



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΠΗΛΛΙΟΥ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ

ΑΝΔΡΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΥ ΝΕΦΕΛΗ-ΕΛΕΝΗ

1114201700004

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΑΘΗΝΑ, 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια του προπτυχιακού κύκλου σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, του Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, μου ανατέθηκε η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Σε συνεργασία με την Καθηγήτρια Σταυροπούλου Μαρία, η οποία είναι η επιβλέπουσα της εργασίας, και τον Τομέα Τεκτονικής & Δυναμικής Γεωλογίας, που πραγματοποίησε γεωτεχνική – γεωλογική μελέτη για το λιμνοσπήλαιο της Μελισάνης, μελέτησα την ευστάθεια του θόλου και των παρειών του λιμνοσπηλαίου στην υφιστάμενη κατάσταση.

Πριν την παρουσίαση της εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους για την στήριξη και την βοήθειά τους, καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αλλά και των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Σταυροπούλου Μαρία, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου στην ανάθεση αυτού του θέματος, για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε και για την υπομονή της στην αντιμετώπιση οποιασδήποτε δυσκολίας παρουσιαζόταν.

Επιπροσθέτως, θεωρώ απαραίτητο να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές για την μεταλαμπάδευση των γνώσεων και την μετάδοση των εμπειριών τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Τμήμα, καθώς με τις συστηματικές τους προσπάθειες καταφέρνουν να κρατούν ενεργό το ενδιαφέρον των φοιτητών για μάθηση.

Τελευταίοι αλλά εξίσου σημαντικοί, είναι οι γονείς μου, οι οποίοι βάζοντας γερά θεμέλια με βοήθησαν να ανελιχθώ σαν άνθρωπος, με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια και πάντοτε μου προσφέρουν τα απαραίτητα εφόδια για να πραγματοποιήσω τα όνειρά μου. Σε αυτούς αφιερώνω και το παρόν σύγγραμμά, θέλοντας να τους εκφράσω την αγάπη και την ευγνωμοσύνη μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1 Γεωλογία Κεφαλληνίας.....	10
1.1.1 Γεωτεκτονικές ζώνες Κεφαλληνίας.....	11
1.2 Τεκτονική Κεφαλληνίας.....	14
1.2.1 Νεοτεκτονική δομή της νήσου.....	14
1.2.2 Περιγραφή ρηξιγενούς ιστού.....	16
1.2.2.1 Γεωμετρικά στοιχεία ρηγμάτων (γεωμετρική ανάλυση).....	16
1.2.2.2 Κινηματικά στοιχεία ρηγμάτων (κινηματική ανάλυση).....	16
1.2.3 Τεκτονική εξέλιξη της νήσου.....	17
1.3 Σεισμικότητα Ιονίου.....	18
1.4 Εθνικός Αντισεισμικός Κανονισμός.....	19
1.4.1 Σεισμικές ζώνες της Ελλάδας.....	19
1.4.2 Σεισμικές δονήσεις Κεφαλληνίας, 2014.....	21
2 ΛΙΜΝΟΣΠΗΛΑΙΟ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ.....	22
2.1 Καρστικές γεωμορφές & σπηλαιολογία.....	23
2.1.1 Γεωμορφολογία σπηλαίου.....	24
2.1.2 Υδρογεωλογία σπηλαίου.....	24
2.2 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σπηλαίου.....	25
2.2.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας.....	27
2.2.2 Γεωτεχνικοί παράμετροι βραχομάζας.....	28
2.2.3 Γεωτεχνικοί παράμετροι ασυνεχειών.....	29
2.3 Γεωτεχνικοί υπολογισμοί.....	30
3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MIDAS GTS NX.....	30
3.1 Θεωρητικά στοιχεία του λογισμικού.....	30
3.1.1 Στόχος της εργασίας.....	33
3.2 Βήματα επεξεργασίας μοντέλου.....	34
3.2.1 Μοντελοποίηση – Geometry.....	34
3.2.2 Προσδιορισμός παραμέτρων – Mesh Generator.....	36
3.2.3 Οριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης – Slope/Static Analysis.....	38
3.3 Αναλύσεις λογισμικού - Analysis.....	39
3.3.1 Ανάλυση Ευστάθειας - Stability Analysis.....	40
3.3.2 Ανάλυση Σταδίου Κατασκευής (Construction Stage Analysis).....	41
3.3.3 Ανάλυση Ιστορικού Χρόνου (Time History Analysis).....	41
3.3.3.1 Ανάλυση Ιδιοτιμής (Eigenvalue).....	43

4	ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	46
4.1	Αποτελέσματα SRM	46
4.2	Αποτελέσματα Construction Stage (Parametric) Analysis	48
4.3	Αποτελέσματα της Ανάλυσης Ιστορικού Χρόνου για την εδαφική επιτάχυνση της Κεφαλληνίας	52
4.4	Αποτελέσματα της Ανάλυσης Ιστορικού Χρόνου για τις σεισμικές δονήσεις του 2014	55
4.4.1	Σεισμική δόνηση στις 26 Ιανουαρίου του 2014	55
4.4.2	Σεισμική δόνηση στις 3 Φεβρουαρίου του 2014	58
5	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ UNWEDGE.....	61
5.1	Αναλύσεις σφηνοειδούς ολίσθησης με το λογισμικό UnWedge	61
5.1.1	Αποτελέσματα για στατικές συνθήκες.....	63
5.1.2	Αποτελέσματα για συνθήκες σεισμού	68
6	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75
7.1	Ξένη βιβλιογραφία	75
7.2	Ελληνική βιβλιογραφία	76

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με τον έλεγχο της ευστάθειας και την εκτίμηση του διατιθέμενου επιπέδου ασφαλείας του θόλου και των παρειών του λιμνοσπηλαιου της Μελισάνης στην υφιστάμενη κατάσταση, μελετώντας το ως συνεχές και ασυνεχές μέσο. Η εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας, θα δώσει προτάσεις για τις συνιστώμενες διαδρομές που θα πρέπει να ακολουθούν οι λέμβοι περιήγησης από εδώ και στο εξής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ανάλυση του μοντέλου ως συνεχές μέσο διεξήχθη μετά από απομείωση των παραμέτρων σχεδιασμού χρησιμοποιώντας τον γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI) και εν συνεχεία με την χρήση του λογισμικού Midas GTS NX παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των διαφόρων αναλύσεων. Οι αναλύσεις αυτές αναφέρονται σε στατικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες εδαφικής επιτάχυνσης και σεισμικών δονήσεων της Κεφαλληνίας, στοχεύοντας στην εύρεση των Συντελεστών Ασφαλείας για την υφιστάμενη κατάσταση και των δυνητικά επισφαλών βραχώδων όγκων εντός του λιμνοσπηλαιού.

Σε επόμενο βήμα, με τη χρήση του λογισμικού UnWedge της Rocscience και την εναλλαγή σε ασυνεχές μέσο, κατασκευάστηκε διατομή, η οποία επιλέχθηκε βάσει των δυσμενών χαρακτηριστικών αναφορικά με τη γεωμετρία του λιμνοσπηλαιού και τον αναμενόμενο μηχανισμό εκδήλωσης της αστοχίας, από όπου μελετήθηκαν οι σφηνοειδείς ολισθήσεις των τεμαχών εντός του λιμνοσπηλαιού λόγω ασυνεχειών. Η αποτύπωση των ασυνεχειών διεξήχθη σε αρχικό στάδιο, με την χρήση του Terrestrial Laser Scanner και των Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (drones), ενώ η ταυτοποίηση αυτών έγινε με επιτόπιες γεωλογικές παρατηρήσεις. Αυτή η διαδικασία βοήθησε ουσιαστικά στον σχεδιασμό των επιπέδων των ασυνεχειών και του μηχανικού μοντέλου.

Τέλος, με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κατέστη σαφής η υφιστάμενη κατάσταση ευστάθειας του λιμνοσπηλαιού σε στατικές συνθήκες και σε συνθήκες σεισμού, με στόχο την αποφυγή κατάπτωσης βραχώδων όγκων ή κατάρρευσης τμήματος της οροφής αυτού.

ABSTRACT

In the current dissertation we will deal with the control of the stability and the assessment of the available level of security of the dome and the sides of Melisani lagoon cave in the current situation, studying it as a continuous and discontinuous model. The elaboration of this study will provide suggestions on the recommended routes that the navigation boats should follow from now on.

It is important to note that the analysis of the continuous model was carried out after the design parameters have been reduced using the Geological Stability Index (GSI) and then using the Midas GTS NX software the results of the various analysis were presented. This analysis refers to normal static conditions, but also to conditions of ground acceleration and seismic vibrations of Kefallinia. The analysis aimed to find the Safety Factors for the current situation and the potentially precarious rock masses inside the lagoon.

In the next step, using the software UnWedge from Rocscience and switching to a discontinuous model, a cross-section was constructed. This one was selected, based on the unfavorable characteristics regarding the geometry of the lagoon and the expected mechanism of manifestation of the failure. This software scrutinized the wedge-shaped slips of the pieces inside the lagoon due to discontinuities. The recording of the discontinuities was carried out at an initial stage, using the Terrestrial Laser Scanner and the Unmanned Aircraft Systems (drones), while their identification was done with on-site geological observations. This process essentially helped in designing the planes of discontinuities and the mechanical model.

In conclusion, within the presentation of the results, the current state of stability of the lake cave was clarified in static and earthquake conditions, in order to avoid the downfall of rock masses or the collapse of part of its roof.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

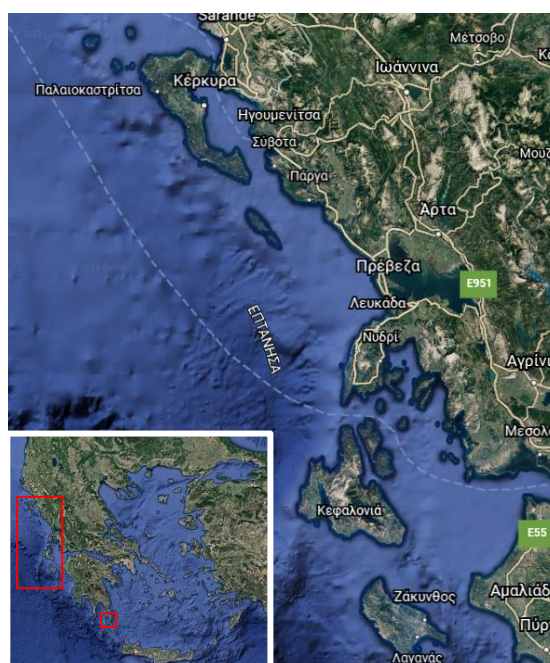
Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην ανάλυση της ευστάθειας των τοιχωμάτων ενός από τους πιο σημαντικούς καρστικούς σχηματισμούς στην Ελλάδα, του σπηλαιού Μελισάνης στη Νήσο Κεφαλληνία. Η Κεφαλληνία είναι γνωστή παγκοσμίως για τα ιδιαίτερα γεωλογικά φαινόμενά της, τα οποία συνεχίζουν να προβληματίζουν μέχρι σήμερα πολλούς επιστήμονες και ερευνητές κυρίως γεωλόγους αλλά και τους ίδιους τους κατοίκους της ευρύτερης περιοχής. Πρόκειται για γεωμορφές καρστικής φύσεως που αποτελούν παραδείγματα γεωλογικού μυστηρίου όπως οι Καταβόθρες Αργοστολίου, το σπήλαιο Δρογγραδάτης και το λιμνοσπήλαιο Μελισάνης που βρίσκεται στην κωμόπολη Σάμη και συγκεκριμένα στην περιοχή του Καραβόμυλου που βρίσκεται βόρεια αυτής. Η διαμόρφωση και παραμόρφωση του επιφανειακού ανάγλυφου της Κεφαλληνίας υπό συνθήκες αντίδρασης με το νερό της βροχής, έχουν δώσει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό καρστικών γεωμορφών όπως αυτές που προαναφέρθηκαν αλλά και δεκάδες άλλες στη νήσο. Πιο συγκεκριμένα το νερό της βροχής το οποίο περιέχει διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με ανθρακικά πετρώματα και

ιδιαίτερα με τις ασβεστολιθικές μάζες που κατακλύζουν την περιοχή. Έτσι οι ασβεστόλιθοι ερχόμενοι σε επαφή με τα ύδατα αλλοιώνονται/διαβρώνονται και δίνουν τους επιφανειακούς και υπόγειους καρστικούς σχηματισμούς οι οποίοι θα αναλυθούν στο «2.1 Καρστικές γεωμορφές & σπηλαιολογία». Σημειώνεται επιπλέον ότι η νήσος Κεφαλληνία χαρακτηρίζεται ως μία εκ των πιο σεισμογενών περιοχών του Ελλαδικού χώρου, καθώς είναι πλούσια σε ρηξιγενείς ζώνες και εκτεταμένα συστήματα διακλάσεων, γεγονός που επιτρέπει μέχρι και σήμερα τη συνεχή διαμόρφωση των καρστικών γεωμορφών λόγω της ακατάπαυστης κυκλοφορίας του νερού μέσω αυτών. Η Ιόνια Ζώνη καθώς και η Ζώνη Παξών ή Προαπούλια Ζώνη, οι οποίες απαρτίζουν τη νήσο, δίνουν έντονα σεισμικά φαινόμενα, καθώς οι σεισμοί αυτών ξεχωρίζουν για το μεγάλο μέγεθός τους στον Ελλαδικό χώρο ενώ με βάση αυτούς έχει δοθεί υψηλός σεισμικός συντελεστής για την κατασκευαστική ενέργεια στη νήσο. Στην εν λόγω εργασία λοιπόν θα πραγματοποιηθεί μελέτη για την παραμορφωσιμότητα των τοιχωμάτων του λιμνοσπηλαίου Μελισάνης με την χρήση του λογισμικού Midas GTS NX, το οποίο θα αναλυθεί στο «3.1 Θεωρητικά στοιχεία του λογισμικού» διαχειριζόμενοι διαφορετικές αναλύσεις και παραμέτρους με σκοπό τον υπολογισμό Συντελεστών Ασφαλείας (SF) που εκφράζουν την ευστάθεια του σπηλαίου, τη διεξαγωγή συμπερασμάτων και την πραγματοποίηση συγκρίσεων μεταξύ διαφορετικών σεισμολογικών δεδομένων και γεωτεχνικών παραμέτρων.

1.1 Γεωλογία Κεφαλληνίας

Η Κεφαλληνία, μαζί με τη νήσο Ιθάκη, αποτελούν το δυτικότερο τμήμα των Εξωτερικών Ελληνίδων (ΣΧΗΜΑ 1.1), βρισκόμενες κοντά στο ελληνικό τόξο το οποίο και αποτελεί την πιο ενεργή τεκτονικά περιοχή της Ευρώπης. Εξαιτίας λοιπόν της γεωτεκτονικής τους θέσης αποτελούν νησιά με πλούσια γεωλογία και μεγάλη σεισμική δραστηριότητα στα οποία συναντάται μια παραστατικότατη απεικόνιση της δυναμικής των γήινων διεργασιών μέσω των πολυάριθμων και μεγάλης ποικιλίας γεωλογικών εμφανίσεων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την τεκτονική δραστηριότητα, τις κλιματικές συνθήκες και τις διεργασίες διάβρωσης και απόθεσης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δεκάδων υπόγειων και επιφανειακών καρστικών γεωμορφών όπως, σπήλαια, δολίνες, καταβόθρες, βάραθρα, μορφές επιφανειακής διάβρωσης και άλλα.

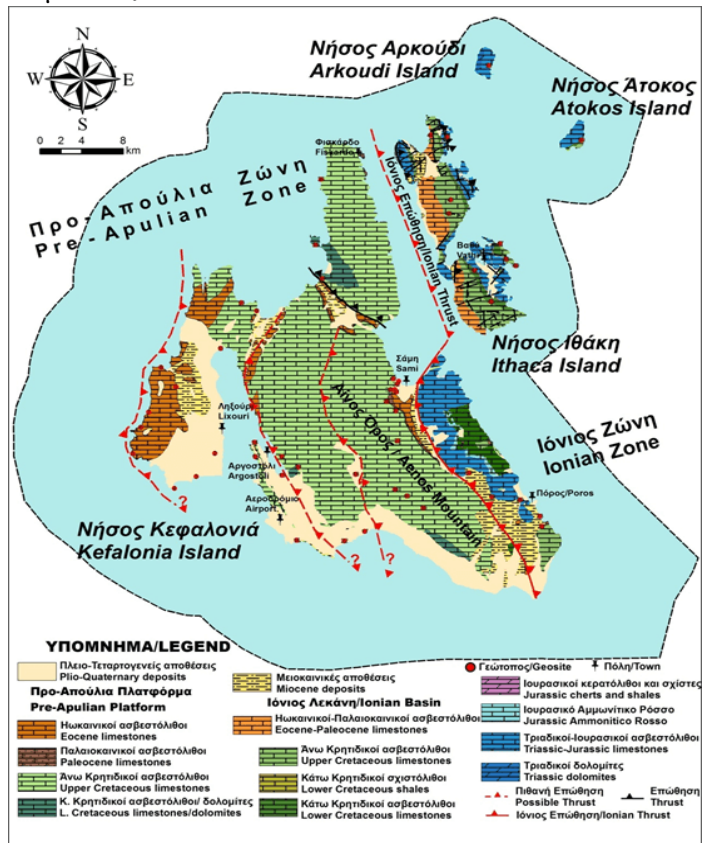
Σχηματίζουν δηλαδή ένα πλούσιο καρστικό σύστημα, με το μεγαλύτερο να λαμβάνει χώρα στην περιοχή της Σάμης, από όπου θα μελετηθεί το λιμνοσπήλαιο της Μελισάνης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ύπαρξη του καρστικού δικτύου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, προκαλώντας παγκόσμιο αξιόθεατο λόγω του πλούσιου σταλακτικού και σταλαγματικού συστήματος και της εκτάσεώς τους. Η ιδιαιτερότητα αυτή οφείλεται στην καταβύθιση λόγω του έντονου τεκτονισμού αλλά και στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας της τήξης των τελευταίων παγετώνων με αποτέλεσμα να πλημμυρίσουν πολλά από τα σπήλαια της Κεφαλληνίας.



ΣΧΗΜΑ 1.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΕΠΙΤΑΝΗΣΩΝ (GOOGLE EARTH)

1.1.1 Γεωτεκτονικές ζώνες Κεφαλληνίας

Στη γεωλογική δομή της Κεφαλονιάς εντοπίζονται δύο διαφορετικές γεωτεκτονικές ζώνες (αλπικοί σχηματισμοί) των Εξωτερικών Ελληνίδων (ΣΧΗΜΑ 1.2), με γενική διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, η Προαπούλια ή ζώνη Παξών στα δυτικά η οποία είναι σχετικά αυτόχθονη και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του νησιού (483.4 km²) και η Ιόνια ζώνη η οποία εμφανίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού σε μικρότερη έκταση (68.72 km²), επωθούμενη πάνω στην προηγούμενη. Το μέτωπο της επώθησης με γενική διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, περνά από το ΒΔ άκρο της Ιθάκης και το ΝΑ τμήμα της Κεφαλονιάς.

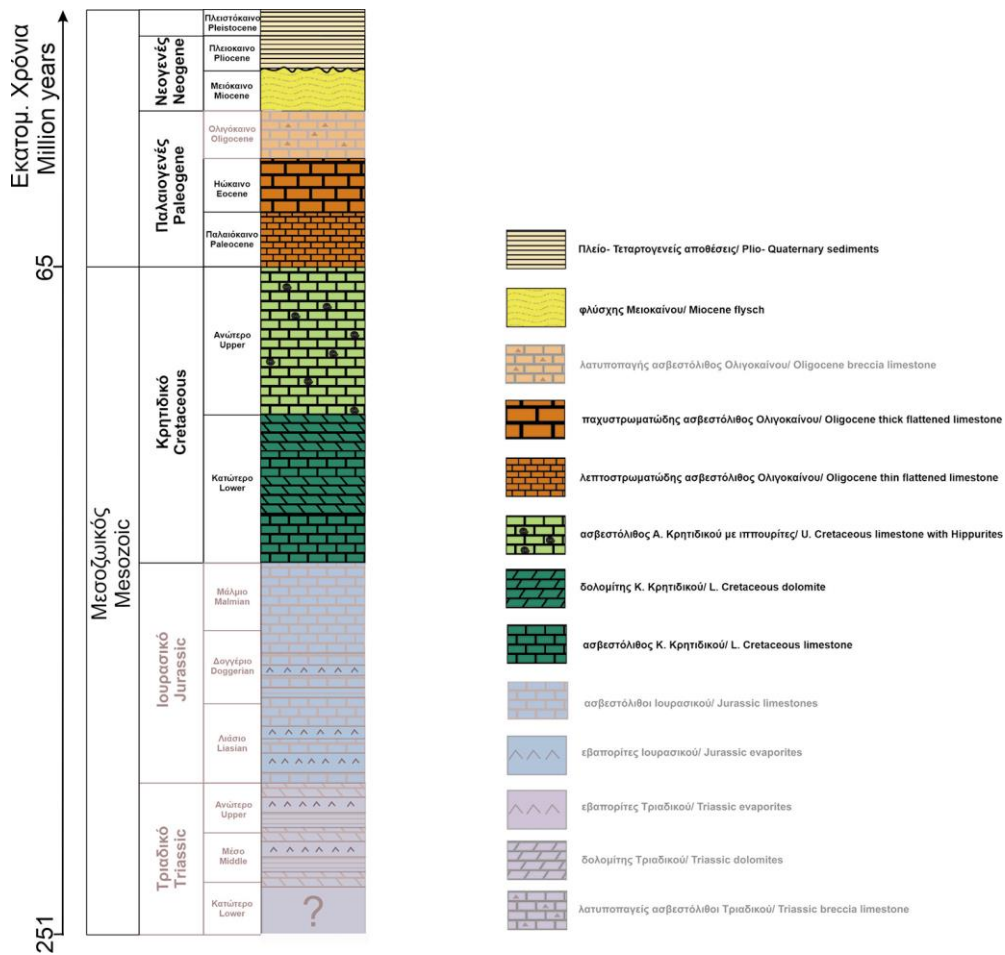


ΣΧΗΜΑ 1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ
([HTTPS://KEFALONIAGEOPARK.GR/GEOLOGIA/](https://kefaloniageopark.gr/geologia/))

Η Προαπούλια ή ζώνη Παξών (ΣΧΗΜΑ 1.3) είναι η πιο εξωτερική ζώνη των Ελληνίδων και θεωρείται ότι κατέχει τα ανατολικότερα τμήματα της Απουλίας πλάκας η οποία εκτείνεται έως το νοτιοανατολικό άκρο της χερσονήσου της Ιταλίας. Η Προαπούλια ζώνη στο νησί της Κεφαλονιάς χαρακτηρίζεται από μια συνεχή σειρά νηριτικών ανθρακικών πετρωμάτων (δολομίτες, ασβεστόλιθοι, μαργαίτικοι ασβεστόλιθοι), που αρχίζει από το Κατώτερο Κρητιδικό (145-100 Ma) φτάνοντας μέχρι και το Ανώτερο Μειόκαινο (12-5.332 Ma), με χαρακτηριστική την έλλειψη της κλαστικής ακολουθίας του φλύσχη που είναι ορατός στις υπόλοιπες εξωτερικές Ελληνίδες.

Πιο αναλυτικά οι λιθολογικοί σχηματισμοί από τους οποίους αποτελείται η Προαπούλια ζώνη ξεκινώντας από τους αρχαιότερους, είναι ο σχηματισμός του Κατώτερου Κρητιδικού (145-100.5 Ma) ο οποίος κατέχει μικρή έκταση, αλλά σημαντική καθώς εμφανίζεται μόνο στο νησί της Κεφαλονιάς. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα πετρώματα αυτά είναι τα αρχαιότερα πετρώματα που συναντώνται στην επιφάνεια του νησιού και αποτελούνται από δολομίτες και ασβεστόλιθους. Ακολουθεί ο σχηματισμός του Ανώτερου Κρητιδικού (100.5-66 Ma) από έντονα διαρρηγμένους και καρστικοποιημένους

λευκούς ασβεστόλιθους, πλούσιους σε απολιθώματα θαλάσσιων οργανισμών όπως Ιππουρίτες, οι οποίοι και παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη εξάπλωση στο νησί. Στη συνέχεια εντοπίζεται ο σχηματισμός του Παλαιοκαίνου (66.5-56 Ma) από λεπτοστρωματώδεις πελαγικούς ασβεστόλιθους, και ακολουθεί ο σχηματισμός του Ηωκαίνου (56-33.9 Ma) από νηριτικούς ασβεστόλιθους άστρωτους ή παχυστρωματώδεις (οι οποίοι περιέχουν μεγάλα Τρηματοφόρα) και στην Κεφαλονιά βρίσκεται στρωματογραφικά σε συμφωνία πάνω στους σχηματισμούς του Κρητιδικού (145-66 Ma). Τέλος ολοκληρώνεται η Προαπούλια ζώνη με το σχηματισμό του Μειοκαίνου (23.03-5.332 Ma) όπου εμφανίζονται μαργαίτικοι σχηματισμοί, πολλές φορές φαμμιούχοι, εναλλασσόμενοι με λατυποπαγείς ασβεστόλιθους, που υποκαθιστούν την τυπική κλαστική φλυσική ιζηματογένεση των άλλων γεωτεκτονικών ζωνών.

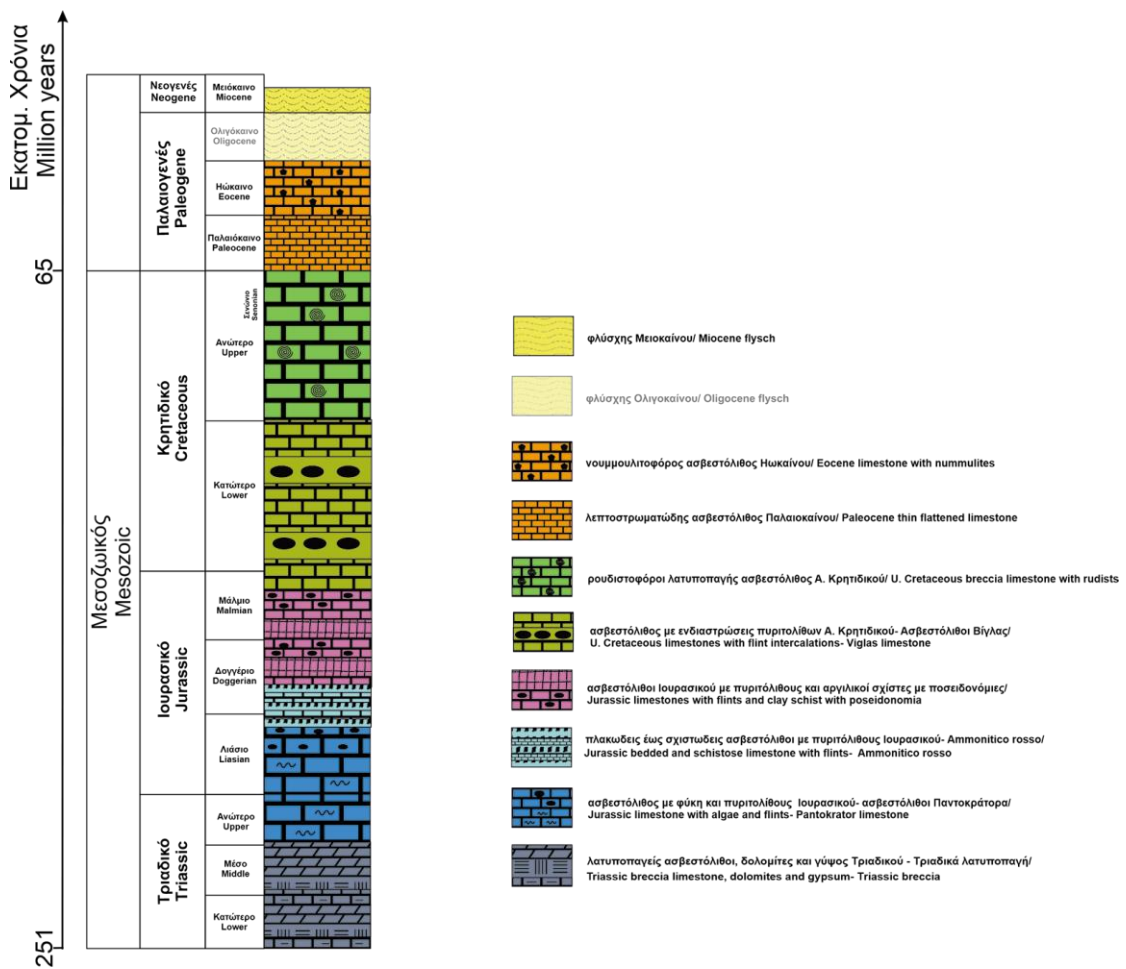


ΣΧΗΜΑ 1.3 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΞΩΝ Ή ΠΡΟΑΠΟΥΛΙΑΣ
<https://kefaloniageopark.gr/geologia>

Η Ιόνια ζώνη (ΣΧΗΜΑ 1.4) στο νησί της Κεφαλονιάς απαντάται σε πολύ μικρότερη έκταση. Συγκεκριμένα στην Κεφαλονιά εμφανίζεται μόνο στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού και βρίσκεται επωθημένη, όπως έχει προαναφερθεί, στην ζώνη Παξών. Από το σύνολο των λιθολογικών σχηματισμών της Ιόνιας ζώνης στη δομή των δύο νησιών συμμετέχουν κυρίως ασβεστόλιθοι από το

Ιουρασικό (201.3-145 Ma) έως το Ηώκαινο (56-33.9 Ma) καθώς και εβαποριτες Τριαδικής ηλικίας (251.2-201.3 Ma).

Συγκεκριμένα οι παλαιότεροι σχηματισμοί της ζώνης της Ιονίου είναι Τριαδικά «λατυποπαγή», που αποτελούνται από ένα μίγμα λατυποπαγών ασβεστόλιθων, δολομιτών και γύψου. Πάνω από αυτούς αναπτύσσεται μια ανθρακική ακολουθία, ηλικίας Ανώτερου Τριαδικού (230-201 Ma) – Μέσου Λιασίου (190-183 Ma), που περιλαμβάνει συμπαγείς ανοιχτόχρωμους παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους με απολιθώματα φυκών, και ασβεστόλιθους με πυριτόλιθους στην κορυφή, αντίστοιχους των νηριτικών «Ασβεστόλιθων Παντοκράτορα». Οι σχηματισμοί της βαθμίδας αυτής καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με τους υπόλοιπους σχηματισμούς της Ιόνιας ζώνης. Ακολουθούν οι σχηματισμοί Ammonitico rosso ηλικίας Ανώτερου Λιασίου - Κατώτερου Δογγέριου (περίπου 183-170 Ma). Πρόκειται για εναλλασσόμενα στρώματα πλακωδών έως σχιστωδών ασβεστόλιθων με πυριτόλιθους, χρώματος κόκκινου καθώς και κόκκινων αργιλικών σχιστολιθών που περιέχουν Αμμωνίτες Τοαρσίου (183-174 Ma).



ΣΧΗΜΑ 1.4 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΙΟΝΙΟΥ ΕΝΟΤΗΤΑΣ (HTTPS://KEFALONIAGEOPARK.GR/GEOLOGIA)

Στη συνέχεια απαντώνται ασβεστόλιθοι με πυριτόλιθους και αργιλική σχίστες με ποσειδώνιες ηλικίας Μέσου Δογγέριου – Μαλμίου (174-145 Ma). Οι σχηματισμοί του Ιουρασικού - Κατώτερου Κρητιδικού (201.3-100.5 Ma) αντιπροσωπεύονται από στρωματοποιημένους πελαγικούς ασβεστόλιθους της Βιγλας, που εναλλάσσονται με στρώματα πυριτολιθών. Το Ανώτερο Κρητιδικό (100.5-66 Ma) αντίστοιχα εκπροσωπείται από συμπαγείς ρουδιστοφόρους λατυποπαγείς ασβεστόλιθους. Συνεχίζει ο σχηματισμός του Παλαιοκαινού (66.5-56 Ma) που αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και ακολουθεί το Ηώκαινο (56-33.9 Ma) το οποίο

αντιπροσωπεύεται από άστρωτους νουμουλιτοφόρους κλαστικούς ασβεστόλιθους. Τέλος ολοκληρώνεται η ζώνη της Ιονίου με το φλύσχη ηλιτιάς Ολιγοκαίνου - Μέσου Μειοκαίνου (33.9-13.82 Ma).

Η γεωλογική δομή της Κεφαλονιάς ολοκληρώνεται με τις Μεταλλικές αποθέσεις οι οποίες αποτελούνται από μάργες Πλειοκαινικής ηλικίας (5.333- 2.58 Ma), καθώς και Τεταρτογενή (2.588 Ma έως σήμερα) θαλάσσια ιζήματα και χερσαίους σχηματισμούς.

(<https://kefaloniageopark.gr/geologia>)

1.2 Τεκτονική Κεφαλληνίας

Η δομή της νήσου είναι αποτέλεσμα της επίδρασης μιας σειράς διαδοχικών τεκτονικών παραμορφωτικών επεισοδίων, κυρίως συμπιεστικού χαρακτήρα, τα οποία όμως έχουν διακοπεί από περιόδους αποσυμπίεσης των πετρωμάτων και επίδρασης της βαρύτητας, φαινόμενα που αντιστοιχούν σε ένα καθεστώς εφελκυσμού. Οι κύριες τεκτονικές μορφές που δημιουργήθηκαν κατά τη φάση της αλπικής παραμόρφωσης της νήσου, συνδέονται γενετικά με την τοποθέτηση του καλύμματος της Ιονίας ενότητας πάνω στην ενότητα Παξών κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο και είναι:

- i. ανάστροφα ρήγματα με διεύθυνση είτε ΒΔ-ΝΑ, είτε ΝΔ-ΒΑ και ανοικτές πτυχές με άξονες που παρουσιάζουν ίδιο προσανατολισμό μέσα στην ενότητα Παξών, τα οποία θεωρούνται παλαιότερες συνιζηματογενείς τεκτονικές δομές που κατά την περίοδο της ιζηματογένεσης καθόριζαν τις διάφορες παλαιογεωγραφικές περιοχές της Προαπούλιας πλατφόρμας. Σε ορισμένα από αυτά τα ρήγματα (ρήγμα Αγίας Ευφημίας ΝΔ του όρους Καλό, ρήγμα Αίνου) παρατηρείται και μια οριζόντια συνιστώσα κίνησης εκτός από την αμιγώς επιπλευτική,
- ii. επιπτεύσεις, αντίλινα εφίπλευσης και αντίλινα δίδυμα εφίπλευσης με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και
- iii. ρήγματα βαρύτητας με διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ μέσα στην Ιόνια ενότητα.

Αξονικά επίπεδα πτυχών και επιπτεύσεις είναι παράλληλα με την κύρια τεκτονική επιφάνεια επώθησης της Ιονίας ενότητας πάνω στην ενότητα Παξών.

1.2.1 Νεοτεκτονική δομή της νήσου

Στις προηγούμενες τεκτονικές μορφές του Κατώτερου Πλειοκαίνου προστίθενται στη συνέχεια οι νεότερες μορφές (δομές) που συνδέονται με τα παραμορφωτικά επεισόδια του Πλειοκαίνου - Πλειστοκαίνου (νεοτεκτονικές μορφές) και δίνεται μεγάλη σημασία σε αυτές καθώς αποτελούν την σύγχρονη κινηματική της περιοχής μελέτης. Οι νεοτεκτονικές μορφές αντιπροσωπεύονται κυρίως από τα ρήγματα (ΣΧΗΜΑ 1.5), τα οποία σύμφωνα με τον Underhill (1989) τέμνουν ή οριοθετούν όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τα ρηξιτεμάχη της νήσου. Πρόκειται για μια μεγάλη ποικιλία ρηγμάτων με άλλα από μερικά μέτρα έως μερικές δεκάδες μέτρα και με ολίσθηση τόσο με κατακόρυφη συνιστώσα όσο και με οριζόντια.

Τα ρήγματα που αναγνωρίστηκαν και τα οποία αποδεικνύεται πως έχουν επαναδραστηριοποιηθεί ή δημιουργηθεί κατά την Πλειοκαινική - Τεταρτογενή περίοδο κατατάσσονται κατά σειρά

- Επαναδραστηριοποιήσεις και ανορθώσεις παλαιότερων κατωπλειοκαινικών πτυχώσεων (αντίλινο Αίνου, Αργοστολίου - Μηνίων, Μεγάλης Ράχης, Κοντογουράτων, Καλού, χερσονήσου Παληκής), αλλά και δημιουργία νεότερων με κάποια απόκλιση από τις παλαιότερες διευθύνσεις (σύγκλινο κόλπου Αργοστολίου, Αηλιά - Κουστουμπάρδι) (Underhill, 1989).
- Ανυψώσεις ακτογραμμών που τοπικά μπορούν να φθάνουν ως και 100 m ύψος όπως παρατηρείται για την παλαιοακτή του Κατώτερου Πλειστοκαίνου στην χερσόνησο Αργοστολίου (Μηνιές).
- Έντονη κατά βάθος διάβρωση των δομών που δημιούργησαν οι τεκτονικές παραμορφωτικές φάσεις του Κατώτερου Πλειοκαίνου και Πλειστοκαίνου. Τα φαινόμενά της εντοπίζονται κυρίως στις Δ και ΝΔ πλευρές των μορφολογικών εξάρσεων (όρος Αίνος, όρος Καλό, Χερσόνησος Παληκής) εκεί όπου διέρχονται οι σημαντικές τεκτονικές δομές και εκτελείται η μεγαλύτερη κίνηση, παραμόρφωση και κατακερματισμός των πετρωμάτων.
- Μετατοπίσεις του υδρογραφικού δικτύου, από τον Ν (περιοχή Πάστρα και Παλαιάς Σιάλας, βύθισμα Κατελείου) προς τα Α και ΒΑ (Πόρος), λόγω των σημαντικών κινήσεων που έλαβαν χώρα αυτή την περίοδο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα επίσης την πλήρη διάβρωση των πλειο-πλειστοκαινικών ιζημάτων προς τα βόρεια του νησιού έτσι ώστε να μην απαντώνται σήμερα βορειότερα του Ασπρογέρακα (ΝΑ Κεφαλλονιά).

1.2.2 Περιγραφή ρηξιγενούς ιστού

1.2.2.1 Γεωμετρικά στοιχεία ρηγμάτων (γεωμετρική ανάλυση)

Το σύνολο των ρηγμάτων της νήσου μπορούν να διακριθούν σε τρία κύρια συστήματα. Τα πρωτεύοντα συστήματα των ρηγμάτων είναι προσανατολισμένα στις διευθύνσεις ΒΔ - ΝΑ, ΒΒΑ - ΝΝΔ και ΒΒΔ - ΝΝΑ, ενώ τα δευτερεύοντα στις διευθύνσεις ΒΑ - ΝΔ και Α - Δ. Στο σύστημα διεύθυνσης ΒΔ - ΝΑ εντάσσονται τα σημαντικά ρήγματα του Αίνου και της Αγίας Ευφημίας, ενώ το σύστημα ΒΒΑ - ΝΝΔ ακολουθούν τα ρήγματα Κοντογουράτα - Αγιάνα, Παλαιόκαστρου και του περιθωρίου Ζακύνθου - Κεφαλλονιάς. Στο τρίτο σύστημα ΒΒΔ - ΝΝΑ κατατάσσεται το ρήγμα Αργοστολίου, αυτά που δημιουργήθηκαν κατά το Πλειόκαινο - Πλειστόκαινο στην ίδια περιοχή και μερικά στη χερσόνησο της Παληκής. Τα συστήματα ρηγμάτων ΒΑ - ΝΔ και Α - Δ απαντώνται, είτε στο κάλυμμα της Ιόνιας ενότητας όπου αντιπροσωπεύουν αναζωπυρώσεις παλαιότερων εφελκυστικών πλαγιοκανονικών ρηγμάτων, όπως το ρήγμα του Άτρου (περιοχή Πόρου), είτε στις περιοχές Φραγκάτων, Μηνίων και Αργινίων όπου δείχνουν μία μικρή οριζόντια ολισθήση. Τα ρήγματα των τριών πρωτεύοντων συστημάτων είναι παλαιά κανονικά ρήγματα, συνιζηματογενή, τα οποία δημιουργήθηκαν κατά το Κρητιδικό - Ηώκαινο. Κατά την ορογενετική περίοδο όμως και μετέπειτα λειτούργησαν ως ανάστροφα.

1.2.2.2 Κινηματικά στοιχεία ρηγμάτων (κινηματική ανάλυση)

Από τις παρατηρήσεις οι οποίες έγιναν σε όσα ρήγματα παρουσιάζουν σαφείς κατοπτρικές επιφάνειες και γραμμές ολισθήσης είναι δυνατό να ενταχθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ρήγματα με καθαρά ανάστροφο χαρακτήρα εμφανίζονται με αρκετά εντυπωσιακό τρόπο στην χερσόνησο του Αργοστολίου όπου παρουσιάζονται να κόβουν μέχρι και πολύ πρόσφατους σχηματισμούς (κώνους προσχώσεων Ρησίου ηλικίας Μέσου - Ανώτερου Πλειστοκαίνου).
- Ρήγματα ανάστροφα ή επιπεύσεις με γραμμές ολισθήσης που παρουσιάζουν τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφη συνιστώσα, και εντάσσονται στην κατηγορία των πλαγιοανάστροφων (ρήγματα της Κεφαλλονιάς όπως αυτό του Αίνου και της Αγίας Ευφημίας).

- Ρήγματα με οριζόντιες ή σχεδόν οριζόντιες γραμμές ολίσθησης που παρατηρούνται κυρίως στη χερσόνησο του Αργοστολίου αλλά και στη ΝΑ Κεφαλλονιά καθώς και στη χερσόνησο της Παληκής των οποίων η κίνηση είναι πάντα μικρού μεγέθους.
- Ρήγματα κανονικά με γραμμές ολίσθησης κατά κλίση σε κεκλιμένη ρηξιγενή επιφάνεια που εντάσσονται στην κατηγορία των ορθοκανονικών. Παρατηρούνται στο τεκτονικό βύθισμα Αργινίων και στο τεκτονικό κάλυμμα της Ιόνιας ενότητας.

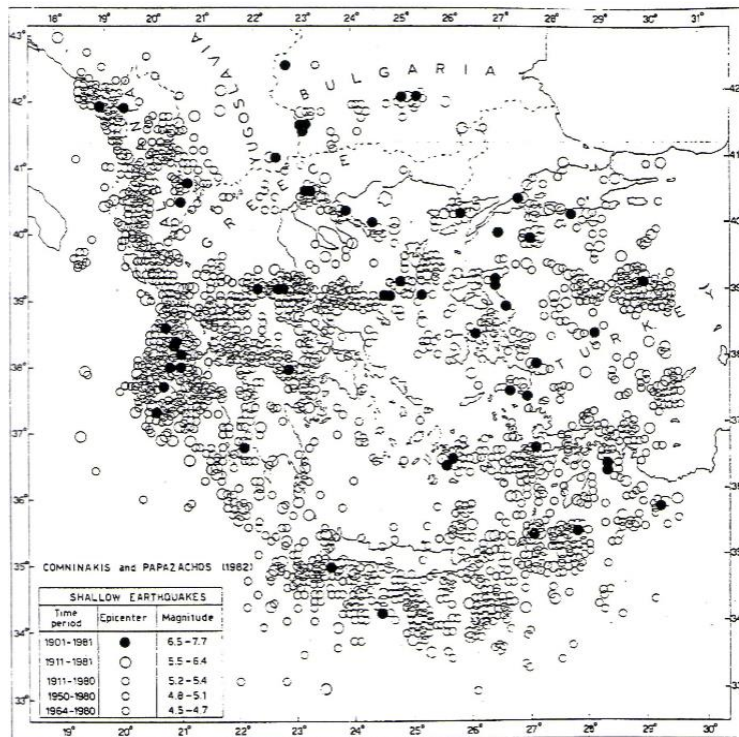
1.2.3 Τεκτονική εξέλιξη της νήσου

Με βάση λοιπόν τα γεωμετρικά και τα κινηματικά στοιχεία των τεκτονικών ασυνεχών δομών είναι δυνατόν να περιγραφούν τα κύρια στάδια της τεκτονικής εξέλιξης της νήσου, που είναι τα ακόλουθα:

- Α' Στάδιο, το οποίο αντιστοιχεί στο Κατώτερο Πλειόκαινο όπου λαμβάνει χώρα η τοποθέτηση του Ιόνιου καλύμματος πάνω στην ενότητα Παξών κάτω από ένα εντατικό καθεστώς έντονης συμπίεσης. Το καθεστώς αυτό προκαλεί την ανάδυση της νήσου με τη δημιουργία πτυχώσεων και την ενεργοποίηση παλαιότερων κύριων συνιζηματογενών τεκτονικών επιφανειών (ρηγμάτων), οι οποίες μεταβάλλουν την κίνησή τους και από δομές λόγω βαρύτητας (κανονικά) γίνονται δομές συμπίεσης, δηλαδή ανάστροφα ρήγματα. Τέτοια παλαιά ρήγματα είναι αυτά του Αίνου, του Αργοστολίου, των Κοντογουράτων - Αγώνα, της Αγίας Ευφημίας, κλπ.
- Β' Στάδιο, στο οποίο ακολουθεί μια περίοδος αποσυμπίεσης, που αντιστοιχεί στο Ανώτερο Πλειόκαινο – Κατώτερο Πλειστόκαινο. Το καθεστώς συμπίεσης επικρατεί σε βαθύτερα τμήματα του φλοιού, ενώ κοντά στην επιφάνεια η γενική ανύψωση του τόξου οδηγεί σε επίδραση της βαρύτητας, η οποία εκφράζεται μέσω της δραστηριοποίησης των μεγάλων ρηξιγενών επιφανειών ως κανονικών ρηγμάτων. Δημιουργούνται επιμέρους τεκτονικά κέρατα και βυθίσματα, όπως το κέρασ του Αίνου, της Αγίας Δυνατής και τα εκατέρωθεν ευρισκόμενα βυθίσματα.
- Γ' Στάδιο, το οποίο λαμβάνει χώρα μέσα στο Κατώτερο Πλειστόκαινο όπου παρατηρούνται εκ νέου σαφή φαινόμενα συμπίεστικής παραμόρφωσης που δημιουργούν νέες ρηξιγενείς δομές ανάστροφου χαρακτήρα κυρίως στη χερσόνησο του Αργοστολίου (Ακρωτήριο Λαρδηγός, Μηνιές, Αεροδρομίο), στη ΝΑ Κεφαλλονιά και στη χερσόνησο της Παληκής. Επίσης δημιουργείται νεότερη γενιά πτυχών και κάμψων διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ. Την ίδια περίοδο (Κατώτερο - Μέσο Πλειστόκαινο) πραγματοποιείται και η ανύψωση της θαλάσσιας αναβαθμίδας στην περιοχή Μηνίων. Η διεύθυνση της συμπίεσης έχει προσδιοριστεί ως ΔΝΔ-ΑΒΑ. (Mercier J et al, 1972; Sorel 1976; Mercier et al, 1987)
- Δ' Στάδιο, όπου από το Μέσο Πλειστόκαινο παρατηρείται εκ νέου μια φάση αποσυμπίεσης των δομών και επανόδου σε ένα καθεστώς, όπου επιδρά η βαρύτητα με δραστηριοποίηση ρηγμάτων που δείχνουν κινήσεις με κανονικό ή πλαγιοκανονικό άλμα. Σε μεγαλύτερο βάθος φαίνεται πως το καθεστώς συμπίεσης εξακολουθεί να επικρατεί, όπως δείχνουν οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών (Drakopoulos & Delibasis, 1982).

1.3 Σεισμικότητα Ιονίου

Σε γενική όψη, τα νησιά του κεντρικού Ιονίου (Κεφαλονιά, Ζάκυνθος, Ιθάκη και Λευκάδα) χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα. Πολλές φορές στο παρελθόν προκλήθηκαν σεισμοί με μεγέθη άνω του $M=7.0$, που απέβησαν καταστροφικοί. Από αυτούς τους σεισμούς, άλλοι ήταν θαλάσσιοι όπως αυτός της Ζακύνθου με $M=6.6$ (1998) προκαλώντας μικρές βλάβες, ενώ άλλοι είχαν επίκεντρο κοντά ή εντός ξηράς έχοντας πολύ πιο καταστροφικές συνέπειες, όπως οι σεισμοί του 1953 που πραγματικά ισοπέδωσαν το Αργοστόλι, αλλά και ολόκληρη σχεδόν την Κεφαλονιά και τη Ζάκυνθο.

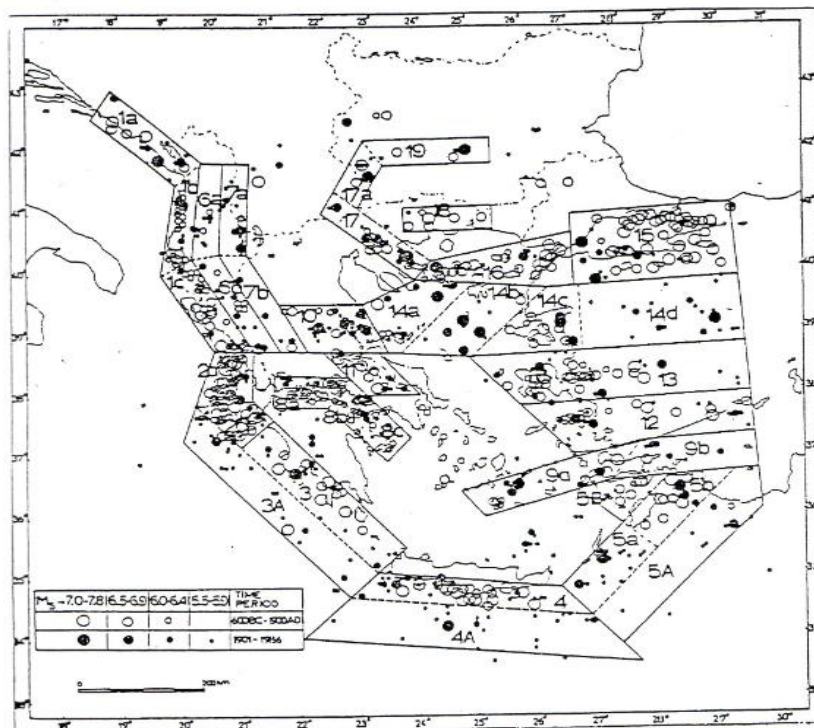


ΣΧΗΜΑ 1.6 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΠΙΚΕΝΤΡΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΓΥΡΩ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΝ 20^ο ΑΙΩΝΑ (Παπαζάχος & Κομνηνάκης, 1986).

Στο ΣΧΗΜΑ 1.6 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των επιπέδων των επιφανειακών σεισμών που έγιναν στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο κατά τον 20^ο αιώνα (Παπαζάχος & Κομνηνάκης, 1986). Ο πίνακας αυτός καλύπτει την περίοδο μέχρι το 1981. Με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι σεισμοί μεγέθους 6.5 έως και 7.7 ενώ οι υπόλοιποι κύκλοι δηλώνουν μικρότερο μέγεθος, ανάλογα με τη διάμετρό τους. Είναι ιδιαίτερα εμφανής η πύκνωση των μαύρων κύκλων πάνω από την Κεφαλονιά και τη Ζάκυνθο, ενώ στα δεδομένα του χάρτη θα πρέπει να προστεθούν τα μεγέθη 7.0 της Κεφαλονιάς το 1983, 6.6 της Ζακύνθου το 1998, αλλά και 6.4 της Λευκάδας το 2015. Άλλοι σημαντικοί σεισμοί που δεν περιέχονται στο χάρτη αναφέρονται λεπτομερέστερα στην ανασκόπηση των σεισμικών γεγονότων που ακολουθεί παρακάτω.

Στο ΣΧΗΜΑ 1.7 (Parazachos, 1989) περιλαμβάνονται στοιχεία μεγαλύτερης χρονικής περιόδου. Από το 550 π.Χ. έως το 1986 δίδονται τα επίκεντρα επιφανειακών σεισμών μεγέθους $M > 6.0$. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη πως οι γεωγραφικές συντεταγμένες των επιπέδων κατά την ιστορική περίοδο περιέχουν αρκετά σφάλματα. Με βάση το ΣΧΗΜΑ 1.7 άρχισε η ομαδοποίηση περιοχών με κοινά στοιχεία σεισμικότητας σε ζώνες. Εδώ παρατηρείται ιδιαίτερη πύκνωση πάνω από τα τρία νησιά,

ενώ αναφέρονται ως μέγιστα μεγεθών τιμές μεγαλύτερες του $M=7.2$ που έδωσε το 1953 το ρήγμα της Κεφαλονιάς.



ΣΧΗΜΑ 1.7 ΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΓΥΡΩ ΠΕΡΙΟΧΕΣ (Papazachos, 1989)

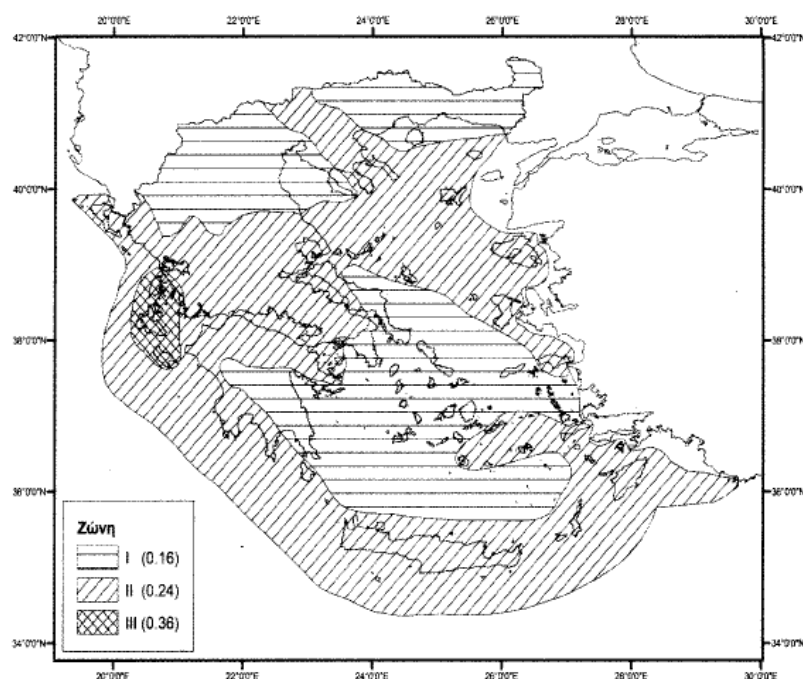
1.4 Εθνικός Αντισεισμικός Κανονισμός

Ο κύριος στόχος του ΕΑΚ είναι η μελέτη και κατασκευή κτιρίων ικανών να αντέξουν σε σεισμικές δονήσεις ορισμένης ισχύος με σκοπό την προστασία της ανθρώπινης ζωής, την αποφυγή και τον περιορισμό των οικονομικών απωλειών καθώς επίσης και την διασφάλιση της λειτουργικότητας των κτιρίων. Παρά τα παραπάνω θα πρέπει να γίνει αντιληπτό, ακόμα και αν εφαρμοστούν κατά γράμμα οι κανόνες του ΕΑΚ πως η πιθανότητα μη επίτευξης του στόχου στην περίπτωση σεισμού, δεν μπορεί να αποκλεισθεί. Αυτό θα συμβεί διότι οι συνθήκες δόνησης ενός σεισμού δεν θα είναι οι αναμενόμενες. Ο Εθνικός Αντισεισμικός Κανονισμός περιέχει υποχρεωτικές διατάξεις που καθορίζουν τις ελάχιστες σεισμικές δράσεις σχεδιασμού και τους αντίστοιχους συνδυασμούς δράσεων, μεθόδους υπολογισμού της έντασης και της παραμόρφωσης των κατασκευών και γενικότερα διατάξεις των φορέων και των υλικών. Ισχύει παράλληλα για όλα τα δομήματα με συγκεκριμένο υλικό (σκυρόδεμα, χάλυβας, ξύλο, τοιχοποιία κτλ.) και δεν επιτρέπει τροποποιήσεις φερόντων ή μη φερόντων στοιχείων καθώς και αλλαγή χρήσης χωρίς προηγούμενη μελέτη των συνεπειών.

1.4.1 Σεισμικές ζώνες της Ελλάδας

Η πιο κρίσιμη παράμετρος για την μελέτη και την θωράκιση των κτιρίων είναι η εδαφική επιτάχυνση. Για την εφαρμογή του κανονισμού η χώρα μας υποδιαιρείται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (I, II και III) τα όρια των οποίων απεικονίζονται στο ΣΧΗΜΑ 1.8.

Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί μία τιμή μέγιστης αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης A που εκτιμάται σύμφωνα με τα σεισμολογικά δεδομένα ότι έχει πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 έτη (άρα περίοδο επανάληψης 475 έτη). Επίσης, οι εδαφικές συνθήκες έχουν χαρακτηριστεί ως «βράχος» (bedrock). Ο Ευρωκώδικας 8 κάνει αποδεκτό τον παρακάτω σεισμικό χάρτη αφού αναθέτει στις εθνικές αρχές το διαχωρισμό των εθνικών περιφερειών σε σεισμικές ζώνες, που θα εξαρτώνται από την τοπική επικινδυνότητα. Συμβατικά η επικινδυνότητα θεωρείται σταθερή στα πλαίσια κάθε ζώνης. Η σχετική επιτάχυνση εδάφους A , a_{gR} για μια χώρα ή τα τμήματα αυτής, μπορεί να εξαχθεί από χάρτες ζωνών που βρίσκονται στα αντίστοιχα σχετικά παραρτήματα. Η σχετική επιτάχυνση του εδάφους που επιλέγεται από τις διεθνείς αρχές για κάθε σεισμική ζώνη, ανταποκρίνεται σε μια σχετική περίοδο επαναφοράς T_{NCR} της σεισμικής δράσης για την διασφάλιση της απαίτησης για μη κατάρρευση.



ΣΧΗΜΑ 1.8 ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ 2003 (Ο.Α.Σ.Π. 2003)

Με βάση την πιθανότητα υπέρβασης μιας μέγιστης αναμενόμενης παραμέτρου επικινδυνότητας για μια συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης σχεδιάζονται και κατασκευάζονται πλέον οι σύγχρονες κατασκευές. Από το 1959 που δημιουργήθηκε ο πρώτος αντισεισμικός κανονισμός, με βάση εγκυκλίους που εφαρμόστηκαν στις νέες κατασκευές Κεφαλονιάς και Ζακύνθου μετά το 1953 και με τις βελτιώσεις και αναθεωρήσεις των επομένων χρόνων μέχρι σήμερα, στόχος είναι ο περιορισμός των καταρρεύσεων και καταστροφών. Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί, έχοντας υπόψη τους όλα τα παραπάνω κατατάσσουν και τα τρία νησιά, Κεφαλονιά, Ζάκυνθο και Λευιάδα στην υψηλότερη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας. Αυτή είναι η ζώνη III η οποία θεωρεί ότι οι κατασκευές που γίνονται πρέπει να μελετώνται και να αντέχουν σε οριζόντια δύναμη στο διάστημα 0.24g ($\approx 240 \text{ cm/sec}^2$) έως 0.36g ($\approx 360 \text{ cm/sec}^2$). Σε κάθε περίπτωση περιλαμβάνονται συνθήκες μη κατάρρευσης, ενώ οι βλάβες πάνω από το μέγεθος σχεδιασμού πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε να απορροφάται ενέργεια κατά το σπάσιμο δοκών και όχι υποστυλωμάτων.

Η περιοχή μελέτης κατατάσσεται σε έδαφος κατηγορίας A, όπου η βασική σεισμική δράση υπολογισμού a_{gR} καθορίζεται κατά τον Ευρωκώδικα του 2008 (EC-8), για συντελεστή σπουδαιότητας

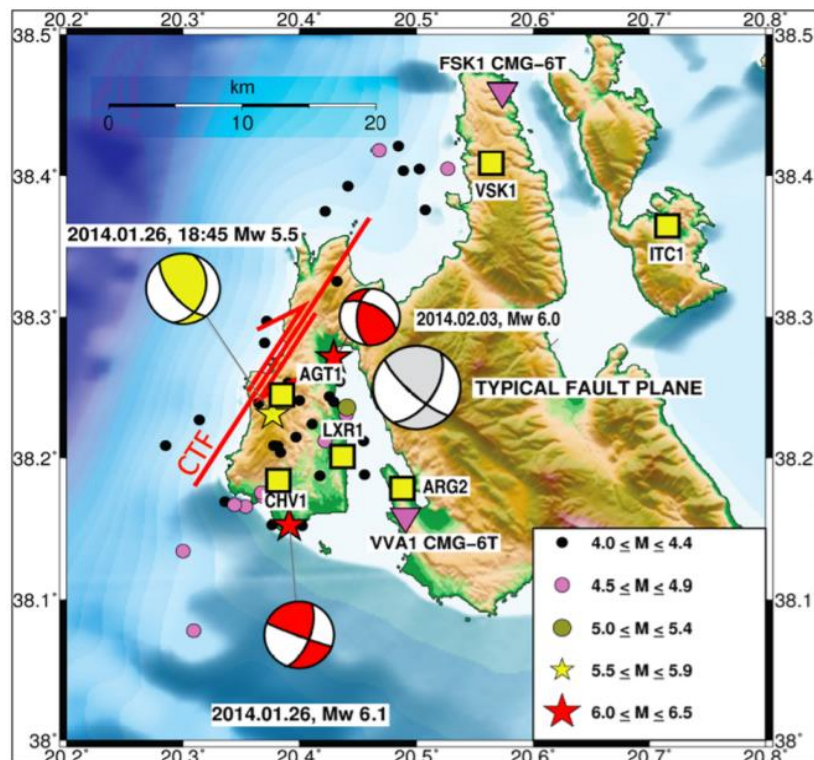
$\gamma I = 1.40$ (περίοδος επαναφοράς 1,300 έτη). Συνεπώς για τον έλεγχο των παρειών του σπηλαίου ελήφθη $a_h = 0.504$ και $a_v = \pm 0.252$ μέσω επίλυσης του παρακάτω τύπου (1):

$$agR = ag * \gamma I = 0.36 * 1.40 = 0.504 \quad (1)$$

1.4.2 Σεισμικές δονήσεις Κεφαλληνίας, 2014

Για την μελέτη της ευστάθειας του σπηλαίου Μελισάνης στην περιοχή της Σάμης χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές δύο εκ των σημαντικότερων σεισμών ενόργανης περιόδου της νήσου με σκοπό την παρατήρηση της παραμόρφωσής του. Ο λόγος γίνεται για τους σεισμούς του 2014, που έπληξαν την ευρύτερη περιοχή της Παληκής με μεγέθη $M_w=6.1$ στις 26 Ιανουαρίου και $M_w=6.0$ στις 3 Φεβρουαρίου.

Ο σεισμός της 26ης Ιανουαρίου είχε επίκεντρο $\varphi=38.154^\circ B$, $\lambda=20.287^\circ A$ όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 1.9 (Sokos et al., 2015) και εστιακό βάθος 14 km, που τον κατατάσσει σε επιφανειακή δόνηση. Τον εν λόγω σεισμό ακολούθησε μετασεισμός 5 ώρες αργότερα με μέγεθος $M_w=5.4$ ο οποίος επίσης προκάλεσε μεγάλες υλικές βλάβες στα ήδη καταπονημένα κτίρια. Με διάστημα 8 ημερών από τον πρώτο σεισμό πραγματοποιήθηκε δεύτερος δυνατός σεισμός την 3η Φεβρουαρίου μεγέθους $M_w=6.0$ με επίκεντρο $\varphi=38.267^\circ B$, $\lambda=20.323^\circ A$ και εστιακό βάθος 9 km, δίνοντας ακόμη ένα επιφανειακό σεισμικό γεγονός στην ενόργανη σεισμικότητα της νήσου.



ΣΧΗΜΑ 1.9 ΕΠΙΚΕΝΤΡΑ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ (6.1, 26/01 – 6.0, 3/02) ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΑΣΤΕΡΙ (Sokos et al. 2015).

Οι μαζρές κωνίδες αντιπροσωπεύουν τα επίκεντρα των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας στην Κεφαλλονιά 1 μηνά μετά το πρώτο συμβάν (πηγή HUSN). Επιπλέον, απεικονίζονται οι μηχανισμοί γένεσης των ισχυρότερων γεγονότων σε αντίστοιχο χρώμα με τα επίκεντρα και ο αναμενόμενος μηχανισμός γένεσης του δεξιόστροφου ρήγματος μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς (CTF) (grey beachball). Τα κίτρινα τετράγωνα και ροζ ανεστραμμένα τρίγωνα σηματοδοτούν την γεωγραφική κατανομή του δικτύου επιταχυνσιογράφων και σεισμογράφων αντίστοιχα.

Η γεωγραφική κατανομή των ισχυρών γεγονότων και των μηχανισμών γένεσης δείχνει ότι η ακολουθία στη δυτική ακτή της Κεφαλονιάς σχετίζεται με το ρήγμα μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς (CTF) (το οποίο είναι δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης). Στο ΣΧΗΜΑ 1.9, τα επίκεντρα των σεισμών συνοδεύονται από τους μηχανισμούς γένεσης για τους οποίους τα στοιχεία είναι γνωστά και παρουσιάζονται στον **Πίνακας 1**:

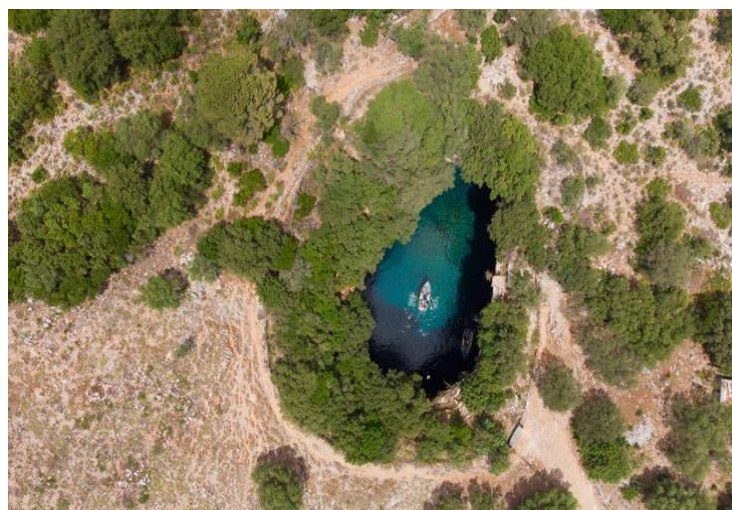
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΓΕΝΕΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ 3 ΔΙΑΔΟΧΙΚΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ 2014

M_w	Αζιμούθιο (°)	Κλίση (°)	Γωνία ολίσθησης (°)
6.1	19	76	176
5.4	11	47	120
6.0	12	57	157

Για λόγους σύγκρισης, δίνεται και ο αναμενόμενος μηχανισμός γένεσης στην περιοχή που προτάθηκε από Papazachos και Papazachou (2003) με γκρι χρώμα (grey beachball) (ΣΧΗΜΑ 1.9). Λόγω του μεγέθους σεισμικής ροπής ($M_w=6.1-6.0$), αυτά τα γεγονότα ήταν έντονα αισθητά στο νησί της Κεφαλονιάς, καθώς και στα νησιά Ιθάκη, Λευκάδα, Ζάκυνθο αλλά και σε περιοχές της δυτικής Ελλάδας και της Πελοποννήσου.

2 ΛΙΜΝΟΣΠΗΛΑΙΟ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ

Ένα από τα σημαντικότερα σπήλαια της Κεφαλληνίας που ξεχωρίζει, είναι το σπήλαιο της Μελισάνης, το οποίο αποτελεί σπάνιο γεωμορφολογικό φαινόμενο από το 1963, όπου ανακαλύφθηκε από Αυστριακούς δύτες. Λόγω της μοναδικότητάς του, που οφείλεται στα ιδιαίτερα χρώματα και τα σταλακτινά συστήματα που το διακοσμούν, κεντρίζει το ενδιαφέρον κάθε επισκέπτη τόσο διεθνώς όσο



ΣΧΗΜΑ 2.1 ΛΙΜΝΟΣΠΗΛΑΙΟ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ ΑΠΟ DRONE
([HTTPS://WWW.DISCOVERGREECE.COM/EL/EXPERIENCES/BOATING-KEFALONIAS-MELISSANI-CAVE](https://www.discovergreece.com/el/experiences/boat-ing-kefalonias-melissani-cave))

και παγκοσμίως. Βρισκόμενο στον οικισμό Καραβόμυλο σε απόσταση 2 km ΒΔ της Σάμης, ανακαλύφθηκε μετά από πτώση ενός τμήματος της οροφής αυτού από μετασεισμό που ακολούθησε του κύριου σεισμού το 1953 που συνέβη στο νησί, γεγονός που έδωσε την κύρια φυσική κατακόρυφη είσοδο του σπηλαιού (ΣΧΗΜΑ 2.1), οι διαστάσεις της οποίας είναι 40 x 50 m. Βέβαια επειδή η πρόσβαση των επισκεπτών θα ήταν αδύνατη από την

κατακόρυφη αυτή είσοδο, δημιουργήθηκε διάνοιξη σήραγγας για την εύκολη πρόσβαση των επισκεπτών στο εσωτερικό αυτού.

2.1 Καρστικές γεωμορφές & σπηλαιολογία

Τα σπήλαια είναι υπόγεια έγκοιλα μεγάλων διαστάσεων που συναντώνται σε ανθρακικά πετρώματα τα οποία επικοινωνούν επιφανειακά με μικρά στόμια και είναι προσιτά στην προσπέλαση του ανθρώπου. Σχηματίζονται στο εσωτερικό της ασβεστολιθικής μάζας, εξαιτίας της καρστικής διάβρωσης που διαλυτοποιεί το CaCO_3 και το απομακρύνει με τη ροή του υπόγειου νερού. Όμως το νερό που εισέρχεται στην ανθρακική μάζα από τις διακλάσεις και τις ανοικτές διαρρήξεις της, πολύ γρήγορα καθίσταται κορεσμένο σε ανθρακικό ασβέστιο με αποτέλεσμα να μην μπορεί να διαλύσει παραπάνω ποσότητα αυτού. Για να δημιουργήσει αυτά τα κορεσμένα νερά ένα σπήλαιο στο βάθος της μάζας του πετρώματος, θα πρέπει να μετατραπούν σε ακόρεστα στο συγκεκριμένο σημείο και να διαλυτοποιήσουν τμήμα αυτής. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν δύο κορεσμένα διαλύματα συναντηθούν μέσω των διακλάσεων και σχηματίσουν ένα νέο διάλυμα το οποίο θα παραμείνει για μικρό διάστημα ακόρεστο. Το ακόρεστο διάλυμα λοιπόν, θα διαλύσει τμήμα του πετρώματος και θα το απομακρύνει σχηματίζοντας στο σημείο εκείνο ένα υπόγειο έγκοιλο.

Συνήθως μέσα στα σπήλαια σχηματίζονται χαρακτηριστικοί σχηματισμοί από την απόθεση του CaCO_3 . Οι πιο σπουδαίοι είναι οι σταλακτίτες και οι σταλαγμίτες. Η σύστασή τους αποτελείται από ασβεστίτη ή αραγωνίτη. Οι σταλακτίτες κρέμονται από την οροφή του σπηλαίου ενώ οι σταλαγμίτες ανυψώνονται από το δάπεδο. Το σπήλαιο της Μελισάνης όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 2.2 χαρακτηρίζεται από έντονη παρουσία σταλακτιτών καθώς λόγω της ύπαρξης νερού στη βάση του δεν έχουν δημιουργηθεί σταλαγμίτες. Ο σχηματισμός τους οφείλεται στο υπέρκορο νερό που φτάνει από τις διακλάσεις στο χώρο του σπηλαίου και το οποίο σε κατάλληλες συνθήκες αποθέτει το ανθρακικό ασβέστιο δημιουργώντας τους ασβεστιτικούς αυτούς σχηματισμούς. Τα σχήματα που παίρνουν οι σταλακτίτες ποικίλλουν και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Το σχήμα της οπής από την οποία το νερό εισέρχεται στο έγκοιλο, η ταχύτητα της ροής του νερού, η θερμοκρασία και η περιεκτικότητα του αέρα σε CO_2 είναι μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόθεση ανθρακικού ασβεστίου. Η παρουσία οξειδίων του σιδήρου κυρίως δίνει το χαρακτηριστικό κόκκινο ή υποκίτρινο χρώμα στις αποθέσεις του CaCO_3 (Gilli, 2015).



ΣΧΗΜΑ 2.2 ΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΤΑΛΑΚΤΙΤΩΝ ([HTTPS://WWW.EYSAILING.GR/EL/EY-ROUTES-GR/ROUTE-POINTS-GR/68-MELISSANI-CAVEGR](https://www.eysailing.gr/el/ey-routes-gr/route-points-gr/68-melissani-cavegr))

2.1.1 Γεωμορφολογία σπηλαιίου

Όσον αφορά το εσωτερικό του σπηλαιοβάραθρου αυτού, αποτελείται από μία λίμνη η οποία εντοπίζεται 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με διαστάσεις 60 x 40 m, βάθος που κυμαίνεται από 10 - 40 m και μήκος που ξεπερνά τα 100 m (≈ 160 m). Η λίμνη αυτή καλύπτει το 1/3 του εσωτερικού του σπηλαιίου καθώς το υπόλοιπο καλύπτεται από ανθρακική νησίδα της οποίας η επιφάνεια βρίσκεται σε βάθος 22 m και κατέχει μήκος 30 m, σχηματιζόμενη από πτώση τμήματος της οροφής λόγω σεισμού. Η ανακάλυψη της νησίδας, η οποία πλέον αποτελεί μία εσωτερική οροφή αλλά και φυσικό φράγμα στην κίνηση του νερού, έγινε από τον σπηλαιολόγο Πετροχείλο Ι. το 1959 (ΣΧΗΜΑ 2.3) και έπειτα ακολούθησε αρχαιολογική έρευνα από τον Μαρινάτο Σ. στο 1963, από όπου βρέθηκε πλήλιο ειδώλιο με αναπαράσταση της νύμφης Μελισσάνθης εξ' ου και η ονομασία του λιμνοσπηλαιίου. Ο υπόλοιπος θάλαμος, δηλαδή αυτός που δεν καλύπτεται από την εσωτερική οροφή της νησίδας, χαρακτηρίζεται από το κάλυμμα οροφής με ύψος 18 m και πολυάριθμα συστήματα σταλακτιτών ηλικίας 20,000 ετών με ιδιαίτερη γεωμετρία και χρωματισμούς. Η κλίση των σταλακτιτών εντός του σπηλαιίου μαρτυρά την μετακίνηση των ασβεστολιθικών τεμαχών τα οποία χωρίζονται από ένα δίκτυο εκτεταμένων ασυνεχειών που θα αναφερθεί στο «2.2.3 Γεωτεχνικοί παράμετροι ασυνεχειών».



ΣΧΗΜΑ 2.3 Η ΒΡΑΧΟΝΗΣΙΔΑ ΠΟΥ ΕΡΜΗΝΕΥΤΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΠΗΛΑΙΟΛΟΓΟ ΠΕΤΡΟΧΕΙΛΟ ΤΟ 1959.

2.1.2 Υδρογεωλογία σπηλαιίου

Ένας υγιής και συμπαγής-συνεκτικός ασβεστολιθικός όγκος αποτελεί έναν αδιαπέρατο σχηματισμό. Όμως σπάνιες είναι οι περιπτώσεις όπου ασβεστόλιθοι μετά τον σχηματισμό τους στο θαλάσσιο χώρο και την ανάδυσή τους με τις διεργασίες της ορογένεσης παραμένουν τεκτονικά ανέπαφοι. Έτσι δημιουργούνται συστήματα διακλάσεων και ανοικτών διαρρήξεων στα οποία είναι δυνατόν να κατεισδύει το επιφανειακό νερό. Τα συστήματα αυτά αποτελούν ένα δευτερογενές πορώδες στο πέτρωμα το οποίο με την δράση της καρστικής διάβρωσης διευρύνεται με αποτέλεσμα οι διακλάσεις να μετατρέπονται σε υπόγειους αγωγούς. Η κατεισδυση του επιφανειακού νερού γίνεται ταχύτατα προς το εσωτερικό των ασβεστόλιθων από τις διακλάσεις και διαμέσου των αγωγών απορρέει προς τα κατάντη φτάνοντας στον τελικό αποδέκτη, τη θάλασσα, όπου αναβλύζει με τη μορφή υποθαλάσσιων

πηγών. Μικρές είναι οι ποσότητες κατεισδύοντος νερού που απορρέουν προς τις γύρω πλαγιές με τη μορφή καρστικών πηγών.

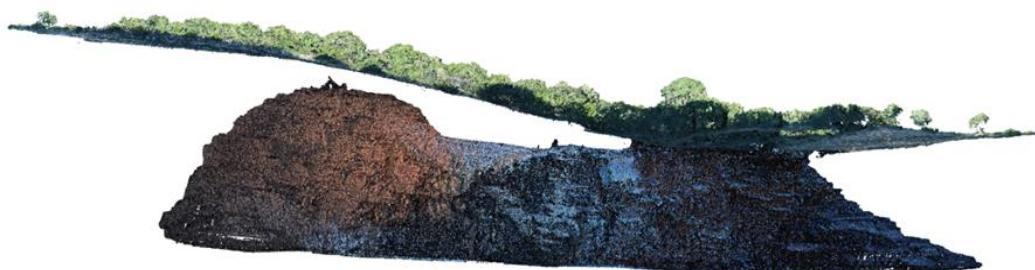
Η μεγάλη απορροφητική ικανότητα των ασβεστόλιθων έχει ως αποτέλεσμα την ισχνή ανάπτυξη των επιφανειακών υδρογραφικών δικτύων σε αυτούς. Τα υπόγεια νερά πολλές φορές διέρχονται από υπόγειες σήραγγες αρκετά μεγάλων διαστάσεων σχηματίζοντας υπόγειους ποταμούς, οι οποίοι δεν διαφέρουν σε τίποτα από τους υπέργειους. Ακολουθούν και αυτοί συγκεκριμένη πορεία εξαιτίας των διακλάσεων των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, χαρακτηριστικό παράδειγμα των οποίων αποτελεί η λίμνη Μελισάνη που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια της κατά βάθους διάβρωσης των υπόγειων αυτών ποταμών.

Γενικότερα, το λιμνοσπήλαιο Μελισάνης επικοινωνεί με το υπόγειο δίκτυο της νήσου, καθώς το θαλασσινό νερό με αφετηρία τις καταβόθρες του Αργοστολίου εισχωρεί στο έδαφος και στην υπόγεια διαδρομή του ενώνεται με όμβρια ύδατα, φτάνει στην Μελισάνη και καταλήγει στις εμβολές υδάτων της άλλης πλευράς του νησιού στον κόλπο της Σάμης, αφού προηγουμένως έχει περάσει από την λίμνη του Καραβόμυλου διοχετεύοντάς της υφάλμυρο νερό.

2.2 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σπηλαίου

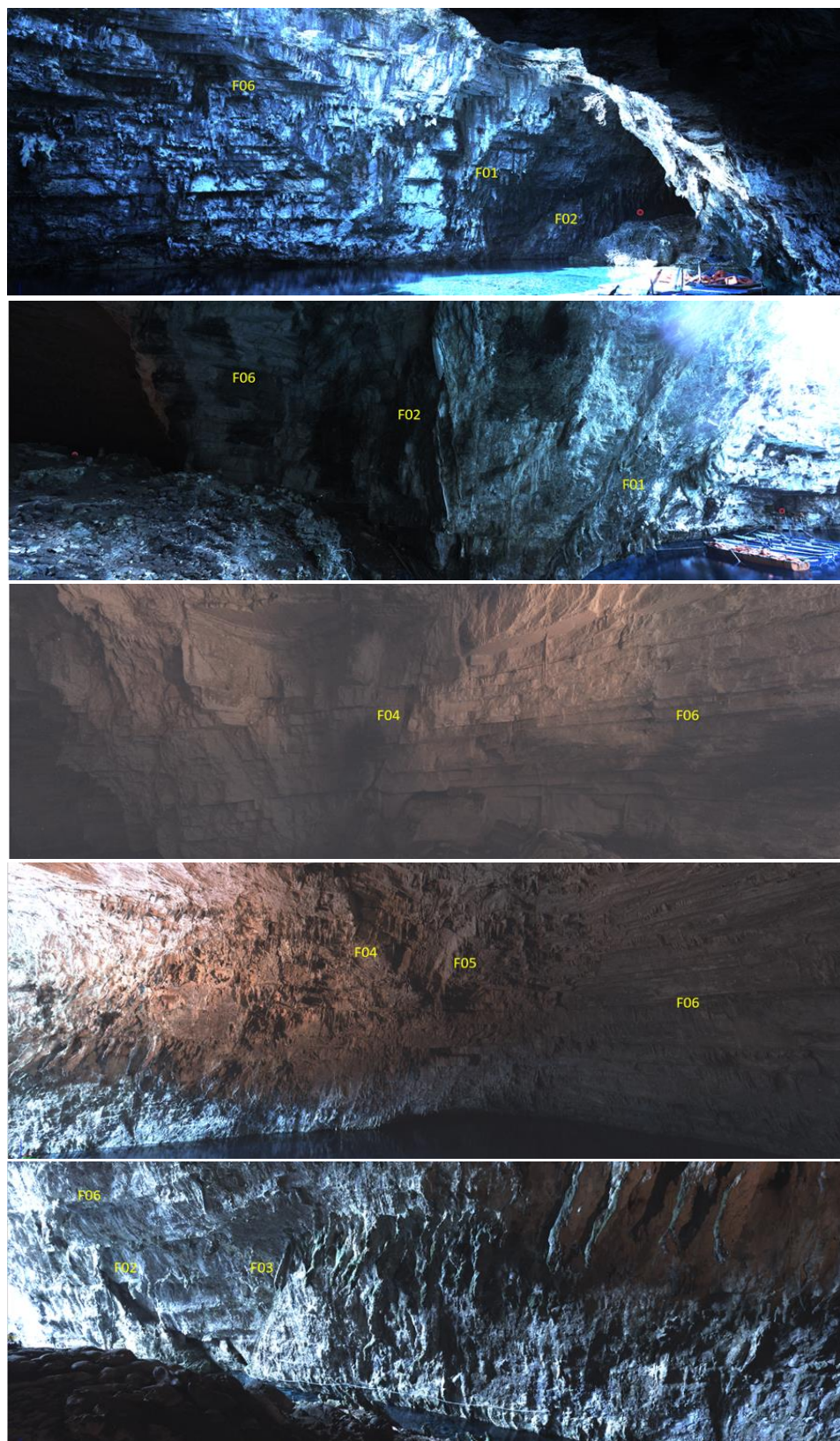
Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη της ευστάθειας των τοιχωμάτων του λιμνοσπήλαιου Μελισάνης, έγινε η αποτύπωση των ασυνεχειών στις εσωτερικές κοιλότητες του με τη χρήση του Terrestrial Laser Scanner, όπου δημιουργήθηκαν νέφη της τάξης των 500,000,000 σημείων τα οποία αποτυπώνουν την ακριβή μορφολογία του δαπέδου, της οροφής και των τοιχωμάτων του σπηλαίου. Οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν, ψηφιοποιήθηκαν μετά από κατάλληλη επεξεργασία των γεωαναφερομένων νεφών σημείων με συντεταγμένες X, Y, Z σε ΕΓΣΑ '87 (Τοπογραφική μελέτη Μελισάνης – Δρογγαράτης, Ε. Βασιλάκης, ΕΚΠΑ 2021).

Για την αποτύπωση της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους χρησιμοποιήθηκε ΣμηΕΑ (Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών) και φωτογραμμετρική επεξεργασία των αεροφωτογραφιών, για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης των οποίων πραγματοποιήθηκε επίλυση με τη μέθοδο Post Processing Kinematics (ΣΧΗΜΑ 2.4). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία τεχνολογία διόρθωσης δορυφορικών δεδομένων (GNSS - Global Navigation Satellite System) που χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα και τη χαρτογράφηση με ΣμηΕΑ για τη λήψη τοπογραφικών δεδομένων υψηλής ακριβείας (έως και εκατοστόμετρου). Τέλος, επετεύχθη συνένωση όλων των παραπάνω δεδομένων σε κοινή χωρική γεωβάση για περαιτέρω επεξεργασία και παραγωγή προϊόντων όπως οι ισοϋψείς καμπύλες (δαπέδου, οροφής και ελεύθερης επιφάνειας εδάφους) (Τοπογραφική μελέτη Μελισάνης – Δρογγαράτης, Ε. Βασιλάκης, ΕΚΠΑ 2021).



ΣΧΗΜΑ 2.4 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ, ΟΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΔΑΠΕΔΟΥ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ TERRESTRIAL LASER SCANNER ΚΑΙ ΣμηΕΑ (ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ – ΔΡΟΓΓΑΡΑΤΗΣ, Ε. ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ, ΕΚΠΑ 2021)

Μέσω της χρήσης ΣμηΕΑ έγινε ακριβής προσδιορισμός 6 κυρίων ασυνεχειών και πάρθηκαν φωτογραφικές αναλύσεις που παρουσιάζονται παρακάτω (ΣΧΗΜΑ 2.5). Επιπλέον για τις κύριες ασυνέχειες μετρήθηκαν και τα στοιχεία των επιφανειών τους όπως δίνονται στον Πίνακα 2.

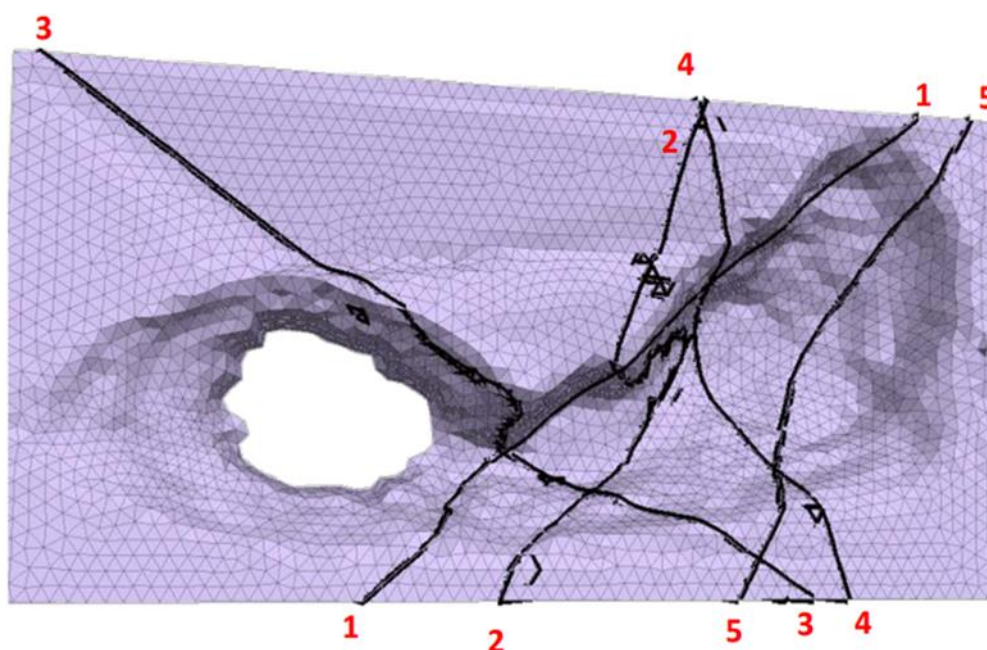


ΣΧΗΜΑ 2.5 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΛΙΜΝΟΣΠΗΛΛΑΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣμηΕΑ (ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ – ΔΡΟΓΓΑΡΑΤΗΣ, Ε. ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ, ΕΚΠΑ 2021)

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ

ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ	ΚΛΙΣΗ (°)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ (°)
FO1	84.2	310.4
FO2	51.8	157.0
FO3	69.5	57.3
FO4	77.5	18.2
FO5	87.7	332.0
FO6 (ΣΤΡΩΣΗ)	9.0	100.0

Από την αποτύπωση και την μετέπειτα επεξεργασία των νεφών σημείων με το πρόγραμμα Midas GTS NX το οποίο θα αναλυθεί στο «3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MIDAS GTS NX» προέκυψε τρισδιάστατο μηχανικό μοντέλο προσομοίωσης του σπηλαιού (ΣΧΗΜΑ 2.6), στο οποίο σχεδιάστηκαν οι παρακάτω κύριες ασυνέχειες μεγάλης κλίσης.



ΣΧΗΜΑ 2.6 ΤΟΜΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΠΟΥ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΟΠΩΣ ΔΙΑΣΧΙΖΟΥΝ ΤΟ ΣΠΗΛΑΙΟ (ΜΟΝΤΕΛΟ MIDAS GTS NX)

2.2.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας

Κατά την έρευνα πεδίου που πραγματοποιήθηκε, πάρθηκαν μετρήσεις των στοιχείων προσανατολισμού των συστημάτων ασυνεχειών, της τραχύτητας και εκτίμηση της αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών. Με τη βοήθεια ΣμηΕΑ αποτυπώθηκε φωτογραφικά η κατάσταση της βραχομάζας του λιμνοσπηλαιού και πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) της βραχομάζας βασισμένο στις παρατηρήσεις πεδίου. Σαν τελικό αποτέλεσμα ο δείκτης αυτός κατανέμεται σύμφωνα με το ΣΧΗΜΑ 2.7 σε 65-70.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνχειών) 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 επιφανείες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διαμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση 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. ΔΟΜΗ		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΧΕΙΑΣ								
		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσπασθριμένες επιφανείες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρώς αποσπασθριμένες και οξείδωμένες επιφανείες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθριμένες και εξοξλωμένες επιφανείες	ΠΤΩΧΗ Επιφανείες ολισθηρές, πολύ αποσπασθριμένες με σημαντική επιφθορά ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχίδια	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφανείες ολισθηρές, πολύ αποσπασθριμένες με μαλακό οργανικό υλικό πλήρωσης				
		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΧΕΙΩΝ →								
		90	80	70	60	50	40	30	20	10
	INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνείειες σε μεγάλη απόσταση							N/A	N/A	
	BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνχειών									
	VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνχειών									
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας									
	DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλειδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων									
	LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διαμημένη ασθενής βραχομάζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνχειών επιποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων	N/A	N/A							
		← ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΟΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ								

ΣΧΗΜΑ 2.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (Marinos and Hoek,2000)

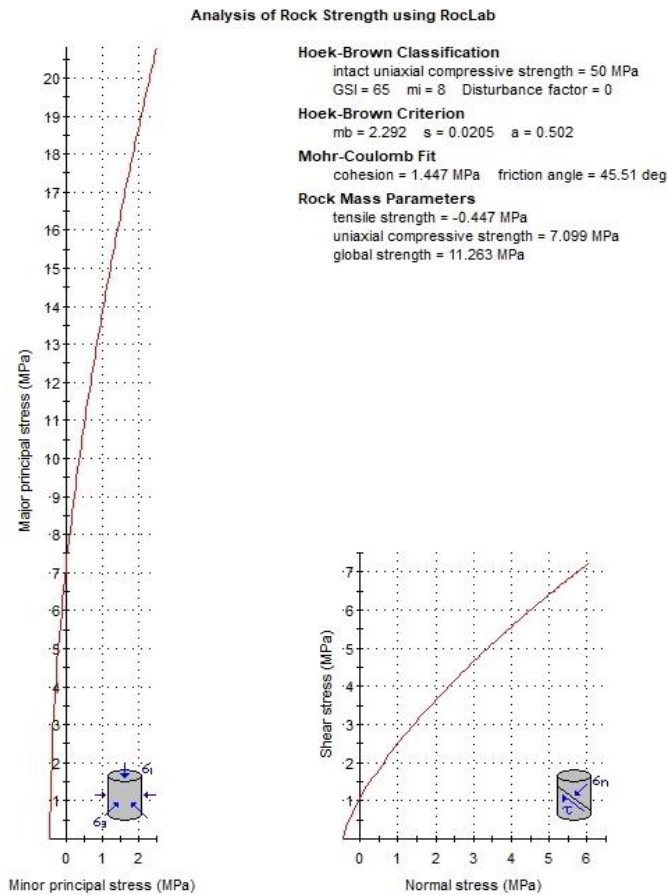
2.2.2 Γεωτεχνικοί παράμετροι βραχομάζας

Από την αξιολόγηση των συνθηκών της βραχομάζας προκύπτει τιμή του δείκτη GSI=65-70, όμως επειδή στους υπολογισμούς η βραχομάζα προσομοιώνεται ως ελαστικό μέσο λαμβάνεται συντηρητικά GSI=65. Θεωρώντας συντηρητικά αντοχή μονοαξονικής θλίψης για το άρρηκτο πέτρωμα $\sigma_{ci}=50$ MPa, μέσω της εξίσωσης του Hoek (Hoek and Carranza-Torres, 2002) προκύπτει μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας ίσο με 18.8 GPa, όμως στους υπολογισμούς λαμβάνεται $E_m=18$ GPa (3).

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (3)$$

Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων του κριτηρίου Mohr-Coulomb είναι το RocLab (RocScience Data) το οποίο βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας του Hoek-Brown, χρησιμοποιεί τον δείκτη GSI (65-70) που αναφέρθηκε στο «2.2.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας» με την υποβαθμισμένη του τιμή (65) προς όφελος της ασφάλειας και την αντοχή του

άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη που προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές ($\sigma_{ci}=50$ MPa). Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από το πρόγραμμα δίνουν τιμή συνοχής $c=1.447$ MPa, η οποία μετετράπη σε $c=1.5$ MPa σε μια συντηρητική προσέγγιση προς όφελος της ασφάλειας και τιμή γωνίας τριβής 45.51° , η οποία μετετράπη σε 45° . Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη το ΣΧΗΜΑ 2.8 και την εργαστηριακή εμπειρία από παρόμοιους σχηματισμούς, προκύπτουν οι τελικές τιμές των παραμέτρων που είναι ίσες με $c=1.5$ MPa (1500 KN/m²) και $\varphi=45^\circ$.



ΣΧΗΜΑ 2.8 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ROCLAB ΚΑΙ ΔΙΝΟΥΝ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

2.2.3 Γεωτεχνικοί παράμετροι ασυνεχειών

Οι ασυνέχειες εμφανίζονται είτε ανοικτές είτε πληρωμένες με ασβεστίτιο υλικό, οι δε επιφάνειές τους εμφανίζονται ελαφρά τραχιές. Συνήθως συναντώνται με μεγάλο μήκος και ελαφρά αποσαθρωμένες. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των επί τόπου παρατηρήσεων προσδιορισμού της τραχύτητας των ασυνεχειών, προέκυψε μέσος συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών $JRC=13$. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους προσδιορίστηκαν με το μετασχηματισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής κατά Barton-Bandis (Barton, 1976) σε αντίστοιχες παραμέτρους κατά Mohr-Coulomb (με θεώρηση μέσης τάσης $\sigma_n=1-1.5$ MPa κατά μήκος ασυνέχειας). Η θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας JRC ελήφθη ίση με 45 MPa και η βασική γωνία τριβής φ_b ίση με 30° .

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\varphi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (4)$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών έδωσαν περιοχές τιμών για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, $c=200-250$ KPa και $\varphi=43^\circ-46^\circ$. Ως γεωτεχνικές παράμετροι υπολογισμού επελέγησαν συντηρητικά για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών μεγάλου μήκους οι τιμές $c=200$ KPa και $\varphi=35^\circ$ ενώ για την επιφάνεια της στρώσης επελέγησαν οι τιμές $c=100$ KPa και $\varphi=33^\circ$.

2.3 Γεωτεχνικοί υπολογισμοί

Οι γεωτεχνικοί υπολογισμοί αφορούν στον έλεγχο της ευστάθειας και της εκτίμησης του διατιθέμενου επιπέδου ασφαλείας της οροφής και των τοιχωμάτων του λιμνοσπηλαίου στην υφιστάμενη κατάσταση. Ειδικότερα, πραγματοποιούνται γεωτεχνικές αναλύσεις με το λογισμικό Midas GTS NX που αφορούν:

- i. Την στατική ευστάθεια του λιμνοσπηλαίου σε τρισδιάστατο μοντέλο με παραμετρική ανάλυση.
- ii. Την ευστάθεια των τοιχωμάτων και της οροφής του λιμνοσπηλαίου στην υφιστάμενη κατάσταση με κύριο παράγοντα τη σεισμική ζώνη της Κεφαλληνίας.
- iii. Την ευστάθεια του σπηλαίου σε 2 σεισμούς του 2014 για τους οποίους έγινε αναφορά στο «1.4.2 Σεισμικές δονήσεις Κεφαλληνίας, 2014».

Για τις εξεταζόμενες καταστάσεις φόρτισης ο ελάχιστος απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας SF, κατά τον Ευρωκώδικα 2008 (EC-8), καθορίζεται ως ακολούθως:

- Κανονικές (στατικές) συνθήκες: SF=1.4.
- Συνθήκες σεισμού: SF=1.0.

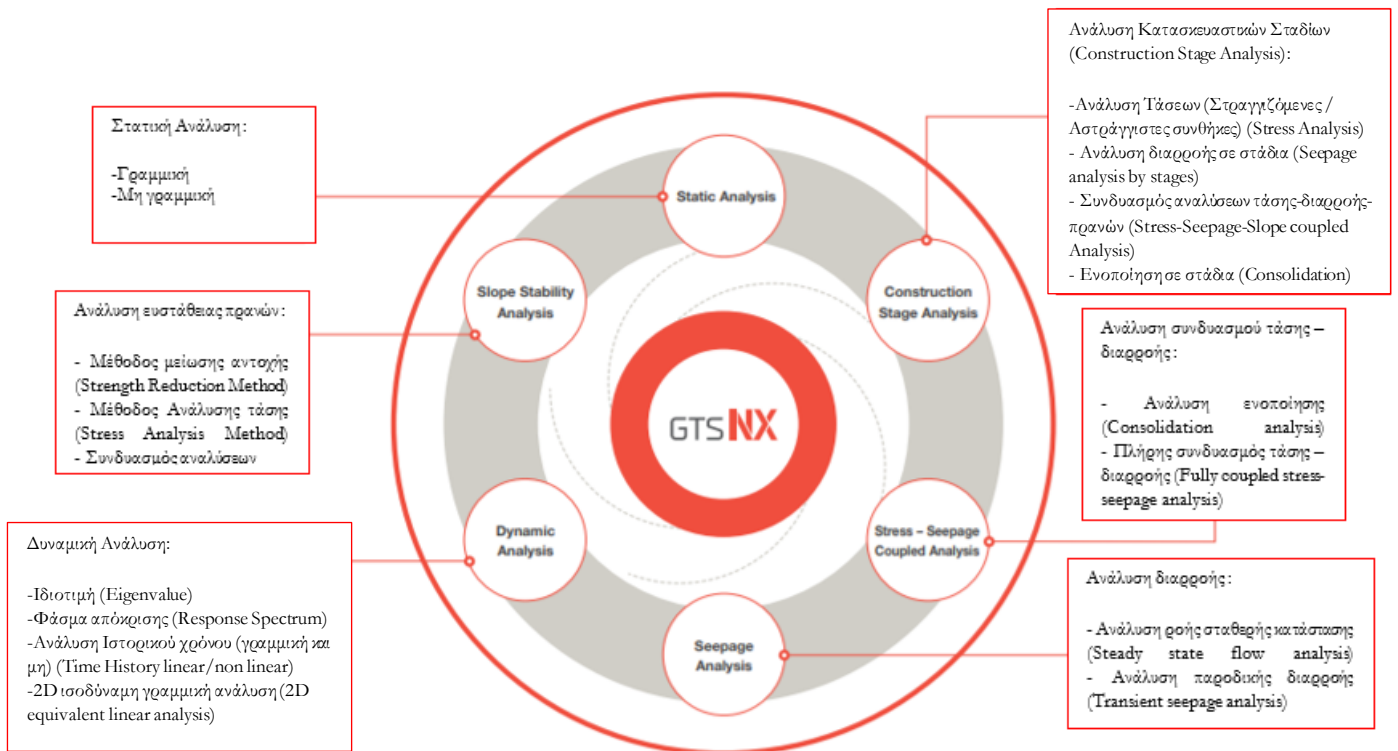
Σε όλες τις επιλύσεις δεν προσομοιώθηκαν συνθήκες υδατικής πίεσης εντός των ασυνεχειών καθώς στο λιμνοσπήλαιο εμφανίζονται μόνο κατεισδύοντα όμβρια ύδατα.

3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MIDAS GTS NX

3.1 Θεωρητικά στοιχεία του λογισμικού

Το GTS NX είναι λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για προηγμένη γεωτεχνική ανάλυση παραμόρφωσης και ευστάθειας εδάφους και πετρωμάτων, καθώς και ροής υπόγειων υδάτων, δυναμικών δονήσεων και αλληλεπίδρασης εδάφους - δομής σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μέσο. Χρησιμοποιείται κατά κόρον καθώς έχει σχεδιαστεί για να προσαρμόζει κάθε είδους γεωτεχνικό έργο, για ανάλυση, δοκιμή και σχεδιασμό από γεωτεχνικούς, πολιτικούς μηχανικούς και μηχανικούς περιβάλλοντος. Οι επιλογές που παρέχει το λογισμικό αυτό, όπως φαίνεται παρακάτω (ΣΧΗΜΑ 3.1), δίνουν την δυνατότητα προσομοίωσης επί-τόπου συνθηκών λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα των υλικών και τις αρχικές πιέσεις στο έδαφος. Το GTS NX υποστηρίζει όλους τους τύπους ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένων στατικής (static), δυναμικής (dynamic), διαρροής (seepage), συνδυασμού τάσης-διαρροής (stress-seepage), κατασκευαστικών σταδίων (construction stage) και ευστάθειας (slope stability). Οποιαδήποτε συμπεριφορά εδάφους που σχετίζεται με την ροή του νερού

(διαρροή/πίεση/ενοποίηση) μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως με την ανάλυση συνδυασμού τάσης – διαρροής (stress – seepage analysis). Μέσω του πλήρως ενσωματωμένου FE Solver (Finite Element Solver – Επίλυση πεπερασμένων στοιχείων), το GTS NX παρέχει εξαιρετικά αξιόπιστα αποτελέσματα για σύνθετη γεωτεχνική ανάλυση και σχεδιασμό.



ΣΧΗΜΑ 3.1 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MIDAS GTS NX

Οι κύριες αναλύσεις και οι υποκατηγορίες τους παρουσιάζονται στο ΣΧΗΜΑ 3.1, εκ των οποίων αυτές που χρησιμοποιήθηκαν («3.3 Αναλύσεις λογισμικού - Analysis») για την υλοποίηση του στόχου της εν λόγω πτυχιακής με σειρά είναι οι εξής:

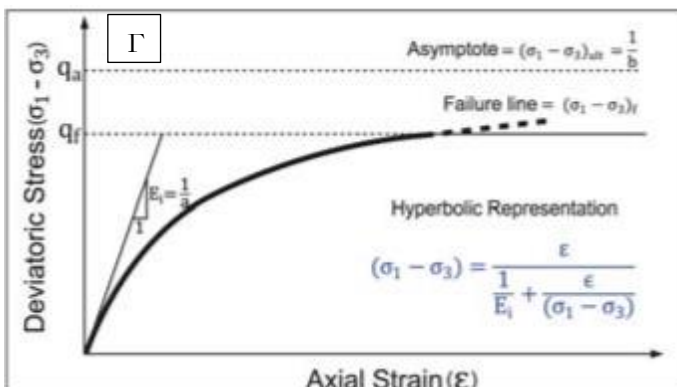
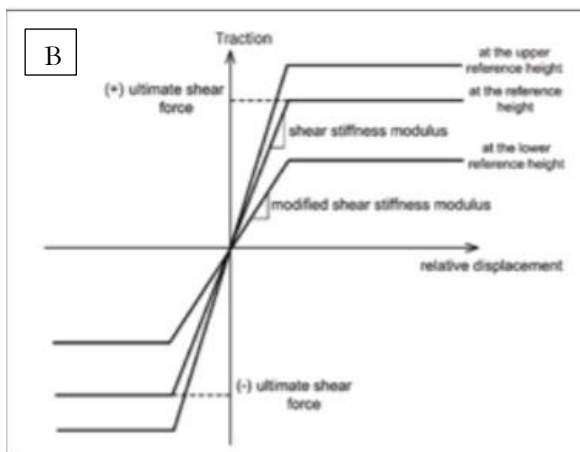
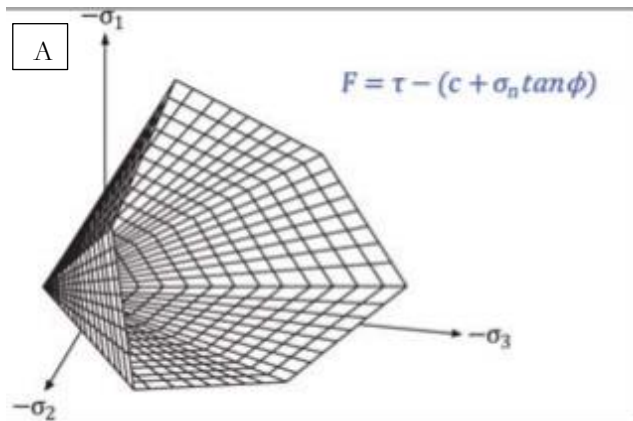
- Slope Stability Analysis / Strength Reduction Method (SRM).
- Construction Stage Analysis.
- Time History Analysis + SRM.
- Dynamic Analysis.

Όσον αφορά την μοντελοποίηση, το GTS NX δημιουργεί αυτόματα γεωμετρίες όπως κοινές επιφάνειες και αποτυπώματα. Αυτές οι λειτουργίες διασφαλίζουν την συνδεσιμότητα των σημείων μεταξύ όλων των παρακείμενων πλεγμάτων, εξασφαλίζοντας έτσι αξιόπιστη ανάλυση της αλληλεπίδρασης κατασκευής - εδάφους. Τα λάθη μοντελοποίησης μπορούν επίσης να εντοπιστούν και να διορθωθούν αυτόματα αποτρέποντας την εκτέλεση ανάλυσης με προειδοποιήσεις αποτυχίας.

Επιπλέον εισάγει πληροφορίες μοντέλου από άλλα λογισμικά MIDAS (Gen, Civil & Soilworks). Η σύνδεση με το λογισμικό AutoCad μεταφέρει δεδομένα έργου CAD για εκτεταμένη ανάλυση που απαιτεί αλληλεπίδραση κατασκευής - εδάφους και λεπτομερή έρευνα 3D, όπως γέφυρες και υποστυλώσεις ψηλών κτιρίων. Επιπλέον, 2D μοντέλα δομής μπορούν να μεταφερθούν στο GTS NX

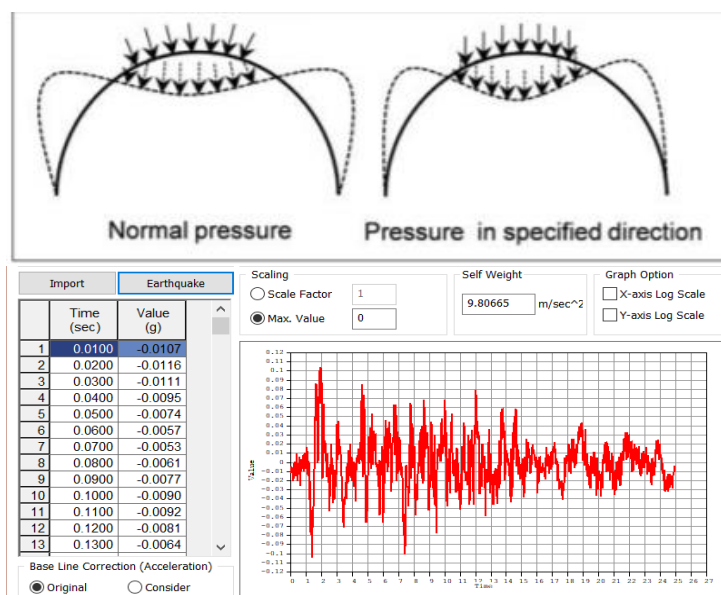
για 3D ανάλυση επίγειων μηχανικών προβλημάτων όπως συστήματα σηράγγων με συνδεδεμένες εξόδους.

Το GTS NX παρέχει διάφορα μοντέλα γραμμικών / μη γραμμικών υλικών για να προσομοιώσει την συμπεριφορά του εδάφους υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και στάθμης νερού. Τα μοντέλα υλικών ταξινομούνται γενικά σε ελαστικά, πλαστικά και στραγγιζόμενα, μη στραγγιζόμενα που αποτελούν κατηγορίες διαρροών (ΣΧΗΜΑ 3.2). Η ισοδύναμη γραμμικότητα και η μη γραμμικότητα των στοιχείων μπορούν να προσομοιωθούν μέσω εσωτερικών λειτουργιών του λογισμικού.



ΣΧΗΜΑ 3.2 Α) ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ, Β) ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΟ ΥΛΙΚΟ, Γ) ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Μετά την μοντελοποίηση, είναι δυνατή η επιλογή διαφόρων επί – τόπου συνθηκών φόρτισης (ΣΧΗΜΑ 3.3). Η δυναμικής λειτουργίας βάση δεδομένων περιλαμβάνει μια ποικιλία κωδικών - φασμάτων απόκρισης και χρόνου απόκρισης. Προσαρμοσμένες λειτουργίες για δόνηση, έκρηξη και σεισμική φόρτιση μπορεί επίσης να δημιουργηθούν με σκοπό την υλοποίηση διαφορετικών παραμέτρων σε μία μελέτη.



ΣΧΗΜΑ 3.3 ΣΤΑΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ - ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Σε επόμενο στάδιο, παρέχει διάφορες οριακές συνθήκες για όλους τους τύπους ανάλυσης. Οι απαραίτητες οριακές συνθήκες για ανάλυση 2D και 3D μέσω, μπορούν να καθοριστούν αυτόματα με την εντολή auto-constraint. Ορίζοντας τη στάθμη του νερού, η πίεση του νερού των πόρων μπορεί να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση των τάσεων (stress analysis). Ο χρόνος από τον οποίο εξαρτάται η στάθμη του νερού μπορεί να οριστεί από τον χρήστη για περιπτώσεις προσομοίωσης ταχείας απορρόφησης καθώς και σταδιακής αύξησης της στάθμης του νερού λόγω βροχοπτώσεων. Η συνάρτηση αλλαγής ιδιοτήτων (Change Property) μπορεί να προσομοιώσει μια αλλαγή στις ιδιότητες του υλικού με το πέρασμα του χρόνου. Αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη για την προσομοίωση της σκλήρυνσης του σκυροδέματος καθώς και για έργα ανασκαφής στα οποία τα στρώματα του εδάφους αντικαθίστανται από δομικά στοιχεία.

Τελευταίο στάδιο, αφού επιλεγεί η ανάλυση που αντιστοιχεί στο κάθε μοντέλο, είναι η εμφάνιση των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης του μοντέλου. Το λογισμικό παρέχει μια ποικιλία μεθόδων εξόδου για τους χρήστες με σκοπό να οπτικοποιήσουν και να εξαγάγουν τα αποτελέσματα ανάλυσής τους.

3.1.1 Στόχος της εργασίας

Η εν λόγω πτυχιακή εργασία έχει ως πρωτεύοντα στόχο την εκτίμηση της ευστάθειας των τοιχωμάτων και των πρανών του λιμνοσπηλαίου της Μελισάνης με τη χρήση του Λογισμικού Midas GTS NX, σε συνέχεια μίας λεπτομερούς έρευνας από το Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών που αφορούσε την γεωμορφολογική, πετρολογική και σεισμοτεκτονική ταξινόμηση και κατάσταση αυτού. Με την βοήθεια του λογισμικού Midas, μοντελοποιήθηκε η περιοχή μελέτης και αναλύθηκε ως συνεχές μέσο έπειτα από απομείωση της βραχομάζας και ενσωμάτωση των συστημάτων ασυνεχειών με τη χρήση του δείκτη αντοχής GSI, έτσι ώστε να συγκριθεί ο Συντελεστής Ασφαλείας με τον

προβλεπόμενο σε κανονικές συνθήκες και σε συνθήκες σεισμικών δονήσεων («2.3 Γεωτεχνικοί υπολογισμοί»).

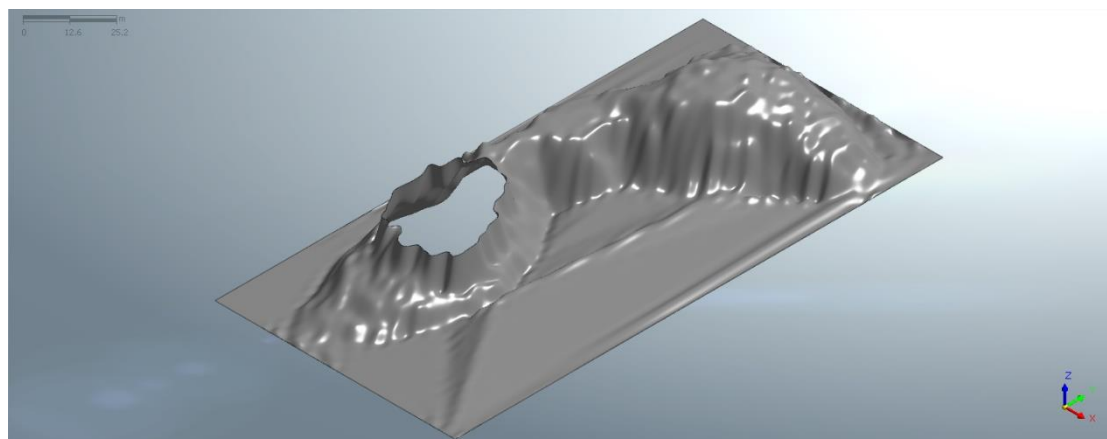
3.2 Βήματα επεξεργασίας μοντέλου

Για την κατασκευή του μηχανικού μοντέλου του λιμνοσπηλαιού ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Το τοπογραφικό μοντέλο επιφάνειας της περιοχής (Digital Terrain Model) όπως αποτυπώθηκε από το ΣμηΕΑ (drone system) (Ε. Βασιλάκης),
- Το γεωμετρικό σχήμα του σπηλαιού όπως προέκυψε από την τοπογραφική αποτύπωση με τεχνικές Laser Scanner (Ε. Βασιλάκης),
- Οι ασυνέχειες που διασχίζουν το σπήλαιο, όπως αυτές ταυτοποιήθηκαν και αποτυπώθηκαν πάνω στο 3D μοντέλο,
- Οι μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος και των ασυνεχειών και,
- Οι επί τόπου τάσεις.

3.2.1 Μοντελοποίηση – Geometry

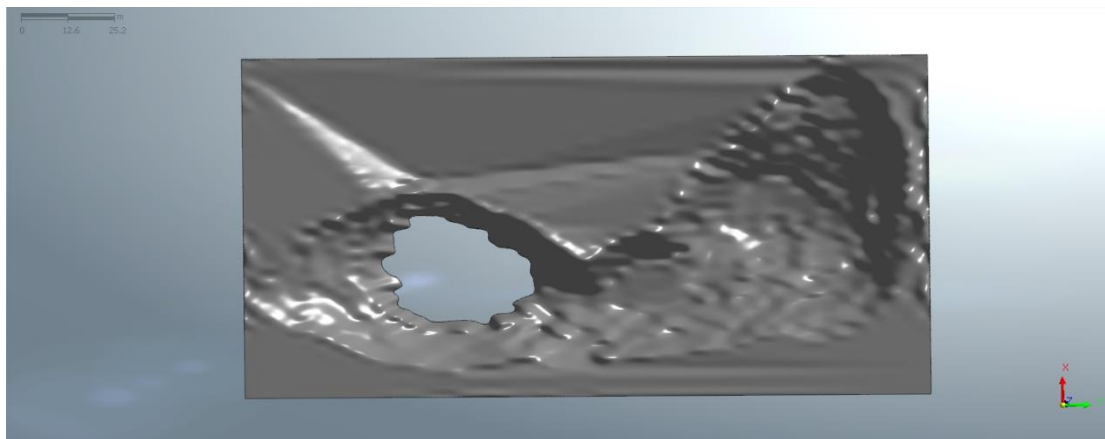
Ο σημαντικότερος παράγοντας για την ανάλυση και λήψη αποτελεσμάτων για το λιμνοσπήλαιο είναι η μοντελοποίηση αυτού μέσω του λογισμικού Midas. Πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης ήταν η αποτύπωση της εσωτερικής επιφάνειας του σπηλαιού δηλαδή της οροφής αυτού με την χρήση του συστήματος Laser Scanner. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα συλλογής χωρικών δεδομένων από απόσταση, βασιζόμενο στην τεχνολογία ανίχνευσης και τοποθέτησης αντικειμένων με αποστολή και λήψη δέσμης Laser. Ένας σαρωτής Laser, που είναι παρόμοιος με έναν αυτοματοποιημένο τοπογραφικό σταθμό, έχει τη δυνατότητα να μετρήσει έως και εκατομμύρια μετρημένα σημεία (νέφη σημείων) ανά δευτερόλεπτο.



ΣΧΗΜΑ 3.4 ΑΠΟΨΗ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ (Ο ΑΞΟΝΑΣ ΟΥ, ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ, ΔΕΙΧΝΕΙ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΒΟΡΡΑ)

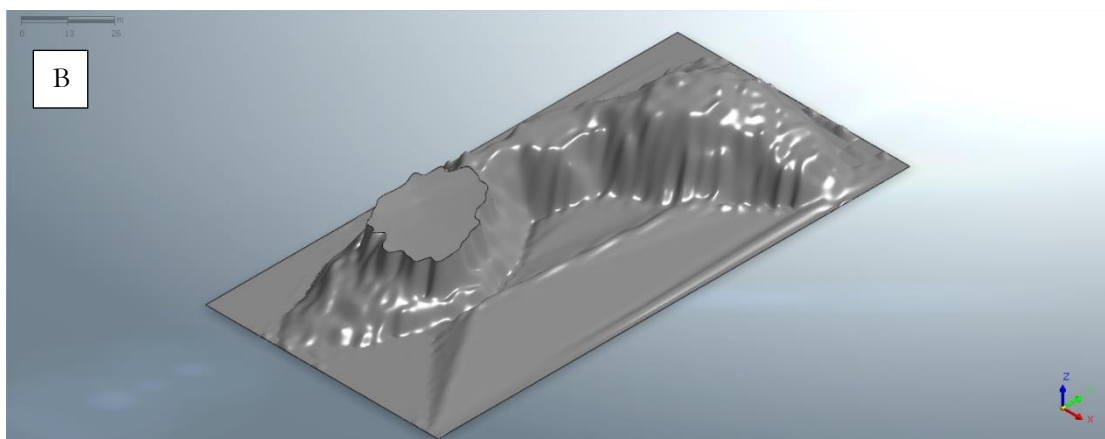
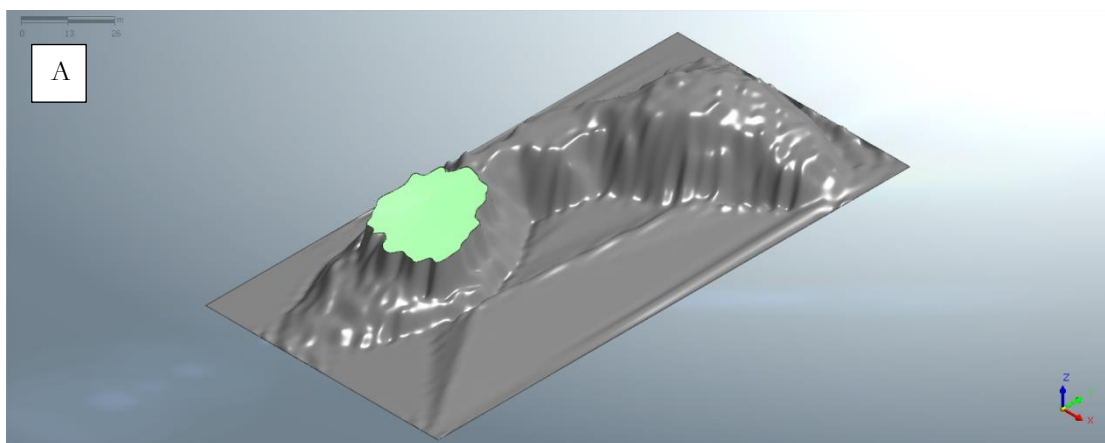
Η δέσμη λοιπόν, εκτρέπεται από καθρέφτες ώστε να σαρώσει ολόκληρη την περιοχή μελέτης με την πυκνότητα που απαιτείται (500,000,000 σημεία), αποτυπώνοντας την πραγματικότητα στην επιφάνεια εργασίας του λογισμικού Midas μέσω του εργαλείου Terrain Geometry Maker (TGM). Η συνάρτηση

TGM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει μια γεωμετρία εδάφους χρησιμοποιώντας ένα αρχείο CAD DXF που περιλαμβάνει τα νέφη σημείων του Laser Scanner, από το οποίο ορίζονται και τα όρια της περιοχής ανάλυσης. Η επιφάνεια που εμφανίζεται στα σχήματα ΣΧΗΜΑ 3.4 και ΣΧΗΜΑ 3.5 είναι αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας.



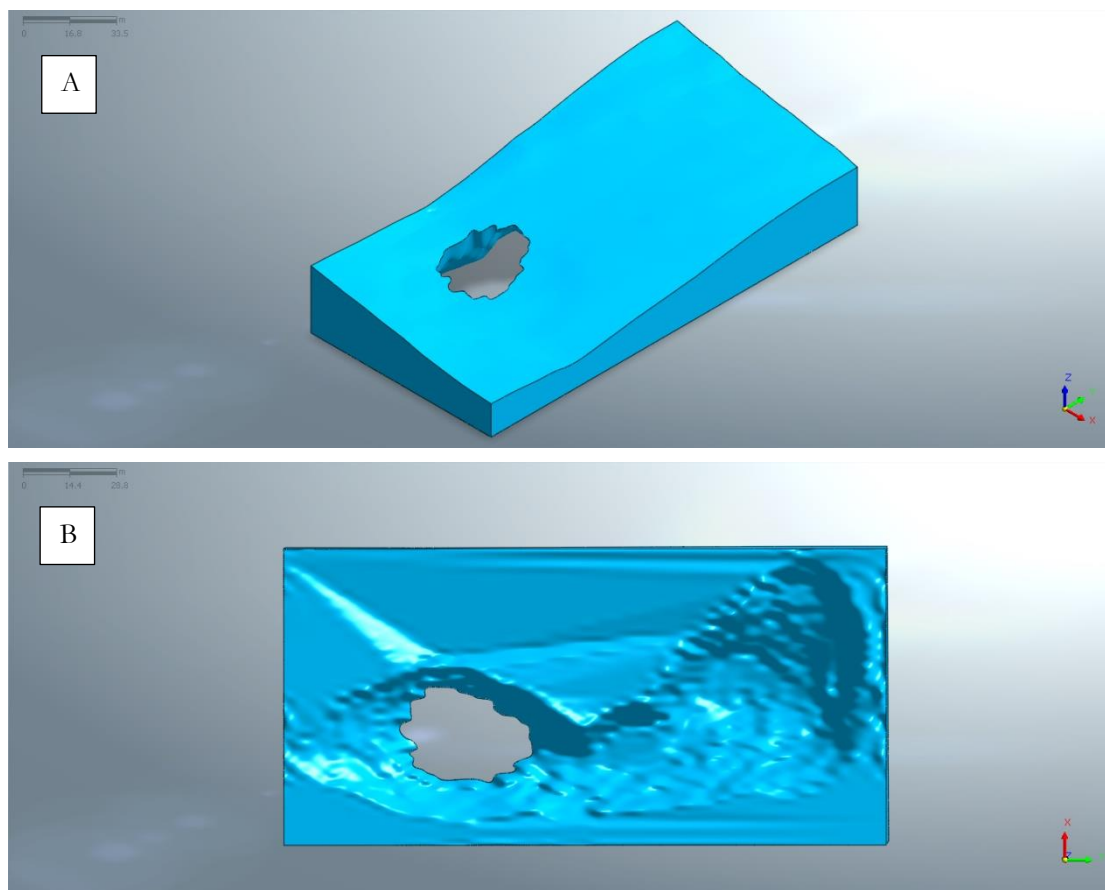
ΣΧΗΜΑ 3.5 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΤΟΜΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ / ΟΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ (Ο ΑΞΟΝΑΣ ΟΥ, ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ, ΔΕΙΧΝΕΙ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΒΟΡΡΑ)

Σε επόμενο στάδιο η επιφάνεια μετατράπηκε σε στερεό με την χρήση των εντολών της γεωμετρίας και με την προσθήκη της επιφάνειας της κύριας φυσικής κατακόρυφης εισόδου του σπηλαίου αποτυπώθηκε η τελική μορφή του εσωτερικού τμήματος αυτού (ΣΧΗΜΑ 3.6).



ΣΧΗΜΑ 3.6 (Α) ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΕΙ ΚΑΙ ΕΧΕΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΣΕΙ ΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΦΥΣΙΚΗ ΕΙΣΟΔΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΣΤΕΡΕΟΥ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ

Εν συνεχεία με την βοήθεια του ΣμηΕΑ αποτυπώθηκε το τοπογραφικό μοντέλο επιφάνειας (Digital Terrain Model) και μοντελοποιήθηκε αρχικώς ως επιφάνεια και τελικώς ως στερεό, στο οποίο ενσωματώθηκε το εσωτερικό ανάγλυφο του σπηλαιού όπως δημιουργήθηκε σε προηγούμενα στάδια (ΣΧΗΜΑ 3.7). Τελική διαμόρφωση του σπηλαιού αποτέλεσε η προσθήκη δαπέδου με σκοπό να μπορέι το στερεό να ισορροπεί σε κανονικές συνθήκες.



ΣΧΗΜΑ 3.7 (Α) ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΟΠΩΣ ΑΠΟΤΥΠΩΘΗΚΕ ΑΠΟ ΣμηΕΑ (Β) ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΟΨΗ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΡΟΦΗΣ ΑΥΤΟΥ

3.2.2 Προσδιορισμός παραμέτρων – Mesh Generator

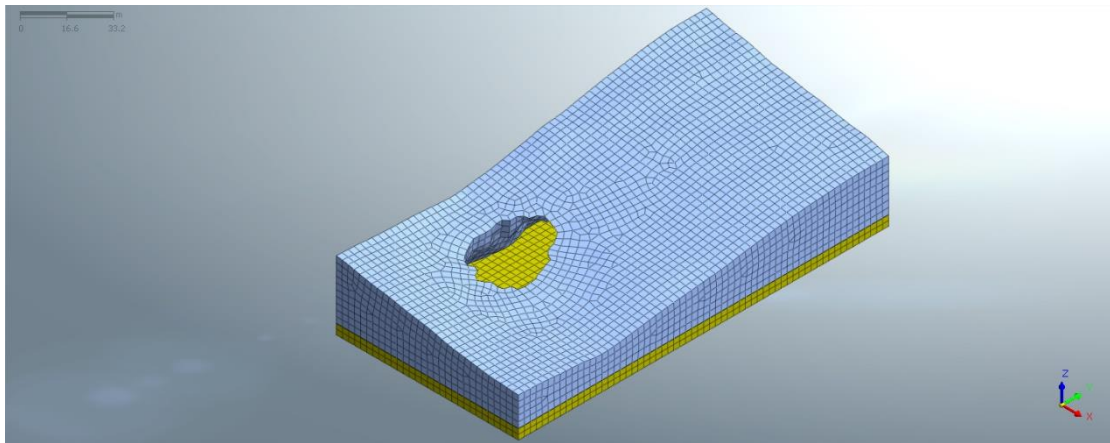
Στην επεξεργασία πλέγματος του μοντέλου, κυριότερο παράγοντα αποτελεί ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων. Το τρισδιάστατο μηχανικό μοντέλο του σπηλαιού δίνεται στο ΣΧΗΜΑ 3.8. Κατά τη στατική επίλυση, η βραχομάζα προσομοιώθηκε ως ισότροπο παραμορφώσιμο στερεό υλικό (βάσει του κριτηρίου Mohr - Coulomb), με παραμέτρους παραμορφωσιμότητας $E=18\text{GPa}$ και $\nu=0.2$ σε όλο το μοντέλο. Οι ιδιότητες θλιπτικής αντοχής και μέτρων ελαστικότητας είναι αρκετά υποβαθμισμένες σε σχέση με του άρρηκτου πετρώματος σε μια συντηρητική προσέγγιση προς όφελος της ασφάλειας. Στην αρχική φάση του μοντέλου γίνεται η διακριτοποίησή του, εισάγεται η βαρύτητα ($g=9.81 \text{ m/sec}^2$) και αφήνεται να ισορροπήσει έτσι ώστε να προσομοιωθεί η αρχική εντατική κατάσταση. Στη συνέχεια εισάγονται οι εκτιμώμενες τιμές συνοχής ($c^{\text{trial}}=1500 \text{ kN/m}^2$) και γωνίας τριβής ($\varphi^{\text{trial}}=45^\circ$) προσομοιώνοντας τις υφιστάμενες συνθήκες, οι οποίες είναι αποτέλεσμα του κριτηρίου Hoek-Brown, όπως αναφέρθηκε στο «2.2.2 Γεωτεχνικοί παράμετροι βραχομάζας».

Τέλος, μετά την πρώτη εκτίμηση του Συντελεστή Ασφαλείας σύμφωνα με την ανάλυση Standard Reduction Method (SRM) όπως θα αναφερθεί στο «**3.3.1 Ανάλυση Ευστάθειας - Stability Analysis**», απομειώνονται σταδιακά οι παράμετροι της βραχομάζας δηλαδή η συνοχή και η γωνία τριβής σύμφωνα με τις σχέσεις (5), (6) ώστε να βρεθούν οι τελικές παράμετροι με τις οποίες θα γίνουν οι αναλύσεις της εδαφικής επιτάχυνσης και των σεισμικών δονήσεων.

- $c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c$ (5)

- $\varphi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan\varphi\right)$ (6)

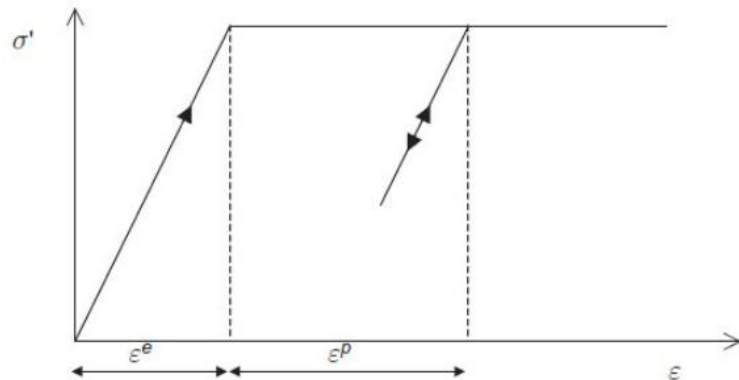
- Το ειδικό βάρος του πετρώματος θεωρήθηκε ίσο με $\gamma = 28 \text{ kN/m}^3$.



ΣΧΗΜΑ 3.8 ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΛΙΜΝΟΣΠΗΛΛΑΙΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

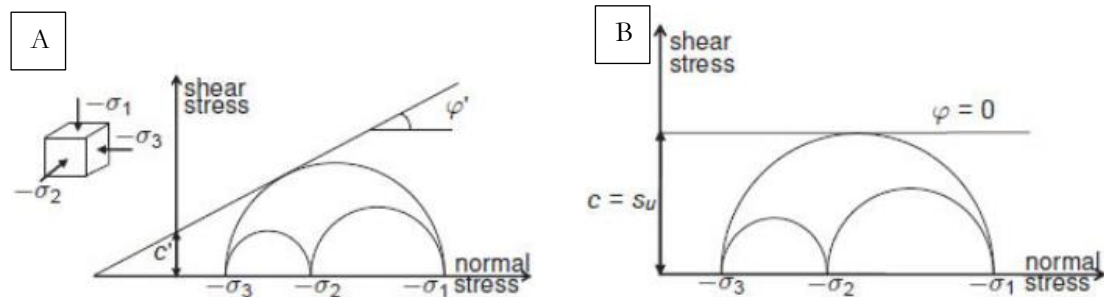
Όσον αφορά τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος (καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου), είναι βασισμένο στο κριτήριο Mohr-Coulomb. Το κριτήριο αυτό ορίζεται από μια ελαστοπλαστική συμπεριφορά όπως φαίνεται στο παρακάτω ΣΧΗΜΑ 3.9 δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα σε μη γραμμικές αναλύσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κόρον για να προσομοιώσουν εδαφικό πεδίο.

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb λοιπόν, παρουσιάζει δύο ελαττώματα κατά τη χρήση γεωγλυκών. Πρώτον, η ενδιάμεση κύρια τάση δεν επηρεάζει την απόδοση, η οποία είναι μια αντιφατική υπόθεση για τα πραγματικά αποτελέσματα δοκιμών εδάφους και δεύτερον, η αστοχία του κύκλου Mohr-Coulomb είναι γραμμική, συνεπώς η γωνία τριβής δεν αλλάζει με την τάση (ή την υδροστατική πίεση). Αυτό το κριτήριο είναι ακριβές μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος τάσεων, με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται η διαφορά εύρους να μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, αυτό το κριτήριο χρησιμοποιείται συχνά επειδή είναι εύκολο στη χρήση και εμφανίζει ακριβή αποτελέσματα εντός του γενικού εύρους τάσεων.



ΣΧΗΜΑ 3.9 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΓΕΩΓΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΟHR-COULOMB (ΠΗΓΗ: MIDAS GTS NX)

Τα γεωυλικά θεωρώντας το κριτήριο διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb έχουν διαφορετική συνοχή και γωνία τριβής ανάλογα τον τύπο τους και αυτές οι τιμές περιλαμβάνονται στην σχέση διατμητικής αντοχής, σύμφωνα με την εξίσωση (7). Η διατμητική τάση αυξάνεται με την αύξηση της ορθής τάσης (σ) και καθώς αυτό το φαινόμενο εξελίσσεται, λειτουργεί κατά μήκος ενός επιπέδου προκαλώντας αστοχία (ΣΧΗΜΑ 3.10). Η διατμητική τάση προκαλεί αντίσταση, που εξαρτάται από τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής (φ), το όριο της οποίας ονομάζεται διατμητική αντοχή.



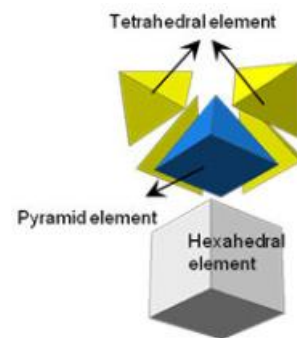
ΣΧΗΜΑ 3.10 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ MOHR-COULOMB ΓΙΑ ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΕΣ (Α) ΚΑΙ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (Β) (ΠΗΓΗ: MIDAS GTS NX)

Σύμφωνα με τον Coulomb, η διατμητική αντοχή (τ) του εδάφους μπορεί να εκφραστεί στην ακόλουθη γραμμική εξίσωση (7):

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (7)$$

Η συνοχή είναι ίση με τη διατμητική αντοχή όταν η γωνία εσωτερικής τριβής είναι «0» σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας. Στην περίπτωση του λιμνοσπλαιίου η συνοχή και η γωνία τριβής λαμβάνουν υψηλές τιμές καθώς αυτό δομείται από βράχο.

Όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 3.8 το πλέγμα που επιλέχθηκε για την αποτύπωση του μηχανικού μοντέλου είναι υβριδικό, καθώς αποτελείται από πυραμιδικές και τετραεδρικές μορφές στη βάση εξαέδρων (ΣΧΗΜΑ 3.11). Το μέγεθος του πλέγματος ορίστηκε ως κατώτερο του 5 με σκοπό να διακρίνονται οι λεπτομέρειες του ανάγλυφου οι οποίες αποτυπώθηκαν από το Laser Scanner και το ΣμηΕΑ.



ΣΧΗΜΑ 3.11 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΠΗΓΗ: MIDAS GTS NX)

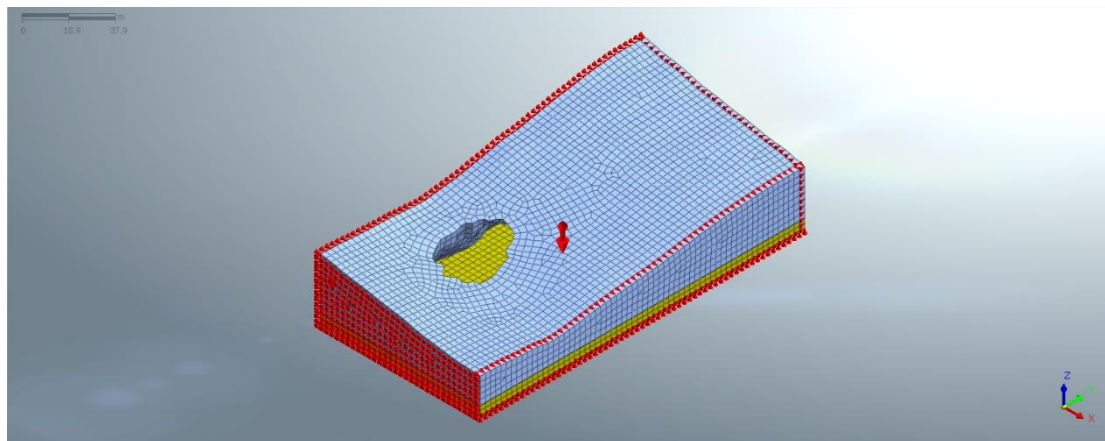
3.2.3 Οριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης – Slope/Static Analysis

Οι συνθήκες που θα αναλυθούν στο εν λόγω υποκεφάλαιο αφορούν τις γενικές συνθήκες του μηχανικού μοντέλου για να ισορροπεί. Οι περιορισμοί και τα φάσματα που δημιουργήθηκαν για της σεισμικές αναλύσεις θα αναφερθούν στο «3.3.3 Ανάλυση Ιστορικού Χρόνου (Time History Analysis)».

Στην κατηγορία των συνθηκών του φορτίου (load), εισήχθη το ίδιο το βάρος του μοντέλου ως εφαρμοζόμενο φορτίο (self-weight). Το υπολογισμένο λοιπόν βάρος, εφαρμόστηκε στην κατεύθυνση Z ως δύναμη σώματος για στατική ανάλυση και αφήθηκε σε ισορροπία με σκοπό την πραγματοποίηση των αναλύσεων του λογισμικού. Οι οριακές συνθήκες που τέθηκαν στο μηχανικό μοντέλο ανταποκρίνονται στις βασικές συνθήκες για τη γενική ανάλυση τάσεων. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε

το πλέγμα του στόχου - μοντέλου και με την εντολή auto-constraint δημιουργήθηκαν οι παρακάτω περιορισμοί όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 3.12 :

- Η μετατόπιση κατεύθυνσης X περιορίστηκε για την Ανατολική και Δυτική πλευρά,
- Η μετατόπιση κατεύθυνσης Y περιορίστηκε για την Νότια και τη Βόρεια πλευρά και
- Η μετατόπιση κατεύθυνσης X, Y περιορίστηκε για το κάτω μέρος του μοντέλου.



ΣΧΗΜΑ 3.12 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (Ο ΑΞΟΝΑΣ ΟΥ ΔΕΙΧΝΕΙ ΠΡΟΣ ΒΟΡΡΑ)

3.3 Αναλύσεις λογισμικού - Analysis

Η ανάλυση των γεωυλικών μπορεί να εξηγηθεί συγκρίνοντάς τη με μια δομική ανάλυση. Η δομική ανάλυση δίνει σημασία στην αβεβαιότητα του φορτίου που ενεργεί στη δομή. Ως εκ τούτου, διεξάγει το σχεδιασμό των στοιχείων της δομής με τη μεγαλύτερη δύναμη που μπορεί να ληφθεί συνδυάζοντας συστηματικά διάφορα αποτελέσματα. Αντίθετα, μία γεωτεχνική ανάλυση εστιάζει στην προσομοίωση των φυσικών συνθηκών αλλά και στην αβεβαιότητα της δομής και των ιδιοτήτων των γεωυλικών.

Έτσι λοιπόν, για την γεωτεχνική ανάλυση με μεθόδους Πεπερασμένων Στοιχείων, πρέπει να χρησιμοποιούνται στερεά στοιχεία στη μοντελοποίηση τα οποία αντικατοπτρίζουν τη γεωμετρία του υπεδάφους καθώς και τις φορτίσεις επί αυτού. Τυχόν περιπτώσεις μη γραμμικών ανισότροπων υλικών ή καταστάσεων επί-τόπου τάσεων είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη ώστε να αντικατοπτρίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές επιτόπιες συνθήκες.

Το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει τις επιτόπιες συνθήκες και να καθορίσει εάν η κατάσταση σχεδιασμού ή κατασκευής είναι κατάλληλη. Για την γεωτεχνική ανάλυση το λογισμικό παρέχει διάφορες δυνατότητες μοντελοποίησης, όπως τη γενική στατική ανάλυση (general static analysis), στάδια κατασκευής (construction stage analysis), ευστάθεια (slope stability analysis) κτλ.

3.3.1 Ανάλυση Ευστάθειας - Stability Analysis

Για την εκτίμηση του Συντελεστή Ασφαλείας του λιμνοσπηλαίου της Μελισάνης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας που μπορούν να υποστηριχτούν από το λογισμικό Midas:

- Η Μέθοδος Μείωσης Διατμητικής Αντοχής (Strength Reduction Method - SRM),
- Η Μέθοδος Ανάλυσης Αντοχής (Strength Analysis Method - SAM), που είναι βασισμένη στη μη γραμμικότητα των πεπερασμένων στοιχείων και στη θεωρία οριακής ισορροπίας.

SRM (Strength Reduction Method):

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται σε αριθμητική ανάλυση από όπου προκύπτει ο ελάχιστος Συντελεστής Ασφαλείας και αναδεικνύεται η περιοχή της αστοχίας χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα, φορτία και οριακές συνθήκες. Συγκεκριμένα, η Μέθοδος Μείωσης Διατμητικής Αντοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει τη διαδικασία αστοχίας χωρίς προηγούμενες υποθέσεις (Griffiths and Lane, 1999). Συνεπώς, αυτή η ανάλυση καταφέρει να δώσει:

- Τον Συντελεστή Ασφαλείας που προκύπτει απομειώνοντας τις αρχικές παραμέτρους διατμητικής αντοχής (c , ϕ), που είχαν οριστεί από τον χρήστη.
- Τις περιοχές του μηχανικού μοντέλου που δίνουν αστοχία σε συνδυασμό με,
- Την ολική μετατόπιση στο χρονικό στιγμιότυπο της αστοχίας.

SAM (Strength Analysis Method):

Αυτή η μέθοδος υπολογίζει τις τάσεις του μηχανικού μοντέλου, ανάλογα τις παραμέτρους και τις οριακές συνθήκες που έχουν επιλεγεί από το χρήστη. Έτσι, δίνει τον Συντελεστή Ασφαλείας για διαφορετικές επιφάνειες ολίσθησης, οι οποίες εκτιμώνται με βάση τη θεωρία Οριακής Ισορροπίας. Εδώ, ο υπολογιζόμενος ελάχιστος SF των διαφόρων επιφανειών μετατρέπεται σε SF για το τμήμα του μοντέλου που είναι κρίσιμο για αστοχία. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου SAM είναι πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε δισδιάστατο περιβάλλον (2D).

Κατά συνέπεια, στο μηχανικό μοντέλο του λιμνοσπηλαίου που εξετάζεται χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SRM καθώς είναι η κατάλληλη για το 3D περιβάλλον σχεδίασης του μοντέλου. Αυτή η ανάλυση χρησιμοποιήθηκε πρώτη με σκοπό την εύρεση του Συντελεστή Ασφαλείας με βάση τις αρχικές παραμέτρους διατμητικής αντοχής που εκτιμήθηκαν από το Κριτήριο Hoek – Brown.

3.3.2 Ανάλυση Σταδίου Κατασκευής (Construction Stage Analysis)

Η ανάλυση Σταδίου Κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει τα διάφορα στάδια/συνθήκες φόρτισης/οριακές συνθήκες του μηχανικού μοντέλου κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Με βάση την παραπάνω δυνατότητα είναι εφικτή η προσθήκη ή αφαίρεση στοιχείων σε κάθε στάδιο. Αυτή η αλλαγή μπορεί να εφαρμοστεί στην αρχή κάθε σταδίου με τον χρήστη να είναι αυτός που ορίζει με ποιες παραμέτρους θα εξελιχθεί η ανάλυση. Το λογισμικό Midas δίνει μεγάλο εύρος τύπων ανάλυσης για τη διεξαγωγή του Construction Stage, στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως, επιλέχθηκε η ανάλυση τάσης – ευστάθειας (Stress-Slope Analysis) για την εκτίμηση των τάσεων και των παραμορφώσεων στο εσωτερικό του λιμνοσπηλαίου.

Η εν λόγω ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε 2 κατασκευαστικά στάδια με το πρώτο να λαμβάνει τις αρχικές τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής που προέκυψαν από το Κριτήριο Hoek – Brown και χρησιμοποιήθηκαν και στην εύρεση του SF στην ανάλυση ευστάθειας ($c=1500 \text{ KN/m}^2$, $\varphi=45^\circ$). Στο δεύτερο στάδιο δόθηκαν οι απομειωμένες παράμετροι οι οποίες προέκυψαν από τους τύπους (5), (6) μετά την επίλυση. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε ως εναλλακτική της παραμετρικής ανάλυσης με σκοπό την ανάδειξη της παραμόρφωσης που λαμβάνει το σπήλαιο με βάση τις διαφορετικές παραμέτρους, καταλήγοντας στις πραγματικές παραμέτρους του δεύτερου σταδίου και στην σύγκριση της ελάχιστης παραμόρφωσης.

3.3.3 Ανάλυση Ιστορικού Χρόνου (Time History Analysis)

Για την περίπτωση του λιμνοσπηλαίου και την προσομοίωση των δυναμικών φορτίων, το GTS NX μπορεί να πραγματοποιήσει ανάλυση Ιστορικού Χρόνου για τη δυναμική κατάσταση ισορροπίας. Η Slope Stability Analysis με τη χρήση της SRM (Μέθοδος Μείωσης Διατμητικής Αντοχής) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του συντελεστή ασφάλειας σε δυναμική κατάσταση.

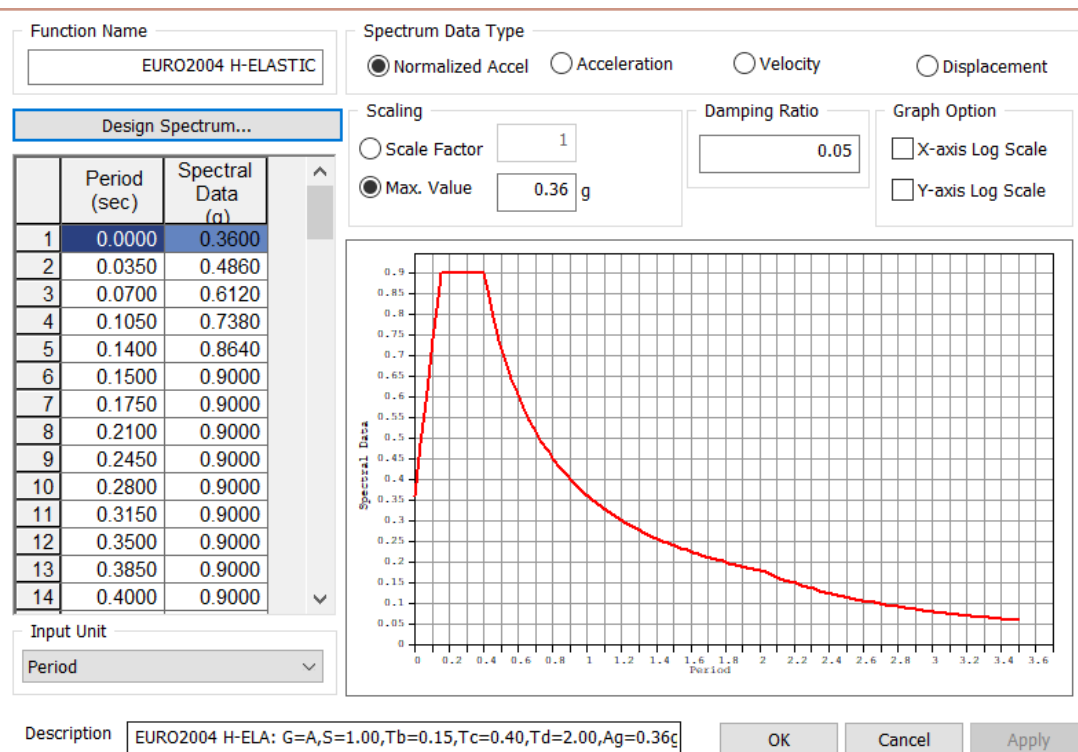
Η εν λόγω ανάλυση λοιπόν, χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση της παραμορφωσιμότητας των τοιχωμάτων του λιμνοσπηλαίου της Μελισάνης σε σεισμικό καθεστώς. Πιο συγκεκριμένα σε πρώτο στάδιο εισήχθη στο λογισμικό η σεισμική ζώνη III η οποία θεωρεί ότι οι κατασκευές που γίνονται πρέπει να μελετώνται και να αντέχουν σε οριζόντια δύναμη σε διάστημα 0.24g – 0.36g, και σε επόμενο στάδιο οι σεισμοί του 2014 όπως αναφέρθηκαν στο «**1.4.2 Σεισμικές δονήσεις Κεφαλληνίας, 2014**». Για να εισαχθεί στο λογισμικό η σεισμική ζώνη της Κεφαλληνίας, αρχικά δημιουργήθηκε συνάρτηση μέσω της εντολής Time Varying Static, η οποία χρησιμοποιεί το προκαθορισμένο στατικό φορτίο για να δημιουργήσει μια συνάρτηση χρόνου φόρτισης για ανάλυση ιστορικού χρόνου. Το δυναμικό φορτίο ορίζεται πολλαπλασιάζοντας το στατικό φορτίο με τη συνάρτηση φορτίου χρόνου. Αυτό το βήμα είναι σημαντικό καθώς μόνο με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εισαχθεί στην δυναμική ανάλυση το βάρος του μοντέλου (self-weight).

Soil Factor (S)	Tb	Tc	Td
1	0.15	0.4	2

ΣΧΗΜΑ 3.13 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ

Έπειτα δημιουργήθηκε ένα φάσμα απόκρισης στο οποίο κατά Ευρωκώδικα-8 (EC-8), η περιοχή μελέτης κατατάσσεται σε έδαφος κατηγορίας Α με απόσβεση 5% και μέγιστη περίοδο 3.5 sec, καθώς τα μέγιστα πλάτη φασματικής επιτάχυνσης αναμένονται σε μικρές περιόδους για μέσου ύψους κτήρια όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 3.13. Σύμφωνα λοιπόν με αυτές τις παραμέτρους δημιουργήθηκε το Response Spectrum για την εδαφική επιτάχυνση της Κεφαλληνίας όπως συνίσταται από τον Εθνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΣΧΗΜΑ 3.14).

Σε επόμενο στάδιο διαμορφώθηκε η συνάρτηση χρονικού φορτίου (time load function) για την ανάλυση ιστορικού χρόνου χρησιμοποιώντας την εδαφική επιτάχυνση (ground acceleration). Αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο του σεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών ή της ρευστοποίησης του εδάφους λόγω σεισμών. Η ανάλυση ιστορικού χρόνου εξετάζει τις δυναμικές κατασκευαστικές ιδιότητες και το εφαρμοζόμενο φορτίο για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς του μοντέλου (μετατόπιση, δυνάμεις μελών κλπ) σε αυθαίρετο χρόνο υπό δυναμική φόρτιση.

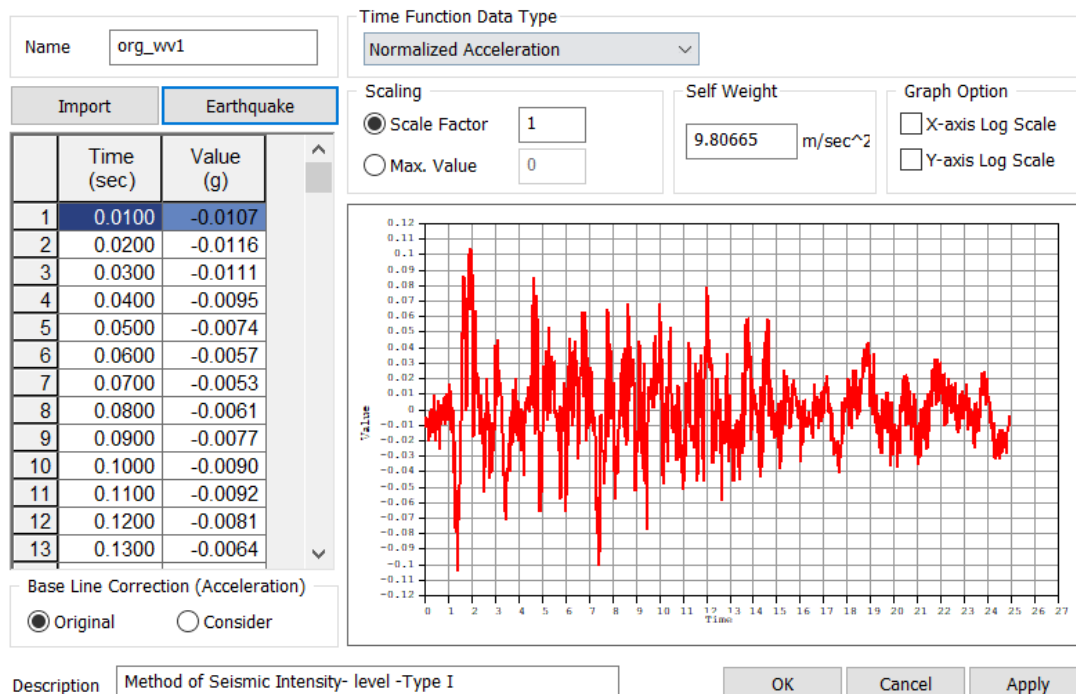


ΣΧΗΜΑ 3.14 ΦΑΣΜΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ (0.36 g) ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ III

Έτσι στην εισαγωγή κυματομορφής επιλέχθηκε ως συνάρτηση φορτίου η Method of Seismic Intensity – Type I, όπως φαίνεται και στο ΣΧΗΜΑ 3.15, η οποία δηλώνει υψηλή σεισμικότητα δηλαδή η συνάρτηση μεταξύ αριθμού σεισμών και μεγέθους σεισμών σχετικά με τον χωροχρόνο είναι υψηλή. Η νήσος Κεφαλληνία χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμικότητα, συνεπώς είναι επόμενο να επιλεγεί η συγκεκριμένη κυματομορφή.

Αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία του φάσματος σχεδιασμού, προστέθηκε στην X και Y συνιστώσα, καθώς τα εγκάρσια κύματα (S) που ευθύνονται για τις βλάβες δρουν με πολικότητα A-Δ, B-N και όχι zz', συνεπώς σε κατασκευές στη z συνιστώσα παρατηρούνται σπάνια βλάβες.

Όσον αφορά τις σεισμικές δονήσεις που παρατηρήθηκαν το 2014, για να εισαχθούν στο πρόγραμμα, αντί για την καταχώρηση της μεθόδου σεισμικής έντασης, χρησιμοποιήθηκαν κυματομορφές από τον επιταχυνσιογράφο του σεισμολογικού σταθμού της Βασιλικής στη Λευκάδα, ο οποίος κατέγραψε και τους δύο κύριους σεισμούς στις 3 συνιστώσες (X, Y, Z). Τα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό και διαμορφώθηκαν οι κυματομορφές για κάθε συνιστώσα για τους δύο κύριους σεισμούς (ΣΧΗΜΑ 3.16, ΣΧΗΜΑ 3.17).



ΣΧΗΜΑ 3.15 ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ -TYPE I

3.3.3.1 Ανάλυση Ιδιοτιμής (Eigenvalue)

Για την ρύθμιση της ανάλυσης ιστορικού χρόνου θα πρέπει να διεξαχθεί και η ανάλυση ιδιοτιμής (Eigenvalue) για τις εγγενείς δυναμικές ιδιότητες του εδάφους, η οποία χρησιμοποιείται για να ληφθεί ο φυσικός τρόπος λειτουργίας (σχήμα λειτουργίας), η φυσική περίοδος (συχνότητα) και ο συντελεστής συμμετοχής του εδάφους/δομής. Πιο συγκεκριμένα μέσω αυτής της συμπληρωματικής ανάλυσης καθορίζεται ο συντελεστής απόσβεσης (Damping Factor) του εδάφους ανάλογα την περιοχή μελέτης με σκοπό την εισαγωγή του στις κυματομορφές των σεισμικών δονήσεων.

Name: VAS.HNE

Time Function Data Type: Normalized Acceleration

Scaling: Scale Factor: 1, Max. Value: 0 g

Self Weight: 980.665 cm/sec²

Graph Option: X-axis Log Scale, Y-axis Log Scale

	Time (sec)	Value (g)
1	0.0000	0.0000
2	0.0050	0.0003
3	0.0100	0.0005
4	0.0150	0.0005
5	0.0200	0.0005
6	0.0250	0.0005
7	0.0300	0.0005
8	0.0350	0.0005
9	0.0400	0.0005
10	0.0450	0.0005
11	0.0500	0.0005
12	0.0550	0.0005
13	0.0600	0.0005

Base Line Correction (Acceleration): Original, Consider

Description: VAS_HNE [OK] [Cancel] [Apply]

Name: VAS.HNN

Time Function Data Type: Normalized Acceleration

Scaling: Scale Factor: 1, Max. Value: 0 g

Self Weight: 980.665 cm/sec²

Graph Option: X-axis Log Scale, Y-axis Log Scale

	Time (sec)	Value (g)
1	0.0000	0.0000
2	0.0050	0.0013
3	0.0100	0.0026
4	0.0150	0.0026
5	0.0200	0.0026
6	0.0250	0.0026
7	0.0300	0.0026
8	0.0350	0.0026
9	0.0400	0.0026
10	0.0450	0.0026
11	0.0500	0.0026
12	0.0550	0.0026
13	0.0600	0.0026

Base Line Correction (Acceleration): Original, Consider

Description: VAS_HNN [OK] [Cancel] [Apply]

Name: VAS.HNZ

Time Function Data Type: Normalized Acceleration

Scaling: Scale Factor: 1, Max. Value: 0 g

Self Weight: 980.665 cm/sec²

Graph Option: X-axis Log Scale, Y-axis Log Scale

	Time (sec)	Value (g)
1	0.0000	0.0000
2	0.0050	-0.0000
3	0.0100	-0.0001
4	0.0150	-0.0001
5	0.0200	-0.0001
6	0.0250	-0.0001
7	0.0300	-0.0001
8	0.0350	-0.0001
9	0.0400	-0.0001
10	0.0450	-0.0001
11	0.0500	-0.0001
12	0.0550	-0.0001
13	0.0600	-0.0001

Base Line Correction (Acceleration): Original, Consider

ΣΧΗΜΑ 3.16 X (HNE), Y (HNN) ΚΑΙ Z (HNZ) ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ ΤΟΥ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ (26/01/2014)

Name:

Time Function Data Type:

Import:

	Time (sec)	Value (g)
1	0.0000	0.0000
2	0.0050	0.0003
3	0.0100	0.0005
4	0.0150	0.0005
5	0.0200	0.0005
6	0.0250	0.0005
7	0.0300	0.0005
8	0.0350	0.0005
9	0.0400	0.0005
10	0.0450	0.0005
11	0.0500	0.0005
12	0.0550	0.0005
13	0.0600	0.0005

Base Line Correction (Acceleration): Original Consider

Scaling: Scale Factor: Max. Value: g

Self Weight: m/sec²

Graph Option: X-axis Log Scale Y-axis Log Scale

Description:

Name:

Time Function Data Type:

Import:

	Time (sec)	Value (g)
1	0.0000	0.0000
2	0.0050	0.0013
3	0.0100	0.0026
4	0.0150	0.0026
5	0.0200	0.0026
6	0.0250	0.0026
7	0.0300	0.0026
8	0.0350	0.0026
9	0.0400	0.0026
10	0.0450	0.0026
11	0.0500	0.0026
12	0.0550	0.0026
13	0.0600	0.0026

Base Line Correction (Acceleration): Original Consider

Scaling: Scale Factor: Max. Value: g

Self Weight: m/sec²

Graph Option: X-axis Log Scale Y-axis Log Scale

Description:

Name:

Time Function Data Type:

Import:

	Time (sec)	Value (g)
1	0.0000	0.0000
2	0.0050	-0.0000
3	0.0100	-0.0001
4	0.0150	-0.0001
5	0.0200	-0.0001
6	0.0250	-0.0001
7	0.0300	-0.0001
8	0.0350	-0.0001
9	0.0400	-0.0001
10	0.0450	-0.0001
11	0.0500	-0.0001
12	0.0550	-0.0001
13	0.0600	-0.0001

Base Line Correction (Acceleration): Original Consider

Scaling: Scale Factor: Max. Value: g

Self Weight: m/sec²

Graph Option: X-axis Log Scale Y-axis Log Scale

Description:

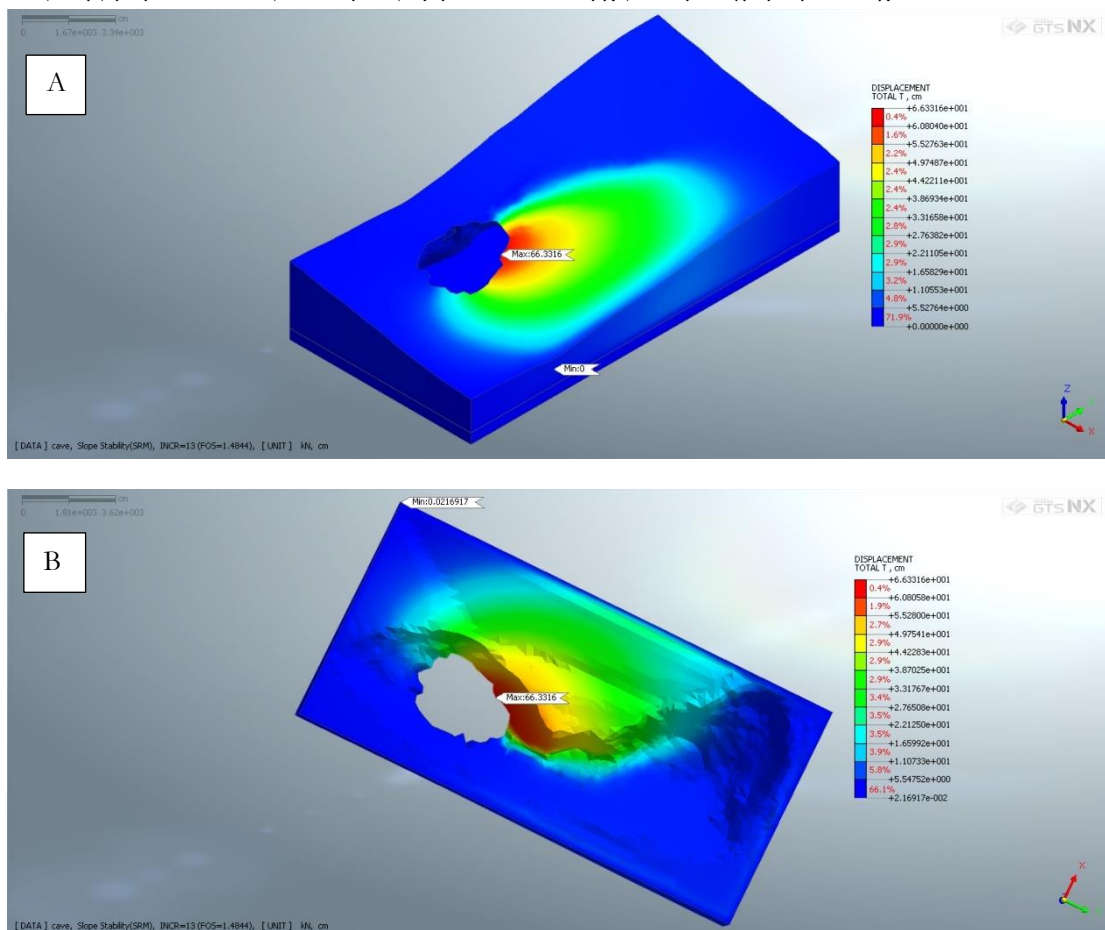
ΣΧΗΜΑ 3.17 X(HNE), Y(HNN) ΚΑΙ Z(HNZ) ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ ΤΟΥ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ (03/02/2014)

4 ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω αναλύσεις που ειτελέστηκαν θα παρουσιαστούν στο εν λόγω κεφάλαιο. Σε όλα τα μηχανικά μοντέλα σχεδιάστηκαν τομές κάθετες σε αυτά με σκοπό την παρακολούθηση της παραμόρφωσης της επιφάνειας του σπηλαιίου σε κάθε κατάσταση είτε στατική είτε δυναμική, με σκοπό την ανάδειξη των SF πριν την αστοχία, την περιοχή που αστοχεί και την ολική μετατόπιση του λιμνοσπηλαιίου την στιγμή αυτή.

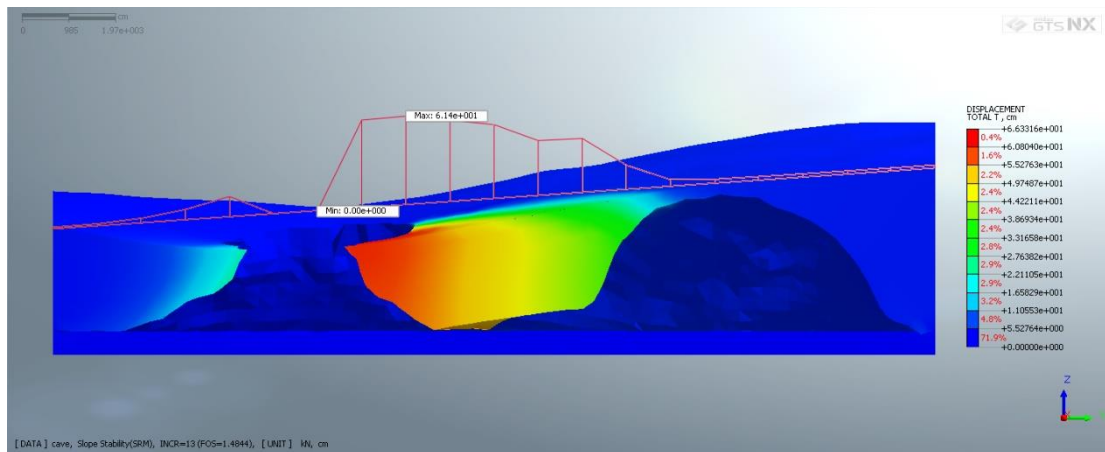
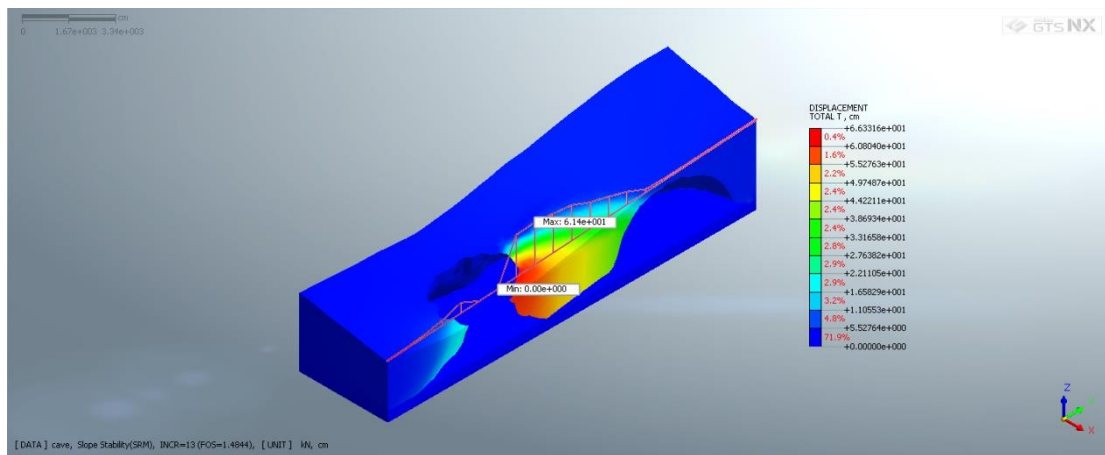
4.1 Αποτελέσματα SRM

Η συγκεκριμένη ανάλυση είχε ως σκοπό την εύρεση του Συντελεστή Ασφαλείας από τις παραμέτρους της συνοχής και της γωνίας τριβής που προέκυψαν μέσω του δείκτη GSI και του κριτηρίου Hoek – Brown, όπως αναφέρθηκαν στο «2.2.2 Γεωτεχνικοί παράμετροι βραχομάζας». Οι τιμές αυτών ήταν για την συνοχή 1500 KN/m² και για την γωνία τριβής 45°. Ο Συντελεστής Ασφαλείας που προέκυψε μετά την ανάλυση Strength Reduction Method ήταν 1.48, πριν το μοντέλο αστοχήσει. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το λιμνοσπήλαιο δεν διατρέχει κίνδυνο κατάρρευσης υπό στατικές συνθήκες. Παρακάτω παρουσιάζεται το μηχανικό μοντέλο με παρουσία ή μη κάτω μέρους, για την καλύτερη παρατήρηση του εσωτερικού της οροφής του κατά τη χρονική στιγμή της αστοχίας.



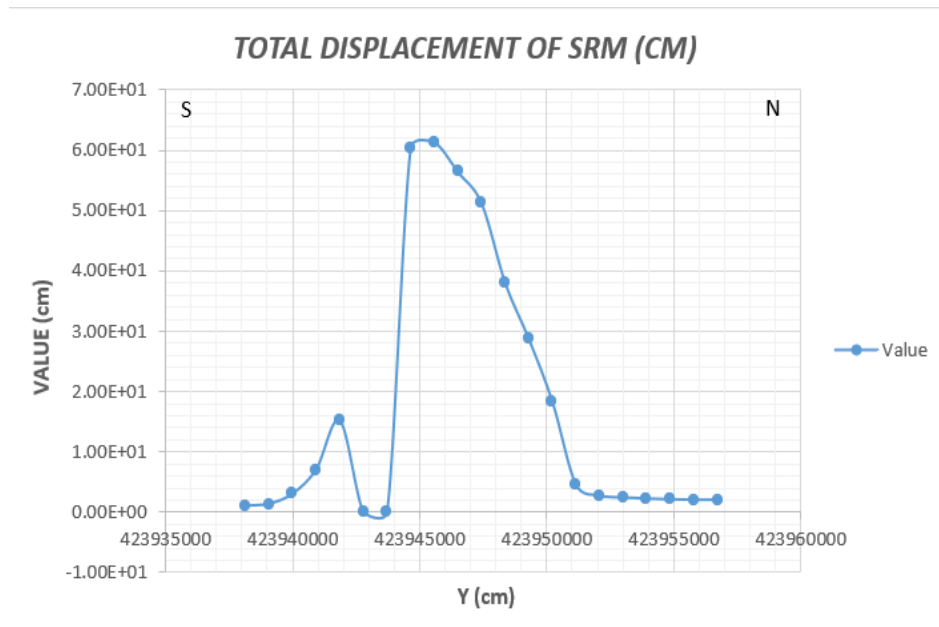
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

Όπως μπορεί για διακριθεί στο ΣΧΗΜΑ 4.1 Α, η μέγιστη μετατόπιση κατά την αστοχία ανέρχεται στα 66 cm και βρίσκεται στη ΒΑ πλευρά της φυσικής εισόδου του λιμνοσπηλαίου, ενώ η ελάχιστη είναι μηδενική στο κάτω μέρος του. Στην Β περίπτωση, η μέγιστη τιμή παραμένει ίση και βρίσκεται στα εσωτερικά τοιχώματα, ενώ η ελάχιστη ανέρχεται στα 0.02 cm. Στην υπόλοιπη επιφάνεια του μηχανικού μοντέλου παρατηρείται παραμόρφωση της τάξης του 1.0 - 5.0 cm, γεγονός που δείχνει μεγάλη παραμόρφωση σε όλο το εμβαδόν του μοντέλου.



ΣΧΗΜΑ 4.2 ΤΟΜΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ SRM

Εν συνεχεία, δημιουργήθηκε τομή με προσανατολισμό N-B όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 4.2, η οποία είναι παράλληλη στον άξονα Υ του μηχανικού μοντέλου. Τα σημεία αυτής περνούν από την μέγιστη μετατόπιση και μπορούν να προβληθούν σε πίνακα μέσω του λογισμικού Midas GTS NX. Με βάση τον πίνακα αυτό, κατασκευάστηκε στο EXCEL διάγραμμα μετατόπισης - Υ άξονα μηχανικού μοντέλου (ΣΧΗΜΑ 4.3), στο οποίο αναγνωρίζεται το σημείο κατάρπτωσης της οροφής του λιμνοσπηλαίου στις συντεταγμένες [(20441.846, 423943.709) - (20441.842, 423942.779)] (m) όπου η μετατόπιση είναι μηδενική, ενώ παράλληλα στις συντεταγμένες [(20441.852, 423945.568) - (20441.849, 423944.639)] (m), φαίνεται η μέγιστη μετατόπιση όπως προαναφέρθηκε, κατά την αστοχία.



ΣΧΗΜΑ 4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ- Υ ΑΞΟΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ SRM ΣΕ ΤΟΜΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΝΟΤΟ-ΒΟΡΡΑ

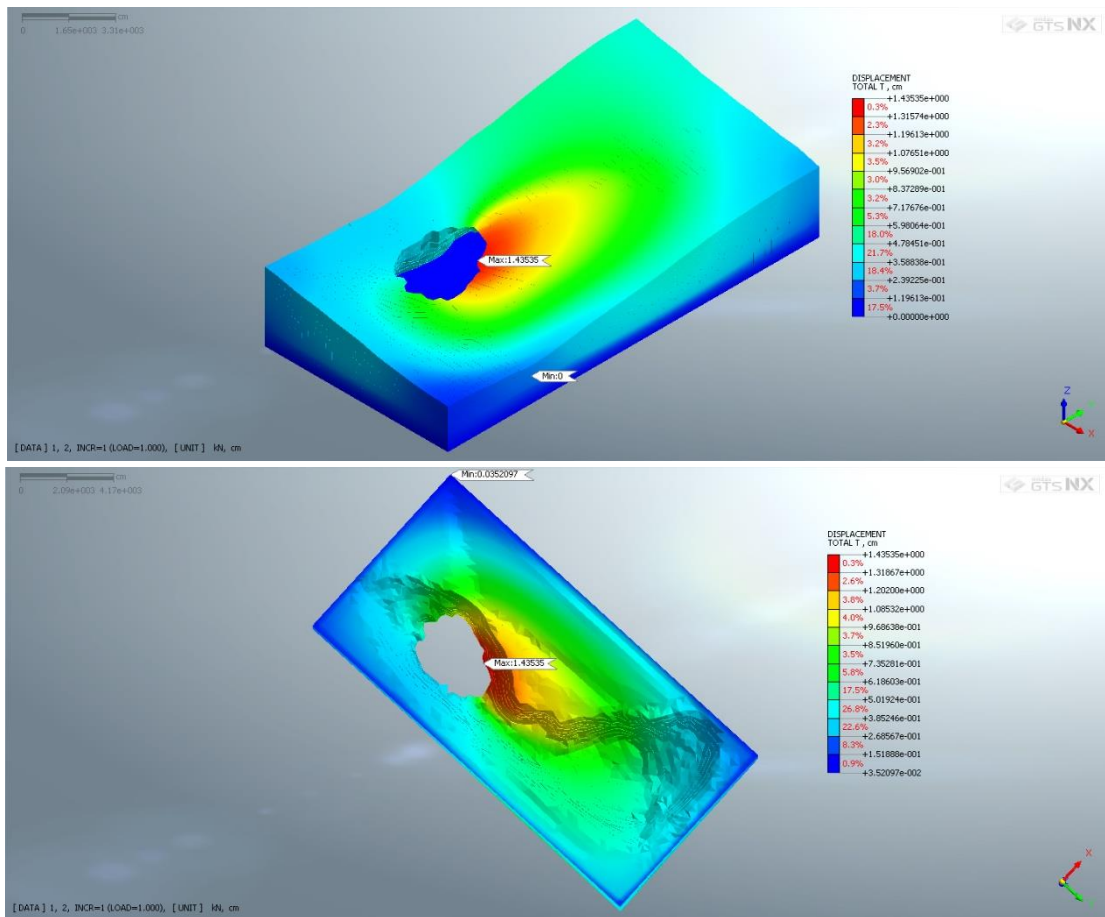
4.2 Αποτελέσματα Construction Stage (Parametric) Analysis

Αφού πραγματοποιήθηκε η SRM και βρέθηκε Συντελεστής Ασφαλείας ίσος με 1.48, υπολογίστηκαν οι απομειωμένες παράμετροι διατμητικής αντοχής από τους τύπους (5, 6) που αναφέρθηκαν στο «3.2.2 Προσδιορισμός παραμέτρων – Mesh Generator». Οι νέες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής είναι:

- $c = 1010.5 \text{ KN/m}^2$
- $\varphi = 33.96^\circ$

Με τις τελικές τιμές των παραμέτρων και κρατώντας σταθερή την τιμή του μέτρου παραμορφωσιμότητας $E = 18 \text{ GPa}$, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση δύο σταδίων κατασκευής με σκοπό την εύρεση της ολικής μετατόπισης των τοιχωμάτων του λιμνοσπηλαιού Μελισάνης πριν την αστοχία και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που έδωσαν οι αρχικές παράμετροι από το κριτήριο Hoek – Brown σε σχέση με τις απομειωμένες. Οι ολικές μετατοπίσεις που προέκυψαν από τα δύο παραμετρικά στάδια, όπως φαίνεται και παρακάτω, αναφέρονται στην παραμόρφωση που λαμβάνει το σπήλαιο πριν αστοχήσει.

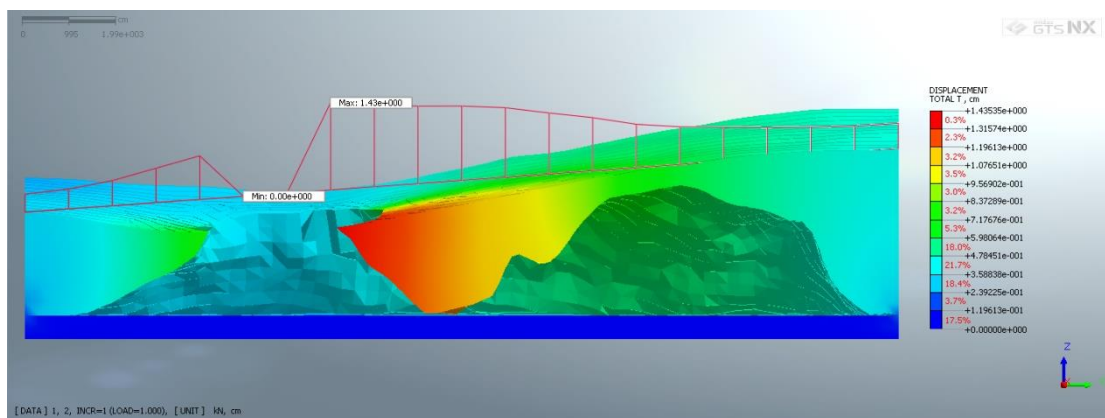
Στο πρώτο στάδιο, με βάση τις αρχικές παραμέτρους πριν την απομείωση της βραχομάζας, η ολική μετατόπιση στο ΣΧΗΜΑ 4.4 έχει ως μέγιστη τιμή τα 1.43 cm στο ΒΑ άκρο της φυσικής εισόδου με ένα εύρος της τάξης των 0.96 – 1.43 cm, μηδενική τιμή στο κατώτερο μέρος του λιμνοσπηλαιού και εύρος τιμών από 0.03 – 0.85 cm στην ευρύτερη επιφάνεια αυτού.



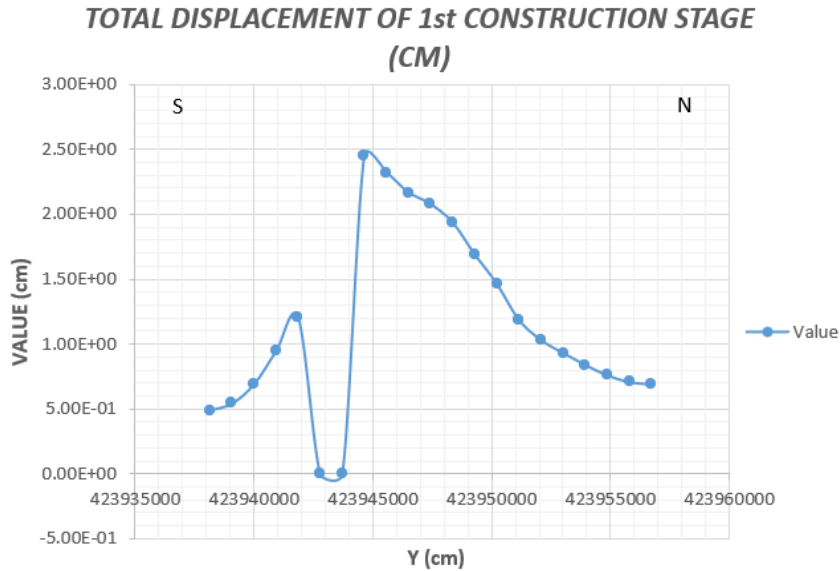
ΣΧΗΜΑ 4.4 ΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Σε τομή που εξετάστηκε με προσανατολισμό N-B (ΣΧΗΜΑ 4.5) με σκοπό να περνάει από τα σημεία των μέγιστων μετατοπίσεων, κατασκευάστηκε διάγραμμα μετατόπισης – Υ άξονα (ΣΧΗΜΑ 4.6) από το οποίο πάραθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Στις συντεταγμένες [(20441.470, 423942.779) – (20441.458, 423943.709)] (m) η παραμόρφωση είναι μηδενική, καθώς αντιπροσωπεύουν την φυσική είσοδο του λιμνοσπηλαιου,
- Στις συντεταγμένες [(20441.446, 423944.639) – (20441.434, 423945.568)] (m) παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή ολικής μετατόπισης στα 2.46 cm, ενώ όσο κινούμαστε προς τα Β η μετατόπιση ελαττώνεται έως τα 0.6 cm.

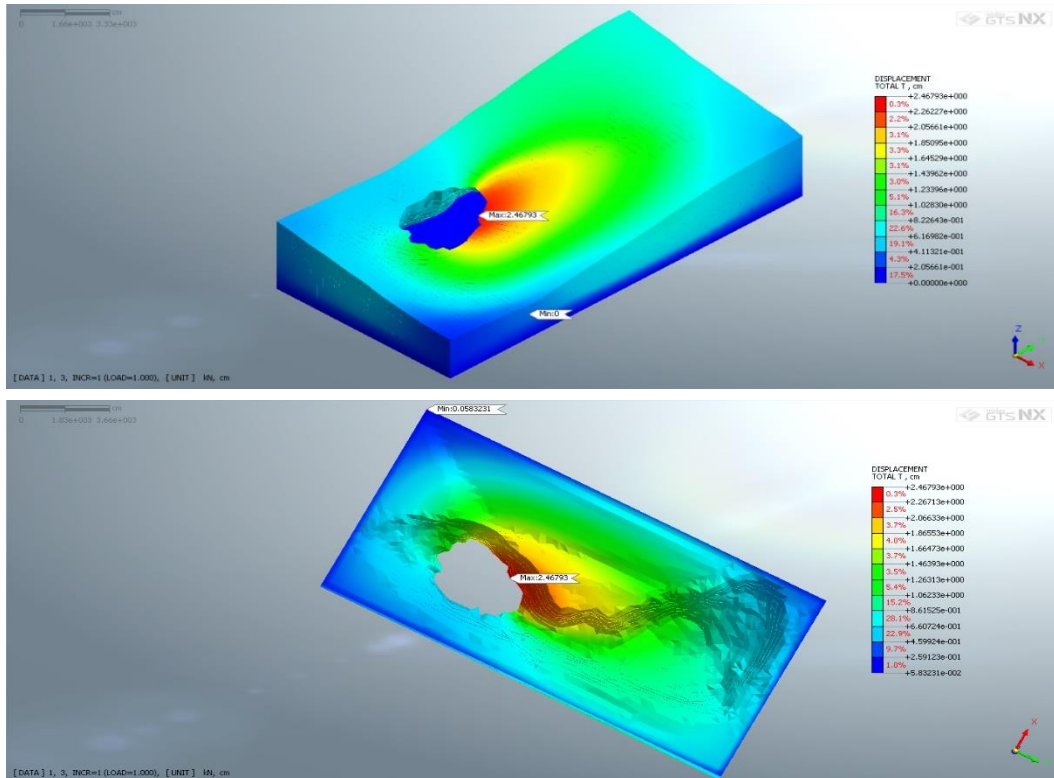


ΣΧΗΜΑ 4.5 ΤΟΜΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

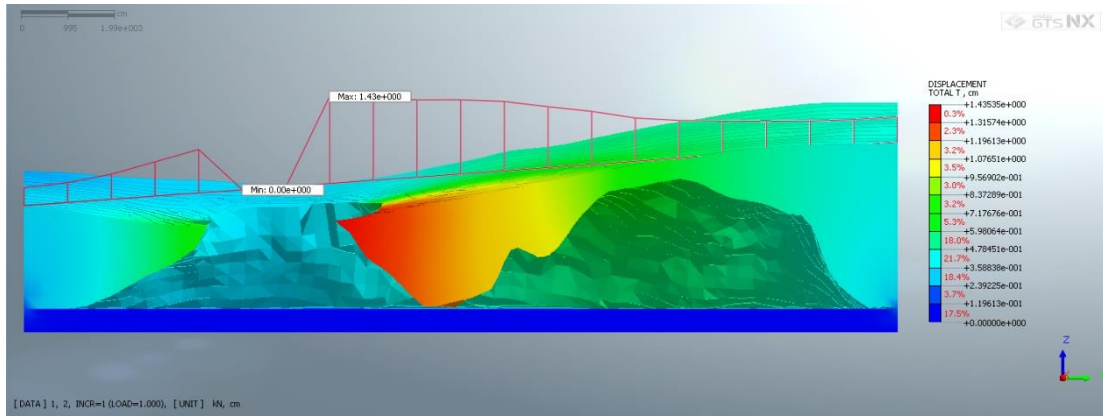


ΣΧΗΜΑ 4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ - Υ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ N-B ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Αντίθετα στο ΣΧΗΜΑ 4.7 που αποτελεί το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης με τις απομειωμένες παραμέτρους, η μέγιστη τιμή της μετατόπισης ανέρχεται στα 2.46 cm στην ΒΑ πλευρά της φυσικής εισόδου, ενώ μηδενική τιμή παρατηρείται στο κατώτερο μέρος του λιμνοσπηλαίου. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της SRM, φαίνεται πως με την σταδιακή απομείωση των παραμέτρων της βραχομάζας, η παραμόρφωση έχει αυξηθεί τόσο στην ΒΑ πλευρά των τοιχωμάτων της φυσικής εισόδου με τιμές από 1.64 – 2.46 cm όσο και στην ευρύτερη επιφάνεια του μηχανικού μοντέλου με τιμές από 0.05 – 1.66 cm., άρα συμπεραίνεται ότι η παραμόρφωση έχει αυξηθεί σε όλα τα σημεία του μοντέλου συγκριτικά.

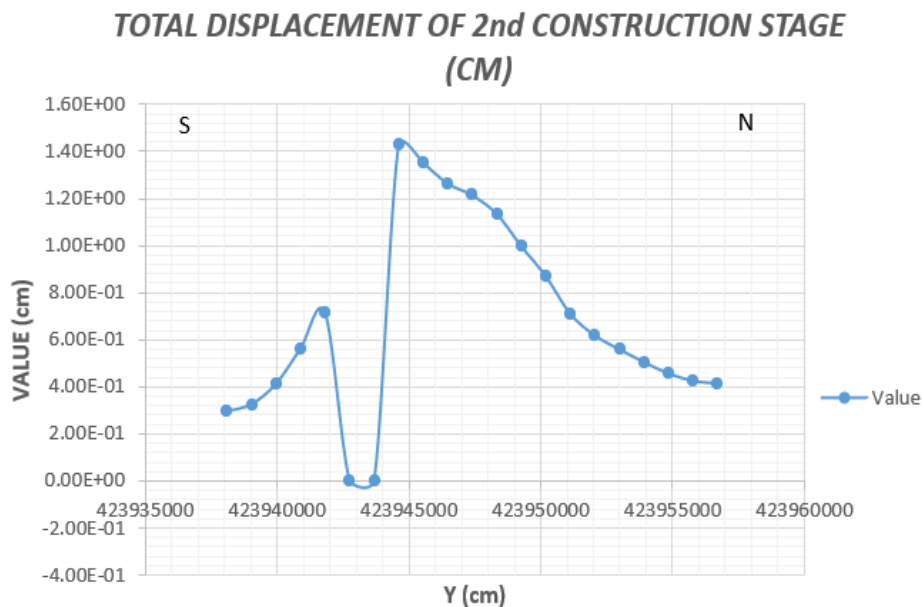


ΣΧΗΜΑ 4.7 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΜΟHR-COULOMB



ΣΧΗΜΑ 4.8 ΤΟΜΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ ΚΑΤΑ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΤΑΔΙΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Σε τομή λοιπόν που κατασκευάστηκε σε ίδιο προσανατολισμό για το δεύτερο στάδιο με τις απομειωμένες παραμέτρους (ΣΧΗΜΑ 4.8), φαίνεται ότι σε σύγκριση με το πρώτο στάδιο της παραμετρικής ανάλυσης όπου ίσχυαν οι αρχικές παράμετροι από το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown, η τιμή της μέγιστης μετατόπισης ανέβηκε κατά 1 cm στις ίδιες συντεταγμένες ενώ η μικρότερη τιμή της επιφανείας κατά 0.02 cm (ΣΧΗΜΑ 4.9).



ΣΧΗΜΑ 4.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ - Υ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ N-B ΓΙΑ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

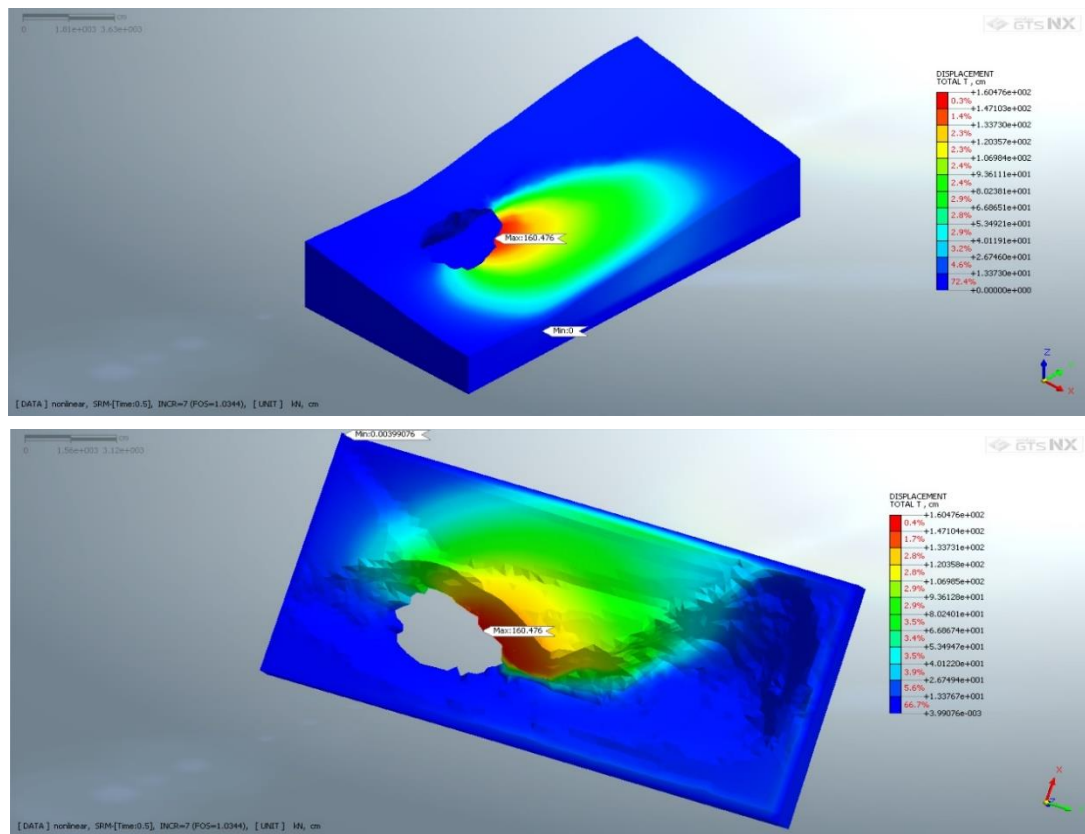
4.3 Αποτελέσματα της Ανάλυσης Ιστορικού Χρόνου για την εδαφική επιτάχυνση της Κεφαλληνίας

Σε επόμενο βήμα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του μηχανικού μοντέλου σε συνθήκες εδαφικής επιτάχυνσης. Το νησί της Κεφαλληνίας έχει υπαχθεί στην σεισμική ζώνη ΙΙΙ από τον ΕΑΚ, η οποία θεωρεί ότι οι κατασκευές που γίνονται πρέπει να μελετώνται και να αντέχουν σε οριζόντια δύναμη στο διάστημα $0.24g$ ($\approx 240 \text{ cm/sec}^2$) έως $0.36g$ ($\approx 360 \text{ cm/sec}^2$), όπως αναφέρθηκε και στο «1.4.1 Σεισμικές ζώνες της Ελλάδας». Αφού λοιπόν δημιουργήθηκαν το φάσμα απόκρισης και η κυματομορφή από την Method of Seismic Intensity Type I όπως αναλύθηκε στο «3.3.3 Ανάλυση Ιστορικού Χρόνου (Time History Analysis)», διαμορφώθηκε μία χρονοσειρά διάρκειας 0.5 sec, από την οποία βρέθηκαν οι Συντελεστές Ασφαλείας σε κάθε περίπτωση. Οι χρόνοι που επιλέχθηκαν ήταν:

- $t=0.01 \text{ sec}$, όπου ακόμα ισορροπεί το μοντέλο, συνεπώς αναμένεται να ισχύουν οι συνθήκες της ανάλυσης SRM,
- $t=0.1 \text{ sec}$, όπου το μηχανικό μοντέλο έχει αρχίσει να παραμορφώνεται σύμφωνα με την εδαφική επιτάχυνση της σεισμικής ζώνης της Κεφαλληνίας,
- $t=0.5 \text{ sec}$, όπου πλέον έχει λάβει τη μέγιστη παραμόρφωση.

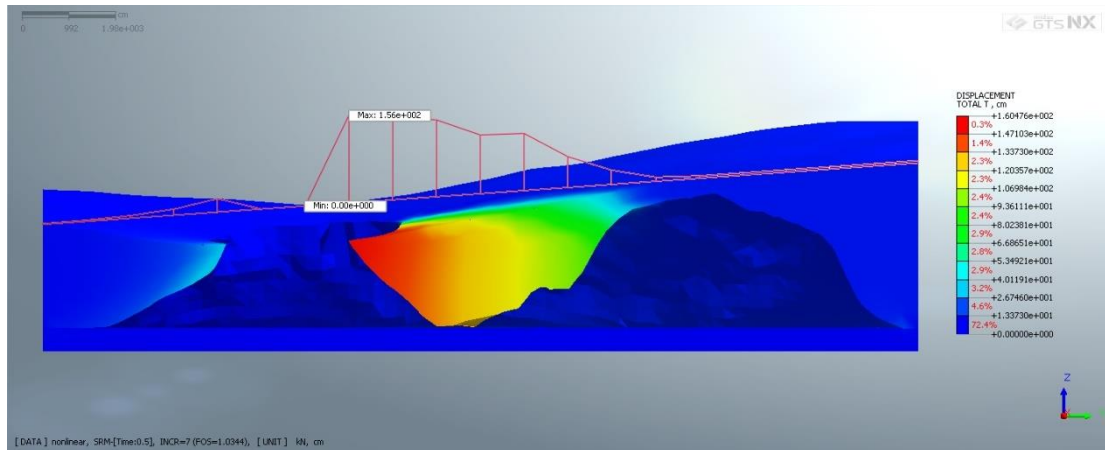
Για $t=0.01 \text{ sec}$, ο Συντελεστής Ασφαλείας που προκύπτει είναι ίσος με $SF=1.74$, συνεπώς πληροί την προϋπόθεση του $SF=1.4$ σε στατικές συνθήκες και το σπήλαιο ισορροπεί.

Για $t=0.1 \text{ sec}$, ο Συντελεστής Ασφαλείας ελαττώνεται στο 1.15, όμως είναι υψηλότερος από τον $SF=1.0$ που ισχύει σε συνθήκες σεισμικής δόνησης, συνεπώς το σπήλαιο βρίσκεται ξανά σε ισορροπία.

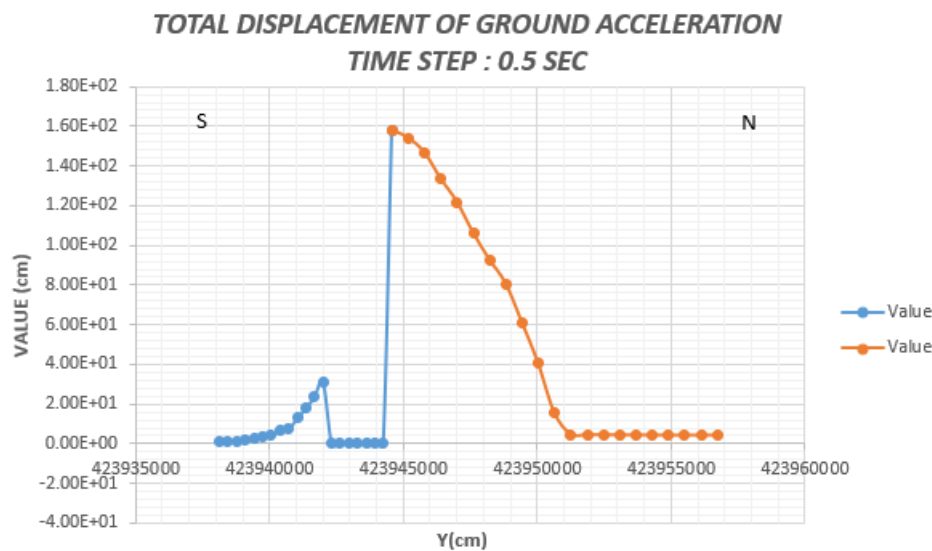


ΣΧΗΜΑ 4.10 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ

Το χρονικό στιγμιότυπο $t=0.5 \text{ sec}$ ($SF= 1.03 > 1.0$) όπου ξανά ισορροπεί το σπῆλαιο, θεωρείται το τέλος της χρονοσειράς. Η περιοχή της αστοχίας που διακρίνεται μετά από αυτό το χρονικό στιγμιότυπο λαμβάνει τις μέγιστες παραμορφώσεις / ολικές μετατοπίσεις. Στο ΣΧΗΜΑ 4.10 είναι εμφανής η συσώρευση των υψηλότερων τιμών ολικής μετατόπισης στο ΒΑ τμήμα της φυσικής εισόδου του λιμνοσπηλαίου. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης (αστοχία) αγγίζει τα 160 cm και βρίσκεται στην ίδια περιοχή που ανέδειξε και η ανάλυση SRM.



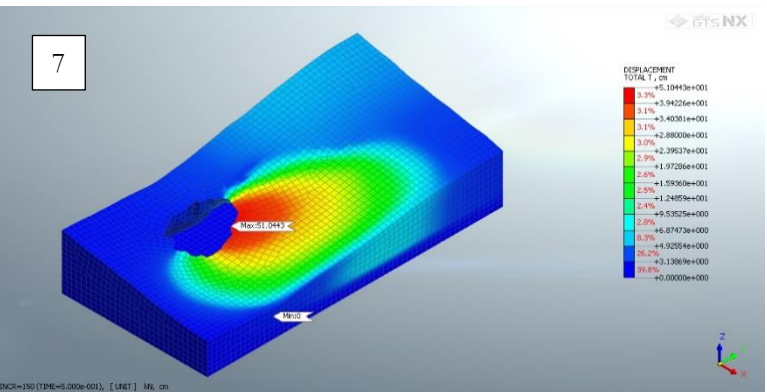
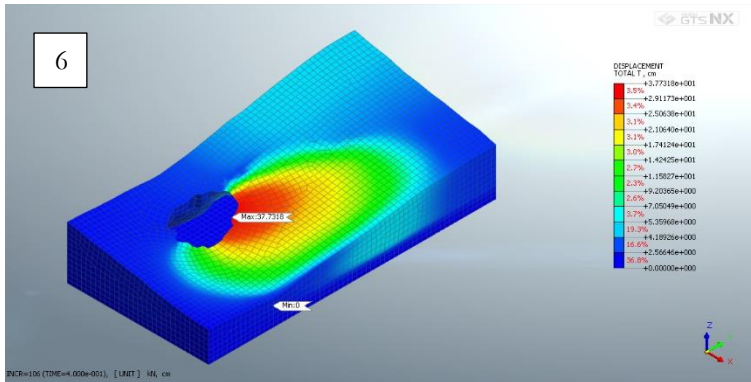
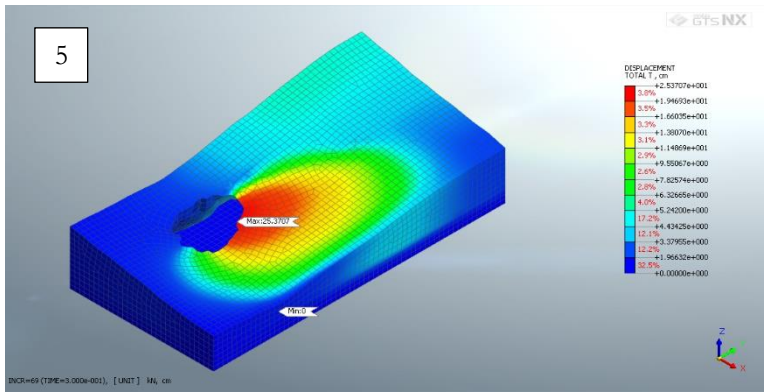
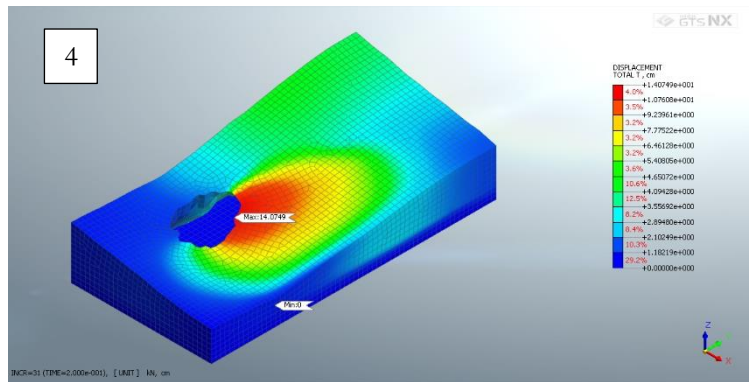
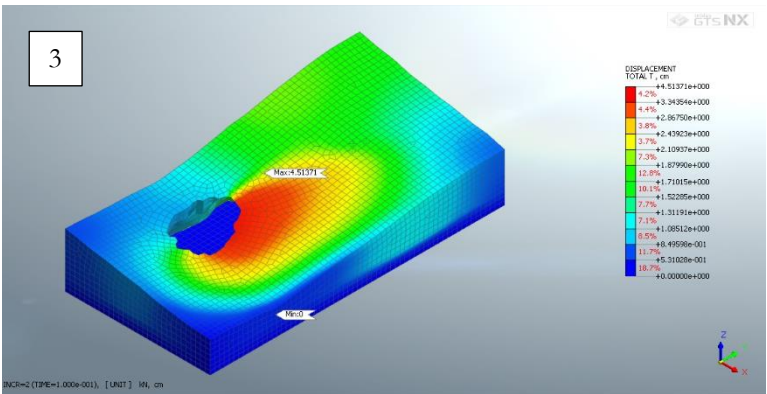
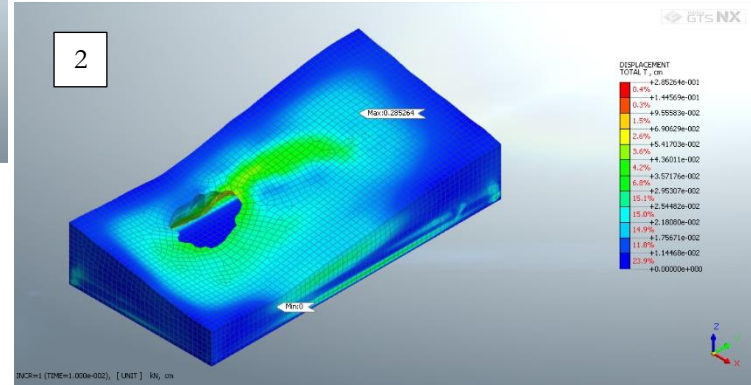
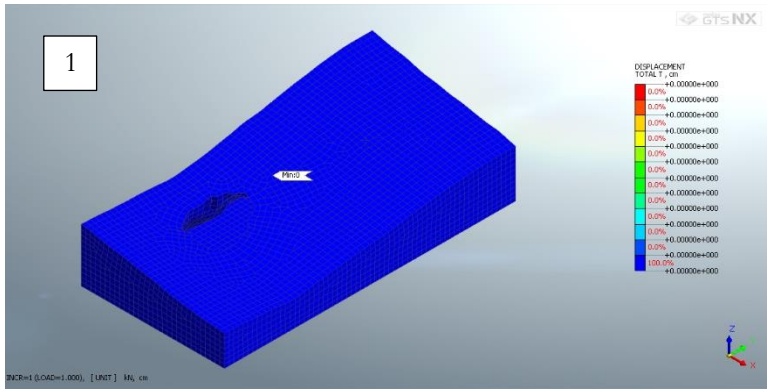
ΣΧΗΜΑ 4.11 ΤΟΜΗ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ N-B ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ $t=0.5 \text{ SEC}$



ΣΧΗΜΑ 4.12 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ - Υ ΑΞΟΝΑ ΓΙΑ $t=0.5 \text{ SEC}$

Στο διάγραμμα που δημιουργήθηκε (ΣΧΗΜΑ 4.12), από τα αποτελέσματα της τομής (ΣΧΗΜΑ 4.11), παρατηρείται μία μικρή αύξηση έως 31 cm όσο κινούμαστε προς την φυσική είσοδο (όπου η μετατόπιση είναι μηδενική) και μία απότομη αύξηση στα 160 cm στα ΒΑ τοιχώματα της φυσικής εισόδου του λιμνοσπηλαίου. Η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται όσο κινούμαστε προς το Β άκρο του μοντέλου έως τα 4 cm, συνεπώς είναι διακριτή η περιοχή της μέγιστης παραμόρφωσης με συντεταγμένες [(20441.578, 423944.581) – (20441.420, 423951.260)].

Σε μία γενικότερη χρονοσειρά μικρότερων διαστημάτων, παρουσιάζεται στο ΣΧΗΜΑ 4.13 η αστοχία που υπέστη το μηχανικό μοντέλο και η τελική κατάληξη στην ολική μετατόπιση της τάξης των 50 cm.



ΣΧΗΜΑ 4.13 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ 0.01-0.5 SEC

4.4 Αποτελέσματα της Ανάλυσης Ιστορικού Χρόνου για τις σεισμικές δονήσεις του 2014

Από τις αναλύσεις ιστορικού χρόνου (Time History Analysis) που πραγματοποιήθηκαν για τις 2 σεισμικές δονήσεις του 2014, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα όσον αφορά την ευστάθεια των τοιχωμάτων του λιμνοσπηλαίου.

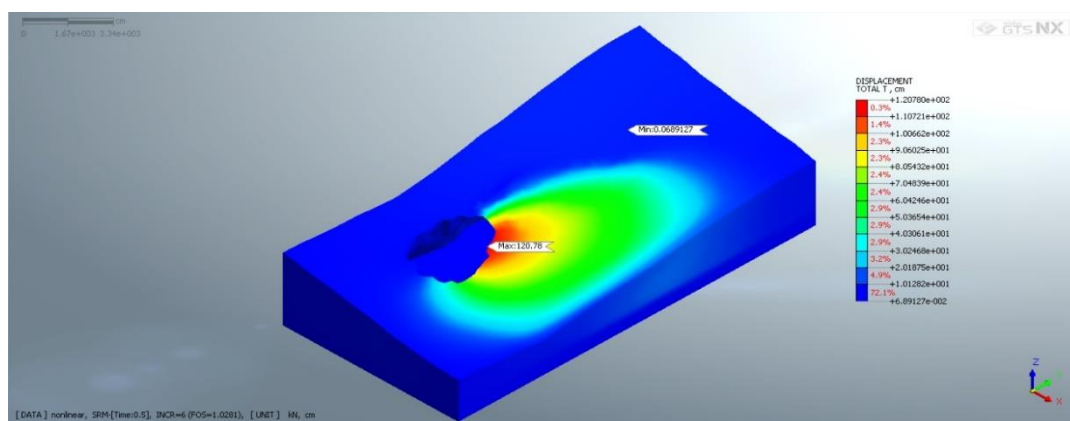
4.4.1 Σεισμική δόνηση στις 26 Ιανουαρίου του 2014

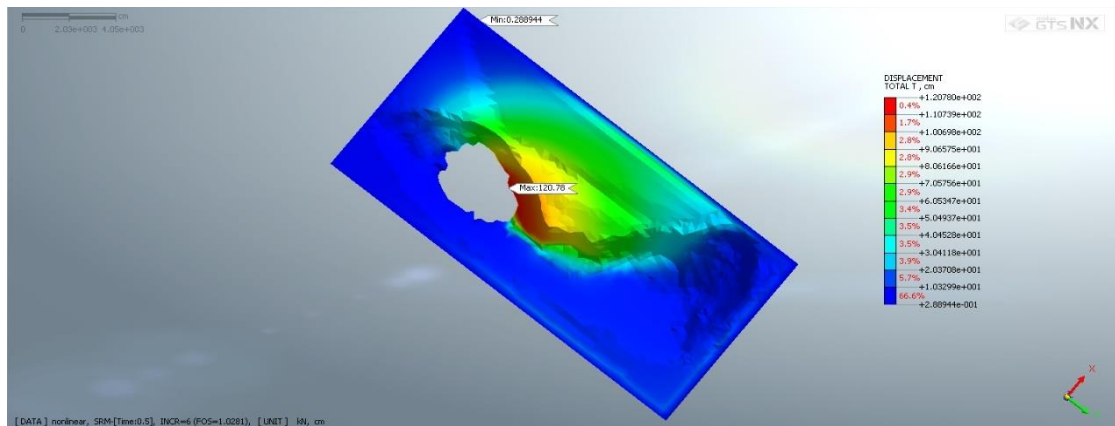
Με την ήδη διαμορφωμένη χρονοσειρά διάρκειας 0.5 sec, βρέθηκε η παραμόρφωση και ο Συντελεστής Ασφαλείας του μηχανικού μοντέλου στα χρονικά διαστήματα 0.01 sec, 0.1 sec και 0.5 sec.

Για το διάστημα 0.01 sec, το οποίο αποτελεί το αρχικό στάδιο παραμόρφωσης, το μηχανικό μοντέλο εγκαταλείπει τις στατικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, ο Συντελεστής Ασφαλείας βρίσκεται στα 1.74, ίσος με αυτόν της ανάλυσης για την εδαφική επιτάχυνση, συνεπώς το μοντέλο ισορροπεί.

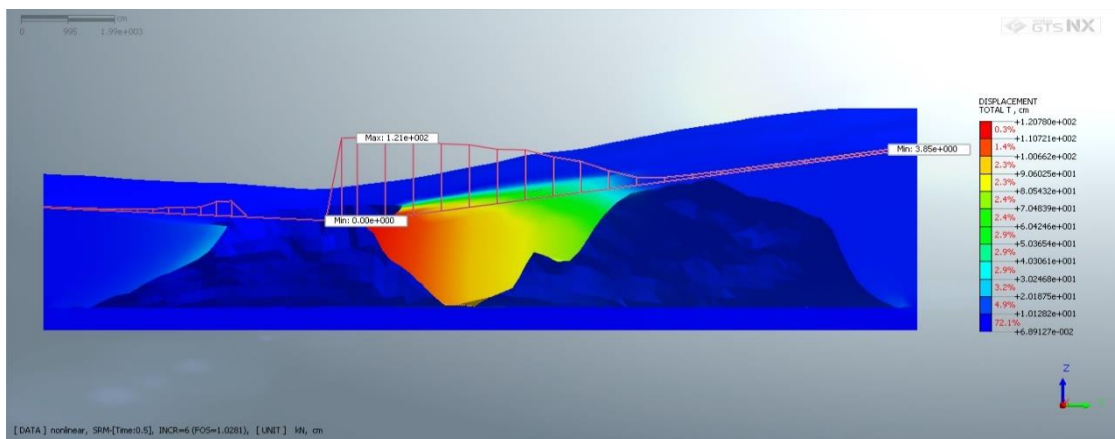
Για το διάστημα 0.1 sec, όπου το μηχανικό μοντέλο έχει εισέλθει πλέον σε καθεστώς παραμόρφωσης και ο SF ισούται με 1.15, ξεκινάει μία συσσώρευση υψηλών τιμών μετατόπισης στο ΒΑ τμήμα της φυσικής εισόδου και συνεχίζεται έως τα 0.5 sec (ΣΧΗΜΑ 4.14). Αυτό το γεγονός υποδεικνύει την αδύναμη ζώνη του λιμνοσπηλαίου, η οποία έγινε διακριτή και στις προηγούμενες αναλύσεις, ενώ αναμένεται να εμφανιστεί ξανά σε επόμενες.

Στο τελικό λοιπόν διάστημα $t=0.5$ sec, όπου έχει επέλθει πλήρης παραμόρφωση στο μηχανικό μοντέλο και ο Συντελεστής Ασφαλείας ισούται με $SF=1.028$, αναδεικνύεται ξανά η ισορροπία του μοντέλου. Μετά τις οριακές συνθήκες, διακρίνεται η μέγιστη μετατόπιση (αστοχία) στο ΒΑ τμήμα της φυσικής εισόδου του λιμνοσπηλαίου, η οποία ανέρχεται στα 120.78 cm, ενώ στην υπόλοιπη επιφάνεια αυτού υπάρχει ειθθητική μείωση της μετατόπισης η οποία φτάνει την ελάχιστη τιμή των 0.28 cm. Όσον αφορά το κάτω μέρος του λιμνοσπηλαίου, παρουσιάζει ελάχιστη παραμόρφωση της τάξης των 0.06 cm. Για αυτό το στάδιο, μελετήθηκε η τομή προσανατολισμού N-B (ΣΧΗΜΑ 4.15) αλλά και το διάγραμμα (ΣΧΗΜΑ 4.16), και βρέθηκε ότι στις συντεταγμένες (20441.391,423944.809) (m) η ολική μετατόπιση κατά την αστοχία αγγίζει τα 120 cm, ενώ όσο κινούμαστε προς τον Β παρουσιάζεται μία μείωση της παραμόρφωσης έως την ελάχιστη τιμή των 3.85 cm.



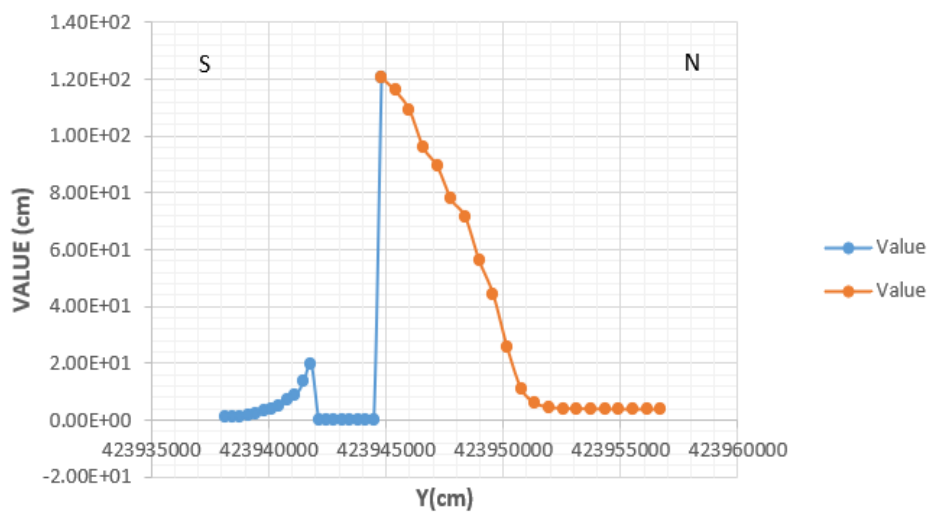


ΣΧΗΜΑ 4.14 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ $T=0.5$ SEC ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΟΝΗΣΗ ΤΟΥ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ



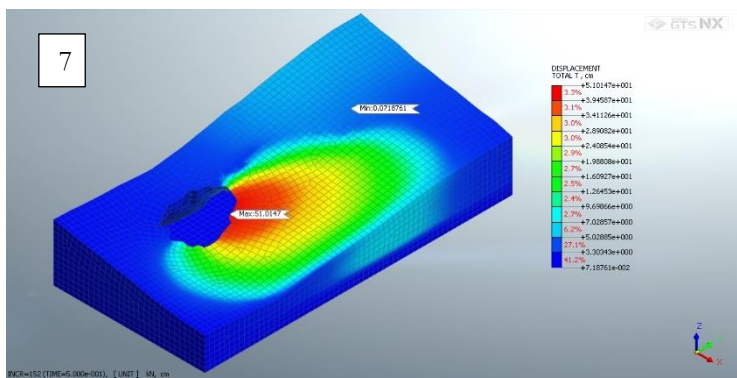
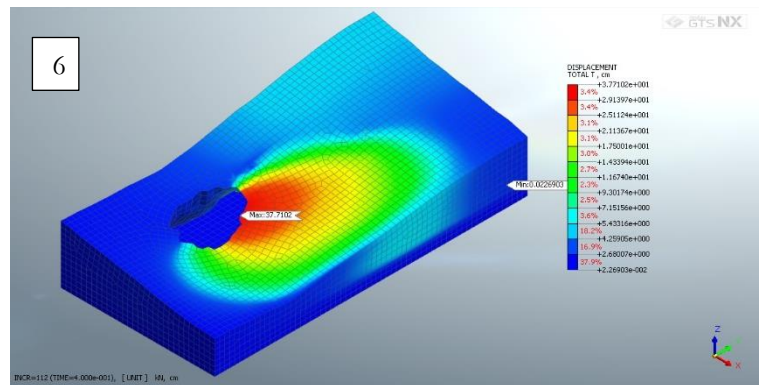
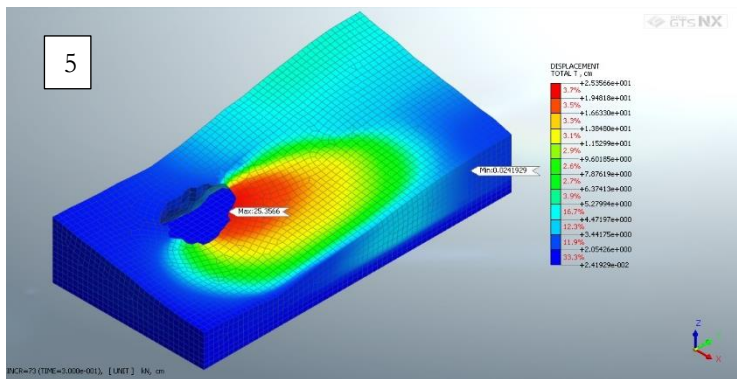
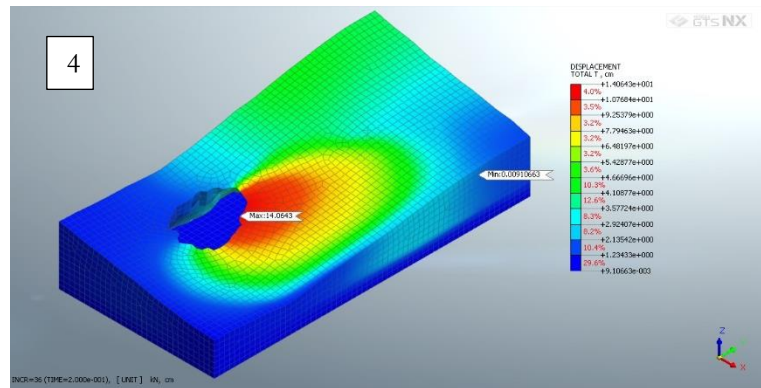
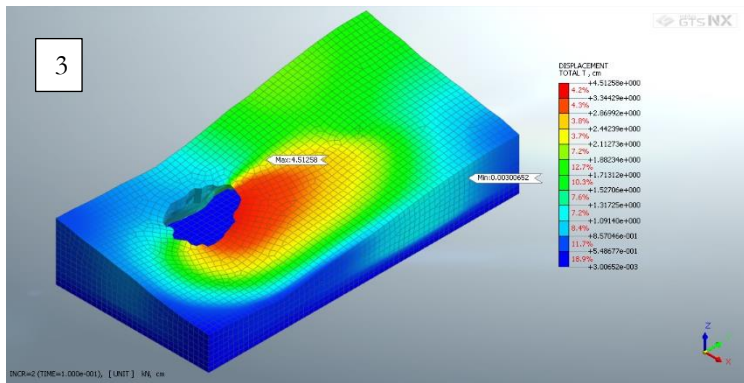
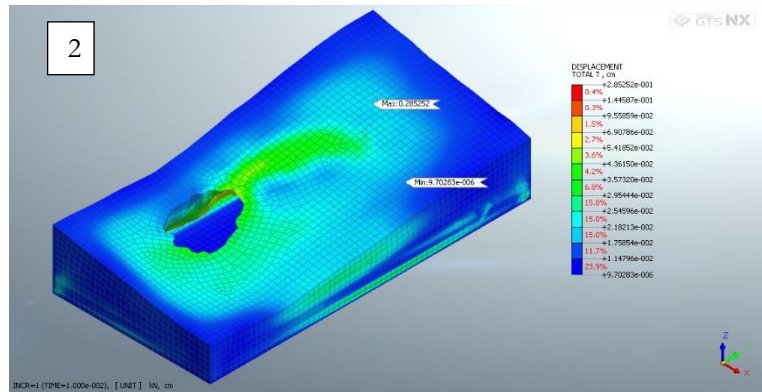
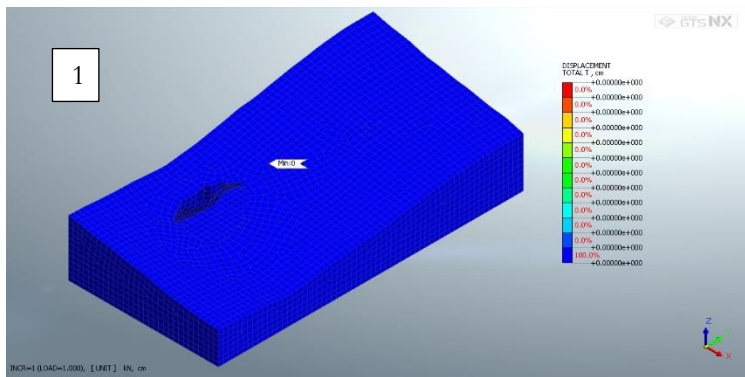
ΣΧΗΜΑ 4.15 ΤΟΜΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ N-B ΓΙΑ $t = 0.5$ SEC

TOTAL DISPLACEMENT OF EARTHQUAKE 26JAN2014 TIME STEP :0.5 SEC



ΣΧΗΜΑ 4.16 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ N-B ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ $t=0.5$ SEC

Με μια γενικότερη ανάλυση στη χρονοσειρά για την σεισμική δόνηση του Ιανουαρίου, όπως δίνεται στο ΣΧΗΜΑ 4.17, η παραμόρφωση κατά το πέρασμα του χρόνου συγκεντρώνεται στο δυνητικά επικίνδυνο προς κατάρρευση σημείο της οροφής του λιμνοσπηλαιίου, με ολικές μετατοπίσεις που ξεπερνούν τα 50 cm.



ΣΧΗΜΑ 4.17 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ 0.01-5 SEC ΜΕ ΒΗΜΑ ΑΝΑ 0.1 SEC

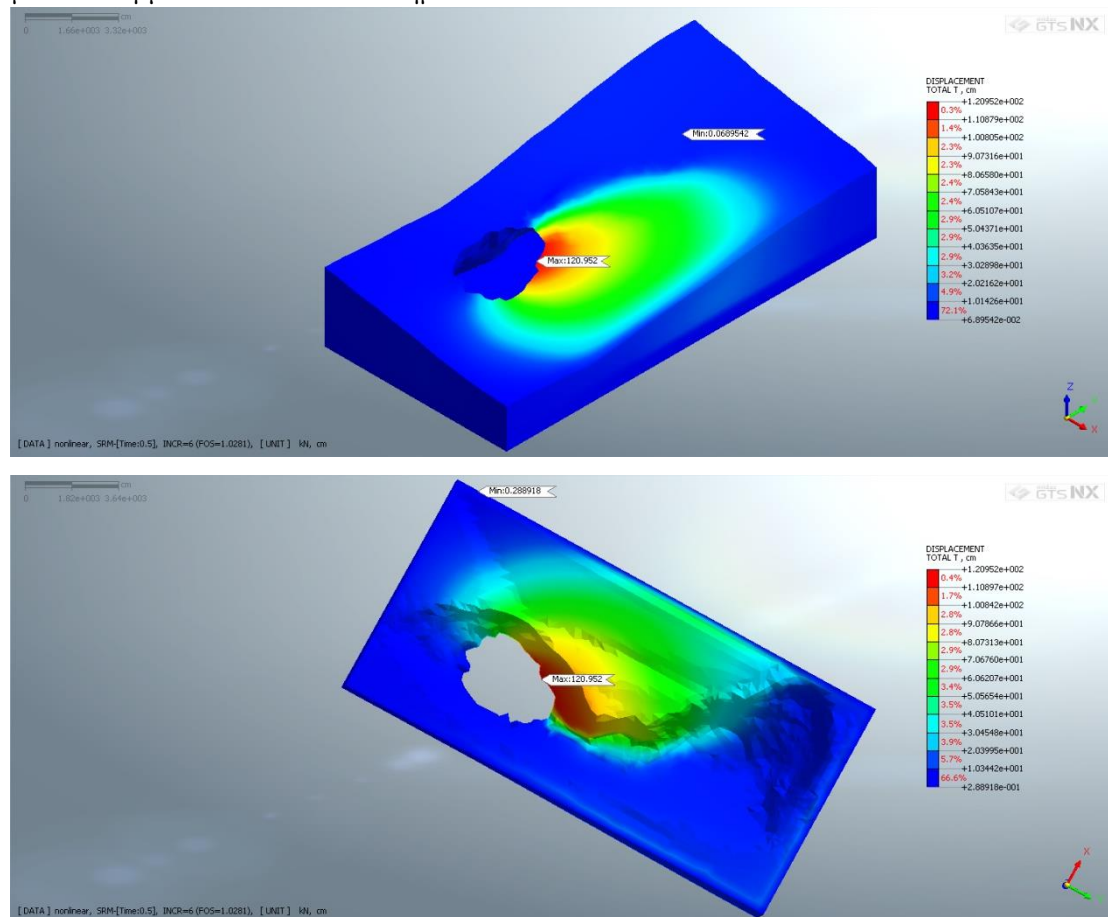
4.4.2 Σεισμική δόνηση στις 3 Φεβρουαρίου του 2014

Η ίδια χρονοσειρά ακολουθήθηκε και για τον δεύτερο κατά σειρά σεισμό, του Φεβρουαρίου, του οποίου το μέγεθος ήταν 6.0 R, όμως το εστιακό το βάθος ήταν μικρότερο, συνεπώς αναμένεται ελάχιστα μειωμένος Συντελεστής Ασφαλείας. Τα διαστήματα για τα οποία βρέθηκαν τα αποτελέσματα είναι κατά σειρά 0.01 sec, 0.1 sec και 0.5 sec.

Για το αρχικό χρονικό διάστημα των 0.01 sec, παρόλο που το καθεστώς παραμόρφωσης έχει παρόμοια εικόνα με την αντίστοιχη του σεισμού του Ιανουαρίου, ο Συντελεστής Ασφαλείας έχει ελαττωθεί κατά 0.02, δηλαδή πλέον ισούται με 1.72. Παρόλα αυτά, το μοντέλο ισορροπεί και δεν διατρέχει οποιοδήποτε κίνδυνο αστοχίας.

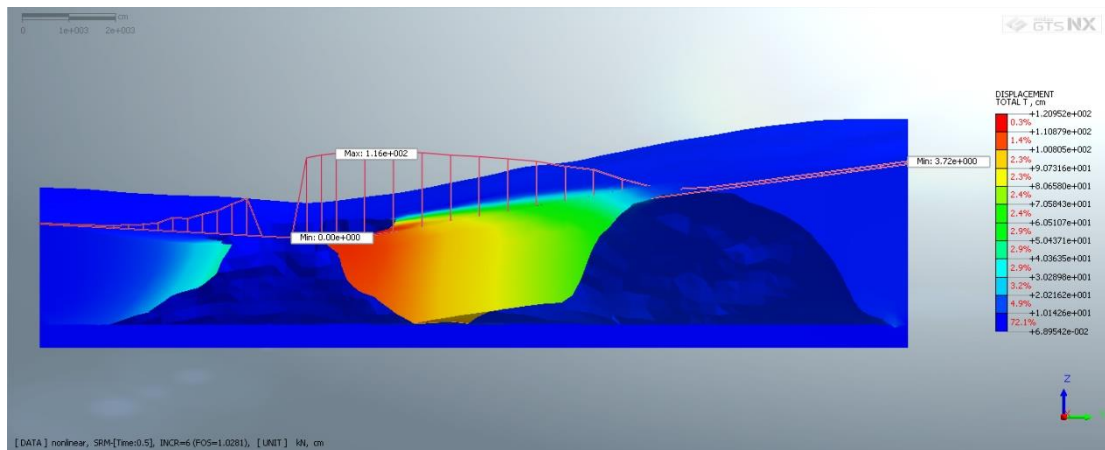
Στο επόμενο στάδιο των 0.1 sec, όπου ο Συντελεστής Ασφαλείας ισούται με 1.15 και η παραμόρφωση έχει αρχίσει να λαμβάνει χώρα, φαίνεται το ίδιο καθεστώς με τον σεισμό του Ιανουαρίου, καθώς το σπήλαιο συνεχίζει στην ισορροπία.

Τέλος, για το διάστημα των 0.5 sec (ΣΧΗΜΑ 4.18), ο Συντελεστής Ασφαλείας αντιστοιχεί σε 1.028, γεγονός που αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης, καθώς είναι μεγαλύτερος από την ελάχιστη τιμή ($SF = 1.0$) που δίνεται κατά τη σεισμική φόρτιση. Κατά την αστοχία ωστόσο, όπου έχει επέλθει πλήρης παραμόρφωση από τη σεισμική δόνηση και η χωρική εξάπλωση της παραμόρφωσης έχει συγκεντρωθεί στο δυνητικά επικίνδυνο ΒΑ τμήμα της φυσικής εισόδου, η μέγιστη ολική μετατόπιση φτάνει τα 120 cm στο σημείο αυτό.

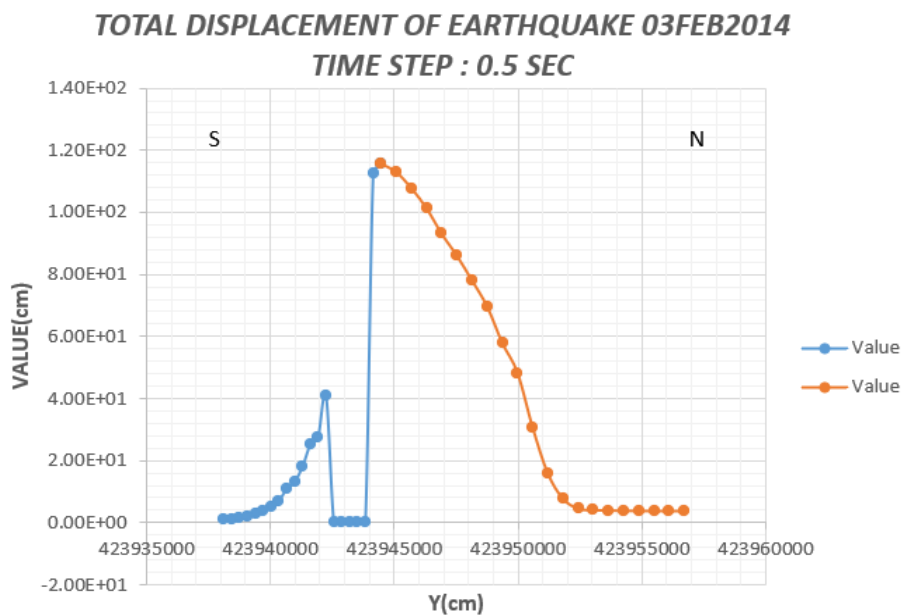


ΣΧΗΜΑ 4.18 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ $t=0.5$ SEC

Στην τομή (ΣΧΗΜΑ 4.19) και εν συνεχεία στο διάγραμμα (ΣΧΗΜΑ 4.20), φαίνεται πως οι μεγαλύτερες τιμές ολικών μετατοπίσεων (αστοχία) βρίσκονται στις συντεταγμένες [(20441.833, 423944.481) – (20441.859, 423949.990)] (m) και κατανέμονται από 48 – 120 cm, ενώ οι ελάχιστες τιμές δεν πέφτουν κάτω από 0.28 cm στην επιφάνεια του λιμνοσπηλαίου.

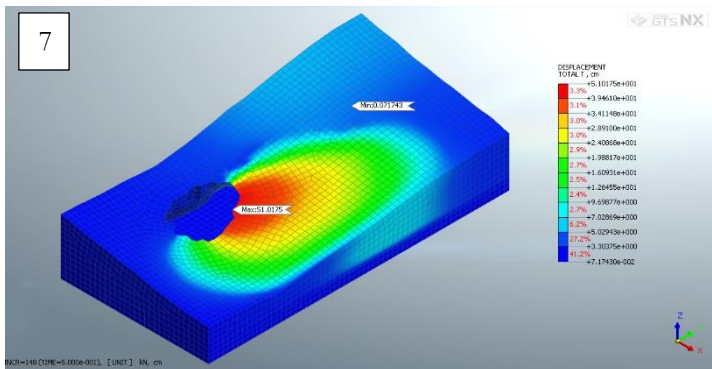
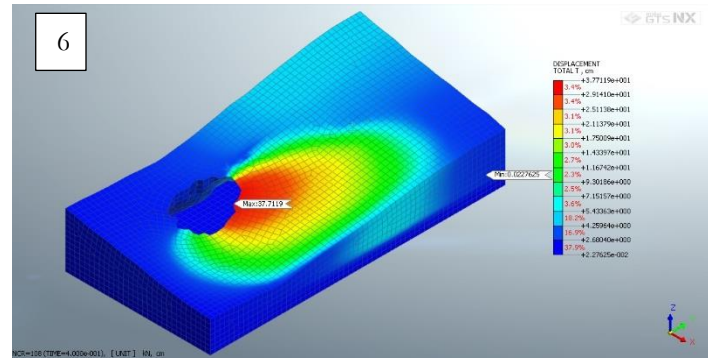
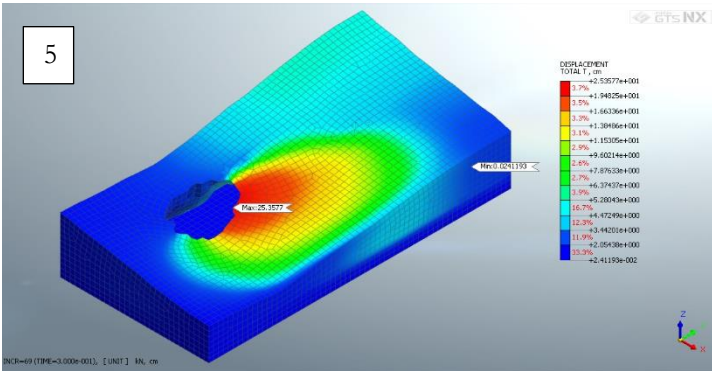
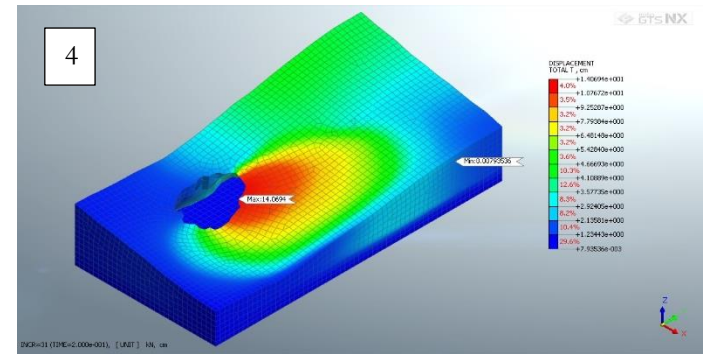
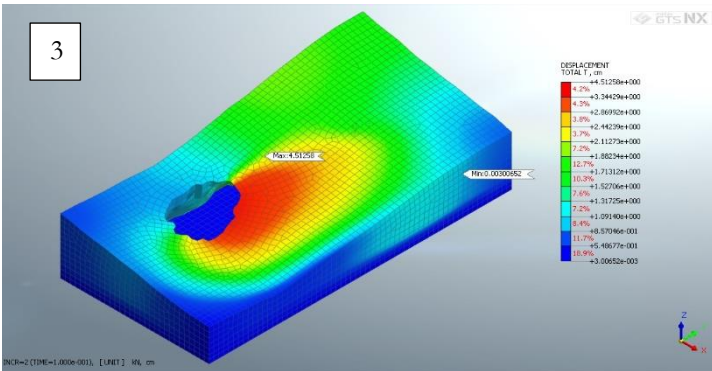
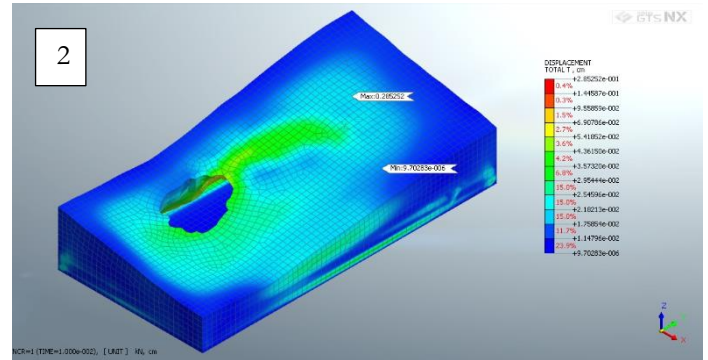
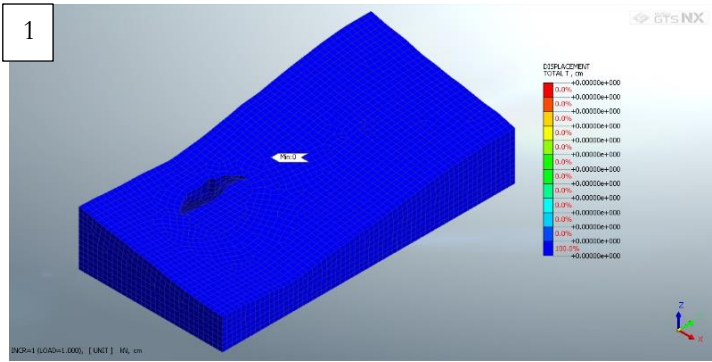


ΣΧΗΜΑ 4.19 ΤΟΜΗ ΣΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ Ν - Β ΓΙΑ ΤΕΛΙΚΟ ΧΡΟΝΟ $t=0.5$ SEC



ΣΧΗΜΑ 4.20 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ – Υ ΑΞΟΝΑ Ν – Β ΓΙΑ ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Συμπερασματικά, η χρονοσειρά για την σεισμική δόνηση του Φεβρουαρίου, παρουσιάζεται στο ΣΧΗΜΑ 4.21 με βήμα ανά 0.1 sec, με σκοπό να διακριθούν οι χωρικές και χρονικές μεταβολές των ολικών μετατοπίσεων κατά τη διάρκεια της αστοχίας.



ΣΧΗΜΑ 4.21 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ $t = 0.01 - 0.5 \text{ SEC}$

5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ UNWEDGE

Σε συνέχεια του λογισμικού Midas GTS NX, όπου το μηχανικό μοντέλο παρουσιάστηκε και αναλύθηκε ως συνεχές μέσο με απομειωμένη βραχομάζα μέσω GSI, το λογισμικό UnWedge θα χρησιμοποιηθεί με σκοπό να αναδείξει τις περιπτώσεις κατάρρευσης τεμαχών της εσωτερικής οροφής του λιμνοσπηλαίου λόγω των ασυνεχειών. Συνεπώς θα πραγματοποιηθεί νέα ανάλυση του μηχανικού μοντέλου με τη διαφορά ότι πλέον θα λειτουργεί ως ασυνεχές μέσο.

Το UnWedge είναι ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης και απεικόνισης ευστάθειας για υπόγειες ανασκαφές σε βράχους που περιέχουν διασταυρούμενες δομικές ασυνέχειες. Οι Συντελεστές Ασφαλείας υπολογίζονται για δυνητικά ασταθείς σφήνες και οι απαιτήσεις στήριξης μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους μοτίβων. Το UnWedge δημιουργεί ένα μηχανικό μοντέλο, πραγματοποιώντας ανάλυση συντελεστών ασφαλείας, με στόχο την διεξαγωγή και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Το UnWedge χρησιμοποιεί μια νέα μηχανή ανάλυσης βασισμένη στη θεωρία των Goodman and Shi (1985), η οποία περιλαμβάνει την ικανότητα ενσωμάτωσης της προκαλούμενης τάσης γύρω από την εσκαφή και την επίδραση στη ευστάθεια, νέα μοντέλα αντοχής όπως των Barton and Bandis (2017), και την ικανότητα βελτίωσης της κλιμάκωσης και του μεγέθους των σφηνών.

5.1 Αναλύσεις σφηνοειδούς ολισθήσης με το λογισμικό UnWedge

Σκοπός της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι ο έλεγχος ασφάλειας έναντι ολισθήσης σφηνών της φυσικής εισόδου και των τοιχωμάτων του λιμνοσπηλαίου στην υφιστάμενη κατάσταση. Οι γεωμετρικοί συνδυασμοί επίπεδων ασυνεχειών με τις ελεύθερες επιφάνειες του λιμνοσπηλαίου δημιουργούν δυνητικά επισφαλείς σφήνες.

Στο λογισμικό Unwedge εισάγονται:

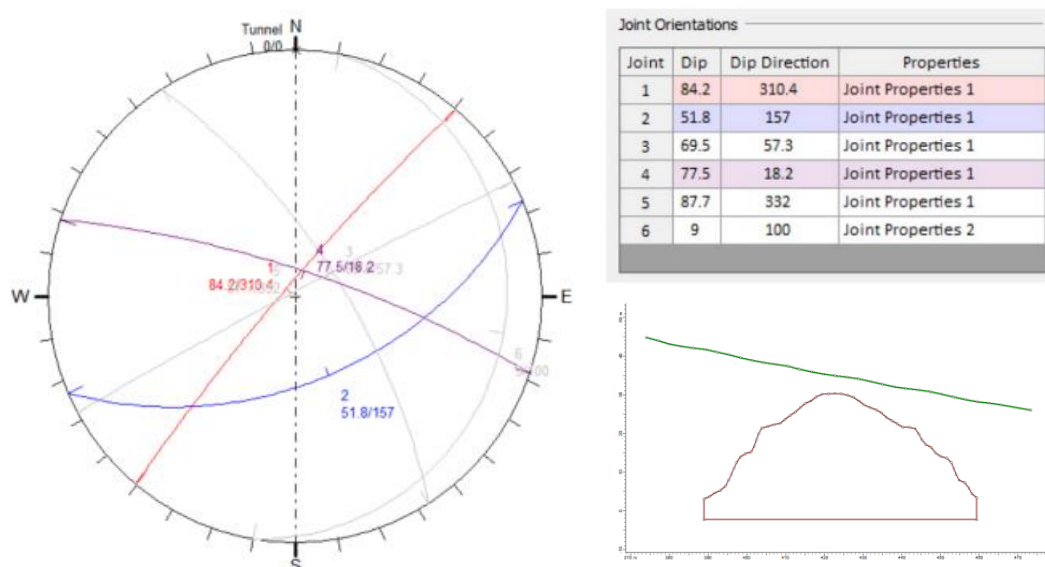
- Η γεωμετρία αντιπροσωπευτικής διατομής του λιμνοσπηλαίου,
- Τα στοιχεία του προσανατολισμού του μοντέλου και των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που αποτυπώθηκαν και
- Η διατμητική αντοχή αυτών.

Το πρόγραμμα βασίζεται στη θεώρηση ότι οι σφήνες ορίζονται από 3 επίπεδα ασυνεχειών και φέρουν μόνο το ίδιο το βάρος τους. Η επίλυση παρέχει το βάρος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σφήνας καθώς και τον Συντελεστή Ασφαλείας έναντι ολισθήσης. Σημειώνεται ότι δεν υπολογίζονται στην ανάλυση διαδοχικές ολισθήσεις σφηνών, αλλά ολισθαίνει μια σφήνα κάθε φορά. Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι οι μετακινήσεις λαμβάνουν χώρα επί των ασυνεχειών και ότι οι σφήνες κινούνται σαν άκαμπτα σώματα χωρίς εσωτερική παραμόρφωση ή ρηγμάτωση. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης των μέτρων αντιστήριξης δίνοντας την αντίστοιχη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας.

Αναλυτικά στο πρόγραμμα εισήχθησαν οι κύριες ασυνέχειες με τους προσανατολισμούς και τις παραμέτρους αντοχής όπως αυτές δόθηκαν στο «2.2 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σπηλαίου» (θεωρώντας το κριτήριο διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb), που αναπαρίστανται σε δίκτυο Schmidt (ΣΧΗΜΑ 5.1) και τα στοιχεία τους δίνονται στον **Πίνακα 3** που ακολουθεί:

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΚΥΡΙΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΜΕ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΙΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

ID	Κλίση dip (°)	Διεύθυνση Κλίσης dip direction (°)	Συνοχή c (KPa)	Γωνία Τριβής φ (°)
F01	84.2	310.4	200	35
F02	51.8	157.0	200	35
F03	69.5	57.3	200	35
F04	77.5	18.2	200	35
F05	87.7	332.0	200	35
F06 (Στρώση)	9.0	100.0	100	33



ΣΧΗΜΑ 5.1 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ SCHMIDT, ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΛΙΜΝΟΣΠΗΛΑΙΟΥ

Εξετάσθηκαν 2 περιπτώσεις φόρτισης για κάθε κατάσταση ελέγχου:

- Κανονικές (στατικές) συνθήκες και
- Συνθήκες σεισμού ($a=0.36$ και $a_h=0.504$ - $a_v=0.252$).

Έγιναν 2 διαφορετικές επιλύσεις σε σχέση με τον καθορισμό της κατεύθυνσης της σεισμικής δύναμης. Στην πρώτη επίλυση επιλέχθηκε η κατεύθυνση της ολισθήσεως για κάθε μεμονωμένη σφήνα με συντελεστή $a=0.36$ ενώ στη δεύτερη εισήχθησαν δύο διαφορετικοί συντελεστές ως προς τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα της διατομής ελέγχου. Η εφαρμογή της σεισμικής δύναμης στην ολισθαίνουσα κατεύθυνση για κάθε σφήνα έδωσε μικρότερους συντελεστές ασφαλείας και ως εκ τούτου επιλέχθηκε σε όλες τις επιλύσεις σεισμικής φόρτισης ως το δυσμενέστερο σενάριο.

Η διατομή υπολογισμού επιλέχθηκε βάσει δυσμενών χαρακτηριστικών αναφορικά με τη γεωμετρία του λιμνοσπηλαίου και τον αναμενόμενο μηχανισμό εκδήλωσης της αστοχίας. Σε όλες τις επιλύσεις δεν προσομοιώθηκαν συνθήκες υδατικής πίεσης εντός των ασυνχειών καθώς στο λιμνοσπήλαιο

εμφανίζονται μόνο κατεισδύοντα όμβρια ύδατα, ενώ παράλληλα όλες οι επιφάνειες ασυνεχειών θεωρήθηκαν επίπεδες και συνεχείς.

Από τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα UnWedge στις υφιστάμενες συνθήκες, διαπιστώθηκαν αρχικά 20 πιθανοί συνδυασμοί ασυνεχειών που δυνητικά μπορεί να προκαλέσουν σφηνοειδείς ολισθήσεις εντός του λιμνοσπηλαίου και δίνονται συνοπτικά στον **Πίνακα 4** με ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας SF= 1.5 για κανονικές συνθήκες. Από αυτούς του συνδυασμούς αξιολογήθηκαν ως ρεαλιστικοί μόνο οι συνδυασμοί και οι σφήνες που δίνονται στον **Πίνακα 5**. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκαν οι συνδυασμοί και οι σφήνες που λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη της στρώσης και που αντιστοιχούν στις πραγματικές θέσεις των κύριων ασυνεχειών, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στο τρισδιάστατο μοντέλο του λιμνοσπηλαίου. Επιπροσθέτως εξετάσθηκε η δυνητικά ασταθής σφήνα, η οποία ορίζεται από τον συνδυασμό κύριων διακλάσειων μεγάλης κλίσης F01/F02/F04 για την δυσμενέστερη περίπτωση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη της στρώσης. Στον **Πίνακα 5** λοιπόν, δίνονται οι πιθανοί συνδυασμοί συστημάτων ασυνεχειών που μπορούν να δώσουν σφηνοειδείς ολισθήσεις, ο συντελεστής ασφαλείας για κάθε συνδυασμό, ο όγκων των τεμαχών και ο τύπος αστοχίας.

5.1.1 Αποτελέσματα για στατικές συνθήκες

Στα σχήματα ΣΧΗΜΑ 5.2 έως ΣΧΗΜΑ 5.7 δίνονται τα σακαριφήματα διατομής ελέγχου με τις σημαντικότερες δυνητικά επισφαλείς σφήνες σε στατικές συνθήκες ενώ στα 5.1.2 έως 5.1.3, δίνονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων σε συνθήκες σεισμού. Οι συντελεστές ασφάλειας είναι στο σύνολό τους υψηλοί (S.F. \geq 1.5) με ελάχιστο Συντελεστή Ασφάλειας για στατικές συνθήκες φόρτισης 1.5 και ελάχιστο Συντελεστή Ασφάλειας για συνθήκες σεισμικής φόρτισης 1.1. Ο δυσμενέστερος συνδυασμός F01/F04/F06 δίνει δυνητικά επισφαλή σφήνα (SF_{στατικές φόρτισης} = 1.5), η οποία εντοπίζεται στην μοναδική περιοχή του δαπέδου που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της λίμνης (ή βραχονησίδα όπως αναφέρεται στο «2.1.1 Γεωμορφολογία σπηλαίου») και έχει δημιουργηθεί από πεσμένους ογκόλιθους.

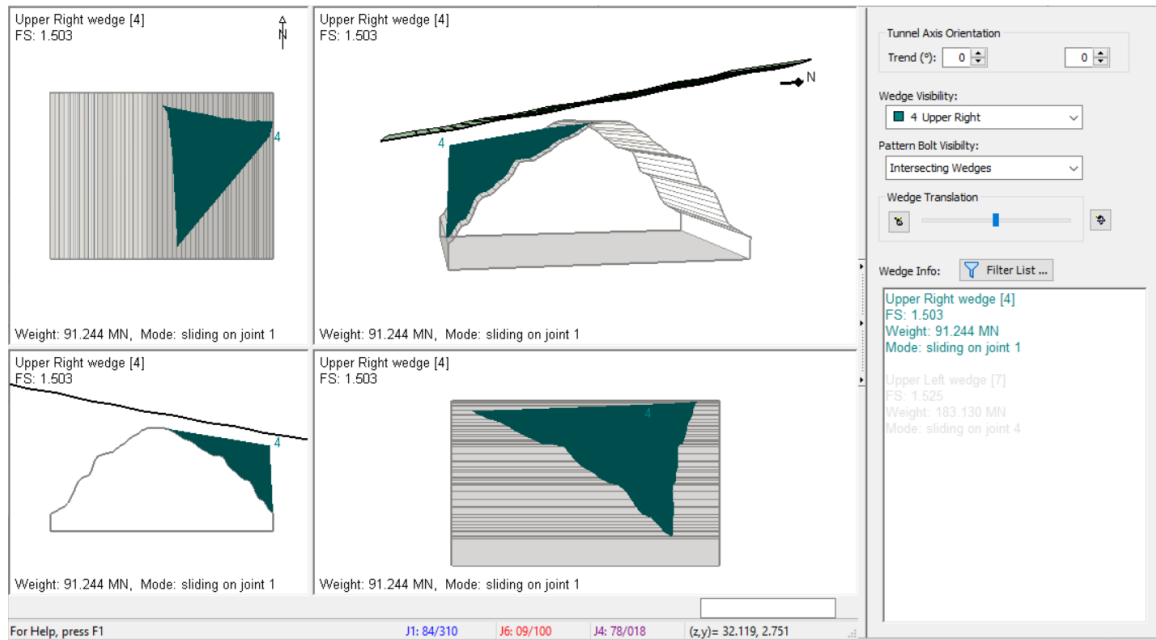
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΔΩΣΟΥΝ ΣΦΗΝΟΕΙΔΕΙΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

α/α	A	B	Γ	SF (στατικές)	Όγκος (m ³)
1	1	4	6	1.503	3379.4
2	1	3	4	1.508	14713.5
3	3	5	6	1.621	2481.4
4	1	3	6	1.784	1875.4
5	3	4	5	1.983	13684.8
6	4	5	6	2.079	6176.0
7	1	3	5	2.295	6771.5
8	3	4	6	2.410	5724.0
9	1	4	5	2.548	6372.2
10	2	3	6	2.761	5326.0

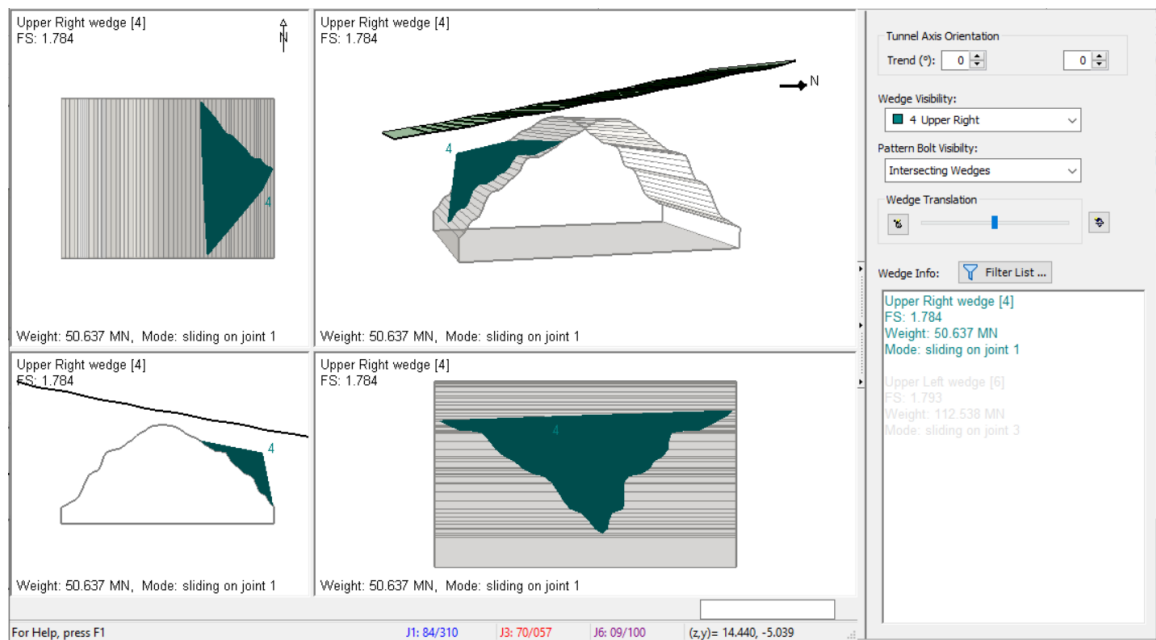
11	1	5	6	3.372	2503.8
12	1	2	3	3.623	1088.3
13	2	3	5	3.677	2446.9
14	2	4	6	3.793	23308.9
15	2	4	5	4.729	1559.3
16	1	2	5	4.759	2112.5
17	1	2	6	5.997	10272.4
18	1	2	4	7.372	221.3
19	2	3	4	14.779	15.9
20	2	5	6	23.227	15090.8

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΠΙΘΑΝΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΔΩΣΟΥΝ ΣΦΗΝΟΕΙΔΕΙΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

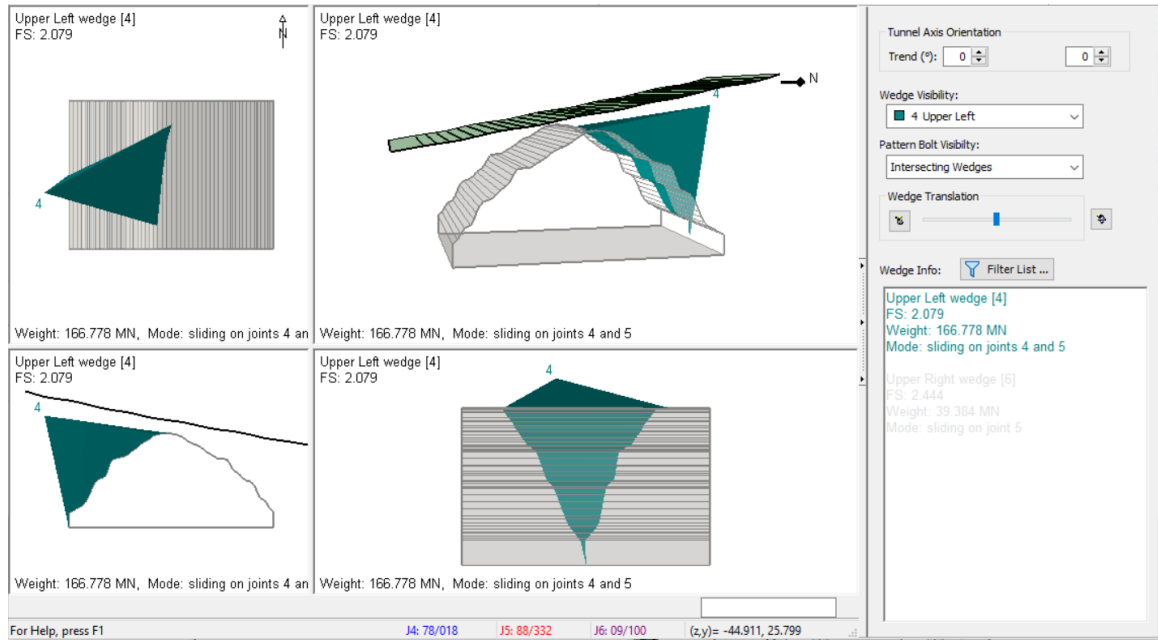
α/α	A	B	Γ	SF (στατικές)	SF (σεισμός)	Όγκος (m³)	Ολίσθηση
1	1	4	6	1.503	1.103	3379.4	J01
4	1	3	6	1.784	1.310	1875.4	J01
6	4	5	6	2.079	1.514	6176.0	J04 και J05
10	2	3	6	2.761	1.848	5326.0	J02 και J03
17	1	2	6	5.997	3.345	10272.4	J01 και J02
18	1	2	4	7.372	6.980	221.3	J01



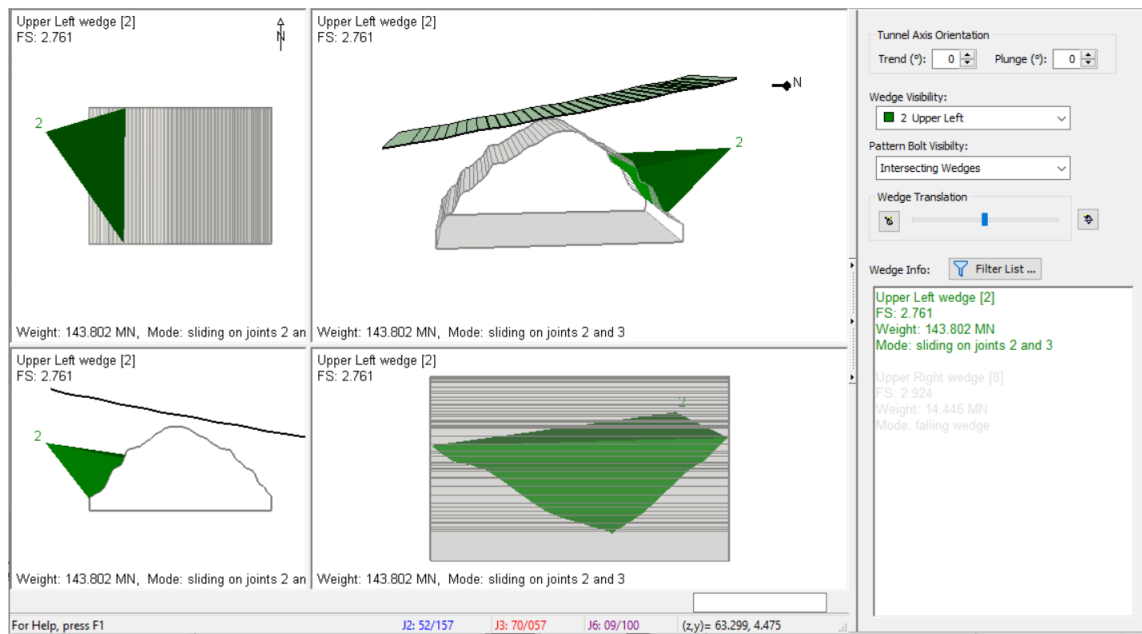
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΛΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F04/F06 ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



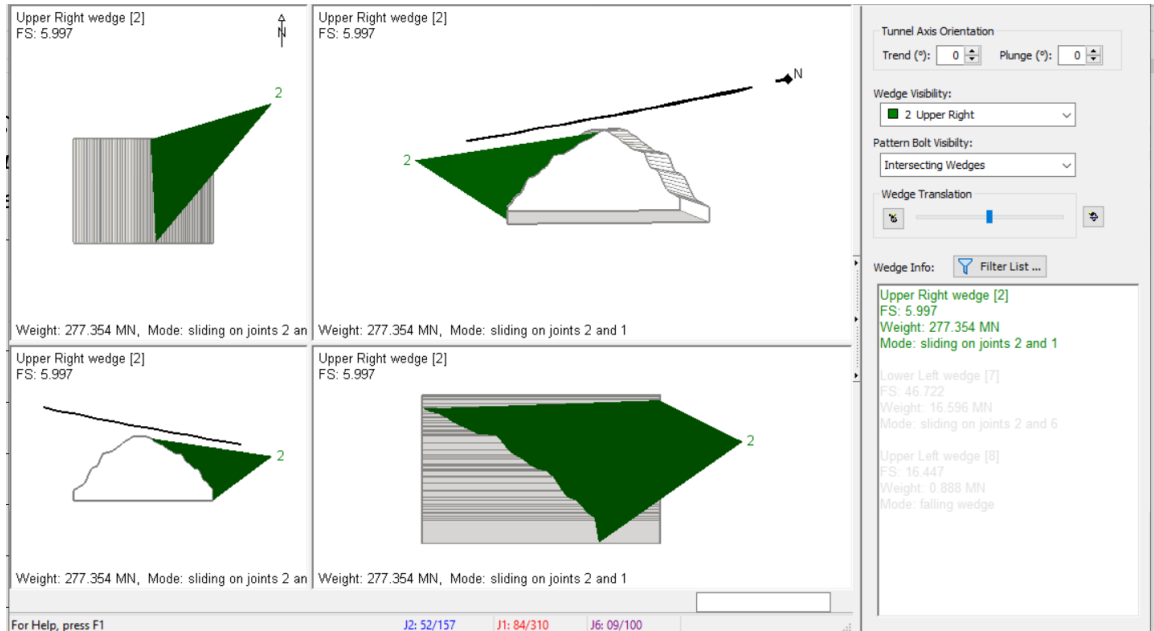
ΣΧΗΜΑ 5.3 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΛΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F03/F06 ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



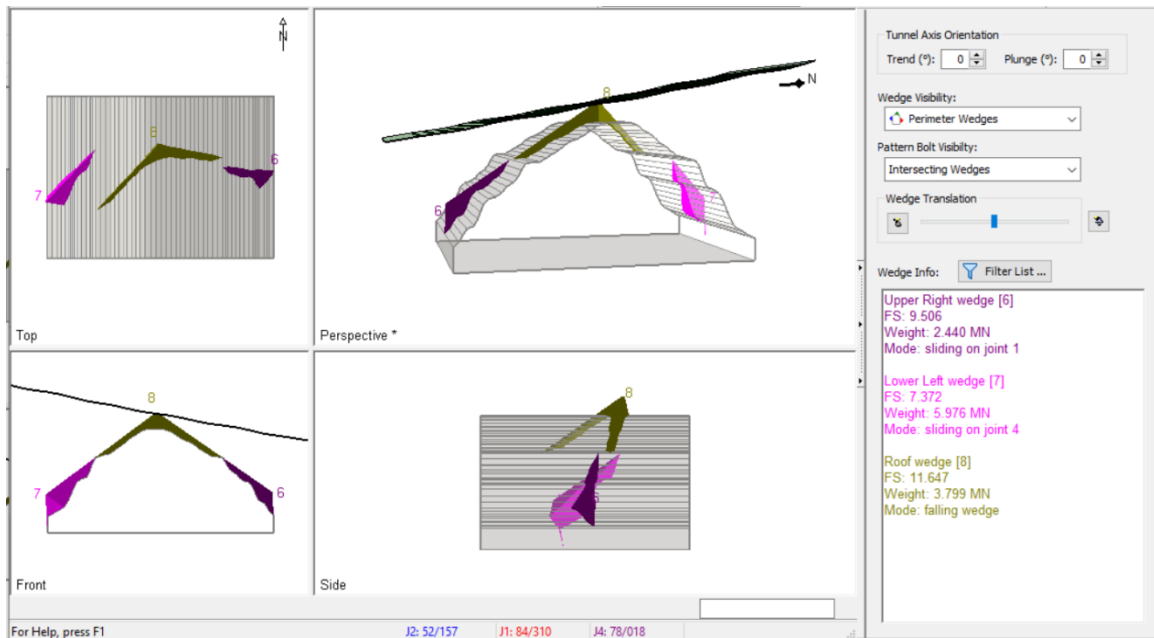
ΣΧΗΜΑ 5.4 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΛΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F04/F05/F06 ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



ΣΧΗΜΑ 5.5 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΛΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F02/F03/F06 ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



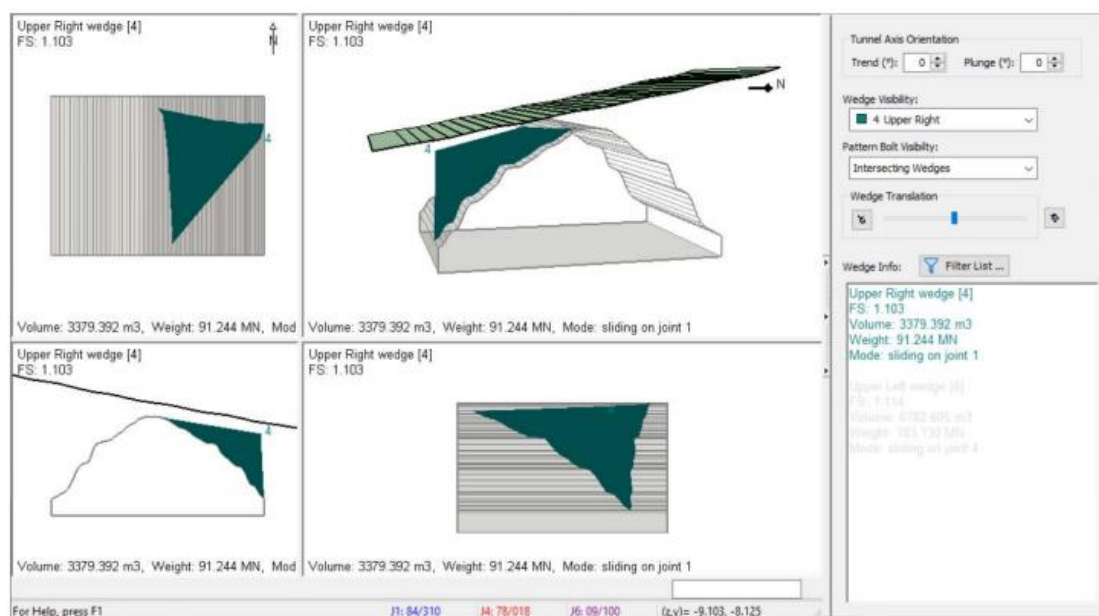
ΣΧΗΜΑ 5.6 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΛΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F02/F06 ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



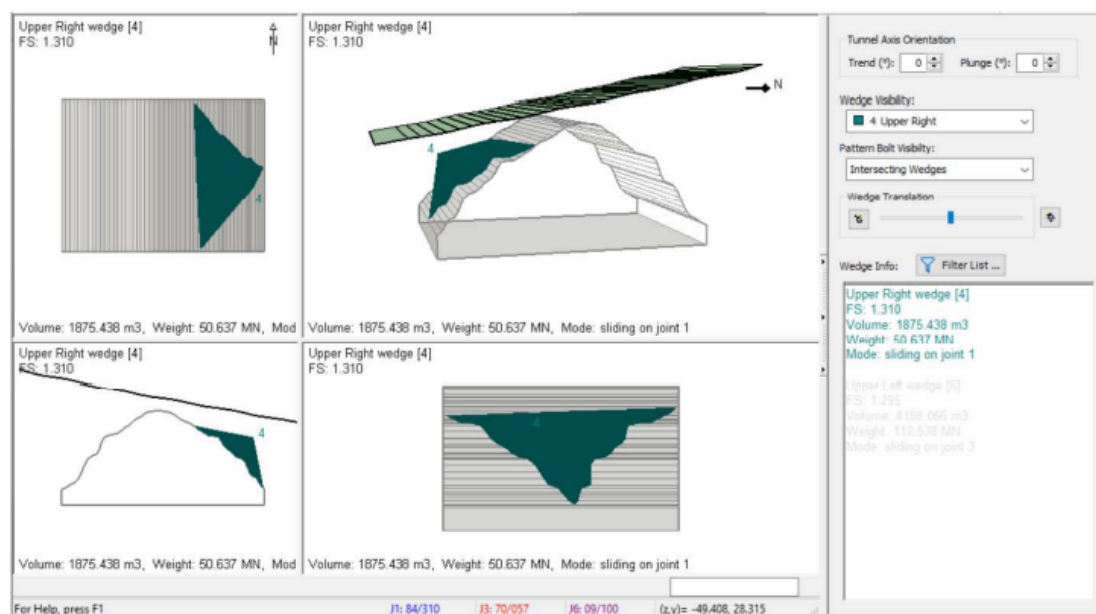
ΣΧΗΜΑ 5.7 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΛΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F02/F04 ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

5.1.2 Αποτελέσματα για συνθήκες σεισμού

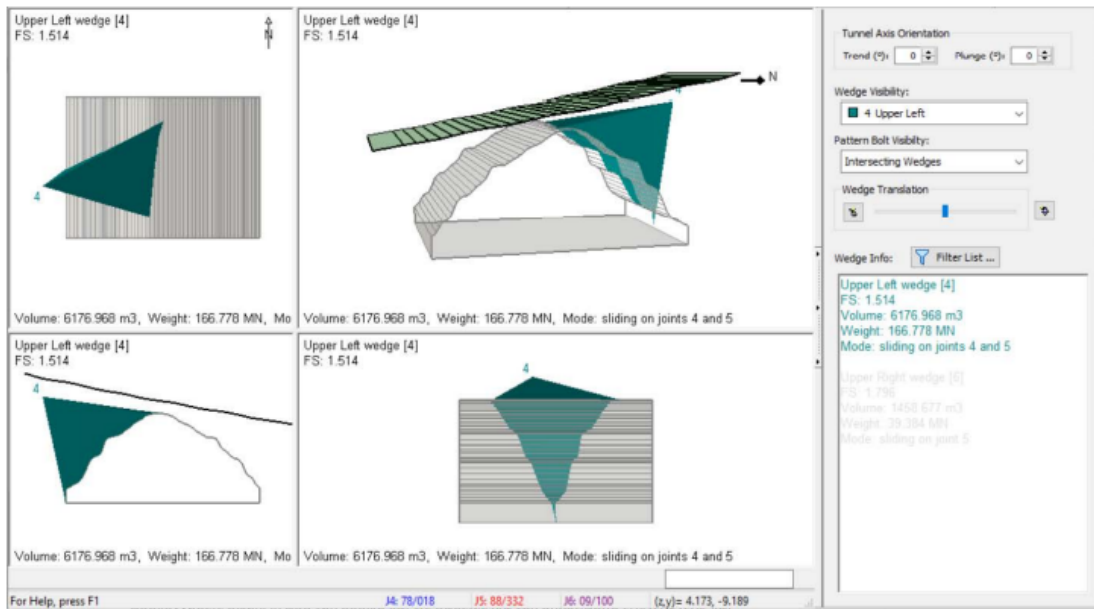
Όσον αφορά τις συνθήκες σεισμικής δόνησης που εξετάστηκαν στο UnWedge, προέκυψαν τα παρακάτω 6 σκαριφήματα μέσω των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5 από τα οποία φαίνεται ξανά πως ο δυσμενέστερος συνδυασμός F01/F04/F06 δίνει δυνητικά επισφαλή σφήνα ($SF_{\text{σεισμικής φόρτισης}} = 1.1$), η οποία εντοπίζεται στην μοναδική περιοχή του δαπέδου που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της λίμνης και χαρακτηρίζεται ως βραχονησίδα.



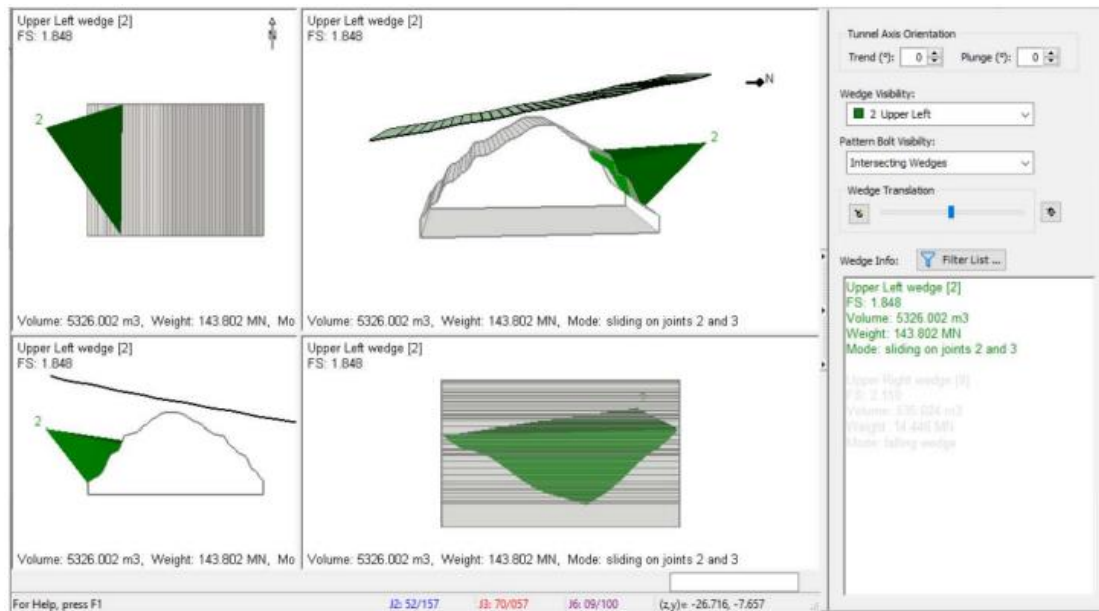
ΣΧΗΜΑ 5.8 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F04/F06 ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕΙΣΜΟΥ



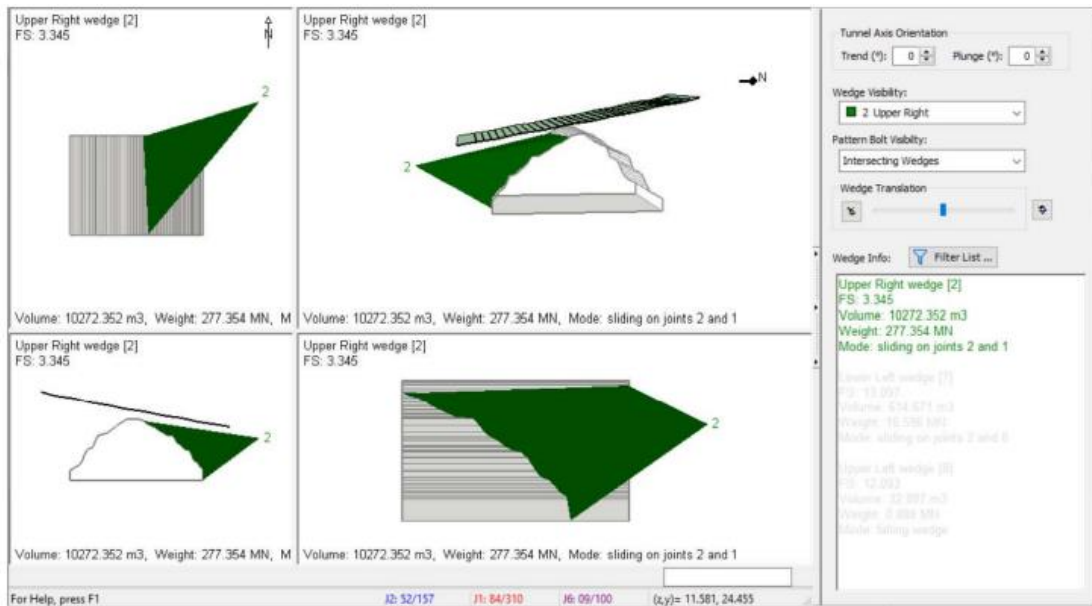
ΣΧΗΜΑ 5.9 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F03/F06 ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕΙΣΜΟΥ



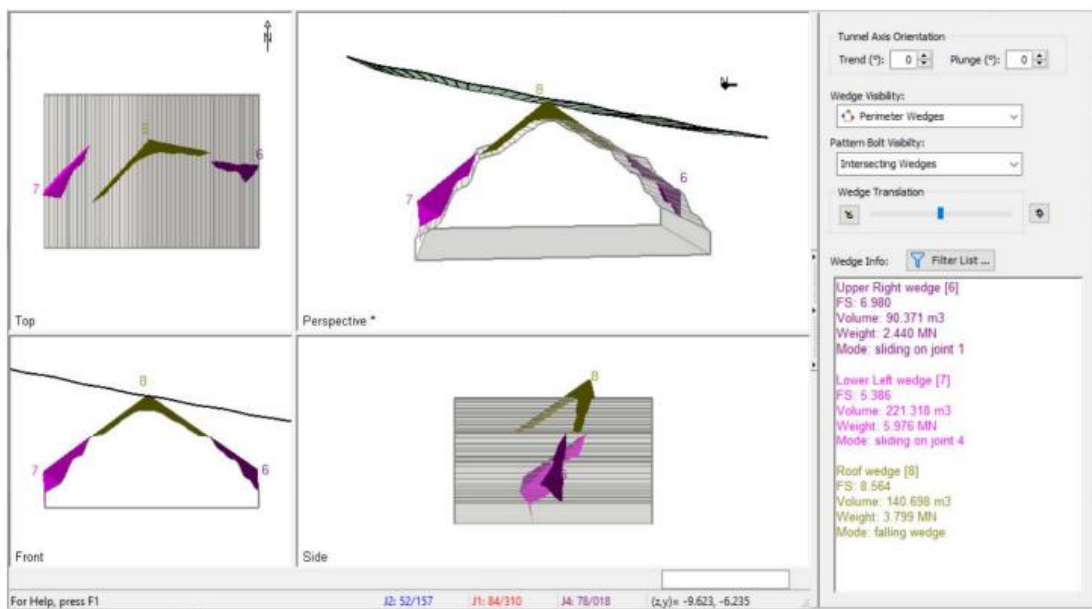
ΣΧΗΜΑ 5.10 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F04/F05/F06 ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕΙΣΜΟΥ



ΣΧΗΜΑ 5.11 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F02/F03/F06 ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕΙΣΜΟΥ



ΣΧΗΜΑ 5.12 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F02/F06 ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕΙΣΜΟΥ



ΣΧΗΜΑ 5.13 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ, ΜΕ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ F01/F02/F04 ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕΙΣΜΟΥ

6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την αξιολόγηση των γεωλογικών – γεωτεχνικών συνθηκών του λιμνοσπηλαιού Μελισάνης και της ευστάθειας της υφιστάμενης κατάστασής του καθώς και τον σχεδιασμό των προτεινόμενων ασφαλών διαδρομών.

Στη μελέτη αυτή ελήφθησαν υπόψη:

1. Οι τοπογραφικές αποτυπώσεις του δαπέδου, της οροφής, των τοιχωμάτων του λιμνοσπηλαιού και της επιφάνειας του εδάφους,
2. Η τεκτονική του σπηλαιού, καθώς και
3. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου βράχου και των ασυνεχειών που το διασχίζουν.

Όλες οι τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού απομειώθηκαν προς την πλευρά της ασφάλειας και ελήφθησαν υπόψη όλες οι σημαντικές ασυνέχειες όπως αυτές αποτυπώθηκαν ψηφιακά και ταυτοποιήθηκαν με τις επί τόπου μετρήσεις. Συντηρητικά και υπέρ της ασφάλειας οι ασυνέχειες θεωρήθηκαν συνεχείς.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας για τον έλεγχο της υφιστάμενης κατάστασης του λιμνοσπηλαιού (σε στατικές συνθήκες και σε σεισμικές δονήσεις) με το λογισμικό Midas GTS NX, όπου κατασκευάστηκε τρισδιάστατο μηχανικό μοντέλο με τη μέθοδο των διακριτών πεπερασμένων στοιχείων (FE Solver) για την λεπτομερή μελέτη της ευστάθειάς του και τον καθορισμό των δυνητικά επισφαλών περιοχών του. Σε αυτές τις αναλύσεις, το μοντέλο θεωρήθηκε **συνεχές** καθώς οι παράμετροι σχεδιασμού απομειώθηκαν μέσω του δείκτη GSI με την βοήθεια του λογισμικού RocLab της Rocscience. Σε επόμενο βήμα, μέσω του λογισμικού UnWedge της Rocscience διεξήχθη ανάλυση ευστάθειας για στατικές συνθήκες και συνθήκες σεισμού σε διατομή η οποία επιλέχθηκε βάσει των δυσμενών χαρακτηριστικών αναφορικά με τη γεωμετρία του **ασυνεχούς** λιμνοσπηλαιού και τον αναμενόμενο μηχανισμό εκδήλωσης της αστοχίας. Βασικός στόχος των αναλύσεων αυτών ήταν ο προσδιορισμός των δυνητικά επισφαλών βραχωδών όγκων εντός του σπηλαιού.

Πιο συγκεκριμένα στη μελέτη του συνεχούς μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση SRM του λογισμικού GTS NX βρίσκοντας Συντελεστή Ασφαλείας SF=1.43 για στατικές συνθήκες, γεγονός που δείχνει ότι το μοντέλο ισορροπεί. Η περιοχή της πιθανής αστοχίας του λιμνοσπηλαιού εντοπίστηκε στα τοιχώματα της ΒΑ πλευράς της φυσικής εισόδου, δείχνοντας ότι η περιοχή εκείνη εμφανίζει δυνητική αστάθεια. Αυτή η περιοχή ωστόσο συνδέεται άμεσα με το μοναδικό μέρος του δαπέδου του λιμνοσπηλαιού που βρίσκεται πάνω από την λιμνογραμμή (βραχονησίδα) και είναι αποτέλεσμα κατάπτωσης ογκολίθων από την εσωτερική οροφή.

Στην ανάλυση κατασκευαστικών σταδίων, με σκοπό την προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών, το πρώτο στάδιο αρχικών παραμέτρων ($c=1500 \text{ KN/m}^2$, $\varphi=45^\circ$) έδωσε μέγιστη μετατόπιση ίση με 1.43 cm, ενώ το δεύτερο στάδιο με τις απομειωμένες παραμέτρους ($c=1010.5 \text{ KN/m}^2$, $\varphi=33.96^\circ$) έδωσε μέγιστη μετατόπιση της τάξης των 2.46 cm. Και οι δύο μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρήθηκαν στην δυνητικά επικίνδυνη περιοχή που προαναφέρθηκε (ΒΑ πλευρά της φυσικής εισόδου).

Για την ανάλυση ευστάθειας σε δυναμικά φορτία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το σεισμολογικό δίκτυο της Κεφαλλονιάς, και συγκεκριμένα από τον σεισμολογικό σταθμό της Βασιλικής. Στην εν λόγω ανάλυση, αρχικά, υπολογίστηκε ο SF για την σεισμική ζώνη της Κεφαλληνίας (III), ο οποίος ήταν ίσος με 1.03. Στις επόμενες αναλύσεις για τους σεισμούς του Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου του

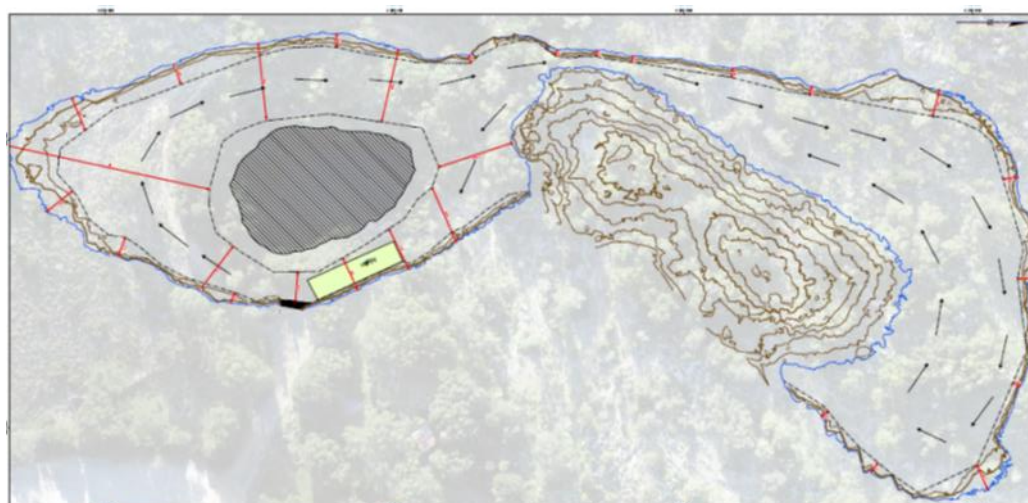
2014, οι SF που προέκυψαν ήταν ίσοι με 1.028, γεγονός που δείχνει πως το σπήλαιο ακόμα και σε δυναμική φόρτιση ισορροπεί, καθώς ο ελάχιστος SF στην περίπτωση σεισμικού καθεστώτος είναι 1.0.

Όσον αφορά την ανάλυση σφηνοειδούς ολίσθησης με το λογισμικό UnWedge, για στατικές συνθήκες βρέθηκε SF ίσος με 1.5 ενώ για συνθήκες δυναμικής φόρτισης, ο SF ήταν ίσος με 1.1. Τους συντελεστές αυτούς τους έδωσε ο συνδυασμός των ασυνεχειών F01/F04/F06, ο οποίος φαίνεται να δίνει δυνητικά επισφαλή σφήνα, που εντοπίζεται στην περιοχή των τοιχωμάτων της οροφής πάνω από τη βραχονησίδα.

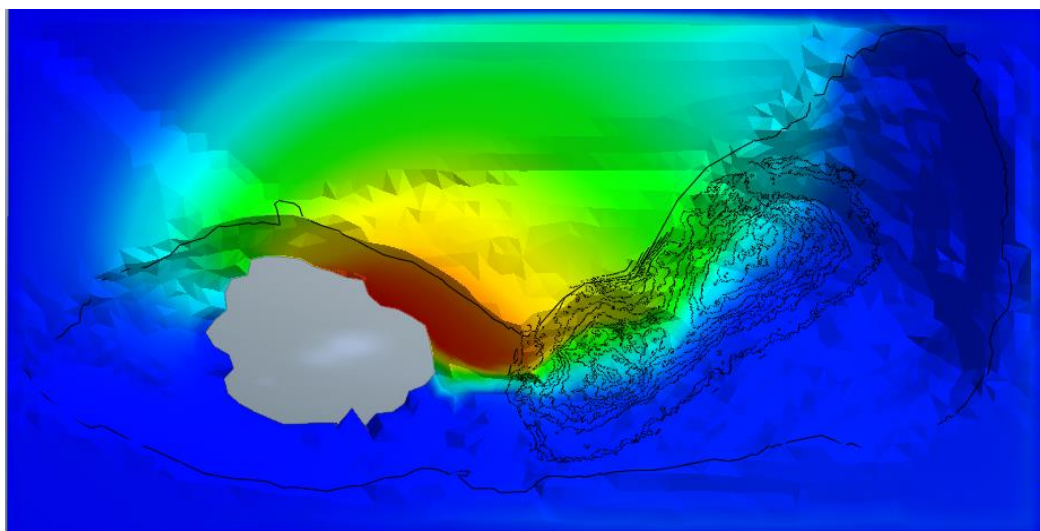
Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη λοιπόν, δείχνουν πως το λιμνοσπήλαιο είναι ευσταθές στην παρούσα κατάσταση καθώς, οι παραμετρικές επιλύσεις από τα μηχανικά μοντέλα (συνεχή και ασυνεχή) έδωσαν SF για στατικές συνθήκες 1.5 έως 1.8 και για συνθήκες σεισμού μεγαλύτερους του 1.0. Οι Συντελεστές Ασφαλείας θεωρούνται αποδεκτοί καθώς αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές παραμέτρων διατμητικής αντοχής κατά μήκος των ασυνεχειών και έχουν προκύψει από αναλύσεις με συντηρητικά εκτιμηθέντα μηχανικά χαρακτηριστικά και συντηρητικές παραδοχές.

Στο ΣΧΗΜΑ 6.1, η γραμμή μπλε απόχρωσης αντιπροσωπεύει τα όρια της λίμνης και ταυτόχρονα την εμφάνιση της βραχονησίδας στα ΒΑ αυτής. Το λευκό ορθογώνιο πλαίσιο στα ΝΑ της λίμνης αντιπροσωπεύει τη λέμβο ενώ τα βέλη δείχνουν την πορεία που ακολουθεί η κάθε λέμβος κατά τη διάρκεια της περιήγησης. Παράλληλα στο ΣΧΗΜΑ 6.2 δίνονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων όπου φαίνεται η δυνητικά επισφαλής περιοχή της εσωτερικής οροφής του λιμνοσπηλαίου με κόκκινη απόχρωση.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, για την μελέτη του λιμνοσπηλαίου ως συνεχές μέσο και με βάση την παραδοχή ότι εξετάζεται μόνο η περίπτωση αστοχίας, παρόλο που το σπήλαιο βρίσκεται σε ισορροπία, οι λέμβοι θα πρέπει να κινούνται από την ΝΔ πλευρά της λίμνης και Β, αποφεύγοντας την κυκλική διαδρομή γύρω από την φυσική είσοδο του λιμνοσπηλαίου.



ΣΧΗΜΑ 6.1 ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΟΠΟΥ ΣΗΜΕΙΩΝΕΤΑΙ Η ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΛΕΜΒΩΝ



ΣΧΗΜΑ 6.2 ΤΟΜΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ 0 ΟΠΟΥ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΔΥΝΗΤΙΚΑ ΕΠΙΣΦΑΛΕΙΣ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ

Σε αντιδιαστολή με την ήδη υπάρχουσα κατάσταση του λιμνοσπηλαίου, η εκδήλωση τυχόν επικρεμάμενων τεμαχίων πετρώματος περιορισμένων στα τοιχώματα δεν επηρεάζουν την συνολική ευστάθειά του. Θα πρέπει όμως να γίνεται τακτική παρακολούθηση του σπηλαίου, ιδιαίτερα στις περιοχές διαδρομής των λέμβων, για εμφανίσεις τυχόν χαλαρών επιφανειακών τεμαχίων έτσι ώστε σε αυτή την περίπτωση να ταυτοποιηθούν και να απομακρυνθούν. Επίσης αν κατά τον έλεγχο του σπηλαίου, σε τακτά χρονικά διαστήματα, εμφανιστούν νέες ρωγματώσεις με κάποια επιμονή στο χώρο ή νέες σφήνες θα πρέπει άμεσα να ταυτοποιηθούν και να επανελεγχθεί η ευστάθειά του.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Ξένη βιβλιογραφία

- BARTON, N., BANDIS, S., 2017. BARTON-BANDIS CRITERION SUMMARIZED WITH FIGURES.
- GOODMAN, R.E., SHI, G., 1985. BLOCK THEORY AND ITS APPLICATION TO ROCK ENGINEERING.
- GRIFFITHS, D.V., LANE, P.A., 1999. SLOPE STABILITY ANALYSIS BY FINITE ELEMENTS. GEOTECHNIQUE 49, 387–403.
- HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., 2002. HOEK-BROWN FAILURE CRITERION—2002 EDITION 1.
- MARINOS, P. AND HOEK, E. (2000) GSI: A GEOLOGICAL FRIENDLY TOOL FOR ROCK MASS STRENGTH ESTIMATION. PROCEEDINGS OF THE GEOENG 2000 AT THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOLOGICAL ENGINEERING, MELBOURNE, 19-24 NOVEMBER 2000, 1422-1446.
- MERCIER J, BOUSQUET B, DELIBASIS N, DRAKOPOULOS I, KERAUDREN B, LEMEILLE F, SOREL D, 1972. DEFORMATIONS EN COMPRESSION DANS LE QUATERNAIRE DES RIVAGES IONIENS (CEPHALONIE, GRECE).
- MERCIER, J., SOREL, D. AND SIMEAKIS, K. (1987) CHANGES IN THE STATE OF STRESS IN THE OVERRIDING PLATE OF A SUBDUCTION ZONE: THE AEGEAN ARC FROM THE PLIOCENE TO THE PRESENT. ANNALES TECTONICAE, 1, 20-39.
- PAPAACHOS, B.C., 1989. A TIME-PREDICTABLE MODEL FOR EARTHQUAKE GENERATION IN GREECE. BULL. SEISMOL. SOC. AM. 79, 77–84.
- SOREL, D. 1976. ETUDE NEOTECTONIQUE DES ISLES IONIENNES DE CEPHALONIE ET ZANTE ET DE L' ELIDE OCCIDENTALE (GRECE).
- SOKOS, E., KIRATZI, A., GALLOVIČ, F., ZAHRADNÍK, J., SERPETSIDAKI, A., PLICKA, V., JANSKÝ, J., KOSTELECKÝ, J., TSELENTIS, G.-A., 2015. RUPTURE PROCESS OF THE 2014 CEPHALONIA, GREECE, EARTHQUAKE DOUBLET (MW6) AS INFERRED FROM REGIONAL AND LOCAL SEISMIC DATA. TECTONOPHYSICS 656, 131–141.
- THEODOULIDIS, N., KARAKOSTAS, CH., LEKIDIS, V., MAKRA, K., MARGARIS, B., MORFIDIS, K., PAPAIOANNOU, CH., ROVTTHIS, EMM., SALONIKIOS, T., SAVVAIDIS, A., 2016. THE CEPHALONIA, GREECE, JANUARY 26 (M6.1) AND

7.2 Ελληνική βιβλιογραφία

- PAPAACHOS B, PAPAACHOU C (2003) THE EARTHQUAKES IN GREECE. ZITI PUBL. CO., THESSALONIKI (IN GREEK WITH ENGLISH ABSTRACT)
- ΠΕΤΡΟΧΕΙΛΟΣ, ΠΕΤΡΟΧΕΙΛΟΥ (1959) ΔΕΛΤΙΟ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΣΠΗΛΑΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ, ΤΟΜΟΣ V - ΤΕΥΧΟΣ 2, 3
- ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΛΙΣΑΝΗΣ-ΔΡΟΓΓΑΡΑΤΗΣ, ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ Ε., ΛΕΚΚΑΣ Ε., ΧΑΤΖΗΘΕΟΔΩΡΟΥ Θ., ΚΟΝΣΟΛΑΚΗ Α., ΚΩΤΣΗ Ε., ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Ι.
- Φ.Ε.Κ., 2003. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥ - Ε.Α.Κ. 2000 ΛΟΓΩ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΡΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (Φ.Ε.Κ Β' 1154/12-8-2003, ΑΠΟΦΑΣΗ ΑΡΙΘ. Δ17Α/115/9/ΦΝ275).