάθετη με τις δύο προηγούμενες. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μεγαλύτερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.

Διαπιστώθηκαν λοιπόν ότι το λατομείο διασχίζεται από τρεις οικογένειες ασυνεχειών με τα παρακάτω στοιχεία:

- Η αρχαιότερη οικογένεια αποτελεί η στρώση ή πρόσωπο (verso ή rift) που έχει προσανατολισμό 047°/48° και παράταξη ΒΔ-ΝΑ
- Τα κεφάλια (contro ή grain ή hard-way) με προσανατολισμό 275°/80° και παράταξη Β-Ν.
- Τα μουρέλα (secondo ή grain ή δεύτερα) με προσανατολισμό 355°/89°

Τα επίπεδα ασυνεχειών «βασιλικών κομμών» (επίμονων ασυνεχειών μεγάλης έκτασης) που αποκαλούνται «κεφάλια» και έχουν παράταξη περίπου Β-Ν δημιουργήθηκαν στην πρώτη φάση πτυχογένεσης. Τα επίπεδα ασυνεχειών που αποκαλούνται «μουρέλα» και έχουν παράταξη περίπου Α-Δ δημιουργήθηκαν στην δεύτερη (νεώτερη) φάση της πτυχογένεσης. Τα μουρέλα είναι επίσης βασιλικοί κομμοί. Στην Τρίτη φάση οφείλεται το γεγονός ότι η μέγιστη οριζόντια κύρια τάση στην ευρύτερη περιοχή του λατομείου έχει διεύθυνση περίπου Α-Δ έως ΑΒΑ-ΔΝΔ. Τα πρόσωπα κλίνουν με 45° αντίρροπα με το πρηνές εκμετάλλευσης. Η επιμονή των ασυνεχειών είναι μερικές δεκάδες μέτρα.

Ο προσδιορισμός του προσανατολισμού των ασυνεχειών και της κλίσης τους πραγματοποιήθηκε με την χρήση γεωλογικής πυξίδας. Το λατομείο διασχίζεται επιπλέον και από τρία ρήγματα (βασιλικούς κόμους) με στοιχεία 210°/60°-70°.

Οικογένεια	Ασυνέχειες	Κλίση (°)	Διεύθυνση (°)	Παράταξη
1 ^η	Πρόσωπα (verso)	48	047	ΒΔ-ΝΑ
2 ^η	Κεφάλια (contro)	80	275	Β-Ν
3 ^η	Μουρέλα (secondo)	89	355	Α-Δ

Πίνακας 3: Περιγραφή των οικογενειών ασυνεχειών που διατρέχουν το κοίτασμα μαρμάρου

7. Ανάλυση ευστάθειας σφηνών κατά την υπόγεια εκμετάλλευση.

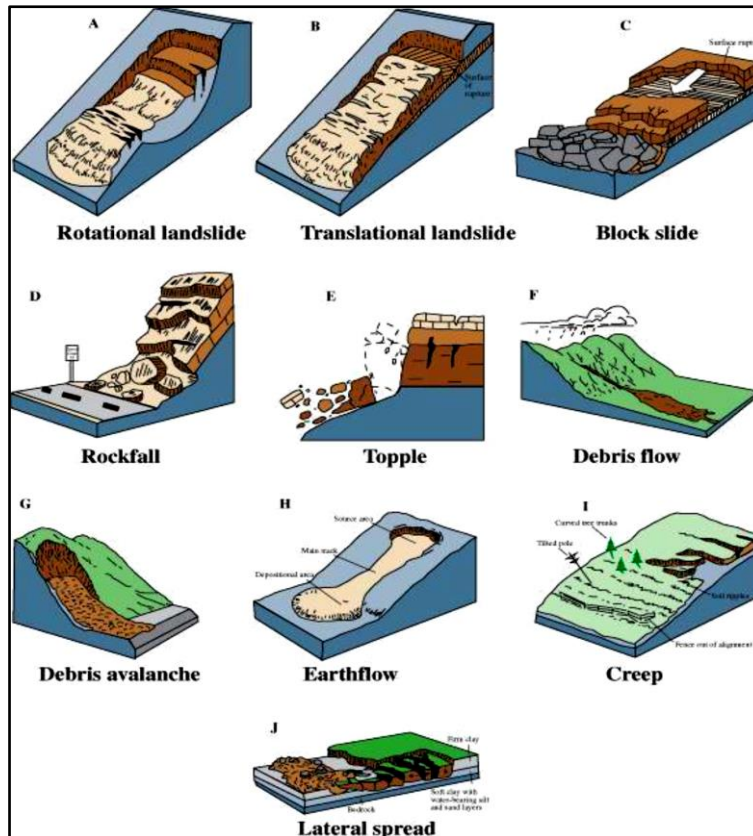
7.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο Κατολισθήσεων

Κατά την εκσκαφή και την εξόρυξη δολομιτικού μαρμάρου στο λατομείο υπάρχει κίνδυνος κατάπτωσης βραχωδών τεμαχών τόσο στο μέτωπο εκσκαφής, όσο και κατά την υπόγεια εκμετάλλευση. Η κατάπτωση τεμαχών ανήκει στον ευρύτερο όρο της μετακίνησης μαζών. Γενικότερα στον όρο μετακίνηση μαζών (mass movements), εντάσσεται κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό (Varnes 1978). Η ταξινόμηση του Varnes είναι η πλέον διεθνώς αποδεκτή και χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή όλων των μορφών κατολισθήσεων. Τα βασικά κριτήρια για αυτή την ταξινόμηση είναι ο τύπος μετακίνησης και το είδος του μετακινούμενου υλικού.

Ως **τύπος μετακίνησης** εντάσσονται οι καταπτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξαπλώσεις και ροές – ερπυσμούς. Το **είδος του μετακινούμενου υλικού** υποβάλλεται σε κινήσεις που είτε εκδηλώνονται σε βραχώδεις σχηματισμούς (πετρώματα) είτε σε εδαφικούς σχηματισμούς. Οι εδαφικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε χονδρόκοκκους εδαφικούς σχηματισμούς (κορήματα) και σε λεπτόκοκκους εδαφικούς σχηματισμούς (γαίες).

ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ (πριν την κίνηση)		
		ΒΡΑΧΟΣ	ΕΔΑΦΟΣ	
			ΚΟΡΗΜΑΤΑ	ΓΑΙΕΣ
Πτώσεις		Πτώσεις βράχων	Πτώσεις κορημάτων	Πτώσεις γαιών
Ανατροπές		Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπές γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφική	Περιστροφική ολίσθηση βράχων	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βράχων	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Πλευρικές εξαπλώσεις		Πλευρική εξάπλωση βράχων	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροές		Ροή – Ερπυσμός βράχων	Ροή – Ερπυσμός κορημάτων	Ροή – Ερπυσμός γαιών
Σύνθετες		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων μετακίνησης		

Πίνακας 4: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978).



Εικόνα 3: Συγκεντρωτικά οι κύριοι τύποι κατολισθήσεων σύμφωνα με τον Varnes (1978)

Ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης, υπάρχει ο διαχωρισμός που ακολουθεί στον Πίνακα κατά Varnes (1978) και κατά WP/WLP (1994).

Περιγραφή	Ταχύτητα	
	Κατά Varnes (1978)	Κατά WP/WLP (1994)
Πάρα πολύ αργή	< 0,06 m/year	< 0,16 mm/year
πολύ αργή	0,06-1,5 m/year	0,16 mm/year-1,6 m/year
αργή	1,5 m/year - 1,5 m/month	1,6 m/year - 13 m/month
μέτρα	1,5 m/month - 1,5 m/day	13 m/month - 1,8 m/hour
γρήγορη	1,5 m/day - 0,3 m/min	1,8 m/hour - 0,3 m/min
πολύ γρήγορη	0,3 m/min - 3 m/sec	0,3 m/min - 5 m/sec
πάρα πολύ γρήγορη	> 3 m/sec	> 3 m/sec

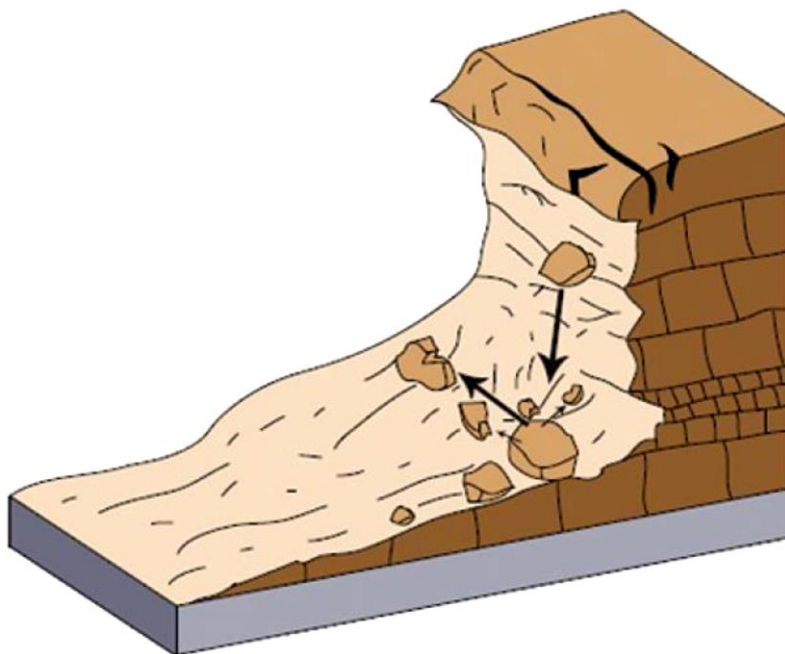
Πίνακας 4: Προτεινόμενη κλίμακα ταξινόμησης ταχύτητας κατολισθήσεων (Varnes (1978) και WP/WLP (1994)).

Η μετακίνηση ενός τεμάχου καθορίζεται από την δράση των δυνάμεων πάνω σε αυτό, την μορφολογία του πρανού και τις γεωτεχνικές παραμέτρους του υλικού. Η μετακίνηση (κατάπτωση ή ολίσθηση) θα συμβεί όταν η διατμητική τάση η οποία δρα επάνω στο τέμαχος, ξεπεράσει την διατμητική αντοχή του. Η μάζα του βραχώδους τεμάχου θα κινηθεί προς τα κατάντη του πρανού μέχρι να βρεθεί στην καινούργια της θέση ισορροπίας.

7.2. Καταπτώσεις

Ο Varnes (1978) όρισε την κατάπτωση ως την κίνηση ενός βραχώδη όγκου οποιουδήποτε μεγέθους, λόγω βαρύτητας με τη μορφή ελεύθερης πτώσης, κύλισης ή αναπήδησης του τεμάχου, η οποία προκαλείται από την απότομη αποκόλλησή του από πρανή με μεγάλη κλίση, κατά μήκος μιας επιφάνειας στην οποία δεν εκδηλώνεται σημαντική κίνηση. Το μέγεθος των βραχοτεμαχίων ποικίλει, από μικρές κροκάλες μέχρι και μεγάλους ογκόλιθους με όγκο εκατοντάδων κυβικών μέτρων, και ταχύτητα κίνησης κυμαινόμενη από λίγα έως και δεκάδες μέτρα το δευτερόλεπτο.

Η κίνηση είναι γρήγορη και συνήθως αυξάνει προς τα κατάντη, λόγω της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Πρόκειται για συνήθη φαινόμενα σε απότομα βραχώδη πρανή και ακτές, λόγω της δράσεως των κυμάτων ή σεισμικών κινήσεων. Οι καταπτώσεις βράχων κατά τον Hoek (2000) σχετίζονται με ορισμένα κλιματικά ή βιολογικά γεγονότα τα οποία μπορούν να επιφέρουν αλλαγή στις δυνάμεις που ενεργούν στον βράχο. Αναλυτικότερα, οι καταπτώσεις βράχων σχετίζονται με την αύξηση της πίεσης νερού των πόρων, λόγω διεύδυσης του βρόχινου νερού, τη διάβρωση, την αποσάθρωση, τον παγετό, την υποσκαφή λόγω εναλλαγής συνεκτικών και χαλαρών σχηματισμών, τη διαταραχή από υπερκείμενους βράχους, τη δράση του ριζικού συστήματος, τη θερμική διαστολή-συστολή και τους σεισμούς.



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου κατάπτωσης σε βραχώδες πρανές

Η διάνοιξη υπόγειων έργων σε βραχώμαζες που διασχίζονται από διάφορες οικογένειες ασυνεχειών και σε διενεργούνται σε σχετικά μικρό βάθος εμφανίζουν αστοχίες, οι οποίες συνήθως εκδηλώνονται με την μορφή καταπτώσεων σφηνών άρρηκτου πετρώματος, από την οροφή ή από ολισθήσεις πάνω σε μια ή δύο επιφάνειες ασυνεχειών. Αυτές οι σφήνες σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες όπως είναι οι στρωσιγενείς επιφάνειες και οι διακλάσεις. Η ολίσθηση σφήνας σε ένα βραχώδες πρανές είναι δυνατόν να εκδηλωθεί όταν υπάρχουν εγκάρσια προς το πρανές τεμνόμενα επίπεδα ασυνεχειών, πολύ καλά αναπτυγμένων με πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, ώστε οι σφήνες που δημιουργούνται να έχουν ικανό όγκο. Στην περίπτωση που η απόσταση των ασυνεχειών είναι μικρή, δεν είναι δυνατόν να έχουμε ολίσθηση σημαντικών σφηνών, παρά μόνον περιοδικές αποσπάσεις και καταπτώσεις μικρών τεμαχίων βράχων, ιδιαίτερα κατά την περίοδο έντονων και παρατεταμένων βροχοπτώσεων. Κατά την εξόρυξη αφαιρείται η δύναμη συγκράτησης της σφήνας με αποτέλεσμα να προκληθεί κατάπτωση ή ολίσθηση, αν οι ασυνέχειες έχουν μεγάλη επιμονή. Προκειμένου να αποφευχθεί ένα τέτοιο φαινόμενο, απαιτείται να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιστήριξης προκειμένου να εξασφαλισθεί η ευστάθεια της οροφής και να μην προκληθεί περαιτέρω απομείωση της δύναμης συγκράτησης (restraint) και του φυσικού κλειδώματος της βραχομάζας (interlocking).

7.3. Αστοχία Σφήνας

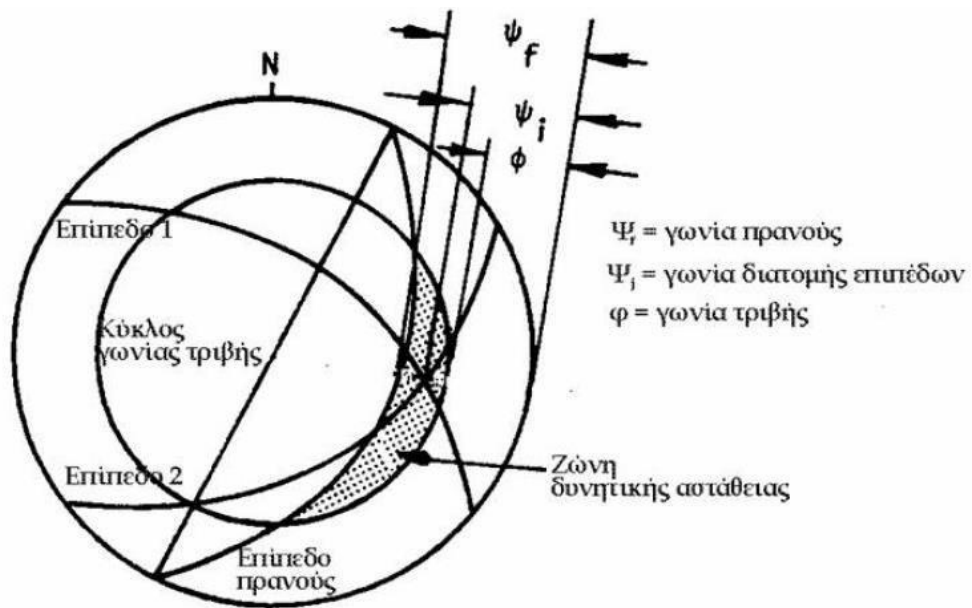
Σύμφωνα με τον Ρόζο (2007), σφηνοειδής ολίσθηση (wedge failure) διαμορφώνεται από δύο επίπεδα που τέμνουν την επιφάνεια του πρανούς και αλληλοτέμνονται σε κάποια θέση, δίνοντας μια γραμμή διατομής εσωτερικά της επιφάνειας του πρανούς.

Για να εκδηλωθεί αστοχία σφήνας, δηλαδή για να αποσπασθεί το τμήμα της βραχομάζας που οριοθετείται από τα δύο αλληλοτεμνόμενα επίπεδα ασυνεχειών, πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες :

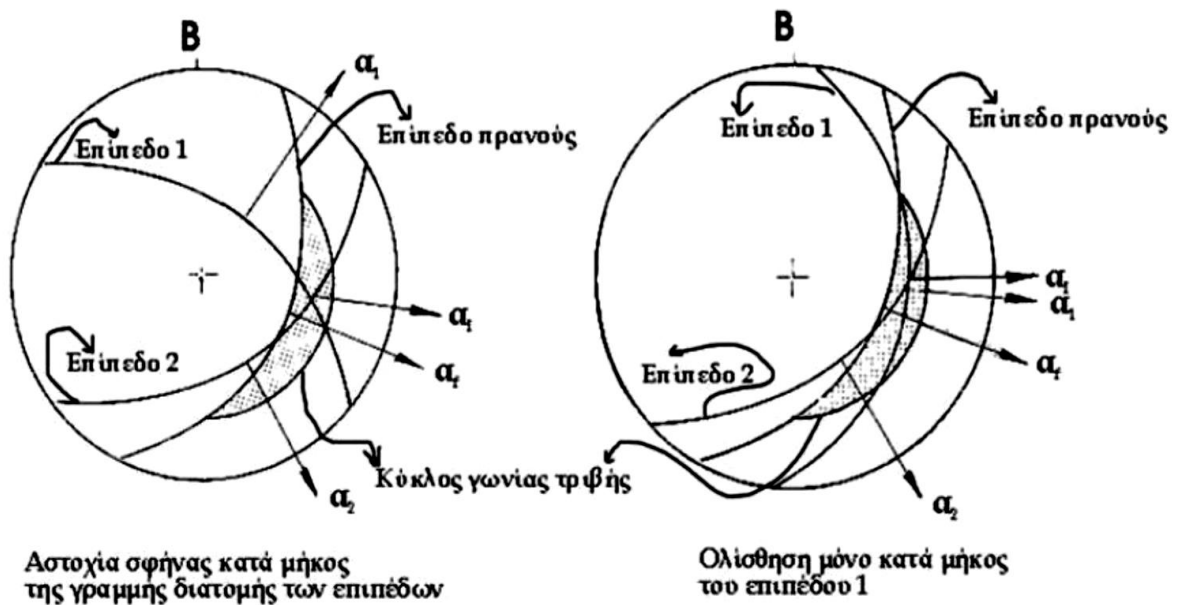
- 1) Η διεύθυνση του πρανούς και της σφήνας να συμφωνούν
- 2) Τα δύο επίπεδα να τέμνουν την επιφάνεια του πρανούς και να αλληλοτέμνονται
- 3) Η γραμμή διατομής των επιπέδων να σχηματίζει γωνία ψ_j με το οριζόντιο επίπεδο που να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής της βραχομάζας ϕ , αλλά μικρότερη της γωνίας του επιπέδου του πρανούς ψ_f

Η ολίσθηση θα σημειωθεί κατά μήκος της γραμμής διατομής των δύο επιπέδων, εφ' όσον η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης αυτών βρίσκεται εκτός ζώνης δυνητικής αστάθειας. Ωστόσο, αν η διεύθυνση μέγιστης κλίσης του ενός επιπέδου βρίσκεται εντός της ζώνης αυτής, τότε η ολίσθηση της σφήνας θα γίνει κατά μήκος του υπόψη επιπέδου. Η ολίσθηση σφηνών κατά μήκος 2 δομικών ασυνεχειών μπορεί να είναι απλή, σε βήματα ή πολυγωνική

Γενικά, διαπιστώνεται ότι σε περίπτωση αστοχίας σφήνας ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς εξαρτάται από τη βύθιση της διατομής των δύο επιπέδων, τη διατμητική αντοχή της επιφάνειας των ασυνεχειών και τη γεωμετρία της σφήνας.



Σχήμα 2: Η πλέον αναγκαία συνθήκη για αστοχία σφήνας από Hoek & Bray, 1981

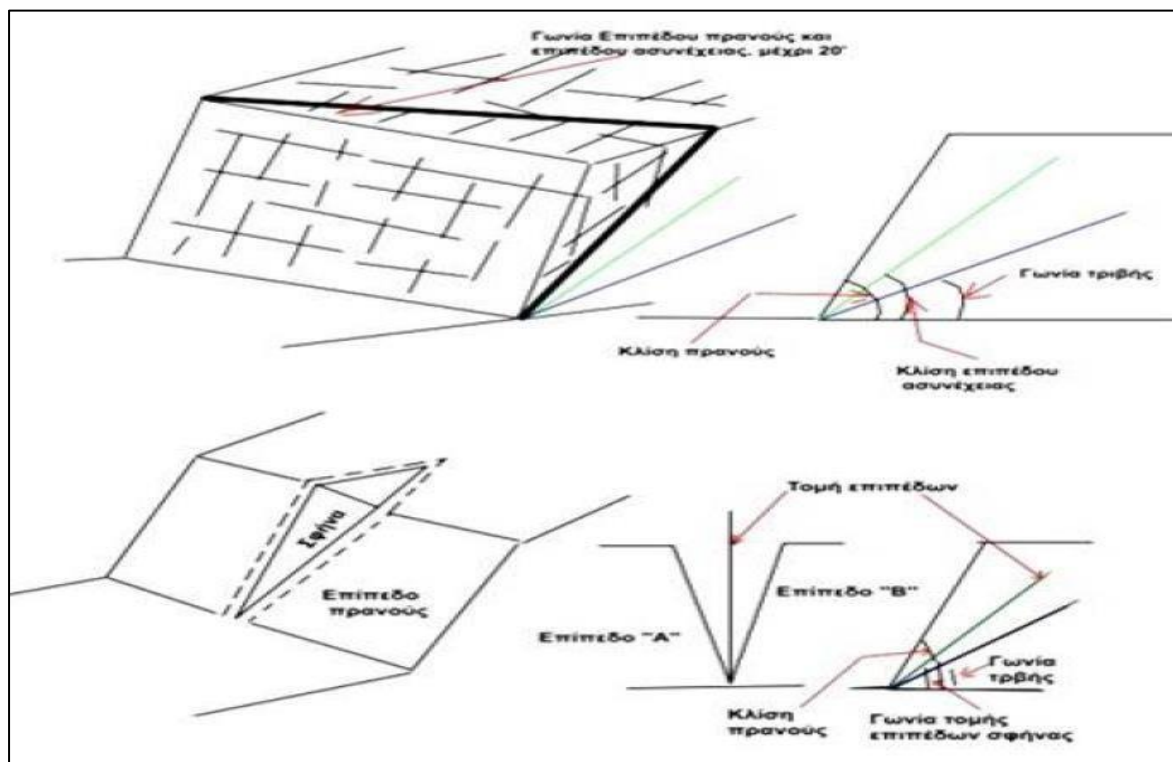


Σχήμα 3: Αστοχία σφήνας με ολίσθηση μόνο κατά μήκος της γραμμής διατομής των δύο επιπέδων, και με ολίσθηση μόνο κατά μήκος του ενός επιπέδου εκ των δύο (Hoek & Bray, 1981).

7.4. Αστοχία Επιπέδου

Η επίπεδη ολίσθηση (plane failure), η οποία αποτελεί ειδική περίπτωση αστοχίας σφήνας κατά την οποία έχουμε παραλληλισμό των δύο επιπέδων, για να συμβεί θα πρέπει :

- 1) Η περιοχή αστοχίας να οριοθετείται από εγκάρσιες στο πρηνές ασυνέχειες
- 2) Το επίπεδο της ασυνέχειας να μη σχηματίζει με το επίπεδο του πρηνούς γωνία μεγαλύτερη των 20°
- 3) Να ισχύει η σχέση $\phi_f > \phi_r > \phi$, δηλαδή η γωνία του πρηνούς να είναι μεγαλύτερη αυτής του επιπέδου και εκείνη με τη σειρά της μεγαλύτερη αυτής της γωνίας τριβής.



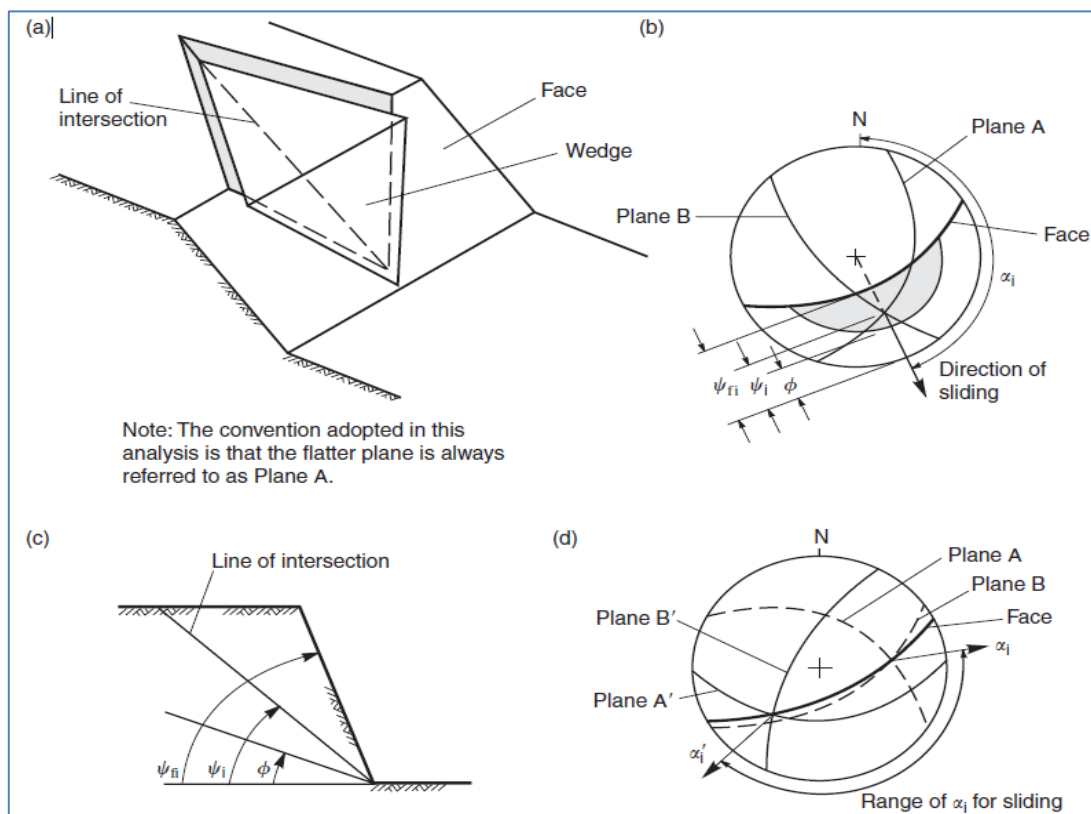
Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση των συνθηκών για την εκδήλωση αστοχιών επιπέδου και σφήνας σε βραχώδη πρηνή (Hoek & Bray, 1981)

7.5. Γεωμετρία Σφήνας

Για την ερμηνεία του βασικού μηχανισμού ολίσθησης των σφήνων έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Η συνθήκη ολίσθησης είναι $\psi_{fi} > \psi_i > \phi$, όπου ψ_{fi} είναι η γωνία κλίσης του πρηνούς και ψ_i η γωνία κλίσης της γραμμής τομής των δύο επιπέδων ως προς την οριζόντια. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ αυτών ορίζεται ως γωνία ξ . Η γωνία που σχηματίζεται από τη διάμεσο της γωνίας ξ και το οριζόντιο επίπεδο που περνάει από τον πόδα της σφήνας είναι η γωνία β .
2. Έστω A και B τα επίπεδα δύο μεγάλων επιφανειών ασυνέχειας, ως B καλείται αυτό με τη μεγαλύτερη γωνία κλίσης.
3. Η αστοχία σφήνας συμβαίνει μόνο με ολίσθηση και ελέγχεται μόνο από τη τριβή.
4. Η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ είναι ίδια και για τα δύο επίπεδα

Η γεωμετρία των σφήνων δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5: Γεωμετρία σφήνας βραχώδους πρηνούς (Hoek and Bray, *Rock Slope Engineering*, 4TH Edition).

7.6. Συντελεστής ασφαλείας

Ως **συντελεστής ασφαλείας (FS)** ορίζεται ο λόγος της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας ολίσθησης προς τη διατμητική τάση ή οποία δρα στην επιφάνεια ολίσθησης. Η διατμητική αντοχή δίνεται από το κριτήριο Mohr- Coulomb

$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$, όπου c η συνοχή, ϕ η γωνία τριβής και σ_n η ορθή τάση που δρα στην επιφάνεια ολίσθησης.

Η διατμητική αντοχή του πετρώματος εξαρτάται από την βασική γωνία τριβής που προσδιορίζεται σε λεία επιφάνεια του πετρώματος. Γενικά είναι ίση με τη παραμένουσα διατμητική αντοχή των ασυνεχειών και εξαρτάται κυρίως από την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος. Επιπλέον η τραχύτητα που παρουσιάζουν οι επιφάνειες των ασυνεχειών και έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μια φαινόμενης συνοχής ή την αύξηση της γωνίας τριβής των ασυνεχειών. Αν σ_n είναι η ορθή τάση που δρα στην επιφάνεια μίας ασυνέχειας, c είναι η φαινόμενη συνοχή και ϕ η γωνία τριβής, τότε το κριτήριο Mohr- Coulomb δίνει την αντοχή σε διάτμηση μίας ασυνέχειας και είναι:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$$

Θεωρώντας ότι στο τέμαχος δρα μόνο το βάρος του W , ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση

$$FS = \frac{c \cdot A + W \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \beta}$$

όπου A το εμβαδό της επιφάνεια ολίσθησης (μήκος επιφάνειας ολίσθησης επί μονάδα μήκους του πρηνούς), W το βάρος του τεμάχους και β η κλίση του πρηνούς. Όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος της μονάδας τότε το πρηνές είναι ευσταθές, ενώ όταν είναι μικρότερος της μονάδας τότε εκδηλώνεται αστάθεια (μετακίνηση).

Για την περίπτωση όπου ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με τη μονάδα, τότε έχουμε οριακή ευστάθεια του πρηνούς.

Η διαδικασία που απαιτείται προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της αστοχίας των σφηνών ξεκινάει αρχικά από τον καθορισμό των σημαντικότερων οικογενειών ασυνεχειών. Έπειτα προσδιορίζεται το ενδεχόμενο κάποιες εκ των σφηνών που δημιουργούνται να ολισθήσουν ή να πέσουν από την οροφή και τους τοίχους κατά την εκσκαφή. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας τους και τέλος εκτιμάται η ποσότητα του οπλισμού που απαιτείται για την βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας των σχηματιζόμενων σφηνών έως ένα αποδεκτό επίπεδο.

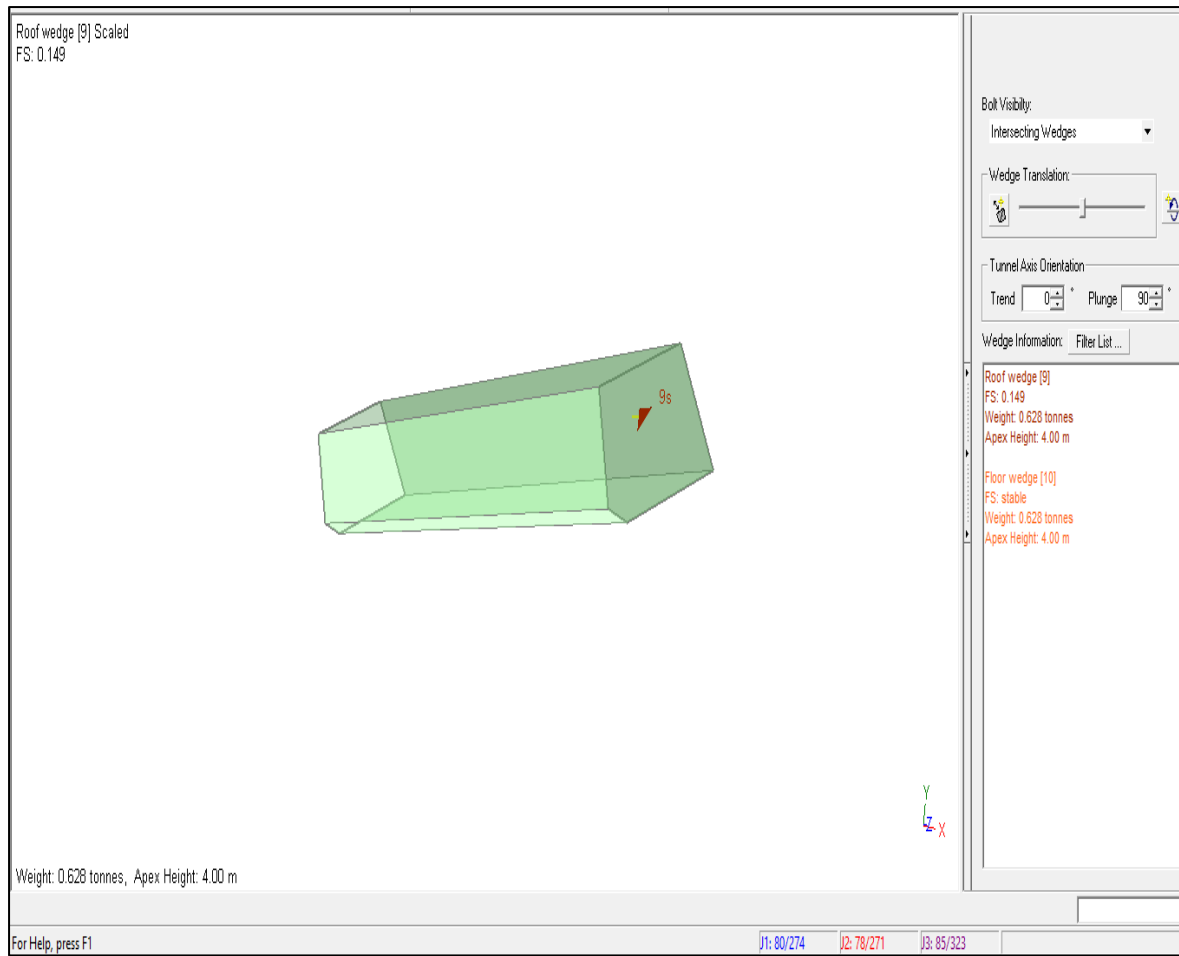
7.7. Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας των σφηνών της οροφής του λατομείου

Για την μελέτη της ευστάθειας των σφηνών που δημιουργούνται κατά την υπόγεια εκμετάλλευση του λατομείου, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Unwedge της Rockscience®. Η γεωμετρία της εκσκαφής έχει δημιουργηθεί από πριν με τη βοήθεια του AUTOCAD TM® και έχει εισαχθεί στο λογισμικό με τη μορφή αρχείου DXF.

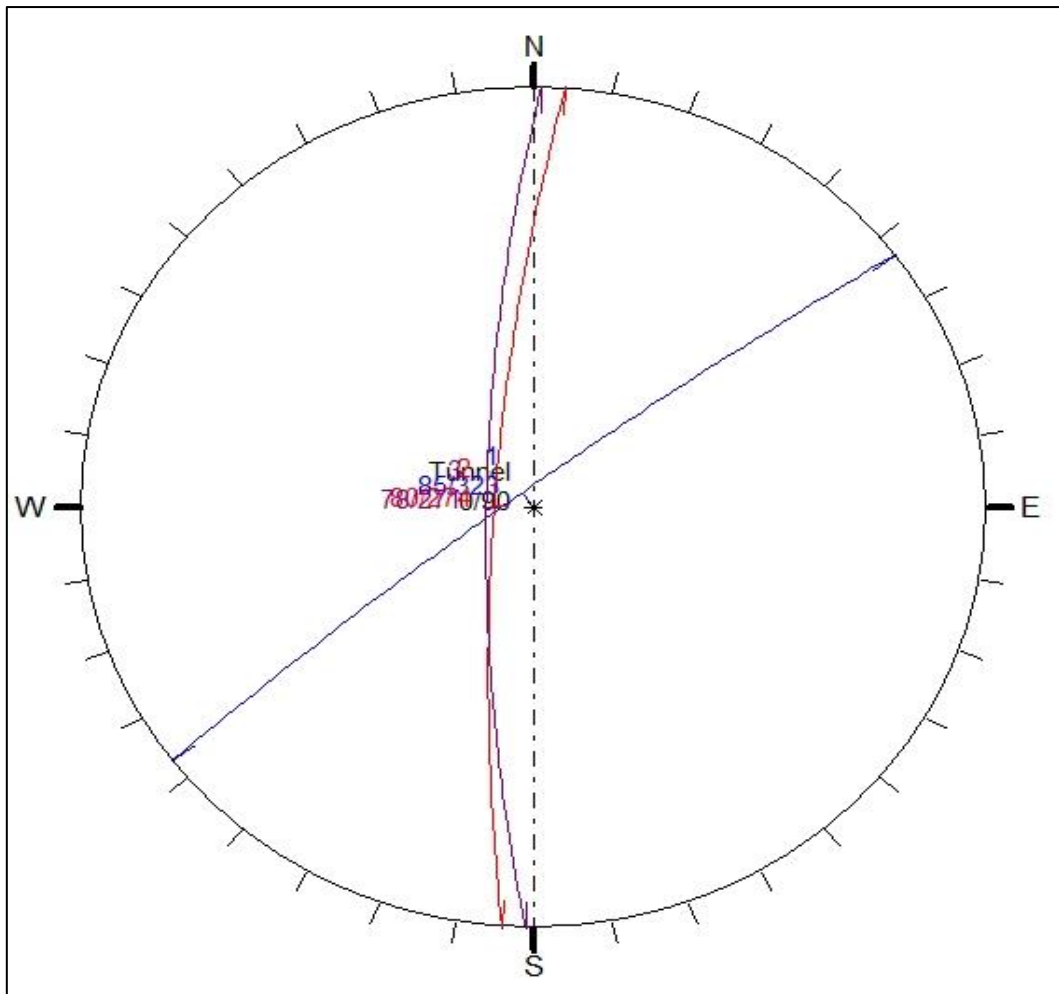
Το πρόγραμμα βασίζεται στη θεώρηση ότι οι σφήνες ορίζονται από τρία επίπεδα ασυνεχειών και φέρουν μόνο το ίδιο βάρος τους. Η επίλυση παρέχει το βάρος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σφήνας καθώς και τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης. Σημειώνεται ότι δεν υπολογίζονται στην ανάλυση διαδοχικές ολισθήσεις σφηνών, αλλά ολισθαίνει μία σφήνα κάθε φορά. Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι οι μετακινήσεις λαμβάνουν χώρα επί των ασυνεχειών και ότι οι σφήνες κινούνται ως άκαμπτα σώματα χωρίς εσωτερική παραμόρφωση ή ρηγμάτωση.

Με βάση τις μετρήσεις των ασυνεχειών όσο αφορά τον προσανατολισμό και την κλίση τους, αλλά και τις τιμές του c, ϕ , πραγματοποιείται υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας των σφηνών σε κάθε θάλαμο του λατομείου. Ξεκινώντας από τον πρώτο θάλαμο (Cavern #1) και για τις ακραίες τιμές $c=0, \phi=30^\circ$, βρέθηκε ότι μορφώνονται σφήνες στο δολομιτικό μάρμαρο, τόσο στην οροφή του θαλάμου, όσο και στα πλευρικά τοιχώματα. Αν $FS < 1$ τότε η σφήνα τείνει να εκδηλώσει αστάθεια και να προκληθεί κατάπτωση του βραχώδους τεμάχους. Για δυνητικά μεγαλύτερη συνοχή με $c=50$ ο συντελεστής ασφαλείας των σφηνών είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας ($FS > 1$) άρα είναι σταθερές και δεν εμφανίζουν ολίσθηση.

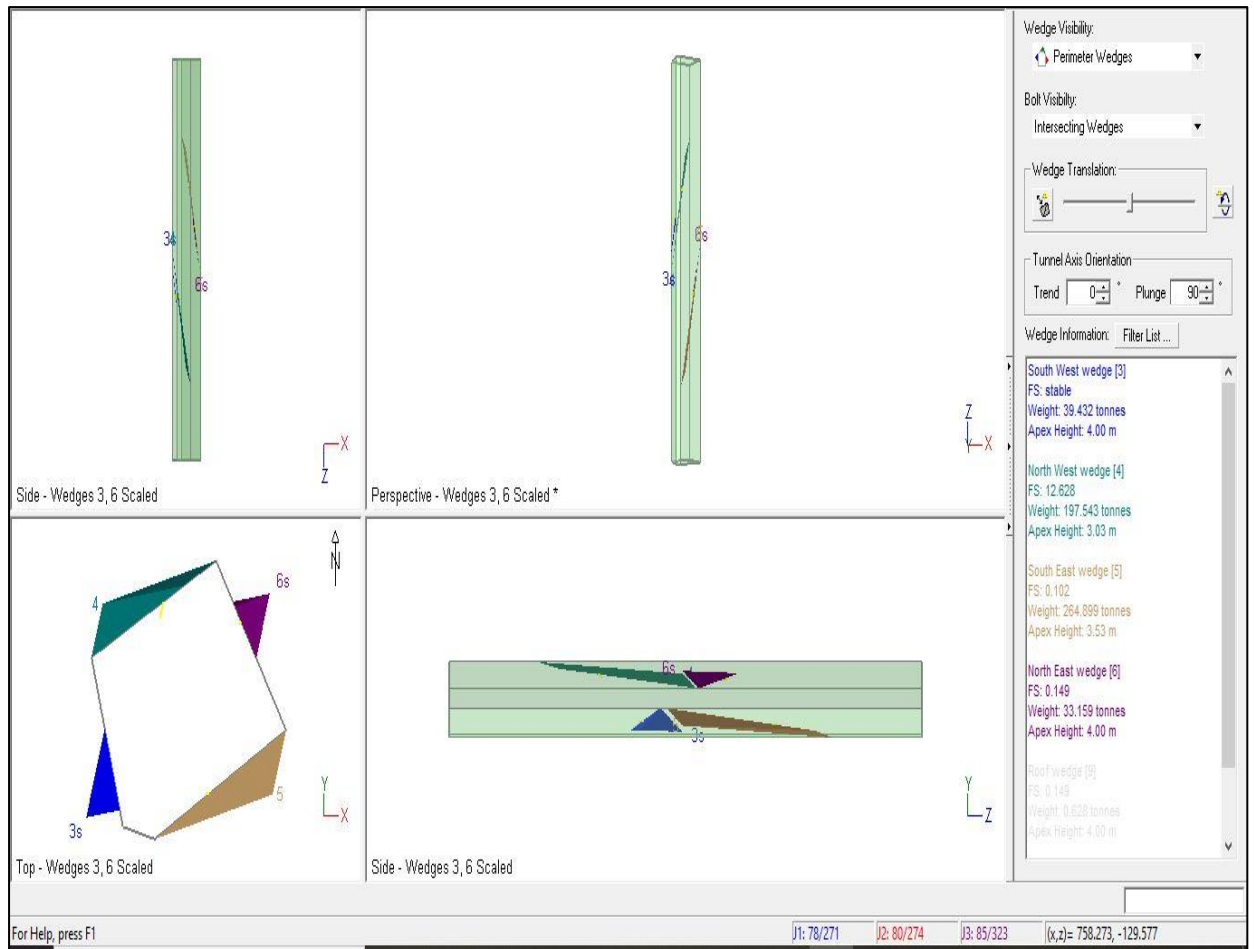
Αναλυτικότεροι πίνακες με τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας για τις σφήνες που μορφώνονται στην οροφή της εκσκαφής αλλά και στα πλευρικά τοιχώματα δίνονται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.



Εικόνα 5: Ασταθής σφήνα στην οροφή του πρώτου θαλάμου εξόρυξης κοιτάσματος δολομιτικού μαρμάρου. (Cavern #1) με συντελεστή $FS=0,149$.



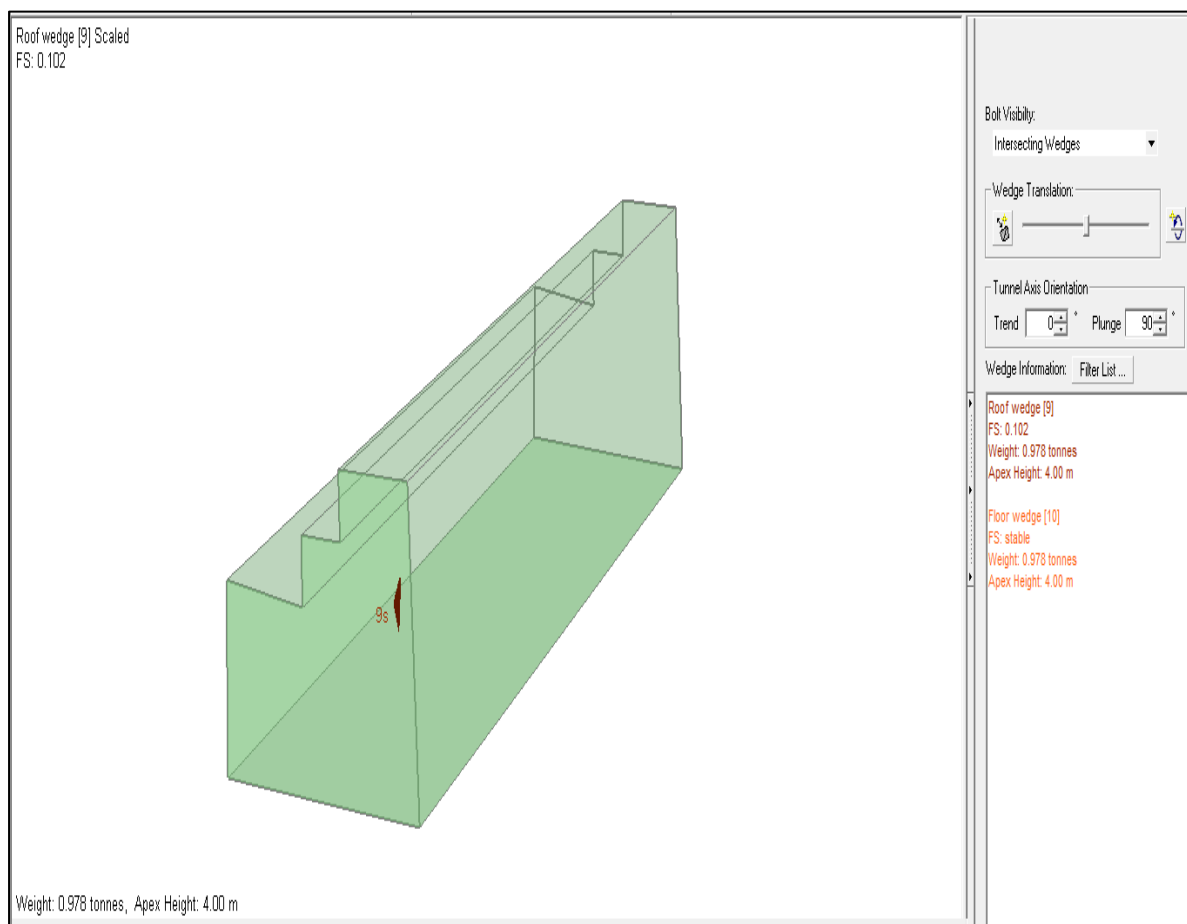
Εικόνα 6: Στερεογραφική προβολή ασυνεχειών C10,C12,S10 (Cavern #1) που ευθύνονται για τον σχηματισμό της ασταθούς σφήνας με συντελεστή ασφαλείας $FS=0,149$. Unwedge.dfx



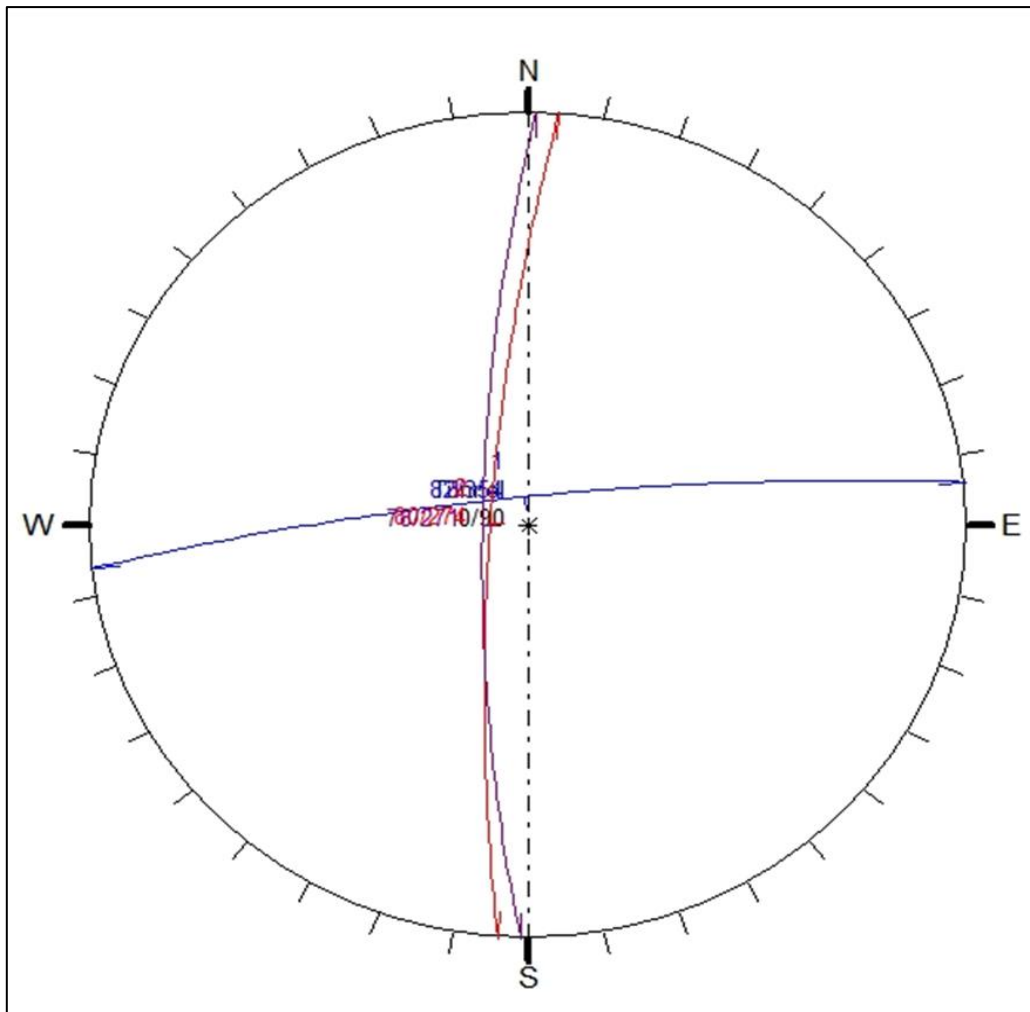
Εικόνα 7: Ανάλυση ευστάθειας σφηνών στα πλευρικά τοιχώματα κατά την υπόγεια εξόρυξη στον θάλαμο 1 (cavern #1). Unwedge.dfx.

Θάλαμος 2 (Cavern #2)

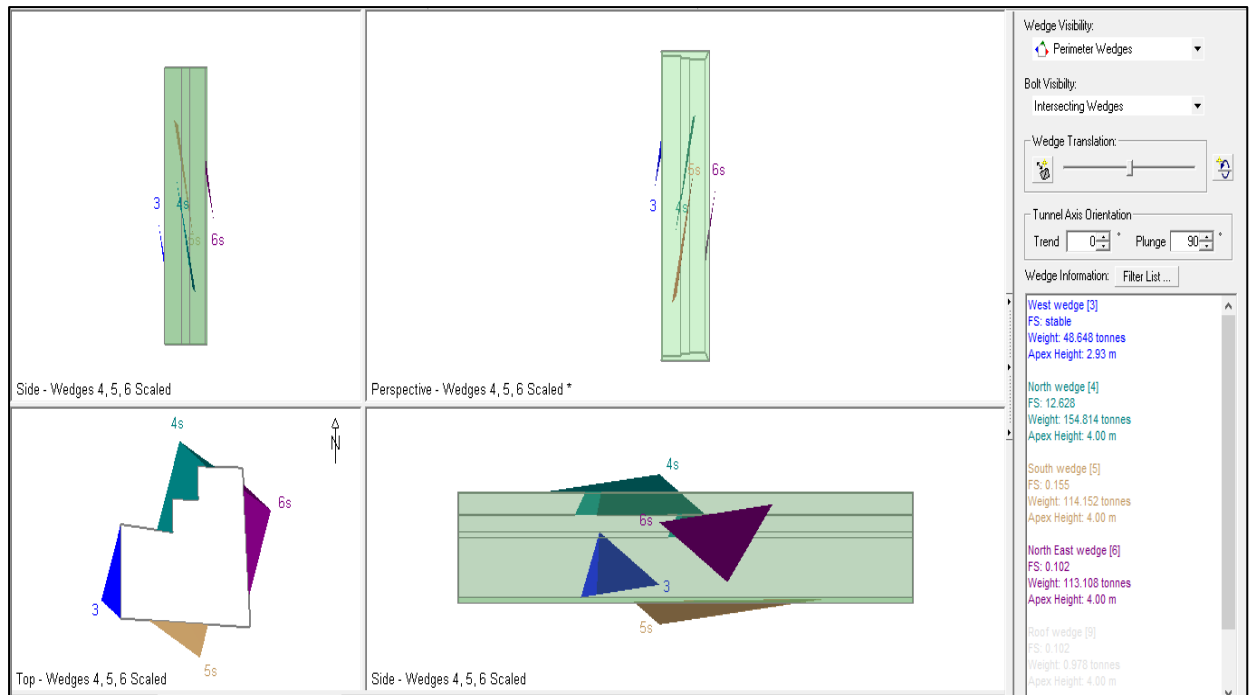
Προχωρώντας στον δεύτερο θάλαμο (Cavern #2), διαπιστώθηκε η μόρφωση ασταθούς σφήνας στην οροφή του, με συντελεστή ασφαλείας (roof wedge) $FS=0.102$, αλλά και στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου. Ωστόσο για μια δυνητικά μεγαλύτερη συνοχή με $c=50$, $\phi=30^\circ$, ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνει τόσο ώστε $FS>1$, οπότε οι σφήνες που μορφώνονται παραμένουν σταθερές (Εικόνα 8, Εικόνα 10, Εικόνα 11).



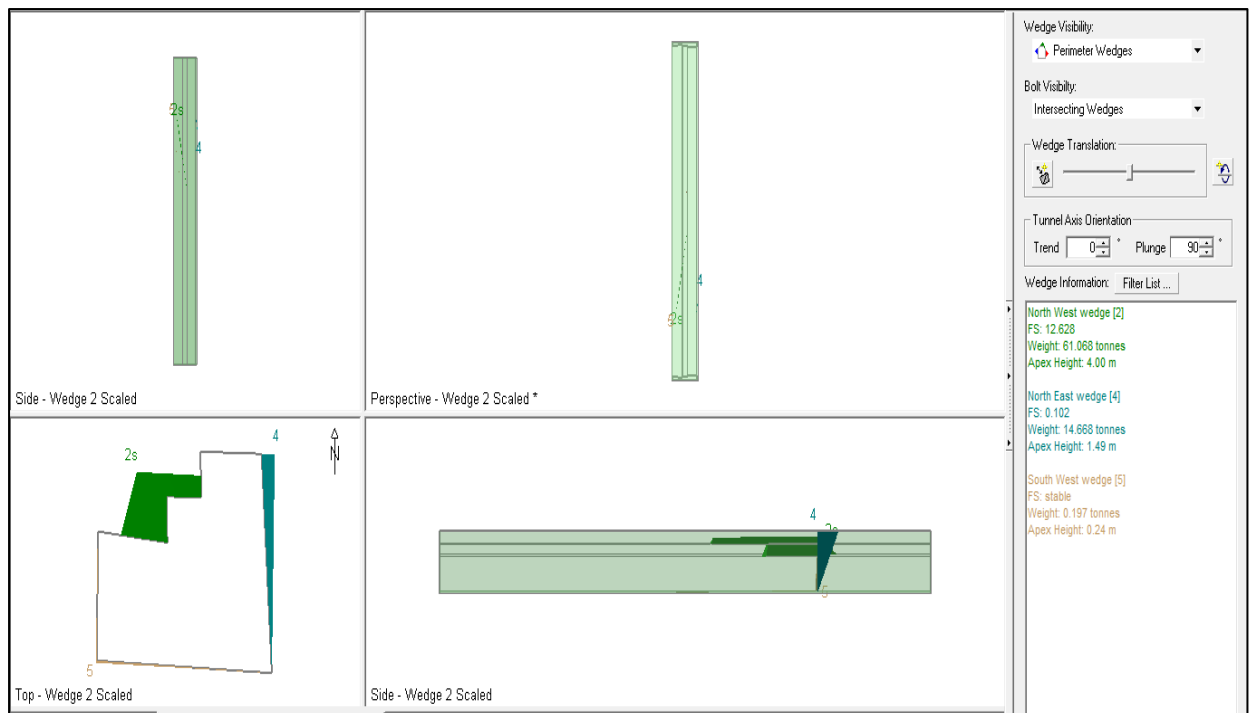
Εικόνα 8: Ασταθής σφήνα στην οροφή του θαλάμου 2 (Cavern #2). (roof wedge) με συντελεστή ασφαλείας $FS=0,10$, που μορφώνεται από τις ασυνέχειες C10, C6, S9. Unwedge.dfx.



Εικόνα 9: Στερεογραφική προβολή ασυνεχειών C10,C6,S9 (Cavern #2) που ευθύνονται για τον σχηματισμό ασταθούς σφήνας με συντελεστή ασφαλείας $FS=0.102$. Unwedge.dfx.



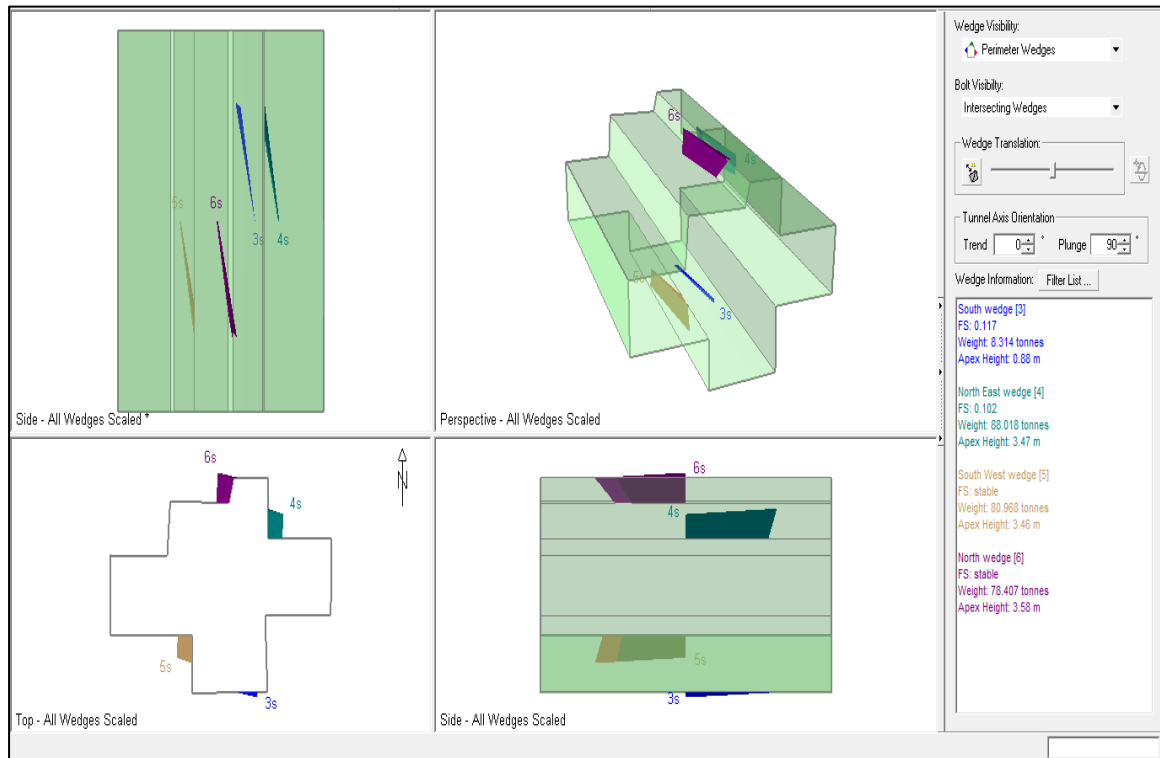
Εικόνα 10: Ανάλυση ευστάθειας σφηνών που σχηματίζονται στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου 2 (cavern #2). Unwedge.dfx



Εικόνα 11: Ανάλυση ευστάθειας σφηνών που σχηματίζονται στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου 2 (cavern #2). Unwedge.dfx

Θάλαμος 3 (Cavern 3)

Στον τρίτο θάλαμο (Cavern #3) δεν παρατηρείται να μορφώνεται κάποια σφήνα στην οροφή του κατά την υπόγεια εκμετάλλευση. Μορφώνονται όμως αρκετές σφήνες στα πλευρικά τοιχώματα οι οποίες για $c=0$ και $\phi=30^\circ$ είναι ασταθείς. Για δυνητικά μεγαλύτερη συνοχή με $c=50$ ο συντελεστής ασφαλείας είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας ($FS>1$) άρα είναι σταθερές και δεν εμφανίζουν ολίσθηση (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Ανάλυση ευστάθειας σφηνών που σχηματίζονται στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου 3 από τις ασυνέχειες C7, C8, S14 (Cavern #3). Unwedge.dfx

Cavern	Joins	c	ϕ	FS
#1	C10,C6,S10	0	30	Roof Wedge: FS=0.149
#2	C10,C6,S9	0	30	Roof Wedge: FS=0.102
#3	NO ROOF WEDGES FORMED			

Πίνακας 5: Συνοπτικός Πίνακας ασταθών βραχωδών τεμαχίων που μορφώνονται στην οροφή του λατομείου.

8. Ανάλυση ευστάθειας του πρανούς κατά την εκμετάλλευση δολομιτικού μαρμάρου.

Ως **πρανή** ορίζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που χαρακτηρίζουν ένα πρανές, δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας, οι οποίες σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από την πιθανή παρουσία νερού στο έδαφος, έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικών δυνάμεων στο εσωτερικό τους που τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα προκειμένου να εξομαλύνουν το ανάγλυφο. Στις διατμητικές αυτές τάσεις αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του υλικού και στην περίπτωση που αυτή δεν επαρκεί, τότε προκαλείται θραύση του πρανούς και μετακίνηση της εδαφικής μάζας, η οποία ονομάζεται κατολίσθηση. (Turner & Schuster 1996)

Αστοχία πρανούς είναι η κατάρρευση μάζας της επιφάνειάς του. Αστοχία μπορεί να επέλθει είτε λόγω της ανθρώπινης επέμβασης στη φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων (εκσκαφές ορυγμάτων, υποσκαφές, επιφορτίσεις, κ.α.) τα οποία διαταράσσουν την υφιστάμενη ισορροπία, είτε υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, οι σεισμοί κ.α., μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία ενός πρανούς. (Turner & Schuster 1996)

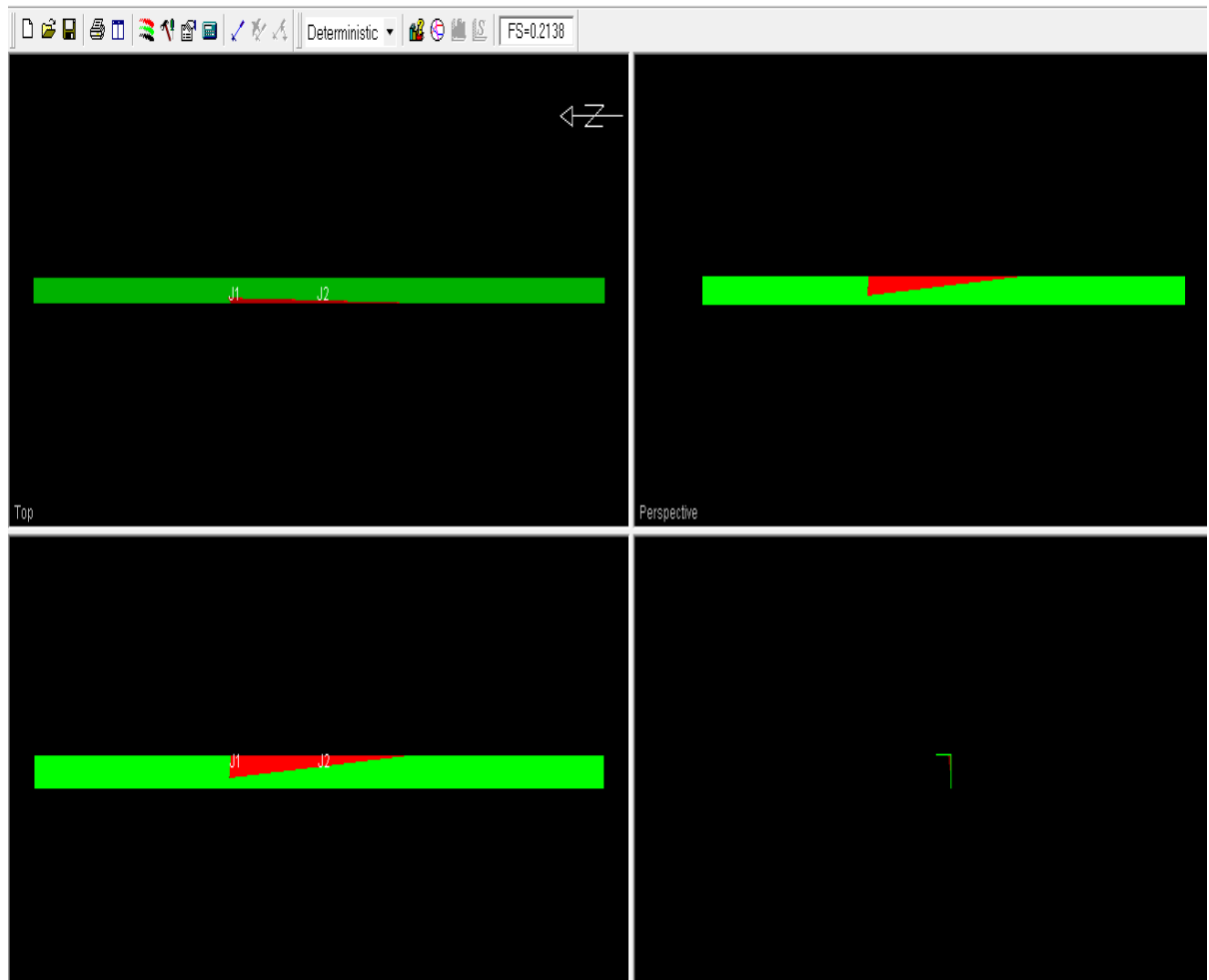
Για την διατήρηση επισφαλών συνθηκών ώστε να την πραγματοποίηση ενός τεχνικού, χρειάζεται ο έλεγχος της ευστάθειας πρανών, που διαμορφώνονται κατά την κατασκευή τεχνικών έργων, αλλά και φυσικών πρανών που παρουσιάζουν ενδείξεις πιθανής κατολίσθησης.

Το λατομείο διατρέχεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από τρεις οικογένειες ασυνχειών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε κάθε θάλαμο ξεχωριστά. Ο υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας (FS) των σφηνών που μορφώνονται στο μέτωπο του λατομείου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Swedge της Rockscience. Το Swedge είναι ένα εργαλείο ανάλυσης για την αξιολόγηση της γεωμετρίας και της σταθερότητας των επιφανειακών σφηνών που μορφώνονται σε βραχώδη πρανή.

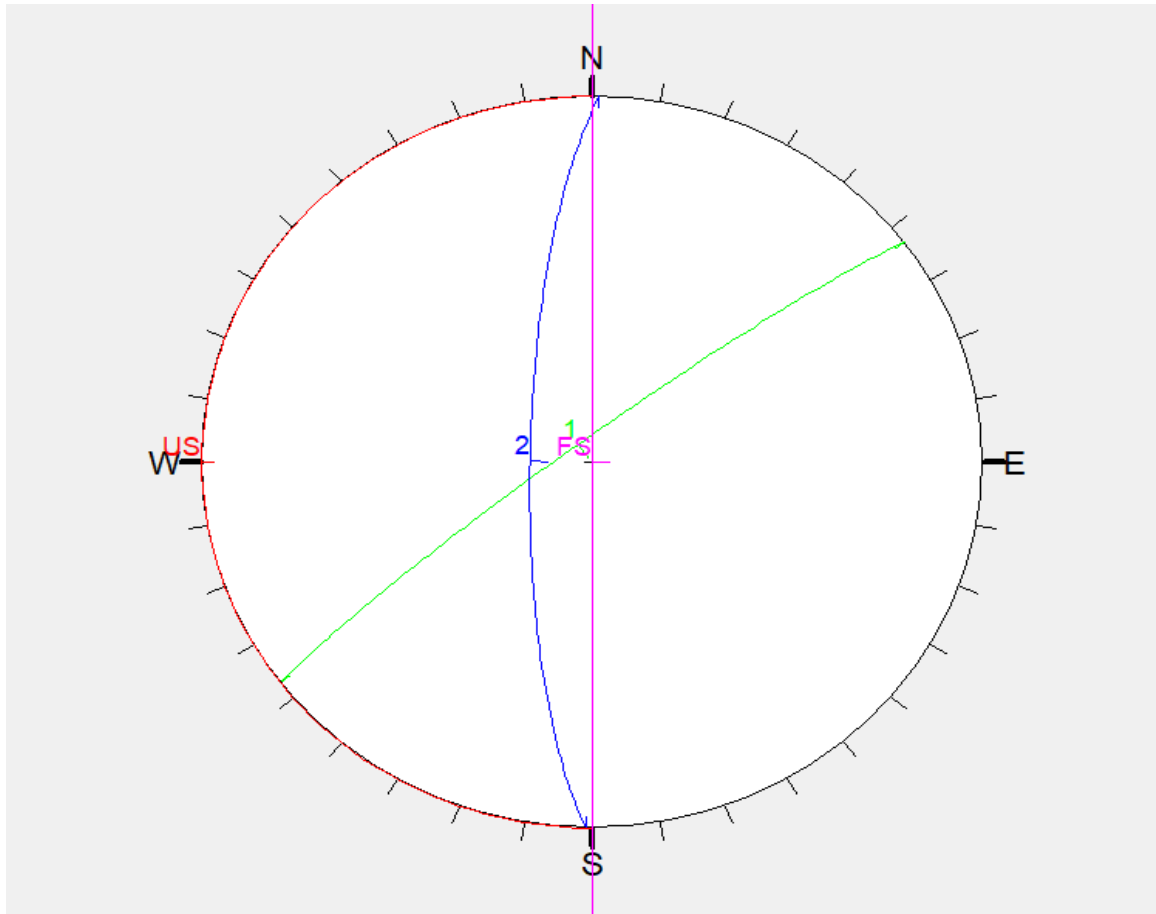
Στην φάση της εξόρυξης, για την οποία, σύμφωνα με τα Άρθρα 40, 83 και 84 του Κ.Μ.Λ.Ε.: Κάθε εκσκαφή, για την ασφαλή και ορθολογική εκτέλεση της εργασίας πρέπει να υποδιαιρείται σε βαθμίδες ύψους, το πολύ, δεκαπέντε (15) μέτρων και με τη μέγιστη γωνία πρανούς εκμετάλλευσης να είναι στις 60° από το οριζόντιο επίπεδο και εφόσον πληρούνται ορισμένες προδιαγραφές (π.χ. πρότμηση, χαλαρή όρυξη κ.α.), δύναται να φτάνει τις 70°. Στο λατομείο μελέτης, οι βαθμίδες που αναλύονται έχουν ύψος 8 μέτρων, με στοιχεία 90/270.

Για τον υπολογισμό των συντελεστών ασφαλείας θεωρούμε το ακραίο σενάριο, όπου $c=0$ και $\phi=30^\circ$. Με βάση αυτές τις τιμές παρατηρούνται να μορφώνονται ασταθείς σφήνες στο μέτωπο εκσκαφής, περιμετρικά από τους θαλάμους, οι οποίες παρουσιάζουν $FS < 1$ άρα είναι ασταθείς. Αυξάνοντας την συνοχή για $c=50$ και $\phi=30^\circ$, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας αυξάνουν, έτσι ώστε $FS > 1$, άρα οι σφήνες που μορφώνονται είναι σταθερές (Εικόνα 13, Εικόνα 15, Εικόνα 17).

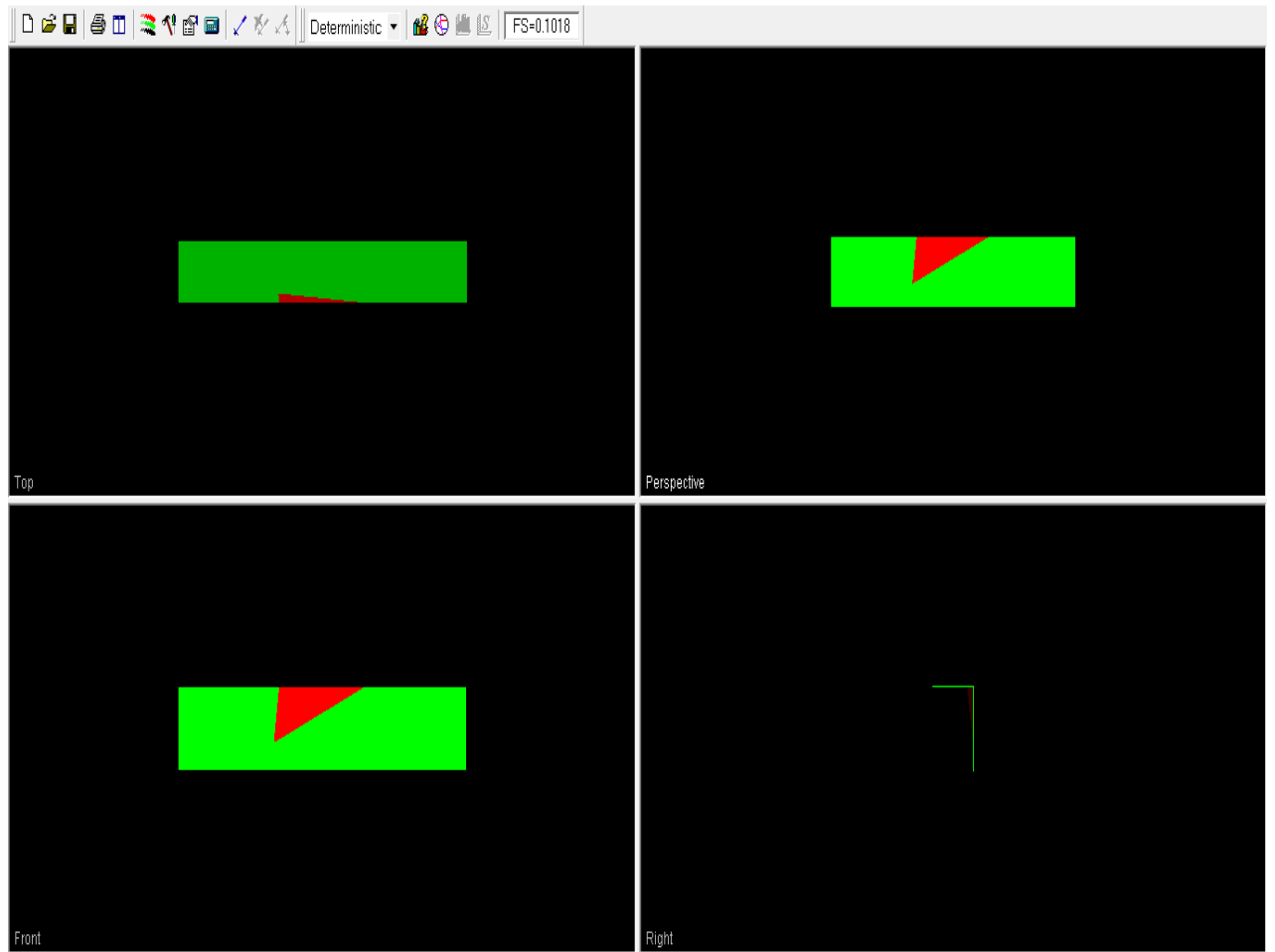
Αναλυτικότεροι πίνακες με τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας για τις σφήνες που μορφώνονται στο μέτωπο εκσκαφής περιμετρικά των θαλάμων δίνονται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.



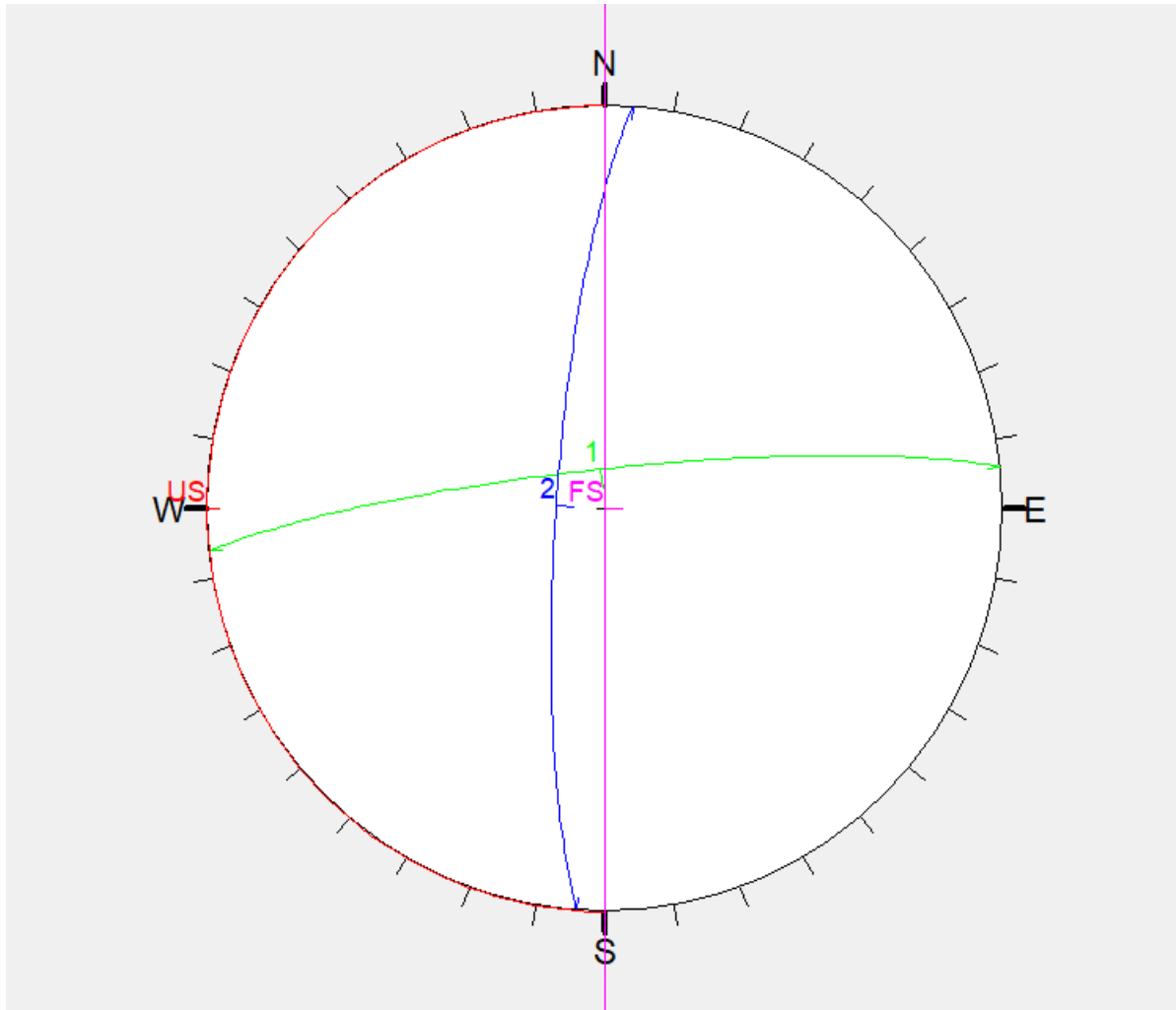
Εικόνα 13: Ασταθής σφήνα $FS= 0.213$ στον θάλαμο 1 (Cavern 1) που διαμορφώνεται από τις ασυνέχειες των οικογενειών *secondo* και *contro*.



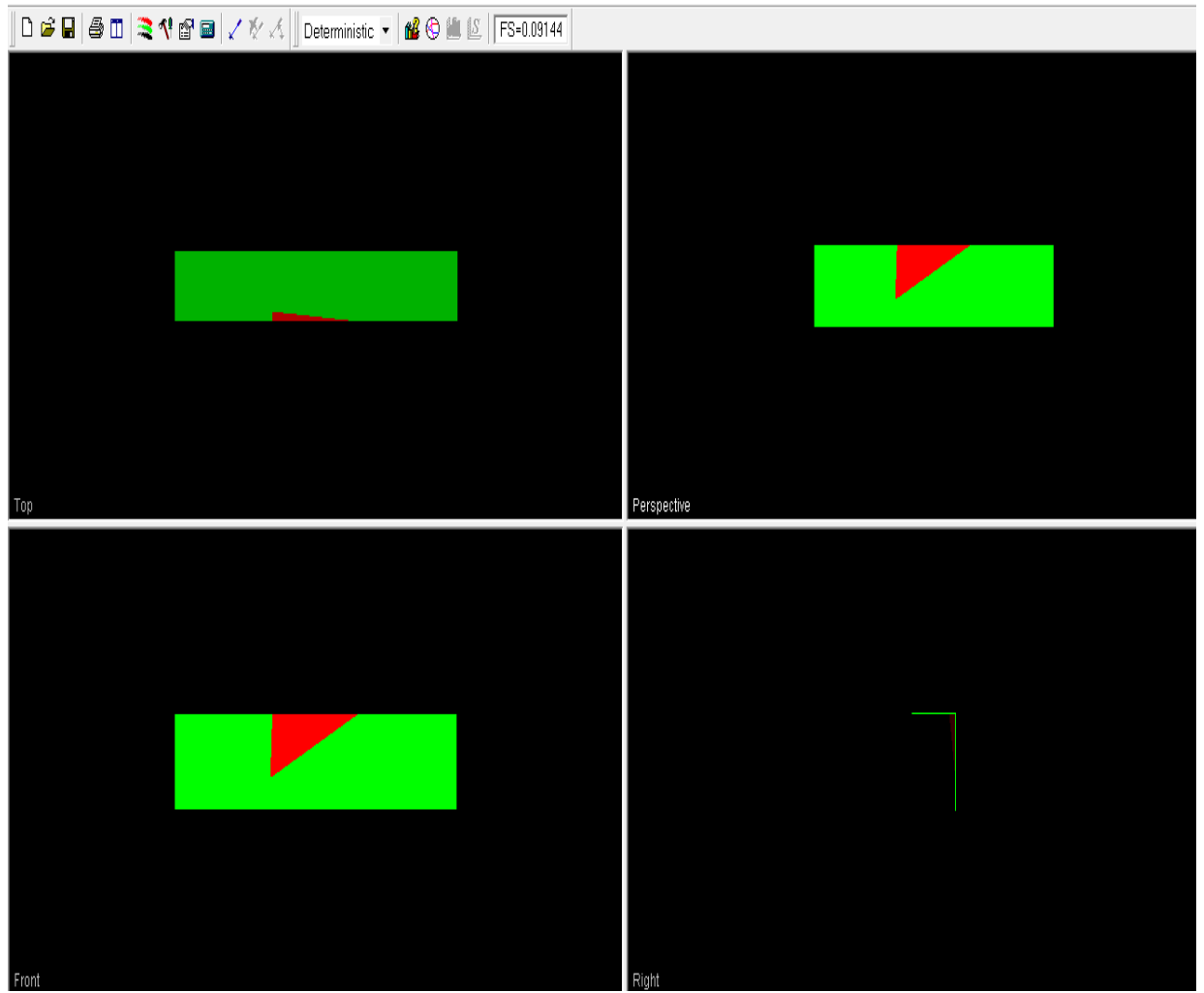
Εικόνα 14: Στερεογραφική προβολή ασυνεχειών S10, C2010(2) (Cavern #1) που ευθύνονται για τον σχηματισμό ασταθούς σφήνας με συντελεστή ασφαλείας $FS=0.213$.



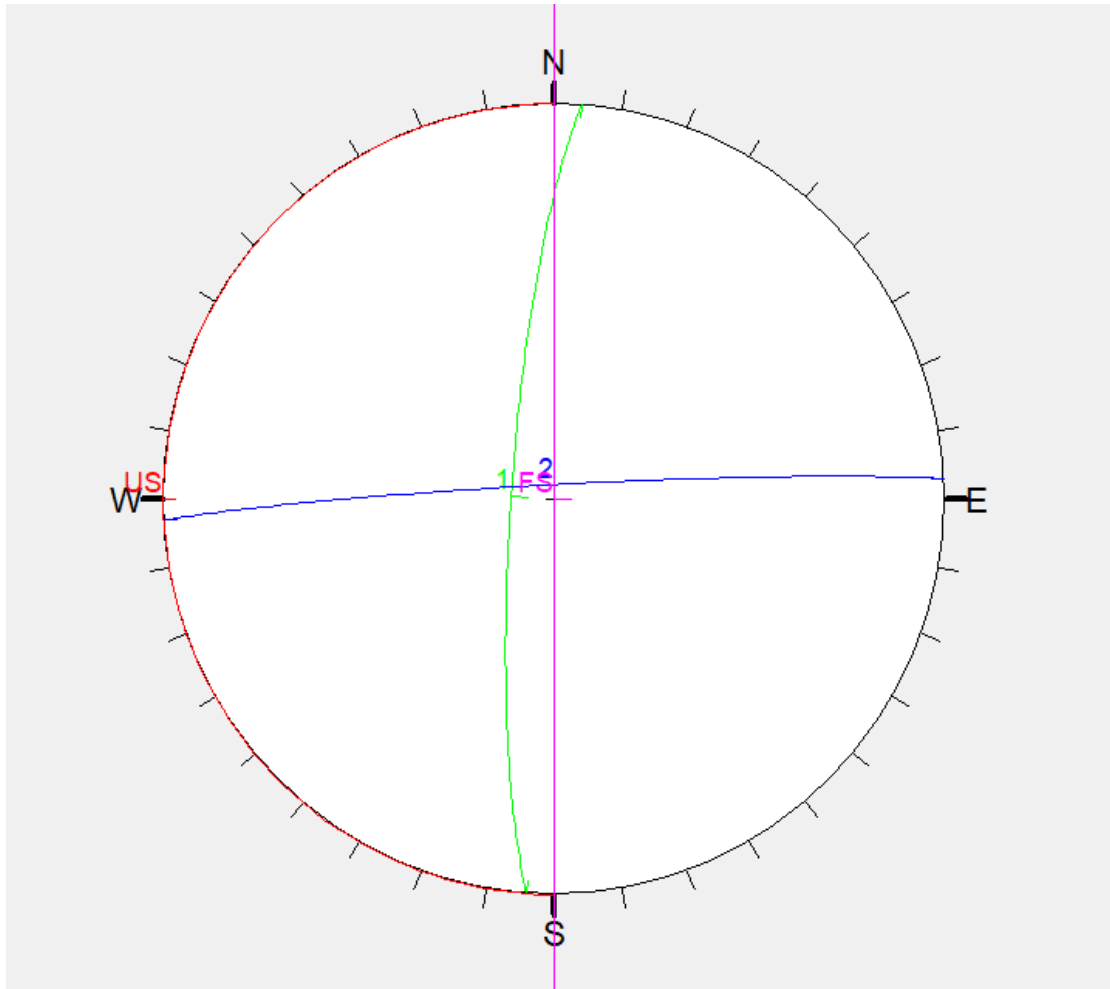
Εικόνα 15: Ασταθής σφήνα $FS=0.102$ στον θάλαμο 2 (Cavern 2), που διαμορφώνεται από τις ασυνέχειες των οικογενειών *secondo* και *contro*.



Εικόνα 16: Στερεογραφική προβολή ασυνεχειών S9, C6 (Cavern #2) που ευθύνονται για τον σχηματισμό ασταθούς σφήνας με συντελεστή ασφαλείας $FS=0.102$.



Εικόνα 17: Ασταθής σφήνα $FS=0.091$ στον θάλαμο 3 (Cavern 3), που διαμορφώνεται από τις ασυνέχειες των οικογενειών *secondo* και *contro*.



Εικόνα 18: Στερεογραφική προβολή ασυνεχειών C9, S14 (Cavern #2) που ευθύνονται για τον σχηματισμό ασταθούς σφήνας με συντελεστή ασφαλείας $FS=0.091$.

9. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε αναλύσεις ευστάθειας βραχωδών τεμαχών κατά τη διάρκεια υπόγειας και υπαίθριας εκμετάλλευσης ενός λατομείου μαρμάρου. Για την πραγματοποίηση της ελήφθησαν υπόψιν η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής όπου εδράζεται το λατομείο, η τεκτονική, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του μαρμάρου και των ασυνεχειών που το διασχίζουν.

Όσο αφορά την γεωλογία, η περιοχή μελέτης ανήκει από γεωλογικής άποψης στη μάζα της Ροδόπης που στον ελλαδικό χώρο καταλαμβάνει την ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη. Ο χώρος του λατομείου τοποθετείται στον ανώτερο ορίζοντα της μεταμορφωμένης ακολουθίας (Χατζηπαναγής, 1990). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής του λατομείου χαρακτηρίζονται από έντονη πτυχωσιγενή και ρηξιγενή τεκτονική. Η ρηξιγενή τεκτονική, αυτής της περιοχής αντιπροσωπεύεται από τρία παραμορφωτικά γεγονότα, P1, P2, P3 που δημιουργούν πλήθος ρηγμάτων και διακλάσεων. (Χατζηπαναγής, 1990)

Με βάση τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την ασφαλή εκμετάλλευση του λατομείου τόσο κατά την υπόγεια όσο και κατά την υπαίθρια εκσκαφή τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποδεικνύουν την διαμόρφωση σφηνών και στις δύο περιπτώσεις από τις οποίες μπορούν να προκληθούν ολισθήσεις σφηνών. Οι σφήνες διαμορφώνονται τόσο μεταξύ των μουρέλων (secondo) και των κεφαλιών (contro), όσο και μεταξύ μουρέλων. Μερικές από αυτές, εμφανίζουν συντελεστή ασφαλείας $FS < 1$, επομένως υπάρχει ενδεχόμενο πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων κατά την λειτουργία του λατομείου. Συνεπώς θα πρέπει να ληφθούν μέτρα προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι κατολισθήσεις. Οι σφήνες που δημιουργούνται μεταξύ των secondo παρατηρούμε ότι εμφανίζουν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο του ενός $FS > 1$, άρα είναι σταθερές. Όσο αφορά τα πρόσωπα (verso), δηλαδή την στρώση των μαρμάρων τότε παρατηρούμε ότι μεταξύ των contro και των verso δημιουργούνται ασταθείς σφήνες, ενώ μεταξύ των verso και των secondo δεν μορφώνονται σφήνες.

Για την αποφυγή ενδεχόμενων αποκολλήσεων και ολισθήσεων των σφηνών που μορφώνονται κατά την εκμετάλλευση του λατομείου προτείνεται η τοποθέτηση κοχλιών και πλεγμάτων σε κάθε βήμα εξόρυξης στους τρεις υπόγειους θαλάμους πριν την αποκάλυψη όλης της βάσης μιας σφήνας έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ακινησία της. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό προτείνεται (α) η εγκατάσταση φωτισμού στους υπόγειους θαλάμους που θα συμβάλλει στην έγκαιρη παρατήρηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα δυνητικών προβλημάτων αστάθειας σφηνών και (β) η εξασφάλιση κατάλληλων μηκών αγκυρίων που θα διαπερνούν πλήρως τις κατά τόπους σχηματιζόμενες σφήνες και θα αγκυρώνονται σε συμπαγές μάρμαρο. Το απαιτούμενο μήκος κοχλιών και ο αριθμός των κοχλιών που θα παραλάβουν επαρκώς το βάρος της σφήνας, μπορούν να βρεθούν από τη γεωμετρία της εκάστοτε σφήνας που μετράται εύκολα επί τόπου με μετροταινία και γεωλογική πυξίδα. Επιπλέον τυχόν νέες ασυνέχειες (μουρέλα ή κεφάλια) που δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθούν και να μετρηθούν στην παρούσα φάση της εκμετάλλευσης πρέπει να ληφθούν υπόψιν σε νέα μηχανική ανάλυση για την ασφαλέστερη πρόοδο της εκμετάλλευσης.

Βιβλιογραφία

Αρβανιτίδης Ν. και Θεοδωρούδης Α. (2001). Νέες Κοιτασματολογικές Προσεγγίσεις στην Αξιοποίηση Διακοσμητικών Πετρωμάτων, Θεσσαλονίκη, Πρακτικά Ημερίδας “Ελληνικό Μάρμαρο”, σελ. 21-36.

Βώβου Θεοδώρα, Υπόγεια εκμετάλλευση λατομείων ασβεστολίθου και μαρμάρου. Ζητήματα ευστάθειας οροφής και στύλων, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ

Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός ΕΑΚ-2000.

Καθβαδάς, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, ΕΜΠ.

Κατεχανάκη Π., Εφαρμογή του Ευρωκώδικα 7 για τον έλεγχο της ευστάθειας βραχοσφηνών σε υπόγεια εκσκαφ, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ

Κατή Μ., Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πετρολογία Ιζηματογενών Πετρωμάτων, ΕΚΠΑ

Κούκης Γ, Σαμπατακάκης Ν (2007). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 516 σσ.

Κράνης Χ.Δ., Αντωνίου Β.Ε. Πανεπιστημιακές σημειώσεις Γεωλογική Χαρτογράφηση, ΕΚΠΑ.

Κωστόπουλος Δ., Πετρολογία Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

Μαντέλου Δ., Ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων υπογείων θαλάμων και στύλων σε λατομείο μαρμάρου με χρήση αριθμητικής μεθόδου, διπλωματική εργασία, ΕΚΠΑ

Μικρούτσικος Α., Διερεύνηση ευστάθειας των βραχωδών τεμαχών του λατομείου «Αίμου» στην περιοχή της Πετρούπολης Αθηνών, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.

Παπανικολάου Δ. (2015). Γεωλογία Ελλάδας. Εκδόσεις Πατάκης

Παπανικολάου Δ., Λόζιος Σ., Τεκτονική Γεωλογία (2016). Εκδόσεις DaVinci

Παπανικολάου Δ., Σιδέρη Χρ. (2007). Γεωλογία. Η επιστήμη της Γης. Εκδόσεις Πατάκης

Ρόζος Δ. Πανεπιστημιακές σημειώσεις Τεχνική Γεωλογία, ΕΜΠ.

Σκούτσος Ε & Σούκης Κ. (2020), Πανεπιστημιακές σημειώσεις Γεωλογία Ελλάδας, ΕΚΠΑ.

Σοφιανός ΑΙ & Νομικός ΠΠ, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Προχωρημένη Μηχανική ΕΜΠ

Σταυροπούλου Μ. Πανεπιστημιακές σημειώσεις Γεωλογία τεχνικών Έργων ΕΚΠΑ.

Σταυροπούλου Μ. Πανεπιστημιακές σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας, ΕΚΠΑ.

Στουρνάρας Γ., Σταυροπούλου Μ., (2010) Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ & ΥΙΟΙ Ο.Ε

Χατζηπαναγής Ι. 1991. Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού. Διδ. Διατριβή, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, 170σ.

Hoek, E. and Bray, J. (1981) Rock Slope Engineering, 3rd edn, Inst. Mining and Metallurgy, London, UK.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.

Christopher W.M., Duncan C.W. (2005). Rock slope engineering, 4TH edn. Civil and Mining. London.

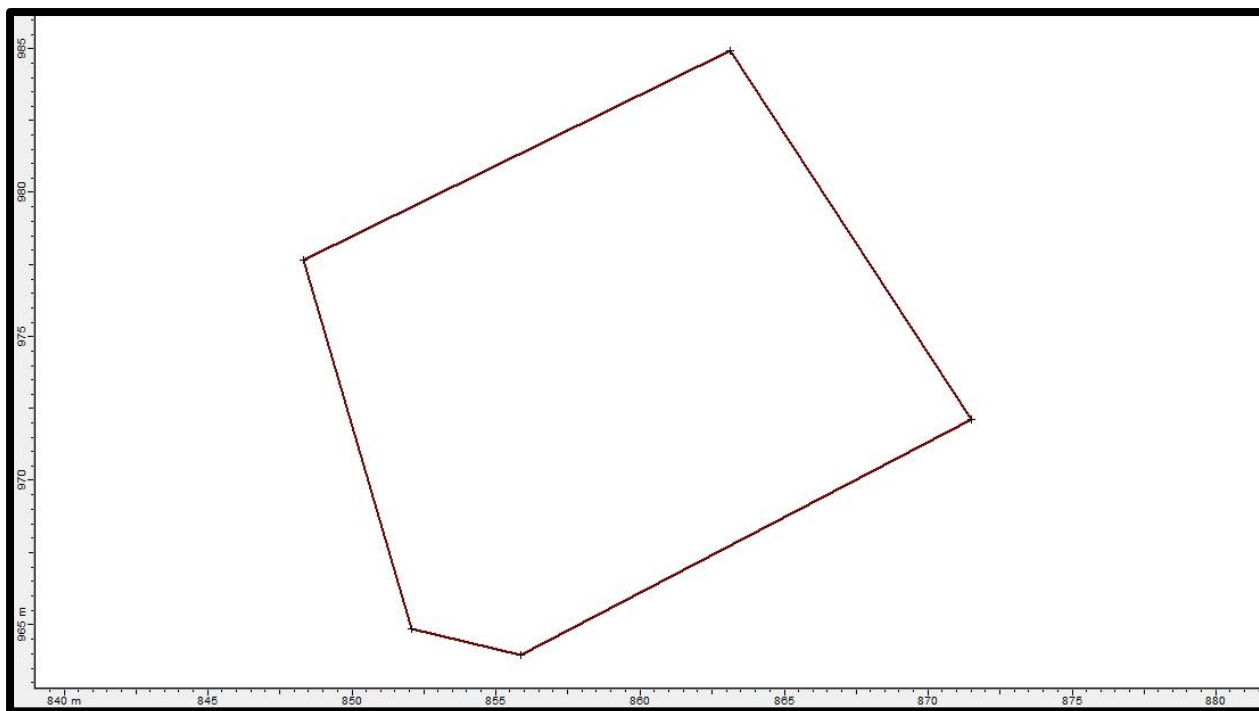
Ιστοσελίδες

www.orykta.gr

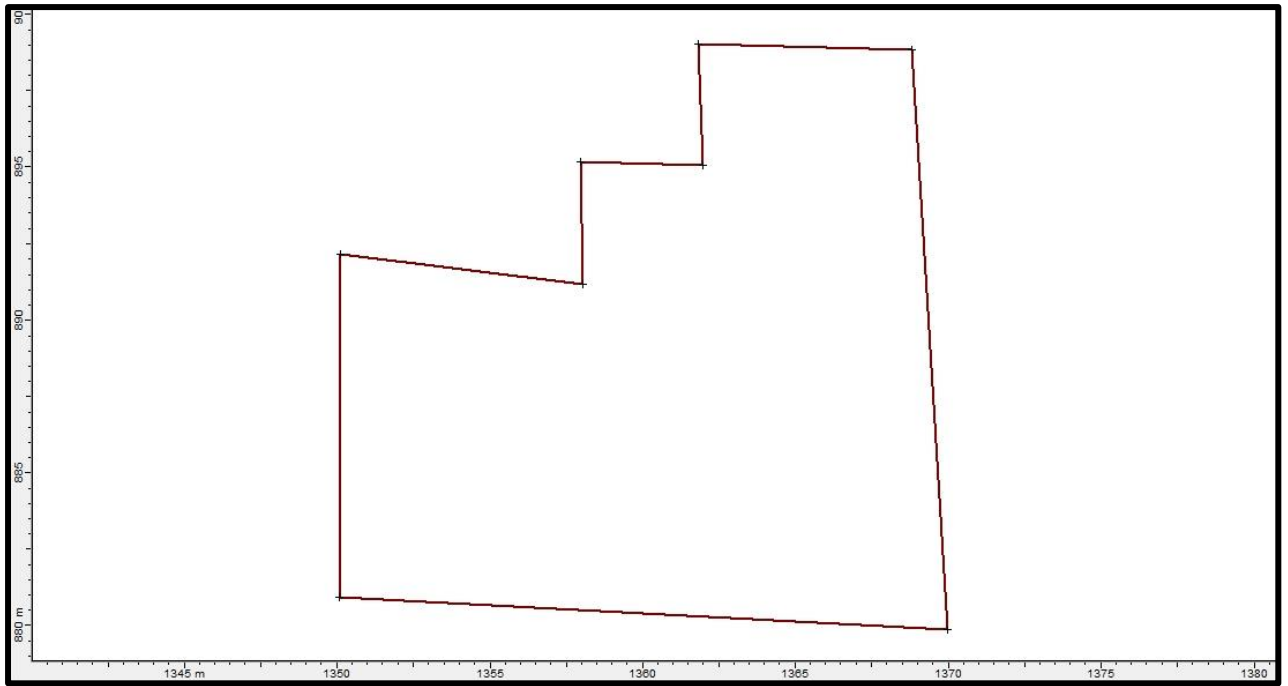
www.oasp.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

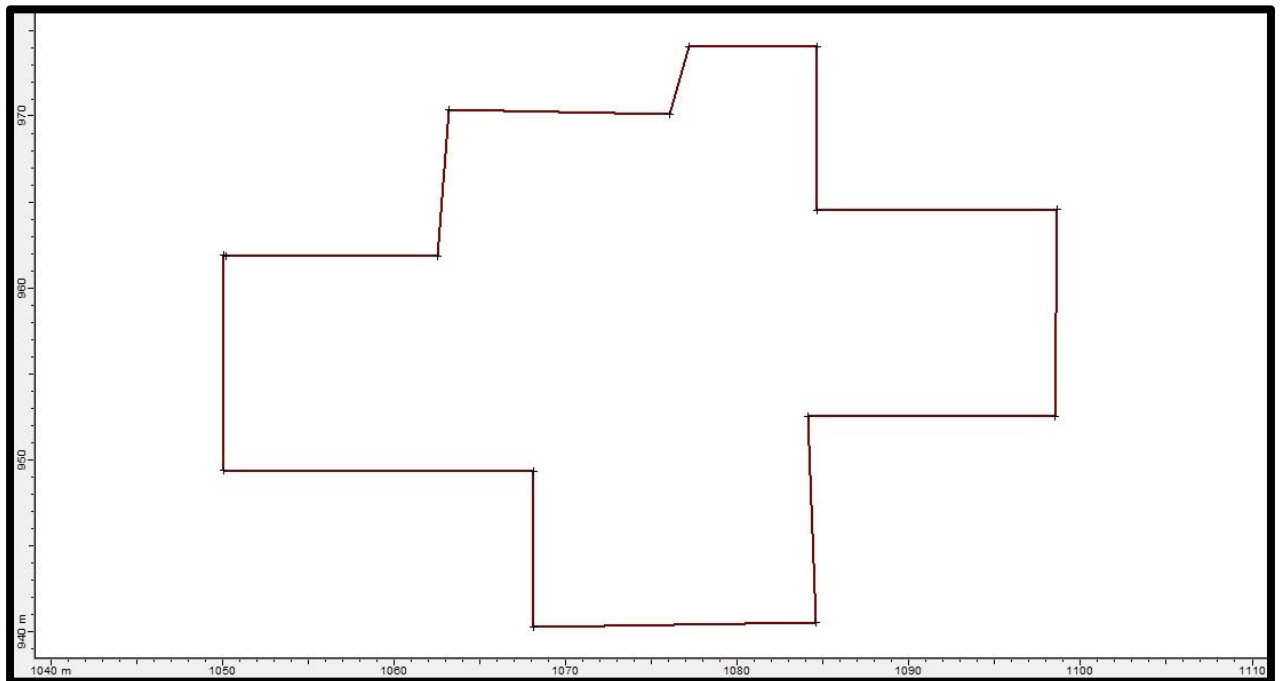
Γεωμετρία Θαλάμων εξόρυξης δολομιτικού μαρμάρου



Γεωμετρία cavern #1. Unwedges.dfx



Γεωμετρία cavern #2. [Unwedge.dfx](#)



Γεωμετρία cavern #3. [Unwedge.dfx](#)

Πίνακες Σχηματισμού Σφηνών κατά την Υπόγεια Εκμετάλλευση
Μαρμάρου

Cavern 1

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
S10	85	323	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C2010(2)	77	271			
C11	79	271			
C11	79	271	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C2010	80	271			
S10	85	323			
C2010	80	271	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C10	78	271			
S10	85	323			
C10	78	271	ROOF WEDGE: FS=0.149 SIDE WEDGES FORMED	0	30
C6	80	274			
S10	85	323			

Cavern 2

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
C2010(2)	77	271	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C11	79	271			
C2010	80	271			
C10	78	271	ROOF WEDGE: FS=0.102	0	30
C6	80	274			
S9	82	354			
C2010	80	271	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C10	78	271			
C6	80	274			
C11	79	271	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C2010	80	271			
C10	78	271			

Cavern 3

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
C6	80	274	NO ROOF WEDGE FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C7	80	274			
C8	87	357			
C6	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C7	80	274			
S14	77	274			
C7	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C8	77	274			
S14	87	357			
C8	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C9	81	274			
S14	87	357			
C8	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C9	81	274			
S7	83	352			
C9	81	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C5	76	274			
S7	83	352			
C9	81	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C5	76	274			
S14	87	357			
C5	76	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C4	77	274			
S7	83	352			
C5	76	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C4	77	274			
S14	87	357			

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
C4	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3	80	274			
S7	83	352			
C4	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3	80	274			
S14	87	357			
C3	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3'	76	274			
S4	84	181			
C3	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3'	76	274			
S7	84	352			
C3	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3'	76	274			
S14	83	357			
C3'	76	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C2'	81	274			
S14	87	357			
C2	81	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C2'	74	274			
S14	87	357			
C2	74	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C1'	80	274			
S14	87	357			
C1'	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C1	79	274			
S14	87	357			

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
C5	76	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C4	77	274			
S1	82	354			
C4	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED NO SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3	80	274			
S1	82	274			
C4	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED NO SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3'	76	274			
S1	82	274			
C5	76	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C4	77	274			
S2	79	346			
C4	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3	80	274			
S2	79	346			
C3	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3'	76	274			
S2	79	346			
C5	76	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C4	77	274			
S3	82	346			
C4	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3	80	274			
S3	82	346			
C3	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3'	76	274			
S3	82	346			

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
S1	82	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
S2	79	346			
S3	82	346			
C5	76	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C4	77	274			
S5'	77	194			
C4	77	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3	80	274			
S5'	77	194			
C3	80	274	NO ROOF WEDGES FORMED SIDE WEDGES FORMED	0	30
C3'	76	274			
S5'	77	194			

Σχηματισμός σφηνών στο μέτωπο εκσκαφής

Cavern 1

JOINS	DIP	DD	FS	Cohesion	Φ(°)
C2010(2)	77	271	NO WEDGES FORMED	0	30
C11	79	271			
C11	79	271	NO WEDGES FORMED	0	30
C2010	80	271			
C2010	80	271	NO WEDGES FORMED	0	30
C10	78	271			
C10	78	271	12.628	0	30
C6	80	274			
S10	85	323	0.213	0	30
C2010(2)	77	271			
S10	85	323	0.160	0	30
C11	79	271			
S10	85	323	0.186	0	30
C10	78	271			
S10	85	323	0.149	0	30
C6	80	274			
S10	85	323	0.133	0	30
C2010	80	271			

Cavern 2

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	Φ(°)
C2010(2)	77	271	NO WEDGES FORMED	0	30
C11	79	271			
C11	79	271	NO WEDGES FORMED	0	30
C2010	80	271			
C2010	80	271	NO WEDGES FORMED	0	30
C10	78	271			
C10	78	271	NO WEDGES FORMED	0	30
C6	80	274			
S9	82	354	0.102	0	30
C6	80	274			

Cavern 3

jOINS	DIP	DD	FS	COHESION	Φ (°)
C9	81	274	0.091	0	30
S14	87	357			
C5	76	274	0.144	0	30
S14	87	357			
C4	77	274	0.133	0	30
S14	87	357			
C3	80	274	0.102	0	30
S14	87	357			
C3'	76	274	0.144	0	30
S14	87	357			
C2'	81	274	0.091	0	30
S14	87	357			

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
C2	74	274	0.166	0	30
S14	87	357			
C1'	80	274	0.102	0	30
S14	87	357			
C1	79	274	0.112	0	30
S14	87	357			
C9	81	274	0.091	0	30
S7	83	352			
C5	76	274	0.144	0	30
S7	83	352			
C4	77	274	0.133	0	30
S7	83	352			
C3	80	274	0.102	0	30
S7	83	352			
C3'	76	274	0.144	0	30
S7	83	352			
C5	76	274	0.144	0	30
S1	82	354			
C4	77	274	0.133	0	30
S1	82	354			
C3	80	274	0.102	0	30
S1	82	354			
C3'	76	274	0.144	0	30
S1	82	354			
C5	76	274	0.144	0	30
S2	79	346			
C4	77	274	0.133	0	30
S2	79	346			

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
C3	80	274	0.102	0	30
S2	79	346			
C3'	76	274	0.144	0	30
S2	79	346			
C5	76	274	0.144	0	30
S3	82	346			
C4	77	274	0.133	0	30
S3	82	346			
C3	80	274	0.102	0	30
S3	82	346			
C3'	76	274	0.144	0	30
S3	82	346			
C5	76	274	0.232	0	30
S5'	77	194			
C4	77	274	0.223	0	30
S5'	77	194			
C3	80	274	0.198	0	30
S5'	77	194			
C3'	76	274	0.232	0	30
S5'	77	194			

JOIN	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
S4	84	181	6.100	0	30
S7	83	352			
S7	83	352	8.328	0	30
S14	87	357			
S1	82	354	2.987	0	30
S2	79	346			
S2	79	346	27.15	0	30
S3	82	346			
S1	82	354	2.471	0	30
S5'	77	194			
S2	79	346	1.611	0	30
S5'	77	194			
S3	82	346	1.479	0	30
S5'	77	194			
S5	82	350	3.236	0	30
S6'	79	186			
S2	79	346	1.095	0	30
MAIN	69	207			
S3	82	346	1.025	0	30
MAIN	69	207			
S5	82	350	1.202	0	30
MAIN	69	207			
S6'	79	186	1.481	0	30
MAIN	69	207			

Σχηματισμός σφηνών στο μέτωπο εκσκαφής μεταξύ verso και secondo

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
S5	82	350	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S5'	77	194	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S3	82	346	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S2	79	346	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S1	82	354	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S14	87	357	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S7	83	352	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S4	84	181	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S13	88	182	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S12	86	182	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S9	82	354	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
S11'	78	198	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S8	82	350	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S10	85	323	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S15	86	350	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			
S16	73	194	NO WEDGES FORMED	0	30
VERSO	48	47			

Σχηματισμός σφηνών στο μέτωπο εκσκαφής μεταξύ verso και contro

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	Φ
C1	79	274	0.112	0	30
VERSO	48	47			
C1'	80	274	0.102	0	30
VERSO	48	47			
C2	74	274	0.166	0	30
VERSO	48	47			
C2'	81	274	0.166	0	30
VERSO	48	47			
C3'	76	274	0.144	0	30
VERSO	48	47			
C3	80	274	0.102	0	30
VERSO	48	47			

JOINS	DIP	DD	FS	COHESION	$\Phi(^{\circ})$
C4	77	274	0.133	0	30
VERSO	48	47			
C5	76	274	0.144	0	30
VERSO	48	47			
C9	81	274	0.166	0	30
VERSO	48	47			
C8	77	274	0.133	0	30
VERSO	48	47			
C7	80	274	0.102	0	30
VERSO	48	47			
C6	80	274	0.102	0	30
VERSO	48	47			
C10	78	271	0.123	0	30
VERSO	48	47			
C2010	80	271	0.102	0	30
VERSO	48	47			
C11	79	271	0.112	0	30
VERSO	48	47			
C2010(2)	77	271	0.133	0	30
VERSO	48	47			

