



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Πτυχιακή Εργασία
«Ευστάθεια του σπηλαίου Μελισσάνης στην Κεφαλονιά»

Σοφία-Χαρίκλεια Καλέκη

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μαρία Σταυροπούλου



Αθήνα, Μάρτιος 2022

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια της εργασίας κα. Μαρία Σταυροπούλου για την συνεχή καθοδήγηση καθώς και για το χρόνο που μου αφιέρωσε για την επίτευξη του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τομέα Δυναμικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας για τις πολύτιμες γνώσεις και εμπειρίες που μου παρείχαν πάνω στον κλάδο και για την άψογη συνεργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους και κυρίως την οικογένειά μου για τη διαχρονική ηθική στήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

Περίληψη

Τα σπήλαια της Ελλάδας από το παρελθόν αποτελούν ένα ισχυρό πόλο έλξης των επισκεπτών, γι' αυτό προέκυψε η ανάγκη για την έρευνα της ευστάθειάς τους και της προστασίας τους ως φυσικά και αρχαία μνημεία. Στην παρούσα εργασία μελετάται το σπήλαιο της Μελισσάνης που βρίσκεται στην περιοχή του Δήμου Σάμης στην Νήσο Κεφαλληνίας. Ύστερα από την έρευνα και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μελέτης προκύπτει ότι η υφιστάμενη τεκτονική δημιουργεί αστοχίες. Ο γεωμετρικός συνδυασμός τους δημιουργεί ασταθείς θέσεις είτε υπό τη μορφή ολισθήσεων βραχοσφηνών, είτε υπό μορφή καταπτώσεων βράχων, κυρίως από την οροφή. Σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός των συντελεστών ασφαλείας σε διαφορετικές θέσεις και η εύρεση κατάλληλων μέτρων υποστήριξης, συμβατών με το περιβάλλον και το μνημειακό χαρακτήρα του σπηλαίου.

Λέξεις-Κλειδιά

Σπήλαια Κεφαλονιάς, Μελισσάνη, Ευστάθεια σπηλαίων, Συντελεστής Ασφαλείας, Ασυνέχειες.

“Stability of the Curst Cave of Melissani in Kefalonia”

Sofia Charikleia Kaleki

Abstract

The caves in Greece, have always acted as a strong source of attraction for visitors, hence the increased need to research their stability and to protect them as natural and ancient monuments. In the present study we examine the cave of Melissani located in the area of the Municipality of Sami on the island of Kefallinia. After conducting research and evaluating the study's results, it appears that what creates failure is the existing tectonics. Their geometric combination creates unstable positions either in the form of rock wedge slips or in the form of rock fails, mainly from the roof. The purpose of this study is to calculate the safety factor in different areas and to discover appropriate support measures, safe to both the environmental and monumental nature of the cave.

Keywords

Caves of Keffalonia, Melissani, Cave Stability, Safety Factor, Discontinuities.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	
Περίληψη	1
Abstract.....	2
1 Εισαγωγή.....	4
1.1 Σκοπός και Αντικείμενο της Μελέτης	4
2 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής της Κεφαλονιάς	5
2.1 Γεωλογία-Στρωματογραφία-Τεκτονική.....	5
2.1.1 Ενότητα Παξών	5
2.1.2 Ιόνια Ενότητα.....	6
2.2 Θέση του Σπηλαίου.....	9
2.3 Γεωλογία του Σπηλαίου.....	10
3 Υδρογεωλογία	12
4 Τεκτονική-Νεοτεκτονική	14
5 Τεχνικογεωλογικά Χαρακτηριστικά	16
5.1 Συστήματα ασυνεχειών.....	16
5.2 Τεκτονικά διαγράμματα κινηματικής ανάλυσης	17
5.2.1 Επίπεδη ολίσθηση	17
5.2.2 Σφηνοειδής ολίσθηση.....	18
5.2.3 Ανατροπή	19
5.3 Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας κατά GSI	19
6 Στοιχεία Σεισμικότητας-Σεισμικής Επικινδυνότητας.....	21
7 Κανονιστικό Πλαίσιο	22
7.1 Κανονιστικό Πλαίσιο Ευστάθειας Κατά EC-7	22
8 Αξιολόγηση Γεωτεχνικών Συνθηκών-Γεωτεχνικά Προβλήματα	24
8.1 Γεωτεχνικά Προβλήματα	24
8.2 Ασυνέχειες	25
8.2.1 Τεκτονική Ανάλυση Ασυνεχειών.....	25
8.2.2 Ψηφιακή Αποτύπωση Ασυνεχειών.....	26
9 Γεωτεχνικοί Υπολογισμοί.....	27
9.1 Αναλύσεις Σφηνοειδούς Ολίσθησης.....	28
10 Προτεινόμενα Μέτρα	33
11 Παράρτημα	36
12 Πηγές-Βιβλιογραφία.....	40

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Αντικείμενο της Μελέτης

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η γεωτεχνική αξιολόγηση του σπηλαίου της Μελισσάνης ως φυσικών και αρχαίων μνημείων· καθώς αποτελούν πόλο έλξης για τους επισκέπτες του νησιού και συνιστούν έναν δυναμικό οικονομικό πόρο για το νησί.

Για τη Γεωτεχνική αξιολόγηση μελετήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- A) Τοπογραφική Αποτύπωση-Σύνταξη Κτηματολογίου
- B) Έρευνα Σεισμικότητας Και Σεισμικής Επικινδυνότητας
- Γ) Εξειδικευμένη Γεωλογική Έρευνα
- Δ) Υδρογεωλογική Έρευνα
- E) Βραχομηχανική Έρευνα Και Έρευνα Ευστάθειας

που εκπονήθηκαν στο πλαίσιο εφαρμοσμένου ερευνητικού έργου από το Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Συγκεκριμένα το έργο «Δράσεις προστασίας και Ανάδειξης στα Σπήλαια Μελισσάνης και Δρογκαράτης με Βάση το Ιδιόμορφο Γεωδυναμικό και Υδρομετεωρολογικό Πλαίσιο Α΄Φάση» με ερευνητική-επιστημονική ομάδα:

Επιστημονικός Υπεύθυνος: Δρ. Λέκκας

Επιστημονικοί Συνεργάτες: Σταυροπούλου Μαρία, Σκούρτσος Εμμ. , Κράνης Χ. , Μαυρούλης Σπ. , Φίλης Χρ. , Κώτση Ευαγγ. , Γιαννόπουλος Ι.

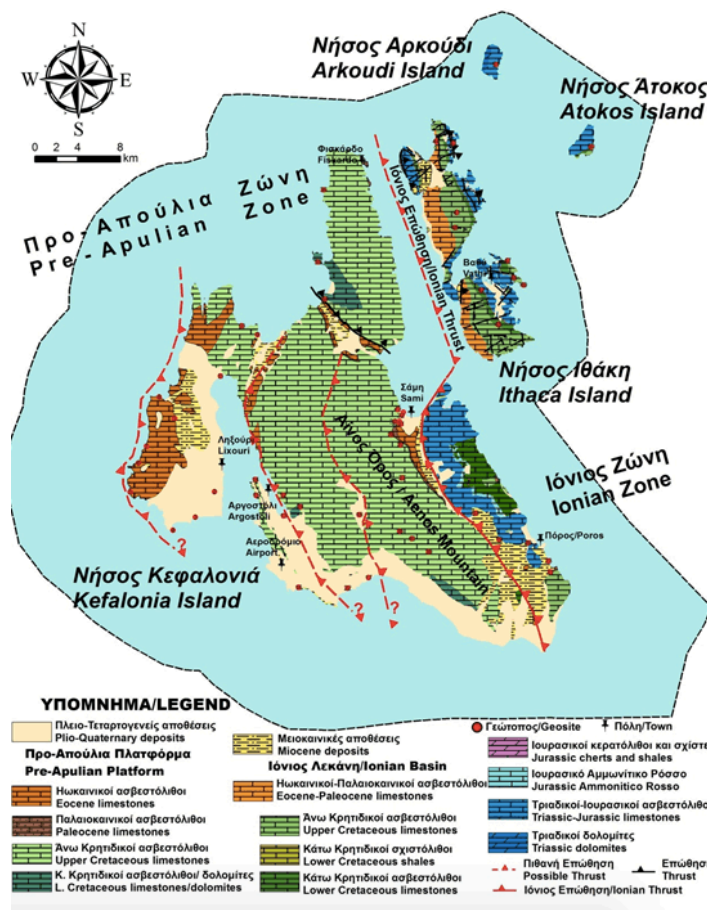
Στις μελέτες αυτές βασίστηκε η παρούσα εργασία και αντλήθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία για την εκπόνησή της. Συνεπώς η πτυχιακή αυτή εργασία εστιάζει στη Βραχομηχανική Έρευνα και την Έρευνα Ευστάθειας στο σπήλαιο της Μελισσάνης.

2 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής της Κεφαλονιάς

2.1 Γεωλογία-Στρωματογραφία-Τεκτονική

Δυτικά των Ιόνιων νήσων βρίσκεται η ελληνική πρόταφρος όπου λαμβάνει χώρα η υποβύθιση της μικροπλάκας της Απουλίας κάτω από την Ευρασία. Η μετωπική επώθηση αναγνωρίζεται μόλις λίγα χιλιόμετρα δυτικά των Ιόνιων νήσων. Η Κεφαλονιά βρίσκεται πολύ κοντά στο ελληνικό τόξο το οποίο αποτελεί και την πιο ενεργή τεκτονικά περιοχή της Ευρώπης. Το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας του νησιού καλύπτεται από ασβεστόλιθους όπου σε συνδυασμό με την τεκτονική δραστηριότητα και τις διεργασίες διάβρωσης και απόθεσης έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών καρστικών συστημάτων (σπήλαια, δολίνες, καταβόθρες, κλπ.).

Στη νήσο της Κεφαλονιάς όπου απαντάται το σπήλαιο μελέτης εμφανίζονται δύο ενότητες, με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΔ. Η Προαπούλια ή ενότητα των Παξών στα δυτικά, καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του νησιού και η Ιόνια η οποία εμφανίζεται σε μικρότερη έκταση στο ανατολικό τμήμα.

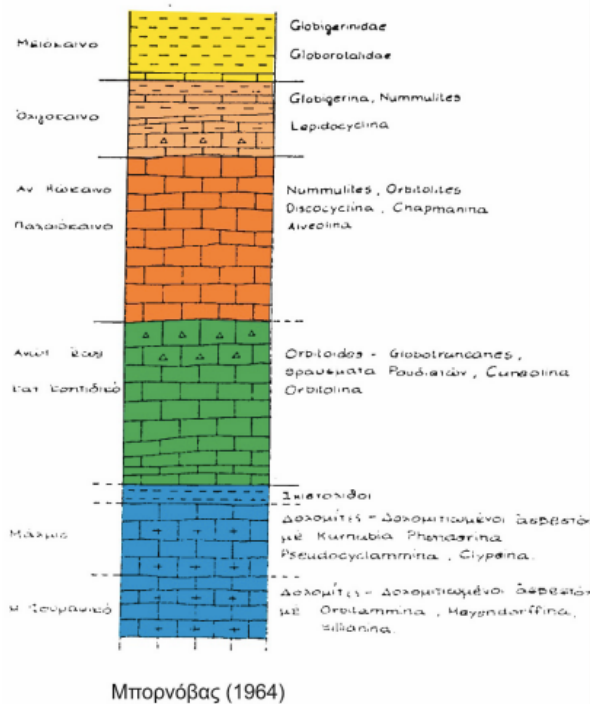


Εικόνα 1. Γεωλογικός χάρτης Κεφαλονιάς (Γεωπάрко Κεφαλονιάς-Ιθάκης)

2.1.1 Ενότητα Παξών

Η ενότητα των Παξών είναι η πιο εσωτερική ενότητα των Ελληνίδων. Αποτελεί την συνέχεια του υβώματος της Απουλίας στην Ιταλία και εμφανίζεται στους Παξούς, τη Λευκάδα, την Κεφαλονιά και τη Ζάκυνθο στα Επτάνησα. Στα ανατολικά η Ιόνια

ενότητα επωθείται στην Ενότητα των Παξών. Δυτικά και βόρεια του ρήγματος της Κεφαλονιάς η Ενότητα των Παξών επωθείται στην Απουλία.



Εικόνα 2. Στρωματογραφική στήλη της ενότητας των Παξών (Εμμ. Σκούρτσος, Μάθημα Γεωλογία Ελλάδος.)

Λιθοστρωματογραφία

- Εβαπορίτες, δολομίτες, νηριτικοί ασβεστόλιθοι. Μέσο Τριαδικό-Μέσο Ιουραϊκό.
- Νηριτικοί ασβεστόλιθοι με παρεμβολές πυριτικών σχιστών και μαργών στο Άνω Ιουραϊκό.
- Στο Κάτω Κρητιδικό τα πρώτα πελαγικά απολιθώματα ενώ στο Άνω Κρητιδικό η πλατφόρμα αρχίζει να αποκτά μεταβατικούς προς τη λεκάνη χαρακτήρες.
- Στο Κρητιδικό-Παλαιογενές πολλές ασυμφωνίες και δισυμφωνίες με στρωματογραφικά κενά.
- Στο Μειόκαινο μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι.
- Άνω Κρητιδικό-Ολιγόκαινο χαρακτηρίζεται από μία ασβεστολιθική ακολουθία με

εναλλαγές λατυποπαγών και πελαγικών ασβεστόλιθων.

- Απουσία τυπικού φλύσχη, τον οποίο αντικαθιστά μία σειρά από μαργαϊκούς οριζόντες που εναλλάσσονται με λατυποπαγείς ασβεστόλιθους.
- Στην επιφάνεια εμφανίζονται σχηματισμοί νεότεροι του Άνω Ιουραϊκού.

2.1.2 Ιόνια Ενότητα

Η Ιόνια ενότητα αποτελεί την αμέσως πιο εξωτερική ενότητα των εξωτερικών Ελληνίδων, εσωτερικά των Παξών και επωθείται σε αυτή. Οι εμφανίσεις της ενότητας συνεχίζουν υποθαλάσσια στο Ιόνιο Πέλαγος. Αποτελούσε υποθαλάσσια αύλακα που παρεμβαλλόταν ανάμεσα που παρεμβαλλόταν ανάμεσα στα υβώματα της Απουλίας στα δυτικά και του Γαβρόβου (Τρίπολης) στα ανατολικά.

Λιθοστρωματογραφία

Στρωματογραφικά περνάει από νηριτική σε πελαγική ιζηματογένεση. Τα αίτια αυτά είναι τεκτονικά και οφείλονται σε ένα εφελκυστικό επεισόδιο που επηρεάζει όλη την περιοχή. Το εφελκυστικό αυτό επεισόδιο πιθανά συνδέεται με το άνοιγμα του ωκεανού της Τηθύος. Λόγω των διαφορών που παρουσιάζει στη

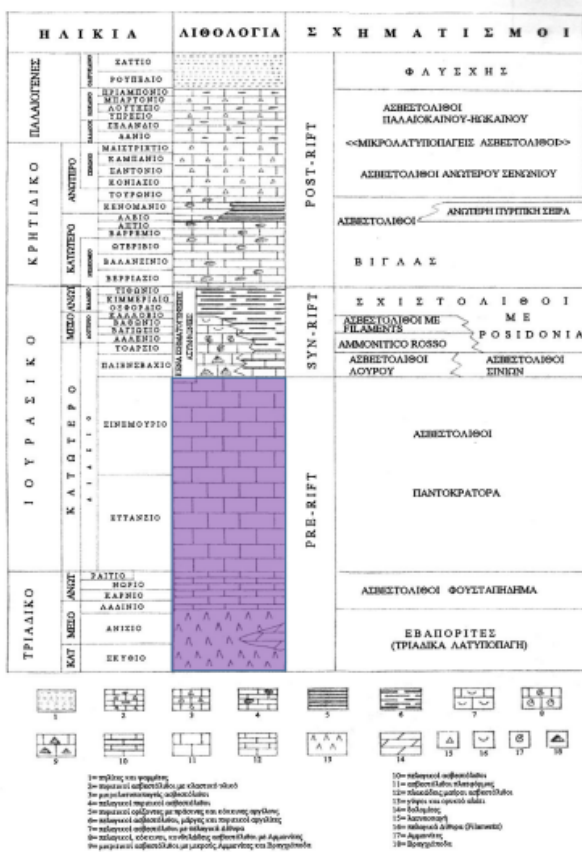
στρωματογραφική της στήλη στην αξονική περιοχή με τις παρυφές της διακρίνεται σε:

- Εξωτερική Ιόνια Ενότητα
- Κεντρική Ιόνια Ενότητα
- Ανατολική Ιόνια Ενότητα

Η στρωματογραφική της στήλη λόγω της αλλαγής των συνθηκών ιζηματογένεσης διακρίνεται σε προ-ταφροσιγενή, συν-ταφροσιγενή και μετα-ταφροσιγενή.

Προ-ταφροσιγενείς σχηματισμοί

- Ιζηματολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα τριαδικά λατυποπαγή είναι αποτέλεσμα της διάλυσης- κατάρρευσης των υπεδαφικών εβαποριτών,
- Η διαδικασία αυτή προσέλαβε τις διαπειρικές διεισδύσεις της εβαποριτικής βάσης κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης της ενότητας.
- Η δημιουργία της αρχικής λεκάνης ιζηματογένεσης ήταν αποτέλεσμα διαφορικής καταβύθισης και απομόνωσης από την Τηθύ περιοχών της δυτικής Μεσογείου κατά το Κατώτερο Τριαδικό.



Εικόνα 3.Στρωματογραφική στήλη προ-ταφροσιγενών σχηματισμών της Ιόνιας ενότητας (Εμμ. Σκούρτσος, Μάθημα Γεωλογία Ελλάδος.)

1. Ασβεστόλιθοι Παντοκράτορα (600μ.) λεπτοκοκκώδεις σε παχιά στρώματα, συμπαγείς με ασβεστοφύκη. Ο παντοκράτορας αντιστοιχεί σε πολύ ρηχή πλατφόρμα στο όριο ανάδυσης. Το πάχος του δείχνει ταχεία βύθιση της πλατφόρμας και αντιστάθμιση της βύθισης με γρήγορη ιζηματογένεση.

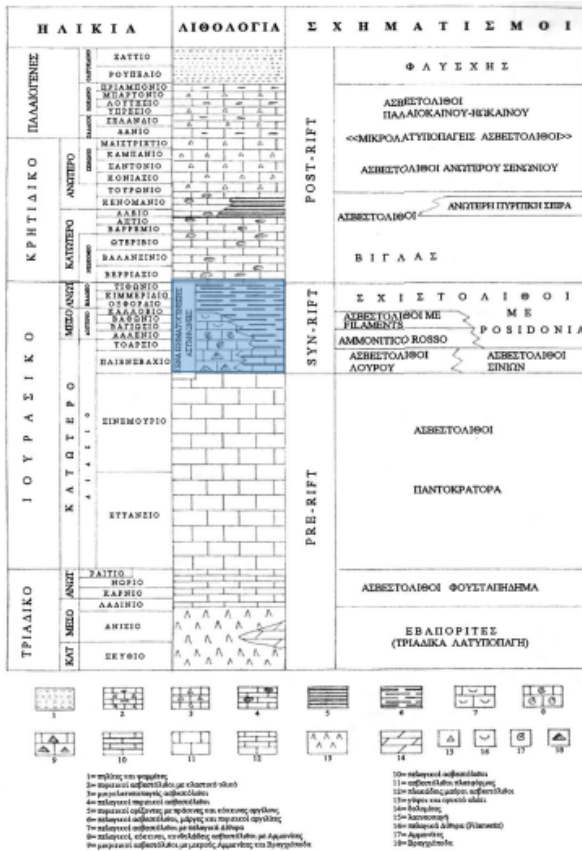
2. Ασβεστόλιθοι Φουσταπήδημα (150μ.), με Cardita. Οι ασβεστόλιθοι Φουσταπήδημα σηματοδοτούν το τέλος της εβαποριτικής ιζηματογένεσης και την αρχή της αμιγούς θαλάσσιας ιζηματογένεσης.

3. Εβαπορίτες-Τριαδικά λατυποπαγή, γύψοι με μικροκρυσταλλική υφή, αναμειγμένα με λατυποπαγή. Η εβαποριτική λεκάνη φαίνεται να περιορίζεται εντός των ορίων της

Συν-ταφροσιγενείς σχηματισμοί

Η κατανομή των υπερκείμενων σχηματισμών δείχνει ότι η απόθεσή τους έλαβε χώρα σε λεκάνες μορφής ημιτάφρων. Προχωρώντας από το βαθύτερο προς το

ρηχότερο τμήμα της λεκάνης, παρατηρείται μετάβαση από την πλήρη ακολουθία των σχηματισμών προς μη πλήρεις ακολουθίες με ελάττωση του πάχους ή και απουσία σχηματισμών με στρωματογραφικό κενό.



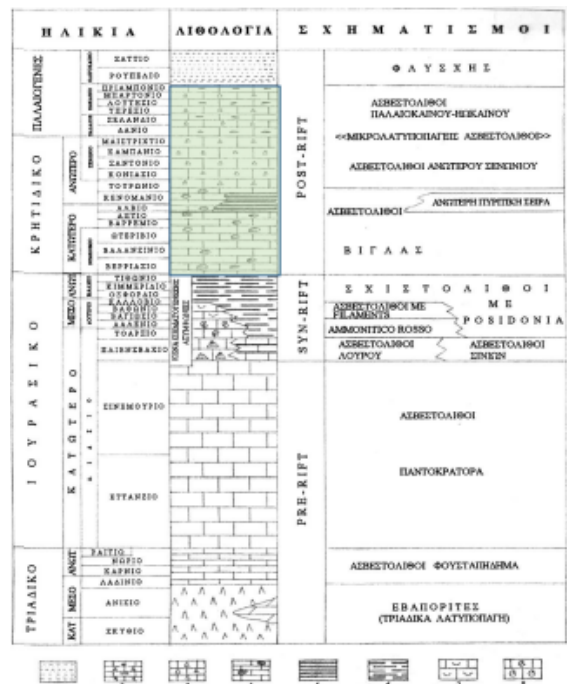
Εικόνα 4. Στρωματογραφική στήλη συν-ταφροσιγενών σχηματισμών της Ιόνιας ενότητας (Εμμ. Σκούρτσος, Μάθημα Γεωλογία Ελλάδος.)

Μετά-ταφροσιγενείς σχηματισμοί

1. Ασβεστόλιθοι (300μ.) λεπτοπλακώδεις με Globigerines και μικρολατυποπαγείς οριζοντες με Nummulites, Alveolines και μερικές ενστρώσεις πυριτιόλιθων, Παλαιόκαινο-Ηώκαινο.
2. Ασβεστόλιθοι Σενωνίου (<300μ.) μικρολατυποπαγείς συμπαγείς με θραύσματα Ρουδιστών, Orbitoides.
3. Σχιστόλιθοι Βίγλας (<150μ.) Εναλλαγές μαργών, ασβεστόλιθων, αργιλικών σχιστόλιθων, Κενομάνιο-Τουρώνιο.
4. Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι Βίγλας (300μ.) με ακτινόζωα και ενστρώσεις πυριτιόλιθων. Στην βάση υπάρχουν άφθονες Calpionelles, ενώ στο ανώτερο τμήμα επικρατούν διάφορα είδη

1. Ανώτεροι Σχιστόλιθοι με Posidonia (50μ.). Πλούσιοι σε πυρίτιο και ακτινόζωα. Ηλικία Οξφόρδιο-Τιθωνίο. (Ραδιολαρίτες)
2. (Βαγιώσιο-Καλλόβιο)
3. Ammonitico Rosso και Κατώτεροι Πελαγικοί ασβεστόλιθοι με filaments. Σχιστόλιθοι με Posidonia.
4. Ασβεστόλιθοι Σινιών-υπολιθογραφικοί ασβεστόλιθοι με ακτινόζωα και ενδιαστρώσεις πυριτιόλιθων και ασβεστόλιθοι Λούρου.

Οι φάσεις Σινιών και Λούρου σηματοδοτούν την γενική βύθιση της λεκάνης. Η φάση Σινιών απαντά στην αξονική περιοχή της λεκάνης, ενώ του Λούρου στα κράσπεδα αυτής.



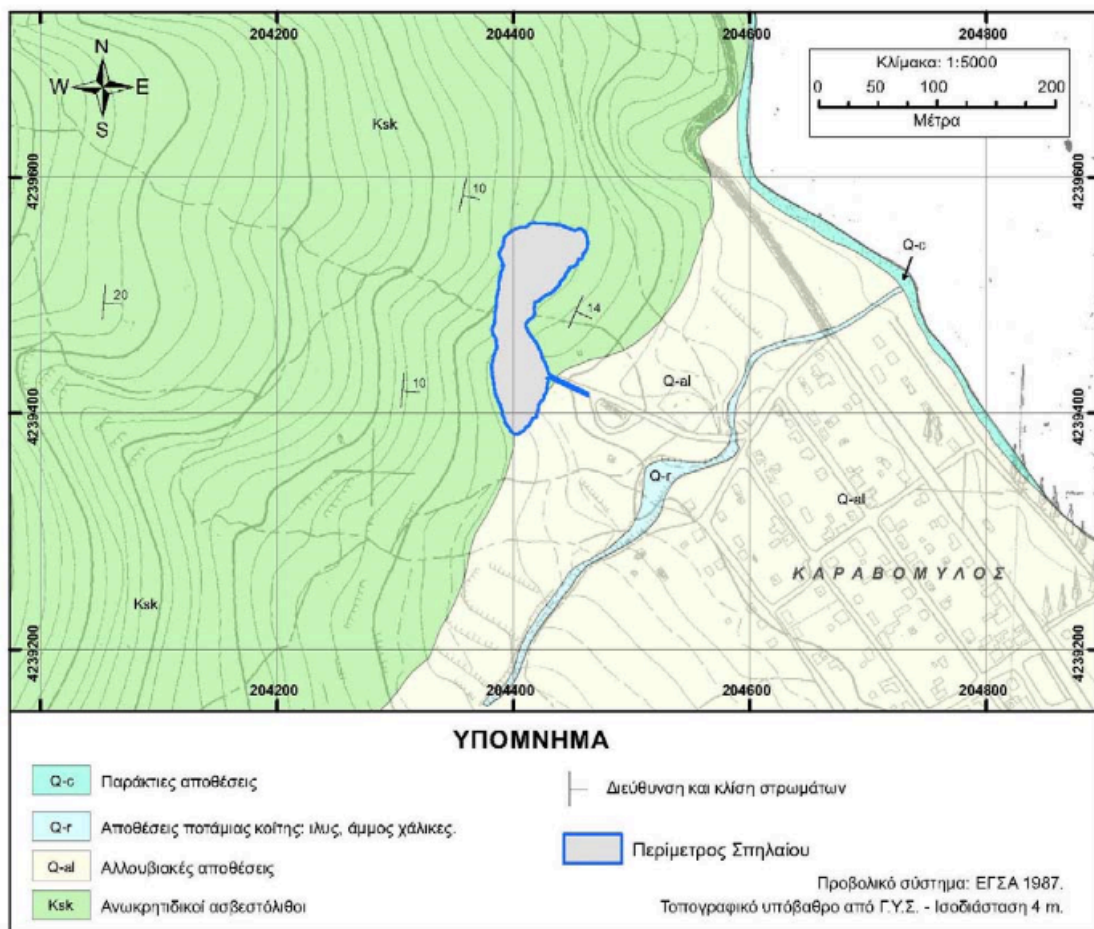
Εικόνα 5. Στρωματογραφική στήλη μετά-ταφροσιγενών σχηματισμών της Ιόνιας ενότητας (Εμμ. Σκούρτσος, Μάθημα Γεωλογία Ελλάδος.)

Η λίμνη βρίσκεται 20m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, έχει μήκος περίπου 160m και το βάθος των νερών της κυμαίνεται από 10m έως 40m. Η επίσκεψη στο σπήλαιο γίνεται με τη χρήση μίας τεχνητής εισόδου με κλίμακα και έναν επιμήκη τεχνητό υπόγειο διάδρομο.

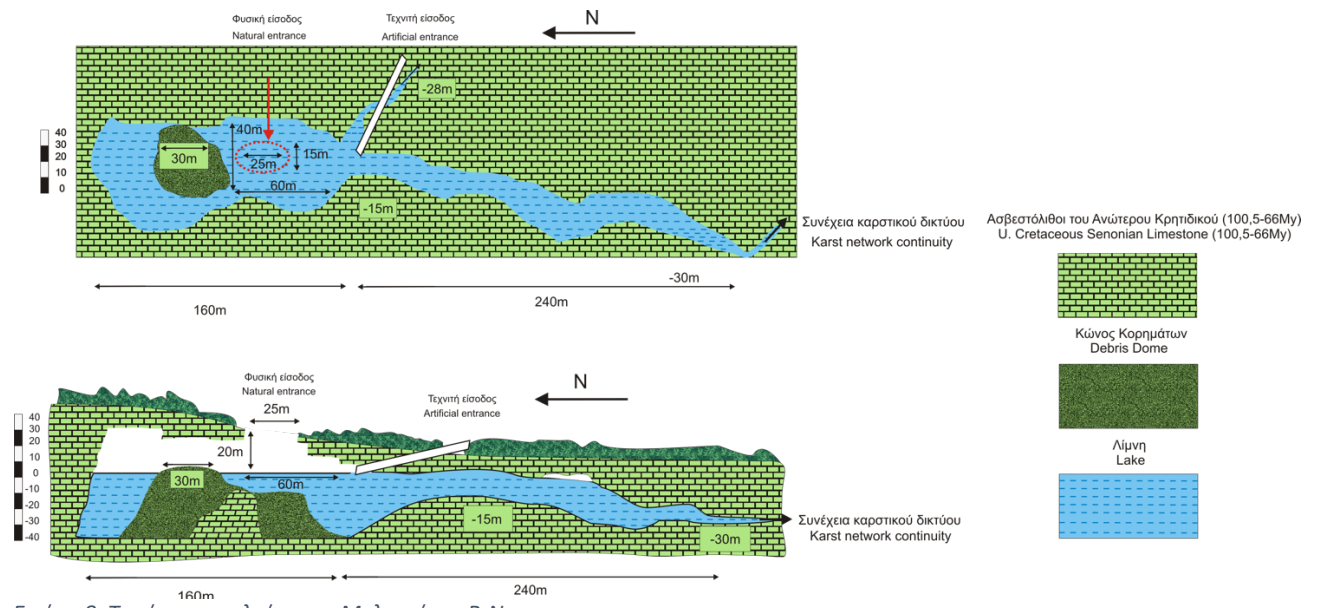
2.3 Γεωλογία του Σπηλαιίου

Η περιοχή που απαντά το σπήλαιο της Μελισσάνης βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της Κεφαλονιάς, στο δυτικό τμήμα του οικισμού της Σάμης. Το δυτικό αυτό τμήμα χαρακτηρίζεται από σχηματισμούς της ενότητας των Παξών και συγκεκριμένα ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους.

Πρόκειται για μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους που περιέχουν θραύσματα από ρουδιστές. Νότια και ανατολικά του ανοίγματος του σπηλαιίου αναπτύσσονται κορήματα, που αποτελούνται από χαλαρά λατυποπαγή και ανθρακικές λατύπες 10-15cm. Τα κορήματα εξαπλώνονται μέχρι την ακτογραμμή ανατολικά του νεκροταφείου και μέχρι λίγα μέτρα νότια της κοίτης που απαντά στη θέση αυτή.



Εικόνα 7. Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του σπηλαιίου της Μελισσάνης.



Εικόνα 8. Τομή του σπηλαίου της Μελισσάνης Β-Ν.

3 Υδρογεωλογία

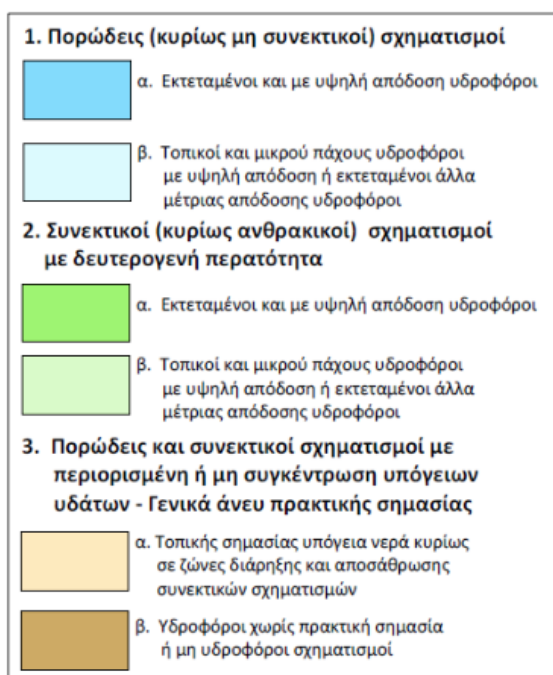
Το σπήλαιο της Μελισσάνης έχει αναπτυχθεί στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ενότητας των Παξών. Ο σχηματισμός του οφείλεται στην τεκτονική καταπόνηση των ασβεστόλιθων η οποία αύξησε το δευτερογενές πορώδες και επέτρεψε την κυκλοφορία του νερού μέσα από ασυνέχειες (κατατμήσεις, διακλάσεις, ρωγμές και καρστικές κοιλότητες). Τόσο η κυκλοφορία του νερού όσο και η διάλυση των πετρωμάτων εξελίσσονται παράλληλα (Herak & Staringfield, 1972).

Στη θέση του σπηλαίου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται μισό μέτρο πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Το νερό της υπόγειας λίμνης είναι υφάλμυρο και αυτό οφείλεται στη συνεχή επικοινωνία με τη θάλασσα η οποία βρίσκεται σε απόσταση μόλις 250m.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 μπορούν να διαχωριστούν σε επιμέρους υδρολιθολογικούς τύπους με βάση τα πρότυπα Διεθνούς Ένωσης Υδρογεωλόγων (Struckmeier & Margat, 1955; Nikas et al., 2010). Η κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών σε επιμέρους υδρολιθολογικούς τύπους γίνεται σύμφωνα με τα εξής κριτήρια:

- Την αποδοτικότητα των υδροφόρων
- Τη γεωγραφική τους εξάπλωση
- Τη στρωματογραφική τους διάρθρωση
- Την υδροπερατότητά τους
- Τα λιθολογικά χαρακτηριστικά τους

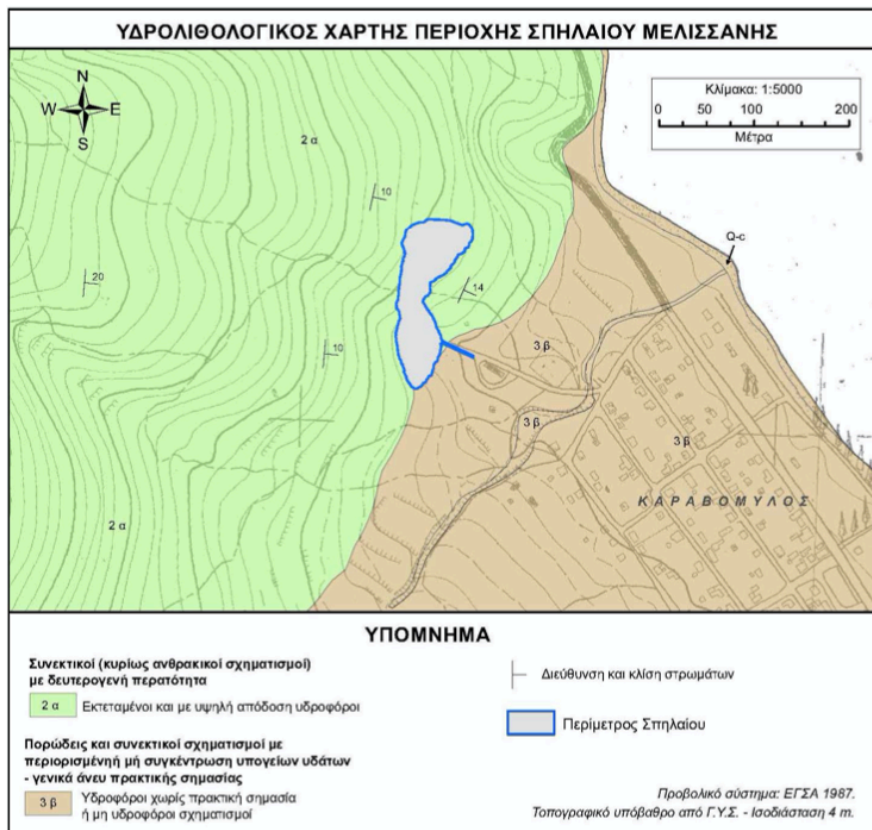
Σύμφωνα με την κατάταξη αυτή διακρίνονται τρεις κύριοι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί με δύο υποκατηγορίες ο καθένας, αναλυτικά παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9. Κατηγορίες κατάταξης γεωλογικών σχηματισμών βάσει της υδρογεωλογικής τους συμπεριφοράς και το πρότυπο της Διεθνούς Ένωσης Υδρογεωλόγων (Αντωννάκος 2012)

Από τις κατηγορίες αυτές στην περιοχή απαντώνται:

1. Συνεκτικοί (κυρίως ανθρακικοί) σχηματισμοί με δευτερογενή πετρώματα και συγκεκριμένα η υποκατηγορία εκτεταμένοι υδροφόροι ορίζοντες με υψηλή απόδοση. Παρατηρούνται λοιπόν ανθρακικοί σχηματισμοί των ενοτήτων της Ιόνιας και των Παξών. Στις καρστικές δομές που κυριαρχούν στην περιοχή αναπτύσσονται υδροφόροι ορίζοντες. Η υδροφορία οφείλεται κατά κύριο λόγο στο δευτερογενές πορώδες. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από μεγάλη περατότητα και με μεγάλο συντελεστή κατείσδυσης (Εμμ. Σκούρτσος, 2021)
2. Πορώδεις και συνεκτικοί σχηματισμοί με περιορισμένη ή μη συγκέντρωση υπόγειων υδάτων, η υποκατηγορία υδροφόροι χωρίς πρακτική σημασία ή μη υδροφόροι σχηματισμοί. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι μεταλλικοί σχηματισμοί, οι οποίοι λόγω της μικρής έκτασης που καταλαμβάνουν δεν μπορούν να αναπτύξουν υδροφόρο ορίζοντα στη μάζα τους. Παρά τον μεγάλο συντελεστή κατείσδυσης το νερό δεν σχηματίζει υδροφόρο ορίζοντα, αντίθετα παροχεύεται στους υποκείμενους ασβεστόλιθους (Εμμ. Σκούρτσος, 2021).

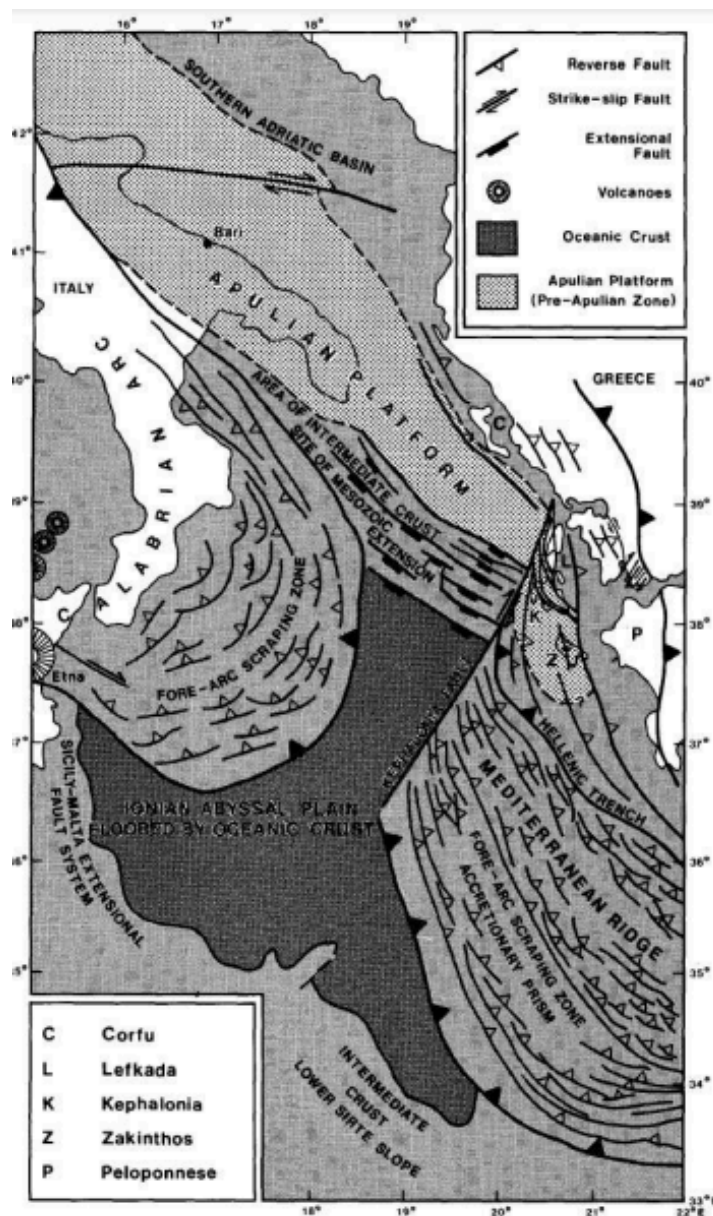


Εικόνα 10. Υδρογεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του σπηλαίου της Μελισσάνης κατά το πρότυπο της Διεθνούς Ενώσεως Υδρογεωλόγων (Αντωνάκος, 2012)

4 Τεκτονική-Νεοτεκτονική

Το ελληνικό τόξο οφείλει τη δημιουργία του στη σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών Ευρασίας και Αφρικής. Από το αρχικό σπάσιμο της Πανγαίας, πριν από 200 εκατομμύρια χρόνια σχηματίστηκε ο ωκεανός της Τηθύος. Πιο συγκεκριμένα ο ωκεάνιος φλοιός που θεωρείται υπόλειμμα της Τηθύος και από τον οποίο αποτελείται η Αφρικανική πλάκα καταβυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική πλάκα.

Η δυτική Ελλάδα βρίσκεται σε μία σεισμοτεκτονικά σύνθετη περιοχή η οποία υπόκειται σε διαρκή και έντονη παραμόρφωση. Στο δυτικό τμήμα του ελληνικού τόξου βρίσκεται η περιοχή με τη μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα στην Ευρώπη, σε αυτή συμπεριλαμβάνονται η Λευκάδα, η Ιθάκη και η Ζάκυνθος. Στην περιοχή αυτή του ελληνικού τόξου η ζώνη καταβύθισης του ωκεάνιου φλοιού κάτω από τον ηπειρωτικό οριοθετείται από το Ρήγμα Μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς.



Εικόνα 11. Calabrian Arc: Τόξο Καλαβρίας Apulian Platform: Απούλια πλάκα Mediterranean Ridge: Μεσογειακή Ράχη Hellenic Trench: Ελληνική Περιφερειακή Τάφρος Fore-Arc Scraping Zone: Ζώνη μπροστά από το τόξο Accretionary Prism: Πρίσμα Προσαύξησης (σχήμα από Finetti, 1982)

Πρόκειται για ένα μεγάλης έκτασης δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης. Το ρήγμα αυτό βρίσκεται στα δυτικά της Κεφαλονιάς σε μία περιοχή μεγάλου βάθους >3χλμ. Στην περιοχή του ρήγματος συναντώνται η προ-Απούλια πλάκα, ηπειρωτικός φλοιός ο οποίος ανήκει στην Ιόνια ζώνη και ωκεάνιος φλοιός.

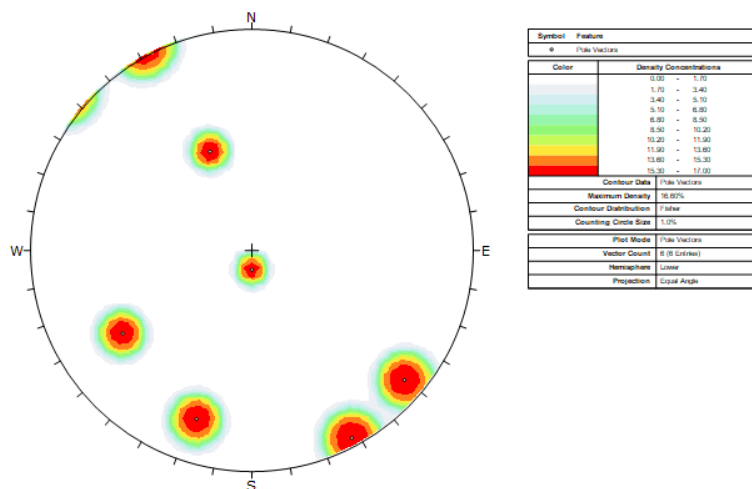
Η τεκτονική δομή της Κεφαλονιάς είναι αποτέλεσμα της επίδρασης τάσεων συμπίεστικού χαρακτήρα στις οποίες παρεμβάλλονται περίοδοι κατά τις οποίες επικρατούν εφελκυστικές τάσεις (Lekkas et al, 2001). Τα κύρια στάδια της τεκτονικής εξέλιξης της νήσου Κεφαλονιάς συνοψίζονται σε 4 στάδια:

- 1) Στο κατώτερο Πλειόκαινο επικρατεί καθεστώς έντονης συμπίεσης. Ως αποτέλεσμα τοποθετείται το Ιόνιο κάλυμμα επάνω στην ενότητα των Παξών και λαμβάνει χώρα η ανάδυση των νήσων με την δημιουργία πτυχώσεων και την ενεργοποίηση παλαιότερων ρηγμάτων που μεταβάλλουν την κίνησή τους από κανονικά σε αντίστροφα.
- 2) Στο Ανώτερο Πλειόκαινο-Κατώτερο Πλειστόκαινο επικρατεί μία περίοδος αποσυμπίεσης. Το καθεστώς συμπίεσης δραστηριοποιείται ακόμη στα βαθύτερα τμήματα του φλοιού, ενώ στην επιφάνεια επικρατεί η δράση μεγάλων ρηξιγενών επιφανειών με τη μορφή κανονικών ρηγμάτων. Τότε έλαβε χώρα και η δημιουργία επιμέρους τεκτονικών κεράτων και βυθισμάτων, όπως το κέρασ του Αίνου και της Αγίας Δυνατής.
- 3) Στο τρίτο στάδιο τεκτονικής εξέλιξης (Κατώτερο Πλειστόκαινο) παρατηρούνται ακόμη χαρακτηριστικά συμπίεστικής παραμόρφωσης που έχουν ως αποτέλεσμα τη γένεση νέων ρηξιγενών δομών ανάστροφου χαρακτήρα και μίας νεότερης γενιάς πτυχών και κάμψεων. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε η ανύψωση της θαλάσσιας αναβαθμίδας στην περιοχή των Μηνιών (Mercier et al., 1972, 1987).
- 4) Στο τελευταίο στάδιο επικρατεί μία νέα φάση αποσυμπίεσης των δομών, με μεγαλύτερα βάθη, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών (Drakopoulos & Delibasis, 1982).

5 Τεχνικογεωλογικά Χαρακτηριστικά

5.1 Συστήματα ασυνεχειών

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης ελήφθησαν μετρήσεις προσανατολισμού των ασυνεχειών. Οι πόλοι των ασυνεχειών από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, δίνονται στο ακόλουθο τεκτονικό διάγραμμα με τη χρήση του προγράμματος Dips της εταιρίας Rocscience.



Εικόνα 12. Στερεογραφική προβολή των πόλων των ασυνεχειών.

Από το σύνολο των μετρήσεων προκύπτουν 6 συστήματα ασυνεχειών:

J1: 84,23/310,39 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

J2: 51,79/156,99 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

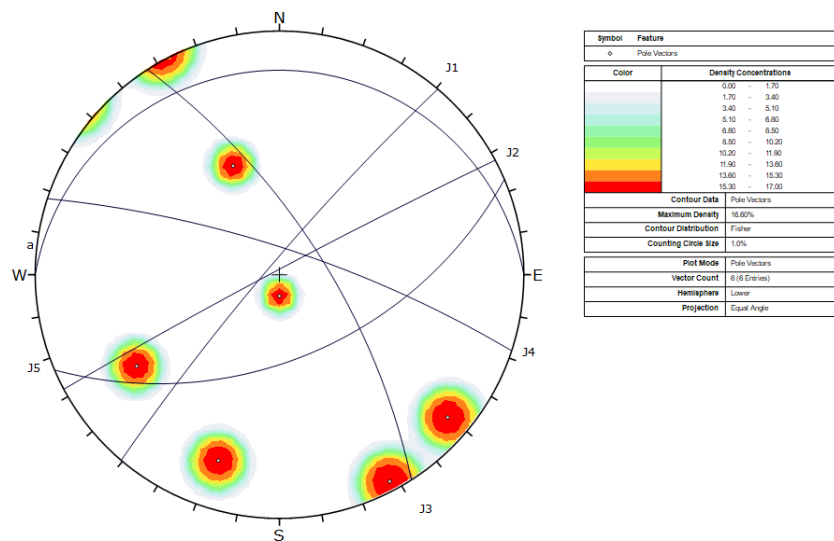
J3: 69,55/057,31 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

J4: 77,5/018,19 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

J5: 87,70/331,98 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

Στρώση α: 10/000 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

Τα παραπάνω συστήματα ασυνεχειών δίνονται σχηματικά στο δίκτυο Schmidt που ακολουθεί.



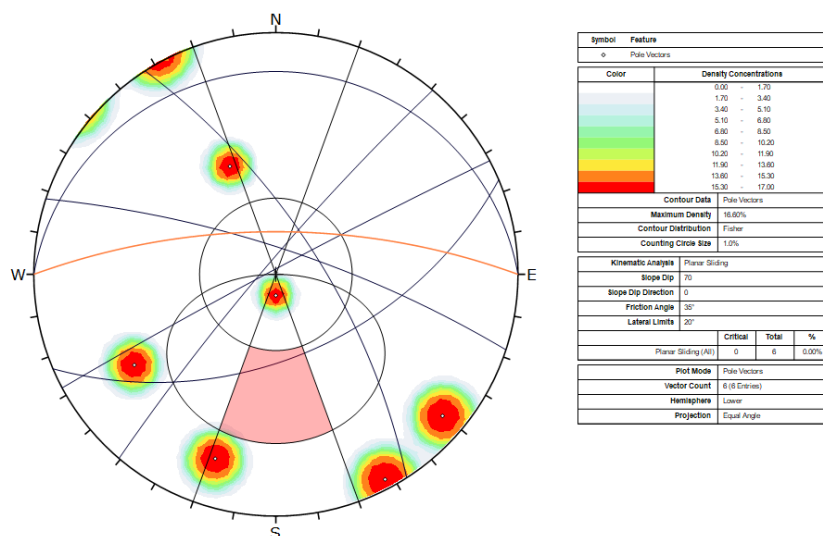
Εικόνα 13. Προβολή ασυνεχειών στο δίκτυο Schmidt.

5.2 Τεκτονικά διαγράμματα κινηματικής ανάλυσης

Για την περιοχή μελέτης σχεδιάστηκε τεκτονικό διάγραμμα κινηματικής ανάλυσης, προκειμένου να εξεταστεί το ενδεχόμενο δημιουργίας σφηνών, ολίσθησης επί της επιφάνειας σχιστότητας ή διάκλασης και ανατροπής όγκων.

Για τον σχεδιασμό των διαγραμμάτων έχει ληφθεί γωνία τριβής 35°.

5.2.1 Επίπεδη ολίσθηση

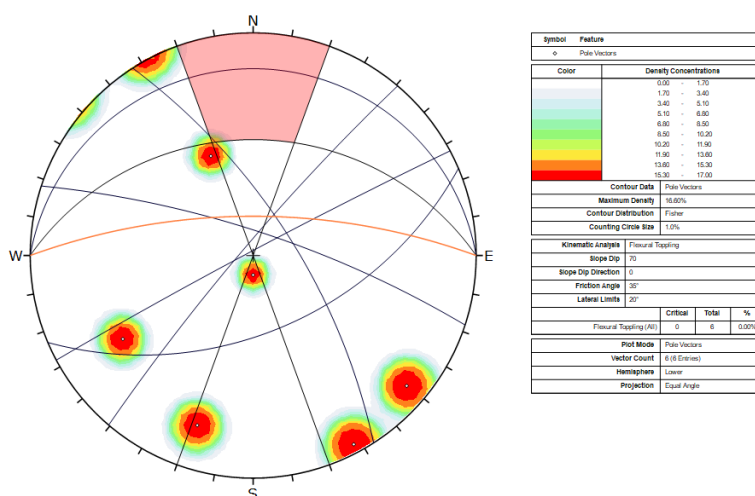


Εικόνα 14. Κινηματική ανάλυση για επίπεδη ολίσθηση.

Συνδυασμός	Κλίση (Dip) °	Διεύθυνση κλίσης (Dip Direction) °	Κλίση (Dip) °	Διεύθυνση κλίσης (Dip Direction) °
J1-a	84,22998	310,3883	10	0
J1-J2	84,22998	310,3883	51,79336	156,9932
J1-J3	84,22998	310,3883	69,54529	57,3065
J1-J4	84,22998	310,3883	77,49738	18,18908
J1-J5	84,22998	310,3883	87,70283	331,9829
J2-a	51,79336	156,9932	10	0
J2-J3	51,79336	156,9932	69,54529	57,3065
J2-J4	51,79336	156,9932	77,49738	18,18908
J2-J5	51,79336	156,9932	87,70283	331,9829
J3-a	69,54529	57,3065	10	0
J3-J4	69,54529	57,3065	77,49738	18,18908
J3-J5	69,54529	57,3065	87,70283	331,9829
J4-a	77,49738	18,18908	10	0
J4-J5	77,49738	18,18908	87,70283	331,9829
J5-a	87,70283	331,9829	10	0

Πίνακας 1

5.2.3 Ανατροπή









Εικόνα 16. Κινηματική ανάλυση-έλεγχος ανατροπής.

Από την κινηματική ανάλυση για τη δημιουργία ανατροπών επιπέδων συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει κίνδυνος ανατροπής στην περιοχή μελέτης.

5.3 Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας κατά GSI

Κατά την έρευνα πεδίου που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, έγιναν μετρήσεις των στοιχείων προσανατολισμού των συστημάτων

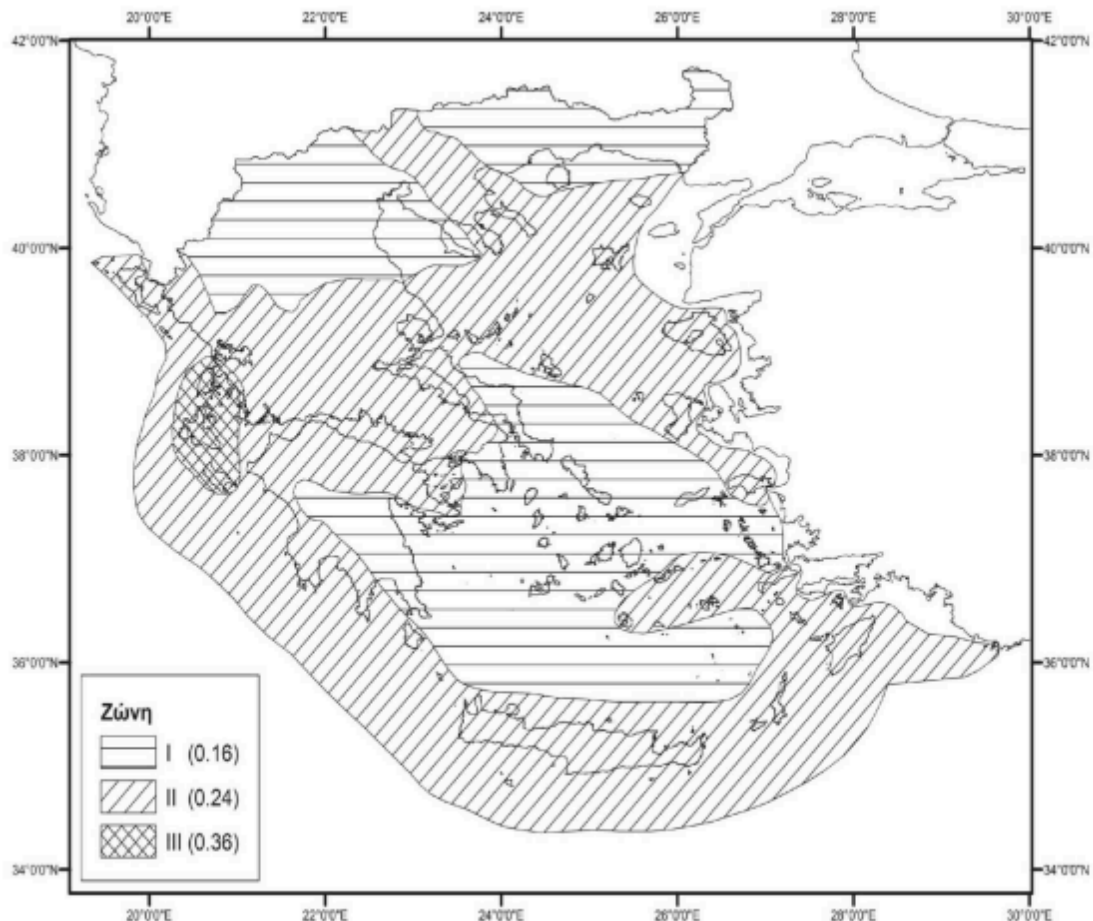
ασυνεχειών, φωτογραφική αποτύπωση της κατάστασης της βραχομάζας, μετρήσεις της ταχύτητας και της αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών, έτσι ώστε να προκύπτει ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης της βραχομάζας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) της βραχομάζας βασιζόμενο στις παρατηρήσεις πεδίου, από όπου προέκυψε δείκτης GSI=65-70.

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασιζόμενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχομάζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>	<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσθρωμμένες επιφάνειες</p>	<p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσθρωμμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p>	<p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσθρωμμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p>	<p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθηρές, πολύ αποσθρωμμένες με σημαντική επιφλοώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχίδια</p>	<p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθηρές, πολύ αποσθρωμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>
	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p>				
 <p>INTACT OR MASSIVE - Άρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90			N/A	N/A
 <p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	80	70	60		
 <p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>	70	60	50		
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>	60	50	40	30	
 <p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p>	50	40	30	20	
 <p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	40	30	20	10	
	N/A	N/A			

Εικόνα 17: Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) (Hoek and Marinos 2000).

6 Στοιχεία Σεισμικότητας-Σεισμικής Επικινδυνότητας

Σύμφωνα με την Αποφ-Δ17α/115/9/ΦΝ275/03 (ΦΕΚ-1154/Β/12-8-03), Τροποποίηση διατάξεων του «Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2000» λόγω αναθεώρησης του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας, η περιοχή μελέτης (Κεφαλονιά) ανήκει στη Ζώνη ΙΙΙ και η σεισμική επιτάχυνση του εδάφους Α (= $\alpha \bullet g$) λαμβάνεται 0,36g.



Χάρτης 1: Οι τρεις κατηγορίες (I, II, III) ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στις οποίες χωρίστηκε ο Ελληνικός χώρος, σύμφωνα με τις πλέον πρόσφατες τροποποιήσεις του ΕΑΚ2000 το 2003, λόγω αναθεώρησης του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας.

Κατηγορία εδάφους: κατά EC-8, η περιοχή μελέτης κατατάσσεται σε έδαφος κατηγορίας Α (Βράχος ή βραχώδης σχηματισμός που περιλαμβάνει έως 5m ασθενέστερου επιφανειακού γεωυλικού). Η βασική σεισμική δράση υπολογισμού ag_R καθορίζεται κατά EC-8, για συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_I = 1.40$ (περίοδος επαναφοράς 1300 έτη): $ag_R = ag * 1.40 = 0.504$. Για τον έλεγχο των παρειών του σπηλαίου ελήφθη $a_h = 0.504$ και $a_v = \pm 0.252$

7 Κανονιστικό Πλαίσιο

Ως κανονιστικό πλαίσιο για τους γεωστατικούς και βραχομηχανικούς υπολογισμούς υιοθετείται ο EC-7 και οι σχετικές προβλέψεις του για

- 1) Αναλύσεις ευστάθειας και
- 2) Σχεδιασμό αγκυρώσεων.

7.1 Κανονιστικό Πλαίσιο Ευστάθειας Κατά EC-7

Η εθνική επιλογή για τον υπολογισμό ευστάθειας πρανών σύμφωνα με τον EC-7 ακολουθεί τη διαδικασία DA-3:

Κατά το εθνικό προσάρτημα (2007) του EC-7 για τις αναλύσεις ευστάθειας πρανών στην Ελλάδα υιοθετούνται οι επιμέρους συντελεστές του τρόπου ανάλυσης 3 (DA-3), οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

	Ομάδα	Επιμέρους Συντελεστές
Μόνιμες ευμενείς δράσεις, γ_G	A2	1.00
Γωνία διατμητικής αντίστασης, $\gamma_{\phi'}$ (Εφαρμόζεται στο $\tan\phi'$)	M2	1.25
Ενεργός συνοχή, $\gamma_{c'}$	M2	1.25
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή, γ_{cu}	M2	1.40
Αντίσταση γαιών γ_R	R3	1.00
Συντελεστής προσομοίωματος, γ_M *		1.00, 1.10

*Ανάλογα με τις υδραυλικές συνθήκες

Πίνακας 2

Για την απλοποίηση των υπολογισμών, στις αναλύσεις ευστάθειας θεωρείται επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης και η αντοχή του εδάφους περιγράφεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb. Εφόσον η αστοχία πρανών σε επιφάνεια αποτελεί ένα πρόβλημα ισορροπίας δυνάμεων, η κατανεμημένη πίεση αντιστήριξης που ασκείται στην επιφάνεια του πρανούς μπορεί να προσομοιωθεί με μία συγκεντρωμένη δύναμη.

Στο κομμάτι των ντετερμινιστικών αναλύσεων για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών τιμών των παραμέτρων αντοχής θεωρείται ότι τα υπό μελέτη πρανή ανήκουν στην κατηγορία συμμετοχής «μεγάλου εδαφικού όγκου στην αστοχία». (Εξισώσεις 2,3,4 με βάση την εξίσωση 1) και για τον υπολογισμό των τιμών σχεδιασμού (εξισώσεις 5,6,7) υιοθετούνται οι επιμέρους συντελεστές των υλικών του DA-3 (Πίνακα 1).

$$X_k = X_m [1 - 0,50V_x] \quad (1)$$

Όπου X_k , X_m είναι η χαρακτηριστική και μέση τιμή της παραμέτρου X και V_x ο συντελεστής μεταβλητότητας

$$c'_{k} = m_{c'} - 0,50V_{c'}m_{c'} \quad (2)$$

$$\varphi'_{k} = m_{\varphi'} - 0,50V_{\varphi'}m_{\varphi'} \quad (3)$$

$$c_{u,k} = m_{c_{cu}} - 0,50V_{c_{cu}}m_{c_{cu}} \quad (4)$$

Όπου $m_{c'}$ η μέση τιμή της ενεργού συνοχής $m_{\varphi'}$ η μέση τιμή της ενεργού γωνίας τριβής, $m_{c_{cu}}$ η μέση τιμή της αστράγγιστης διατμητικής και $V_{c'}$, $V_{\varphi'}$, $V_{c_{cu}}$ είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές μεταβλητότητας.

$$c'_{d} = c'_{k} / \gamma_{c'} \quad (5)$$

$$\varphi'_{d} = \varphi'_{k} / \gamma_{\varphi'} \quad (6)$$

$$c_{ud} = c_{u,k} / \gamma_{c_{cu}} \quad (7)$$

Με εφαρμογή του EC-7 οι αναλύσεις ευστάθειας μπορούν να γίνουν με τις χαρακτηριστικές τιμές δράσεων και γεωϋλικών και ενιαίο συντελεστή ασφαλείας ως ακολούθως:

Κανονικές γεωστατικές συνθήκες (ΚΣ),	FS=1.40
Κατάσταση υψηλής υδροφορίας (ΥΥ),	FS=1.20
Σεισμικές συνθήκες (ΣΣ),	FS=1.00

8 Αξιολόγηση Γεωτεχνικών Συνθηκών-Γεωτεχνικά Προβλήματα

Το σπήλαιο της Μελισσάνης δημιουργήθηκε από τη χημική διάλυση του ασβεστόλιθου στην οποία συνέβαλε σημαντικά η ανάμιξη θαλασσινού και γλυκού νερού. Είναι γνωστό ότι τα σπήλαια αναπτύσσονται σε περιοχές με έντονα φαινόμενα καρστικοποίησης. Η σπηλαιογένεση έλαβε χώρα σε ασβεστόλιθους Ανώτερου Κρητιδικού και Τριτογενούς ηλικίας της ενότητας των Παξών. Η ανάπτυξη του έχει ακολουθήσει την κύρια διεύθυνση των διακλάσεων που διατρέχουν την ανθρακική μάζα των ασβεστόλιθων και έχει βοηθηθεί από τον πλακώδη χαρακτήρα αυτών.

Η θραύση και πτώση μέρους της οροφής αποκάλυψε το σπήλαιο. Η οροφή είναι σχετικά οριζόντια, λόγω γεωμετρίας των ανθρακικών πετρωμάτων.

8.1 Γεωτεχνικά Προβλήματα

Η βραχομάζα μέσα στην οποία έχει αναπτυχθεί το σπήλαιο είναι κατακερματισμένη από διακλάσεις και επιφάνειες στρώσης. Οι ασυνέχειες μπορεί να είναι μεμονωμένες ή συστηματικές. Στις μεμονωμένες ανήκουν οι επιφάνειες τοπικής ολίσθησης της βραχομάζας, ενώ στις δεύτερες εντάσσονται οι διακλάσεις και οι επιφάνειες στρώσης. Η διεύθυνση ανάπτυξης του σπηλαίου υποδεικνύει ότι αυτό ακολούθησε τη διεύθυνση ενός από τα κύρια συστήματα διακλάσεων (BBD-NNA).

Αν και στη θέση του σπηλαίου δεν εντοπίζεται κάποιο αξιόλογο ρήγμα η βραχομάζα διαχωρίζεται από έναν σημαντικό αριθμό ασυνεχειών. Ο συνδυασμός της σχετικά οριζόντιας στρώσης (10°) και των διακλάσεων μεγάλης κλίσης έχει ως αποτέλεσμα τον τεμαχισμό του μητρικού πετρώματος με τη δημιουργία οριζόντιων πλακών αυτού. Οι τελευταίες στην περίπτωση που αποτελούν την οροφή του σπηλαίου ή τις με αρνητική κλίση πλευρές του, με τις κατάλληλες συνθήκες αποκολλούνται από την υπόλοιπη βραχομάζα. Με αυτόν τον τρόπο έγινε η κατάπτωση της οροφής του σπηλαίου και η αποκάλυψή του, αλλά και η δημιουργία του λοφίσκου εντός της υπόγειας λίμνης. Τέλος η σχετικά θολωτή διατομή της οροφής δείχνει ότι έχει γίνει παραλαβή των τάσεων και βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Στο φυσικό άνοιγμα του σπηλαίου, όπου έχει κατασκευαστεί εξώστης για τους επισκέπτες του σπηλαίου, διακρίνονται χαλαρά υλικά. Πρόκειται για χαλίκια και μεγάλα τεμάχια πετρώματος από τον αποσαθρωμένο ασβεστόλιθο. Τα τεμάχια αυτά παρατηρούνται στη δυτική πλευρά του ανοίγματος και ορίζονται από την υπο - οριζόντια στρώση και τις κατακόρυφες ασυνέχειες του πετρώματος. Τα χρώματα του αποσαθρωμένου ασβεστόλιθου δείχνουν την πρόσφατη μετακίνησή τους και είναι επικίνδυνα να πέσουν εντός του σπηλαίου.

Στη νότια πλευρά του σπηλαίου διακρίνονται επίσης χαλαρά υλικά μεγέθους χαλικιών που συγκρατούνται μερικώς από το ριζικό σύστημα της περιοχής, αλλά

πολλά είναι σε θέση να κυλίσουν και να πέσουν εντός του σπηλαιού. Η βλάστηση όμως πέρα από την συγκράτηση του χαλαρού αυτού υλικού συμβάλλει στον κατακερματισμό του πετρώματος και τη διεύρυνση των ρωγμών που ήδη διαθέτει. Τέλος το πάχος της οροφής σε ορισμένα σημεία του σπηλαιού προς τη ΒΔ πλευρά του είναι μόλις μερικά μέτρα (4-5m) και με δεδομένο το μεγάλο πλάτος της οροφής υπάρχει κίνδυνος κατάπτωσης σε περίπτωση ισχυρής σεισμικής δόνησης.

8.2 Ασυνέχειες

8.2.1 Τεκτονική Ανάλυση Ασυνεχειών

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 7.1 οι ασυνέχειες που χαρακτηρίζουν την περιοχή του λιμνοσπηλαιού της Μελισσάνης είναι δύο ειδών:

- i. Στρωματογραφικές (επιφάνειες στρώσεις) με σχεδόν οριζόντια στρώση, διαμπερείς και με μέτρια ταχύτητα λόγω φαινομένων διάλυσης.
- ii. Τεκτονικές (διακλάσεις) που χαρακτηρίζονται από μεγάλο μήκος, μέτρια πυκνότητα και μεταβαλλόμενη κλίση.

Αναλυτικά παρουσιάζονται οι ασυνέχειες που παρατηρήθηκαν στο εσωτερικού του σπηλαιού

J1: 84,23/310,39 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

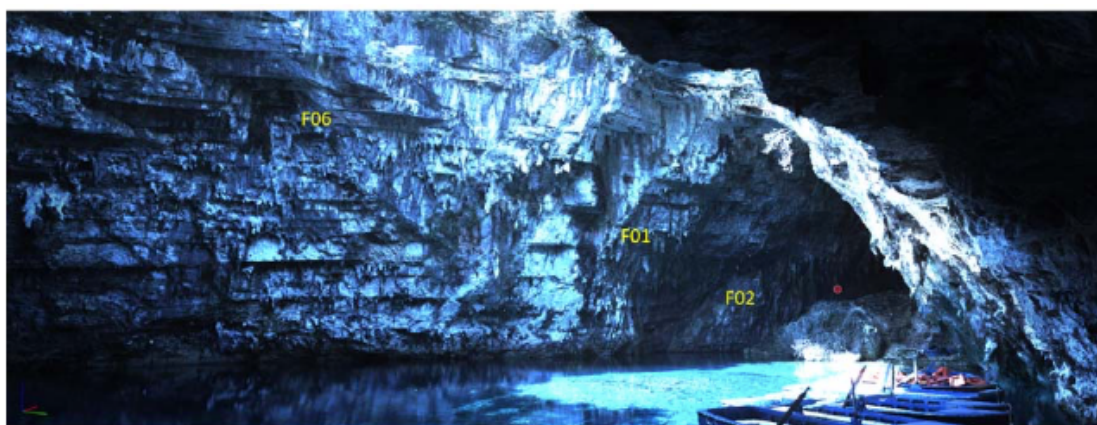
J2: 51,79/156,99 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

J3: 69,55/057,31 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

J4: 77,5/018,19 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

J5: 87,70/331,98 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)

J6/Στρώση α: 10/000 (κλίση/διεύθυνση κλίσης)



Εικόνα 18. Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών, όπως διακρίνονται εντός του σπηλαιού.



Εικόνα 19. Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών, όπως διακρίνονται εντός του σπηλαίου.



Εικόνα 10. Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών, όπως διακρίνονται εντός του σπηλαίου.

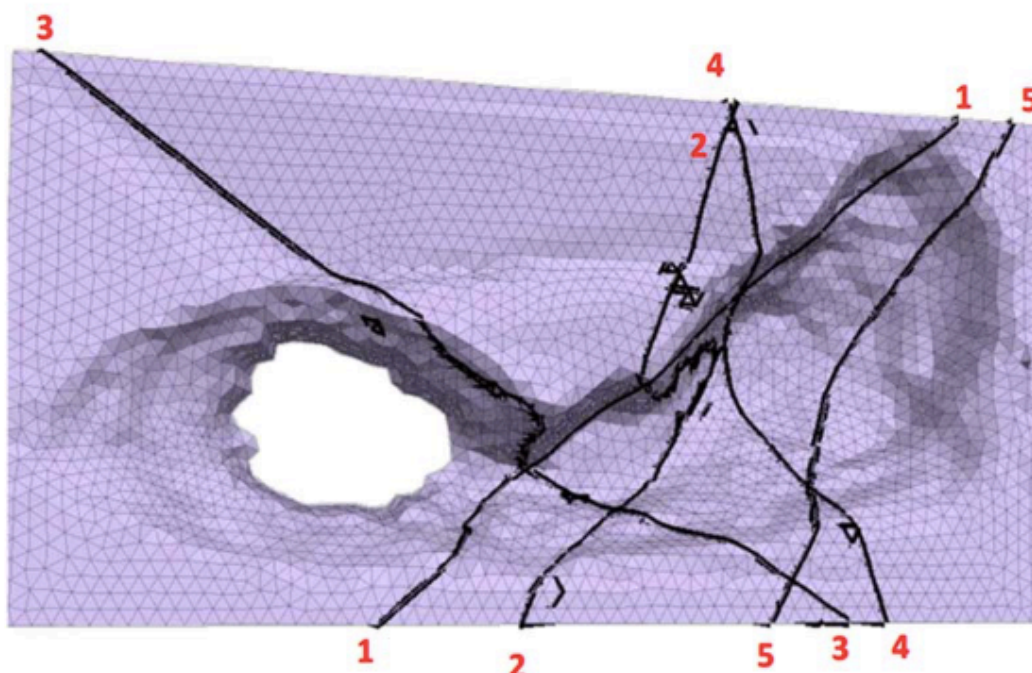


Εικόνα 11. Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών, όπως διακρίνονται εντός του σπηλαίου.

8.2.2 Ψηφιακή Αποτύπωση Ασυνεχειών

Η ψηφιακή αποτύπωση των ασυνεχειών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση Terrestrial Laser Scanner, όπου δημιουργήθηκαν νέφη της τάξης των 500.000.000 σημείων που αποτυπώνουν την ακρινή μορφολογία του δαπέδου, της οροφής και

των τοιχωμάτων του σπηλαίου. Οι ασυνέχειες αναγνωρίστηκαν και ψηφιοποιήθηκαν μετά από κατάλληλη επεξεργασία των σημείων με συντεταγμένες x,y,z σε ΕΓΣΑ 87.



Εικόνα 12.: Τρισδιάστατο μοντέλο σπηλαίου με αποτύπωση των ασυνεχειών (Σταυροπούλου Μαρία).

9 Γεωτεχνικοί Υπολογισμοί

Οι γεωτεχνικοί υπολογισμοί αφορούν στον έλεγχο ευστάθειας του θόλου και των παρειών του σπηλαίου και στην εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας στην υφιστάμενη κατάσταση. Ειδικότερα πραγματοποιούνται γεωτεχνικές αναλύσεις για τον καθορισμό των δυνητικά επισφαλών βραχωδών σφηνών που δημιουργούνται από τα συστήματα ασυνεχειών του βράχου.

Οι γεωτεχνικές επιλύσεις περιλαμβάνουν: Αναλύσεις ευστάθειας για τον έλεγχο της υφιστάμενης κατάστασης του σπηλαίου σε κανονικές συνθήκες και σε σεισμό με το λογισμικό Unwedge της εταιρίας Rocscience.

Για τις εξεταζόμενες καταστάσεις φόρτισης ο ελάχιστος απαιτούμενός συντελεστής ασφαλείας (SF) κατά EC-7 καθορίζεται:

Στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000) απαιτείται ενιαίος συντελεστής ασφαλείας τουλάχιστον ίσος με ένα υπό τις σεισμικές δράσεις σχεδιασμού. Συνεπώς σε:

- Συνθήκες Σεισμού SF=1
- Κανονικές Συνθήκες SF=1.4

Σε όλες τις επιλύσεις δεν προσομοιώθηκαν συνθήκες υδάτινης πίεσης εντός των ασυνεχειών καθώς στο σπήλαιο εμφανίζονται μόνο κατεισδύοντα όμβρια ύδατα.

9.1 Αναλύσεις Σφηνοειδούς Ολίσθησης

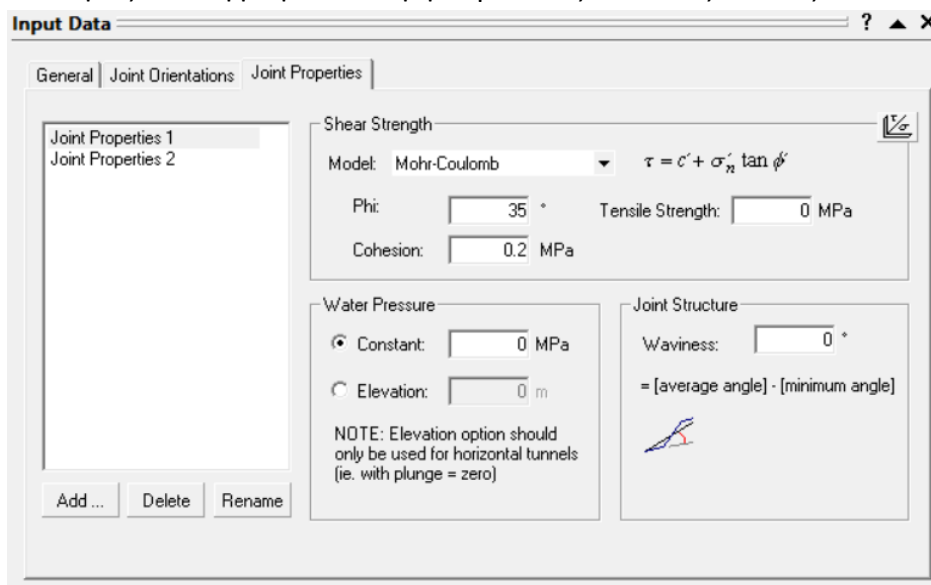
Η ανάλυση έγινε με τη χρήση του λογισμικού Unwedge για τον έλεγχο σφηνοειδούς ολίσθησης του θόλου και των παρειών του σπηλαίου. Οι γεωμετρικοί συνδυασμοί επίπεδων ασυνεχειών με τις ελεύθερες επιφάνειες του σπηλαίου δημιουργούν δυνητικά επισφαλείς σφήνες.

Στο λογισμικό εισάγονται: η γεωμετρία αντιπροσωπευτικής διατομής του σπηλαίου, τα στοιχεία του προσανατολισμού του σπηλαίου και των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που αποτυπώθηκαν και τις γεωμετρικές παραμέτρους αντοχής αυτών.

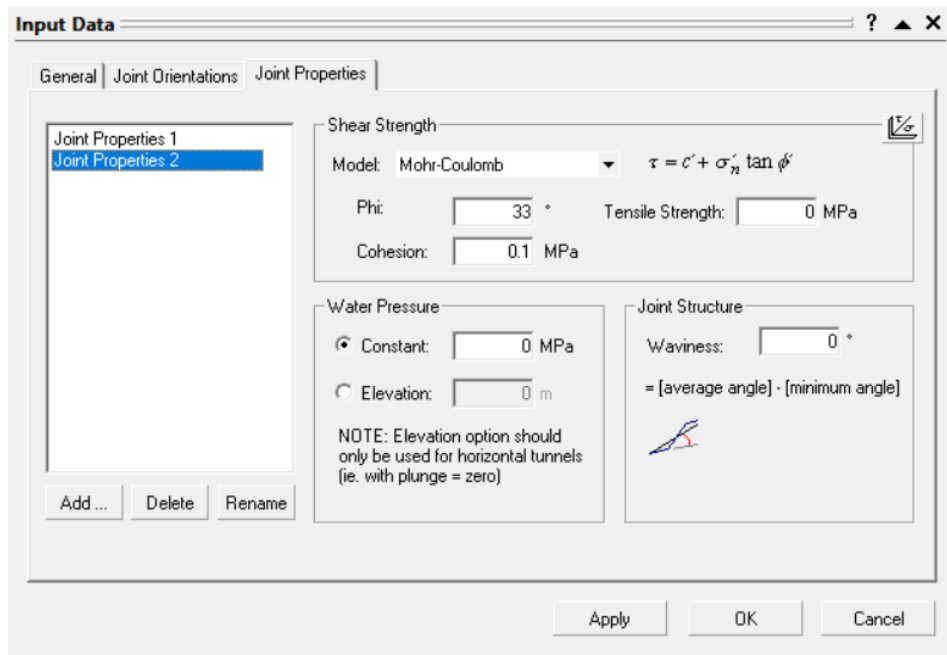
Το πρόγραμμα βασίζεται στη θεώρηση ότι οι σφήνες ορίζονται από τρία επίπεδα ασυνεχειών. Οι παραδοχές που γίνονται για την επίλυση είναι οι εξής:

- Οι σφήνες φέρουν μόνο το ίδιο το βάρος τους.
- Η ανάλυση αφορά την ολίσθηση μίας σφήνας τη φορά και όχι διαδοχικές αναλύσεις σφηνών.
- Οι μετακινήσεις λαμβάνουν χώρα επί των ασυνεχειών και οι σφήνες κινούνται σαν άκαμπτα σώματα χωρίς εσωτερική παραμόρφωση ή ρηγμάτωση.

Από τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν το πρόγραμμα UNWEDGE διαπιστώθηκαν 20 πιθανοί συνδυασμοί ασυνεχειών που μπορούν να προκαλέσουν δυνητικά σφηνοειδείς ολισθήσεις εντός του σπηλαίου και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 με ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας 1.4 για κανονικές συνθήκες. Από αυτούς αξιολογήθηκαν οι συνδυασμοί που περιλαμβάνουν την στρώση F06. Οι συνθήκες που λήφθηκαν υπόψη παρουσιάζονται στις Εικόνες 23 και 24.



Εικόνα 13. Ιδιότητες ασυνεχειών F01 έως F05.



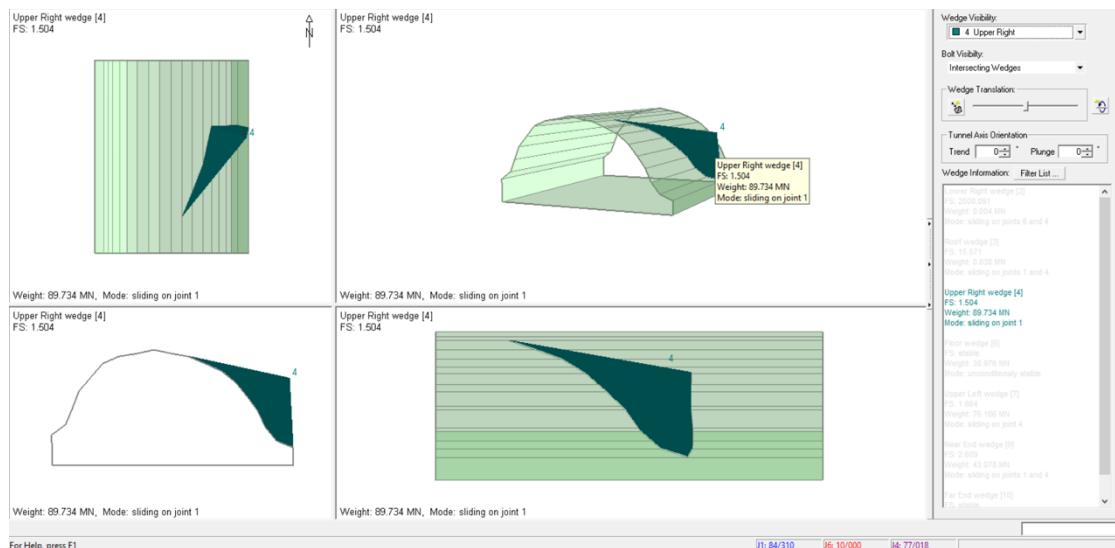
Εικόνα 14. Ιδιότητες Στρώσης F06.

Combination	Joint_A	Joint_B	Joint_C	Factor_of_Safety	Wedge_Volume	Units
1	1	4	6	1.821	3856.4	m ³
2	1	3	4	1.857	15466.1	m ³
3	3	5	6	1.868	2374.9	m ³
4	1	3	6	1.913	2593.4	m ³
5	3	4	5	2.205	14924.3	m ³
6	1	3	5	2.388	7602.7	m ³
7	4	5	6	2.394	6232.3	m ³
8	2	3	6	2.548	5808.7	m ³
9	1	4	5	2.686	6514.9	m ³
10	3	4	6	2.717	6275.1	m ³
11	2	3	4	3.000	18.6	m ³
12	1	5	6	3.776	2667.6	m ³
13	2	4	6	3.956	23345.3	m ³
14	2	3	5	4.674	2417.4	m ³
15	2	4	5	5.770	1502.9	m ³
16	1	2	3	5.894	1316.0	m ³
17	1	2	5	6.010	2276.0	m ³
18	1	2	6	6.548	10202.9	m ³
19	1	2	4	10.030	210.8	m ³
20	2	5	6	36.822	21858.4	m ³

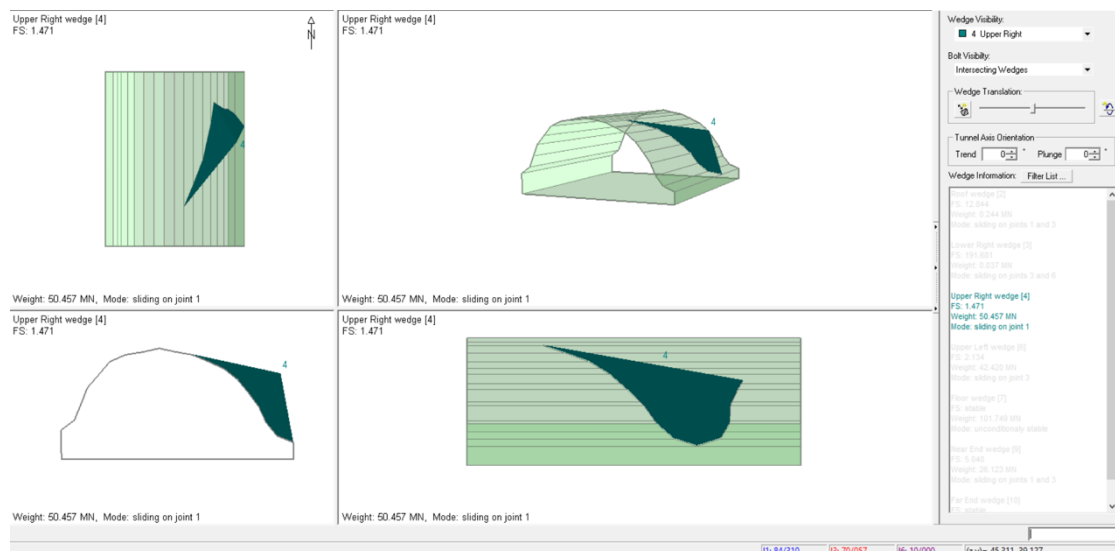
Πίνακας 3. Συνδυασμοί συστημάτων ασυνεχειών που μπορούν να δώσουν σφηνοειδείς ολισθήσεις στο εσωτερικό του σπηλαιού σε στατικές συνθήκες για μεγάλη ανάπτυξη των ασυνεχειών.

Combination	Joint A	Joint B	Joint C	Factor of Safety	Factor of Safety (Seismic)	Wedge_Volume	Slide
1	1	6	4	1.821	1.331	3856.4 m ³	J01
4	1	3	6	1.913	1.383	2593.4 m ³	J01
7	4	5	6	2.394	1.746	6232.3 m ³	J04 & J05
8	2	3	6	2.548	1.708	5808.7 m ³	J02 & J03
18	1	2	6	6.548	3.673	10202.9 m ³	J01 & J02
19	1	2	4	10.030	6.188	210.8 m ³	J01

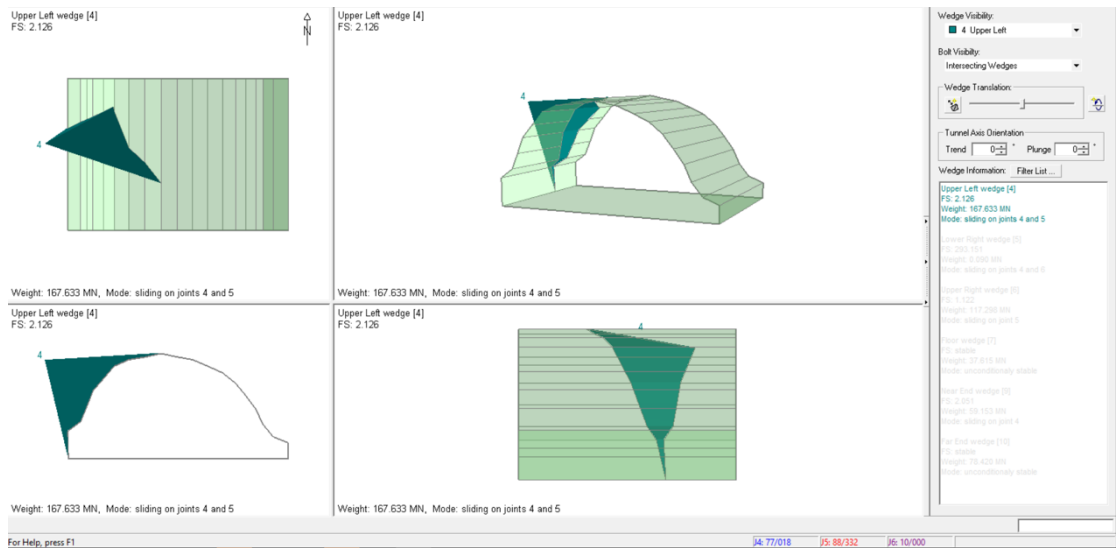
Πίνακας 4. Πιθανοί συνδυασμοί συστημάτων ασυνεχειών που μπορούν να δώσουν σφηνοειδείς ολισθήσεις στο εσωτερικό του σπηλαιού σε στατικές και σεισμικές συνθήκες για μεγάλη ανάπτυξη των ασυνεχειών.



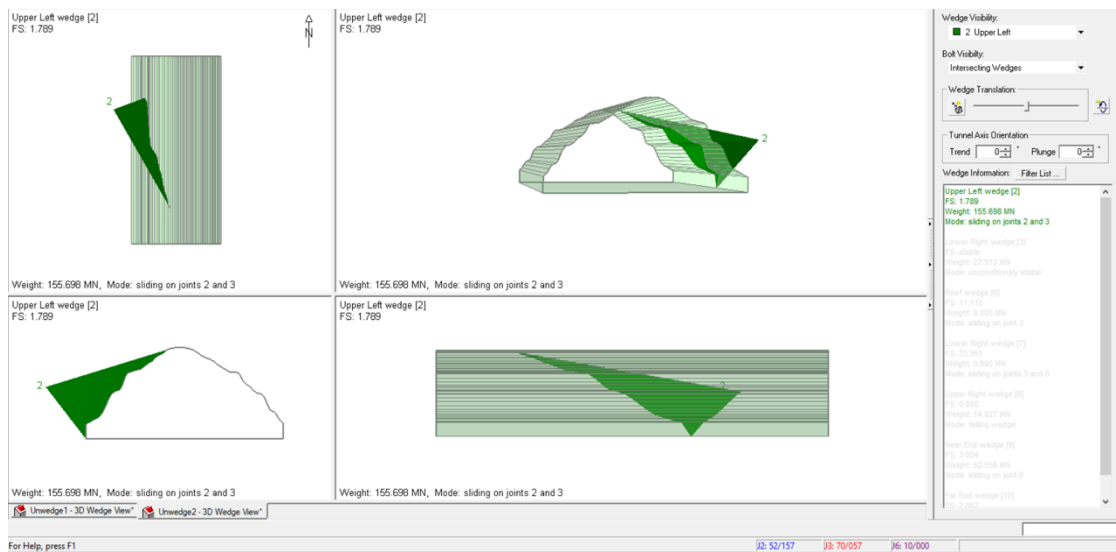
Εικόνα 15. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαιού, με πιθανές αποκολλήσεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F01/F04/F06 και στατικές συνθήκες.



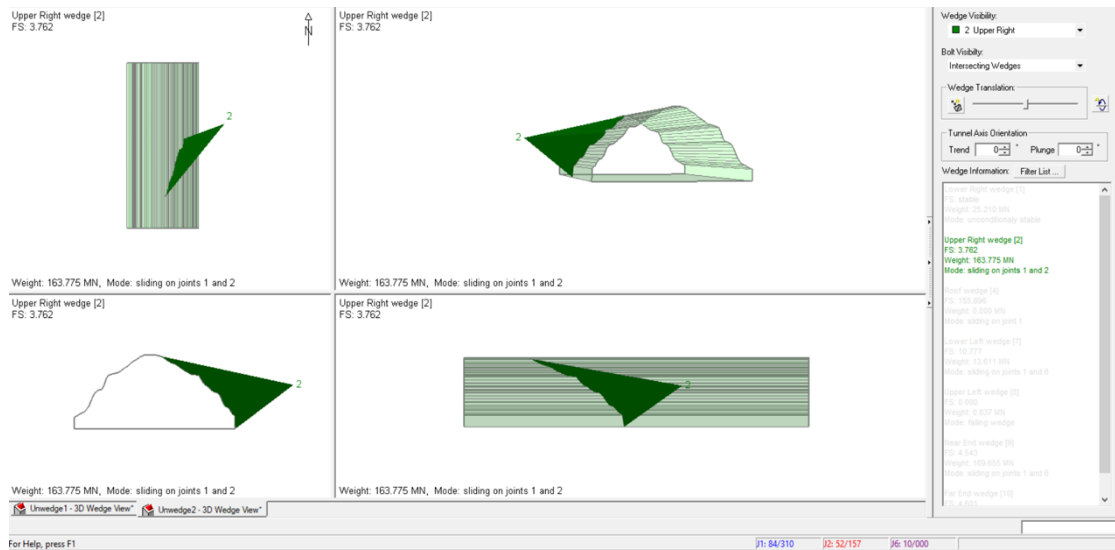
Εικόνα 16. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαιού, με πιθανές αποκολλήσεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F01/F03/F06 και στατικές συνθήκες.



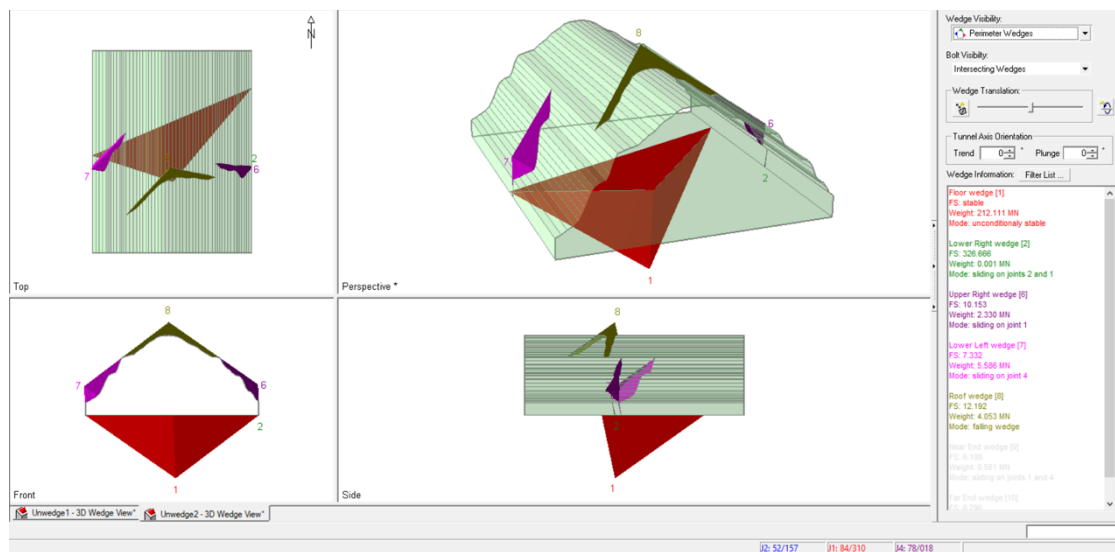
Εικόνα 17. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαίου, με πιθανές αποκολλήσεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F04/F05/F06 και στατικές συνθήκες.



Εικόνα 18. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαίου, με πιθανές αποκολλήσεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F02/F03/F06 και στατικές συνθήκες.



Εικόνα 19. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαιίου, με πιθανές αποκολλήσεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F01/F02/F06 και στατικές συνθήκες.



Εικόνα 20. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαιίου, με πιθανές αποκολλήσεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F01/F02/F04 και στατικές συνθήκες.

Στην Εικόνα 30. έγινε εξέταση για τη δυνητικά ασταθή σφήνα η οποία ορίζεται από τον συνδυασμό κύριων διακλάσεων μεγάλης κλίσης F01/F02/F04 για την δυσμενέστερη περίπτωση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη της στρώσης.

10 Προτεινόμενα Μέτρα

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας για τον έλεγχο της υφιστάμενης κατάστασης του σπηλαίου με το λογισμικό Unwedge και Dips της Rocscience. Από τις αναλύσεις αυτές προέκυψε πως το σπήλαιο είναι ευσταθές στην παρούσα κατάσταση και ο κύριος πιθανός μηχανισμός αστοχίας προκύπτει από τον γεωμετρικό συνδυασμό των σχεδόν κατακόρυφων ασυνεχειών με την οριζόντια στρώση του ασβεστόλιθου. Αυτός εντοπίζεται μόνο στην περιοχή του δαπέδου που βρίσκεται πάνω από την λιμνογραμμή «νησί» και έχει δημιουργηθεί από πεσμένους ογκόλιθους.

Οι προτεινόμενες ενέργειες που παρατίθενται σε αυτό το κεφάλαιο έχουν επιλεχθεί έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατόν μικρότερη παρέμβαση στο σπήλαιο και μείωση στο ελάχιστο δυνατό του επιπέδου διακινδύνευσης των επισκεπτών.

- Καθαίρεση επισφαλών τεμάχων και απομάκρυνση χαλαρών υλικών

Στο φυσικό άνοιγμα του σπηλαίου έχουν παρατηρηθεί επικρεμάμενα τεμάχια με εμφανή κίνδυνο αστοχίας. Οι καθαίρεσεις πρέπει να ξεκινήσουν από το ανώτερο επίπεδο εργασίας με σταδιακή εξέλιξη προς τα κάτω. Σε περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών θα πρέπει να διακόπτονται οι εργασίες και να συνεχίζονται ύστερα από αποκατάσταση των ασφαλών συνθηκών εργασίας. Όλα τα καθαιρούμενα υλικά πρέπει να απομακρυνθούν από το φυσικό άνοιγμα του σπηλαίου και δεν πρέπει να γίνει απομάκρυνση δια ελεύθερης πτώσης. Καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών απαιτείται απαγόρευση πρόσβασης επισκεπτών.

- Ενίσχυση ή αντικατάσταση της περίφραξης του φυσικού ανοίγματος

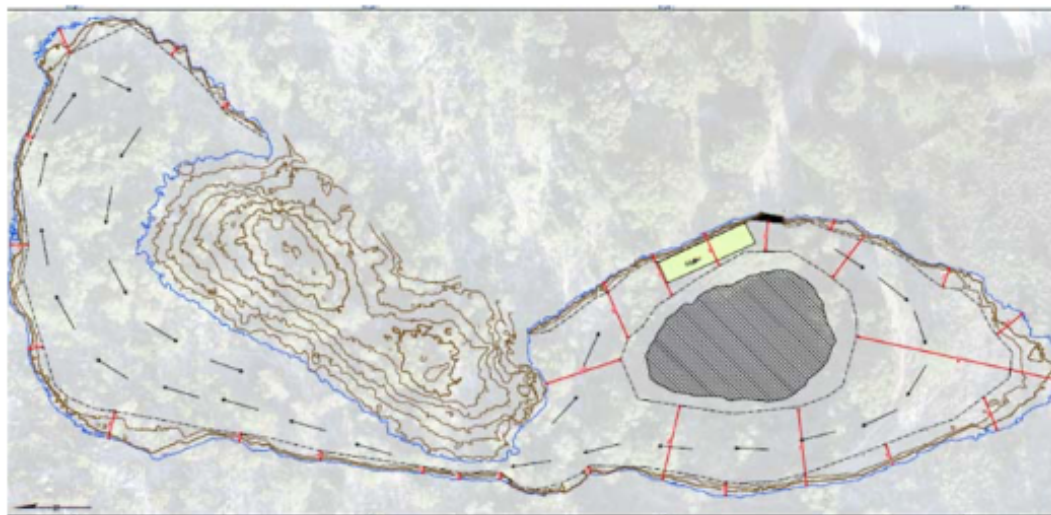
Η περίφραξη περιμετρικά του φυσικού ανοίγματος είναι σε αρκετές θέσεις χαλασμένη. Ο σχεδιασμός της περίφραξης, δηλαδή η αντικατάσταση ή ενίσχυση του υπάρχοντος όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο, θα πρέπει να γίνει με τη λογική όχι του αποκλεισμού αλλά της παρεμπόδισης της πρόσβασης στους επισκέπτες όταν το σπήλαιο είναι κλειστό, απουσία υπαλλήλου του σπηλαίου.

- Αποξήλωση και αντικατάσταση των υπαρχόντων εγκατεστημένων οξειδωμένων και διαβρωμένων κιγκλιδωμάτων στον εξώστη του φυσικού ανοίγματος του σπηλαίου.

Το υπάρχον κιγκλίδωμα κρίνεται ανεπαρκές για την ασφάλεια των επισκεπτών στον εξώστη. Προτείνεται η αντικατάσταση του από νέα αντιδιαβρωτικά κιγκλιδώματα με πυκνότερες κατακόρυφες και οριζόντιες μπάρες και σε μεγαλύτερο ύψος για την αποφυγή πτώσης κυρίως των ανήλικων επισκεπτών.

Όσον αφορά στην περιήγηση των επισκεπτών εντός της λίμνης του σπηλαίου με βάρκες έχει χαραχθεί ειδική διαδρομή, προς αποφυγή των σημείων με δυνητική πτώση βράχων είτε από τα τοιχώματα είτε από την οροφή του σπηλαίου. Ακόμη συνιστάται ο περιορισμός του χρόνου περιήγησης των επισκεπτών με τις βάρκες

ακριβώς κάτω από την περιμετρική ζώνη του φυσικού ανοίγματος του λιμνοσπηλαίου. Τέλος απαραίτητη κρίνεται η χορήγηση προστατευτικού κράνους στους επισκέπτες κατά τη διάρκεια της περιήγησής τους με τις λέμβους στο λιμνοσπήλαιο.



Εικόνα 21. :Ειδική διαδρομή για περιήγηση με λέμβους.

Τα προστατευτικά κράνη διακρίνονται σε δύο είδη:

1. Τα ορειβατικά / σπηλαιολογικά κράνη. Πρόκειται για πιστοποιημένα υλικά από την U IAA (Union of International Alpinists Association – Διεθνής Ένωσης Αλпинισμού) και όλα φέρουν πιστοποίηση CE. Είναι ελαφριά, σταθερά, βολικά και ιδιαίτερα ανθεκτικά. Οι τιμές τους είναι από ιδιαίτερα προσιτές έως πολύ υψηλές ανάλογα με τις προδιαγραφές και από την κατασκευάστρια εταιρεία. Είναι τα ιδανικά υλικά για κάθε μορφής σπήλαιο οριζόντιο ή κατακόρυφο.
2. Τα εργατικά κράνη. Μπορεί να φέρουν πιστοποίηση CE μπορεί όμως και όχι αλλά φέρουν πιστοποίηση από την U IAA. Έχουν πολλά μειονεκτήματα σε σχέση με τα πρώτα, είναι βαρύτερα, όχι τόσο σταθερά και βολικά και λιγότερο ανθεκτικά. Πλεονέκτημά τους το ότι είναι πολύ φθηνά. Ενδείκνυνται μόνο για οριζόντια σπήλαια.

Η οδηγία E N-12492 (U IAA-106) συνοπτικά προβλέπει ότι το κράνος πρέπει να παρουσιάζει αντοχή σε:

- Χτύπημα αντικειμένου με βάρος 5 kg το οποίο προσκρούει από απόσταση 2 m κάθετα στο πάνω τμήμα του κράνους,
- Χτύπημα αντικειμένου με βάρος 5 kg το οποίο προσκρούει από απόσταση 50 cm υπό γωνία σε πλευρικό τμήμα του κράνους και
- Χτύπημα αιχμηρού αντικειμένου βάρους 1,5 kg από απόσταση ενός μέτρου (1 m).

Τα κράνη, όπως όλα τα συνθετικά υλικά, έχουν ημερομηνία λήξης. Η ενημέρωση από τον προμηθευτή/κατασκευαστή ανά περίπτωση για την ημερομηνία λήξης είναι απαραίτητη και η αποφυγή χρήσης του κράνους πέρα από την ημερομηνία

αυτή επιβεβλημένη. Σε περιπτώσεις μεγάλης φθοράς στο κέλυφος ή σε περίπτωση ισχυρού χτυπήματος, επιβάλλεται ο αυστηρός και προσεκτικός έλεγχος του κράνους και η άμεση αντικατάστασή του σε περίπτωση βλάβης.

- Λήψη αντιολισθητικών μέτρων στο δάπεδο του τεχνητού τούνελ.

Προτείνεται ο καθαρισμός του υπάρχοντος υποστρώματος του τεχνητού υπόγειου διαδρόμου και η αντικατάστασή του, όπου αυτό είναι απαραίτητο. Στη συνέχεια η τοποθέτηση νέων αντιολισθητικών μοκετών με υπόστρωμα αντοχής. Εναλλακτικά θα πρέπει να αφαιρεθούν οι ήδη υπάρχουσες μοκέτες και να καθαριστεί το υπόστρωμα ώστε οι επιφάνειες να είναι σταθερές χωρίς υπολείμματα υλικών που εμποδίζουν την πρόσφυση. Τέλος θα κατασκευαστεί χαλαζιακό – ψηφιδωτό δάπεδο στον τεχνητό διάδρομο.

11 Παράρτημα

Unwedge Analysis Information

Document Name

File Name: Unwedge2_FINAL

Project Settings

Project Title: Stability Analysis of Wedges for Underground Excavations

Wedges Computed: Perimeter Wedges

Units: Metric, stress as MPa

General Input Data

Tunnel Axis Orientation:

Trend: 0°

Plunge: 0°

Design Factor of Safety: 1.400

Unit Weight of Rock: 0.026 MN/m³

Unit Weight of Water: 0.010 MN/m³

Seismic Forces

Direction: Sliding

Seismic Coefficient: 0.36

Joint Properties

Joint Properties 1

Water Pressure

Constant: 0 MPa

Waviness: 0°

Shear Strength Model: Mohr-Coulomb

Phi: 35°

Cohesion: 0.2 MPa

Tensile Strength: 0 MPa

Joint Properties 2

Water Pressure

Constant: 0 MPa

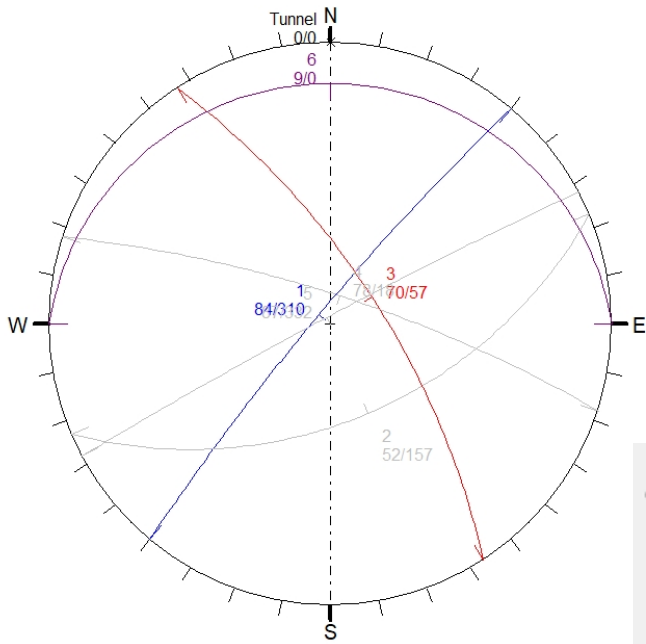
Waviness: 0°

Shear Strength Model: Mohr-Coulomb

Phi: 30°

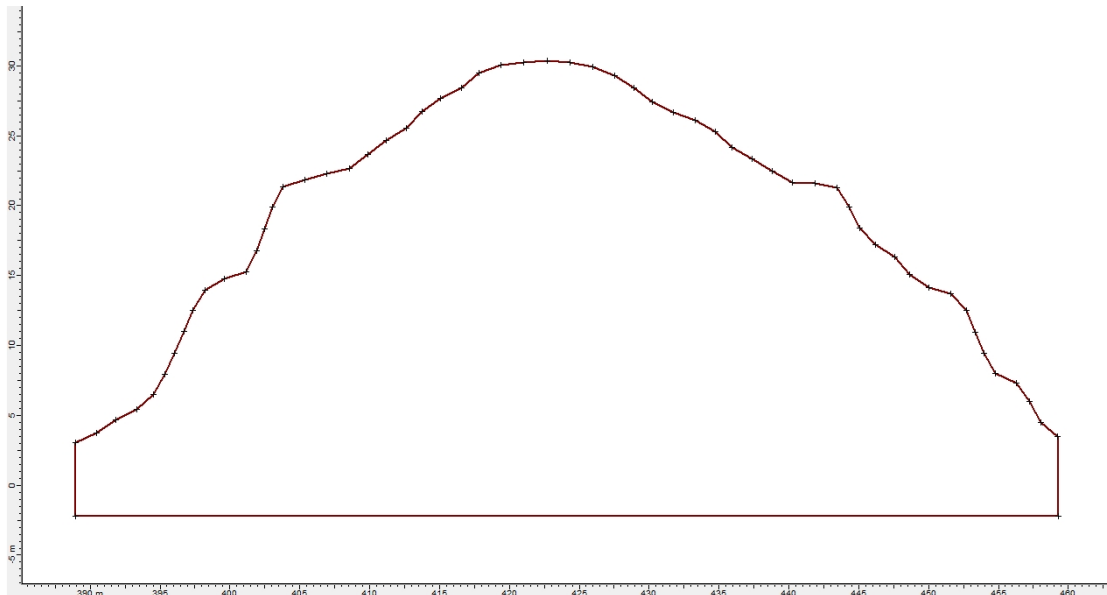
Cohesion: 0.1 MPa

Tensile Strength: 0 MPa



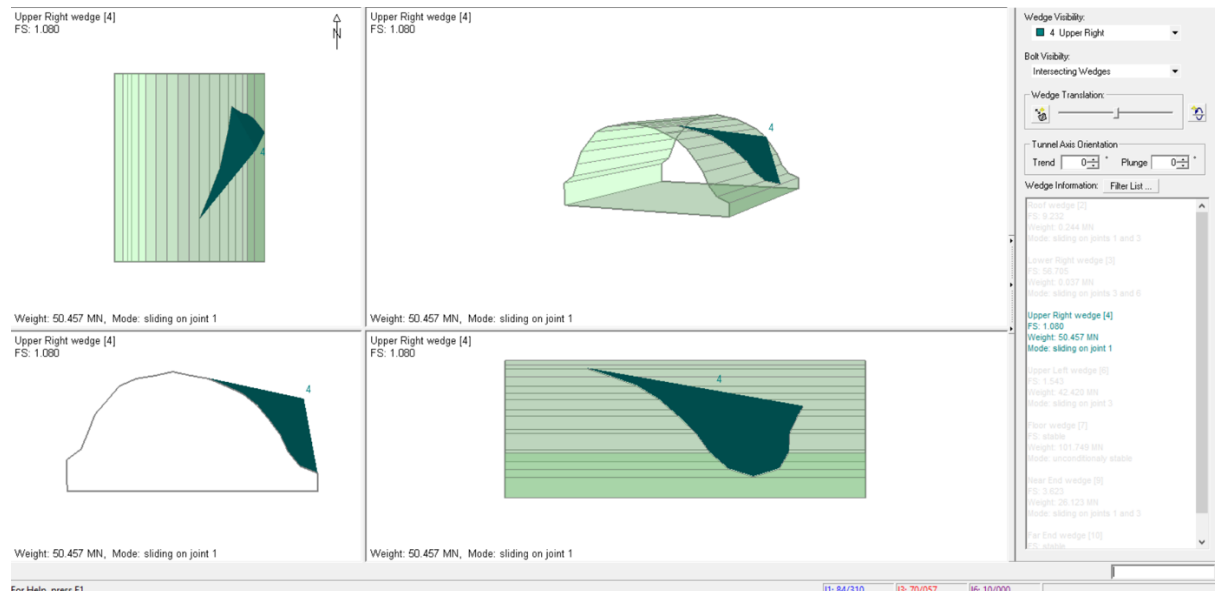
Joint Orientations

Joint	Dip	Dip Direction	Properties
1	84	310	Joint Properties 1
2	52	157	Joint Properties 1
3	70	57	Joint Properties 1
4	78	18	Joint Properties 1
5	87	332	Joint Properties 1
6	9	0	Joint Properties 2

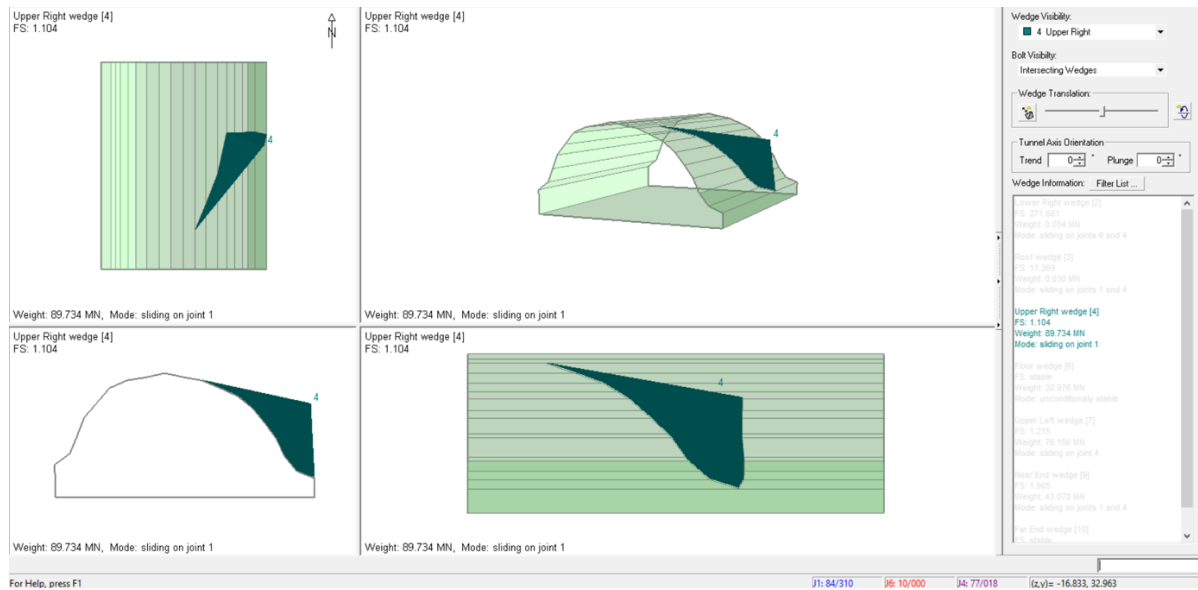




Εικόνα 22. Επεξεργασία διατομής με το λογισμικό AUTOCAD 2019 για μέτρηση του κενού χώρου ανάμεσα στην επιφάνεια του εδάφους και την οροφή του σπηλαιού.



Εικόνα 23. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαιού, με πιθανές αποκολλήσεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F01/F03/F06 και σεισμικές συνθήκες.



Εικόνα 24. Σκαρίφημα διατομής ελέγχου στο εσωτερικό του σπηλαίου, με πιθανές αποκολλησεις σφηνών από την οροφή και τις παρειές για τον συνδυασμό F01/F04/F06 και σεισμικές συνθήκες

12 Πηγές-Βιβλιογραφία

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: Wiley.
- Τσαμπά, Α. (2017). Τεχνικογεωλογικές συνθήκες και αριθμητικές αναλύσεις για τη διασφάλιση της ευστάθειας της οροφής σπηλαίων : η περίπτωση συγκεκριμένου σπηλαίου Ν. Αιτωλοακαρνανίας (Ν Σαμπατάκης, Ed.). Retrieved from <https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/10827>
- Χρηστάρας, Β Γ, Χατζηγώγος, Θ, Δημητρίου, Α, Χατζηγώγος, Ν, Μακεδών, Θ, Βογιατζής, Δ, & Φιλιππίδης, Σ. (2004, April 17). Ευστάθεια του σπηλαίου Πολύφημος στη Μαρώνεια Θράκης. Retrieved from http://www.geo.auth.gr/ege2004/articles/TG37_374.pdf
- Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004 Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004
- Σοφιανός, Α. (2015). Κεφάλαιο 8 Ασθενές πέτρωμα πέριξ υπογείου ανοίγματος. In *Υποστήριξη Υπόγειων Έργων*. Σχολή ΜΜΜ/ΕΜΠ. doi:https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3469/3/02_chapter_8.pdf
- ΤΣΑΚΛΙΔΗΣ. (2003, Αύγουστος 12). Αποφ. Δ17α/115/9/ΦΝ275. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*(2).
- ΦΟΡΤΣΑΚΗΣ, Π. ΣΤΥΛΙΑΝΙ.Η, Ε ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Μ. . (2010, October 1). *Ανάλυση Ευστάθειας Πρανών με Χρήση Στοχαστικών Μεθόδων*. Retrieved April 7, 2022, from <https://docplayer.gr/31532199-Analysi-eystatheias-pranon-ue-hrisi-stohastikon-methodon.html>

Καπατσώρη , Ά. (2012). *Τεκτονική Ανάλυση των δύο μεγάλων επωθήσεων στις περιοχές Όρμου Μύρτου και Κόλπου Αγίας Κυριακής στο Βόρειο τμήμα της νήσου Κεφαλονιάς* . Retrieved April 14, 2022, from <https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5364/1>

Γεωπάρκο Κεφαλονιάς Ιθάκης. (n.d.). *Η γεωλογία της κεφαλονιάς*. Retrieved April 15, 2022, from <https://kefaloniageopark.gr/geologia>

Μπονάτης, Π. (2016). *Εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας των νήσων Κεφαλληνίας και Ιθάκης* (dissertation).

ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ, Ι., ΚΩΤΣΗ, Ευαγγ., ΦΙΛΗΣ, Χρ., ΜΑΥΡΟΥΛΗΣ, Σπ., ΚΡΑΝΗΣ, Χ., ΣΚΟΥΡΤΣΟΣ, Εμμ., ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΥ, Μαρία, & ΛΕΚΚΑΣ, Ευθ. (2021). (tech.). *Δράσεις Προστασίας και Ανάδειξης στα Σπήλαια Μελισσάνης και Δρογκαράτης με Βάση το Ιδιόμορφο Γεωδυναμικό και Υδρομετεωρολογικό Πλαίσιο* . Αθήνα.