



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων

Σχολές Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Πολιτικών Μηχανικών και
Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διερεύνηση των συνθηκών ευστάθειας του καρστικού εγκοίλου και των πρανών εισόδου της σπηλιάς του Νταβέλη στο Πεντελικό Όρος»



ΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων
Σχολές Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Πολιτικών Μηχανικών και
Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής

«Διερεύνηση των συνθηκών ευστάθειας του καρστικού εγκοίλου και των πρανών εισόδου της σπηλιάς του Νταβέλη στο Πεντελικό Όρος»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδροπούλου Αικατερίνη

Επιβλέπων καθηγητής: Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής

Ιωάννης Βακαλάς, Επίκουρος Καθηγητής

Παρασκευάς Τσαγγαράτος, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη για την ανάθεση του θέματος το οποίο ήταν πλήρως εναρμονισμένο με το προπτυχιακό μου υπόβαθρο αλλά και πολύπλευρο όπως και η θεματολογία του μεταπτυχιακού.

Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την προσπάθεια και την επιμονή του για την εύρεση του θέματος έπειτα από συζήτηση μαζί μου σχετικά με τα ενδιαφέροντά μου γύρω από το αντικείμενο σπουδών. Η καθοδήγησή του για την υλοποίηση των εργασιών υπαίθρου αλλά και μετέπειτα για την επεξεργασία των δεδομένων ήταν καταλυτική. Επίσης ήταν παρών σε όλη τη συγγραφή της εργασίας μου με εύστοχες παρατηρήσεις αλλά και συμβουλές ώστε να συμβάλει στην εξέλιξή μου ως προς τη συγγραφή επιστημονικών κειμένων.

Οφείλω και θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην εταιρεία «**LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ**» για τη διάθεση των δεδομένων τους από την τρισδιάστατη χαρτογράφηση της Σπηλιάς του Νταβέλη. Θα ήθελα ιδιαιτέρως να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ψαλτάκη Γιάννη που μου αφιέρωσε τον πολύτιμο για τον ίδιο χρόνο για να γνωρίσω το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων τους.

Άλλο ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να απευθύνω στον κ. Βασίλη Περλέρο και στην κ. Δρακοπούλου Ευσταθία καθώς ήταν παρών τόσο ψυχολογικά όσο και πρακτικά στη συγγραφή της εργασίας μου.

Από τις ευχαριστίες μου δε θα μπορούσε να λείπει η οικογένεια μου. Όπως σε όλα τα βήματά μου μέχρι τώρα έτσι και σε αυτή τη διαδρομή ήταν παρών και δίπλα μου για να με στηρίζουν όπως αυτοί ξέρουν. Έχουν κατανόηση για όλα και φυσικά πάντα ακούν τις αγωνίες μου και τα άγχη μου.

Κλείνοντας, ένα τεράστιο ευχαριστώ ανήκει στον Κώστα μου. Ήταν παρών σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, υποστηρικτικός και πάντα έμπρακτα δίπλα μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	17
2. Γεωλογικά – γεωτεχνικά χαρακτηριστικά	23
2.1 Γεωτεκτονική τοποθέτηση Αττικής	23
2.2 Μεταλτικοί Σχηματισμοί	28
2.3 Γεωλογική δομή Πεντέλης	29
2.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	31
3. Δεδομένα Τρισδιάστατης απεικόνισης	34
3.1 Τρισδιάστατοι Σαρωτές Laser.....	34
3.2 Δεδομένα τρισδιάστατης για την Σπηλιά του Νταβέλη από την εταιρεία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ	36
3.3 GeoSLAM ZEB-REVO	37
3.4 Λογισμικό CloudCompare	41
4. Γεωτεχνικά Χαρακτηριστικά των βραχωδών σχηματισμών της περιοχής ενδιαφέροντος	43
4.1 Διατμητική αντοχή	43
4.1.1 Κριτήριο Barton – Bandis (1973)	43
4.1.2 Δοκιμή σκληρότητας αναπήδησης με τη σφύρα Schmidt	44
4.1.3 Συντελεστής τραχύτητας JRC.....	50
5. Μικροτεκτονικές Αναλύσεις.....	55
5.1 Εργασίες πεδίου και μεθοδολογία διαχείρισης των δεδομένων	55
5.2 Ανάλυση Markland.....	57
5.3 Βελτίωση Hocking.....	58
5.4 Rocscience.....	59
5.4.1 Dips	59
5.4.2 UnWedge	59
5.5 Αναλύσεις τεχνικογεωλογικών συνθηκών ευστάθειας στο δεξί πρηνές ...	60
5.6 Αναλύσεις τεχνικογεωλογικών συνθηκών ευστάθειας στο αριστερό πρηνές	72
6. Αναλύσεις ευστάθειας θαλάμου	103
7. Μέτρα Αντιστήριξης.....	120

8. Συμπεράσματα - Προτάσεις	125
9. Βιβλιογραφία	128

Εικόνες

Εικόνα 1.1: Γεωμορφολογικός χάρτης λεκανοπεδίου Αττικής	17
Εικόνα 1.2: Σχεδιάγραμμα προσδιορισμού της Οδού Λιθαγωγίας (από το βιβλίο του Μ. Κορρέ (1994) «Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα»)	18
Εικόνα 1.3: Σχεδιάγραμμα προσδιορισμού της Οδού Λιθαγωγίας (https://www.yraithros.gr/odos-lithagogias-archaios-dromos-metaforas-marmarou-renteli-parthenona/)	19
Εικόνα 2.1: Γεωτεκτονικός χάρτης (τροποποιημένος από Jacobshagen et al., 1978, Mountrakis et al., 1983) (Σπανός, 2012).....	24
Εικόνα 2.2: Παρουσίαση όλων των απόψεων που έχουν αποτυπωθεί για τη γεωλογία της Αττικής. (Lepsius 1983, Kober 1929, Sindowski 1949,1951, Μαρίνος & Petrascheck 1956, Photiades 2001, Κατσικάτσος 2002, Παπαδέας 2002, Παπανικολάου 2004). Οι συμβολισμοί των σχηματισμών του Lepsius στην πρώτη στήλη, χρησιμοποιούνται και στους υπόλοιπους ερευνητές για την εύκολη ανάγνωση του πίνακα	25
Εικόνα 2.3: Σχηματικός γεωλογικός χάρτης της Αττικοκυκλαδικής ενότητας. Παρουσίαση των συστημάτων αποκόλλησης στις Κυκλάδες, WCDS - σύστημα αποκόλλησης Δυτικών Κυκλάδων; NCDS - Βόρειο Κυκλαδικό σύστημα αποκόλλησης (Durr et al., 1978, Jolivet et al., 2010, Jacobshagen , 1986, Grasemann et al. (2012), Scheffer et al., 2016, και Seman., 2016)	26
Εικόνα 2.4: Η γεωλογική δομή του Λεκανοπεδίου της Αττικής (Παπανικολάου et al.2004) 26	
Εικόνα 2.5: Φύλλο – χάρτη ΙΓΜΕ “Κηφισιά” (2002)(έχει πραγματοποιηθεί μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος)	30
Εικόνα 2.6: Στρωματογραφική – τεκτονική στήλη από το φύλλο – χάρτη ΙΓΜΕ “Κηφισιά” ..	30
Εικόνα 3.1: Σάρωση μίας περιοχής με το φορητό σαρωτή τον φορητό σαρωτή laser ZEB-REVO (WLS) (Cabo, et al., 2018)	35
Εικόνα 3.2: Παράμετροι χαρακτηρισμού βραχώμαζας (Hudson, 1989)	36
Εικόνα 3.3: Αποτύπωση στο χώρο της Σπηλιάς του Νταβέλη	38
Εικόνα 3.4: Όργανο GeoSlam ZEB-REVO με το οποίο πραγματοποιήθηκε η αποτύπωση	38
Εικόνα 3.5: Η Σπηλιά του Νταβέλη σε τρισδιάστατη απεικόνιση	39
Εικόνα 3.6: Κάτοψη της εισόδου της Σπηλιάς του Νταβέλη από το τρισδιάστατο μοντέλο .	40
Εικόνα 3.7: Κάτοψη της Σπηλιάς του Νταβέλη από το τρισδιάστατο μοντέλο	40
Εικόνα 3.8: Οθόνη έναρξης του λογισμικού CloudCompare	41
Εικόνα 4.3: Σφύρα Schmidt	45
Εικόνα 4.4: Τομή σφύρας Schmidt που αποτυπώνει βήμα βήμα τη λειτουργία της	45
Εικόνα 4.5: Κλίμακα οργάνου	45
Εικόνα 4.6: Νομογράφημα με καμπύλες αναπήδησης – αντοχής μέσω πειραματικών δεδομένων με σφύρα Schmidt τύπου L για τον υπολογισμό της έμμεσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Deere and Miller, 1996).....	46
Εικόνα 4.7: Προφιλόμετρο	50
Εικόνα 4.8: Προφίλ τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές JRC (Barton and Choubey, 1977)	51
Εικόνα 5.1: Ανάλυση Markland στη στερεογραφική προβολή.....	57
Εικόνα 5.2: Στερεογραφική αποτύπωση του test Markland (1972) όπου διαφαίνεται η αστοχία της βραχοσφήνας.....	58

Εικόνα 5.3: Σύμφωνα με τη βελτίωση Hocking τα δίκτυα (a) και (b) παρουσιάζουν ολίσθηση κατά μήκος του άξονα της βραχοσφήνας. Ενώ στο δίκτυο (c) η βραχοσφήνα θα ολισθήσει κατά μήκος του επιπέδου της επιφάνειας της ασυνέχειας A.	58
<i>Εικόνα 6.1: Οι διατομές της Σπηλιάς.....</i>	<i>104</i>
<i>Εικόνα 6.2: Οι τρεις διατομές μπαίνοντας στο θάλαμο – διακρίνονται οι θέσεις των μετρήσεων</i>	<i>105</i>
<i>Εικόνα 6.3: Οι τρεις διατομές από το τέλος του θαλάμου - διακρίνονται οι θέσεις των μετρήσεων.....</i>	<i>105</i>
Εικόνα 6.4: Οριοθέτηση του τμήματος – θέση 1	106
Εικόνα 6.5: Οριοθέτηση του τμήματος – θέση 2	111
Εικόνα 6.6: Οριοθέτηση του τμήματος – θέση 3	115

Πίνακες

Πίνακας 4-1: Μέση τιμή αναπήδησης για κάθε πρανές.....	48
Πίνακας 4-2: Υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της γωνίας τραχύτητας i και της γωνίας εσωτερικής τριβής.....	53
Πίνακας 6-1: Επίπεδα των συστημάτων των ασυνεχειών μέσα από τη Σπηλιά του Νταβέλη	103

Φωτογραφίες

Φωτογραφία 1-1: Εσωτερικό του ναού του Αγίου Νικολάου	20
Φωτογραφία 1-2: Εσωτερικό του ναού του Αγίου Σπυρίδωνα	21
Φωτογραφία 1-3: Η είσοδος της Σπηλιάς του Νταβέλη και τα δύο ναΰδρια	21
Φωτογραφία 1-4: Οι τοιχογραφίες εντός του ναού του Αγίου Νικολάου χαραγμένες στο μάρμαρο	22
Φωτογραφία 2-1: Τα δύο πρανή και η είσοδος της Σπηλιάς	32
Φωτογραφία 2-2: Το τέλος του θαλάμου (α), εσωτερικό της Σπηλιάς (β).....	33
Φωτογραφία 5-1: Επί τόπου μετρήσεις με τη γεωλογική πυξίδα στο αριστερό πρανές	55
Φωτογραφία 5-2: Πανοραμική φωτογραφία της Σπηλιάς του Νταβέλη με τα δύο πρανή (α), Πανοραμική φωτογραφία του δεξιού πρανούς (β)	60
Φωτογραφία 5-3: Ασυνέχεια στο δεξί πρανές.....	61
Φωτογραφία 5-4: Μάρμαρα δεξιού πρανούς	61
Φωτογραφία 5-5: Άκρο του δεξιού πρανούς στο οποίο διαφαίνεται ένα τεμάχιο βραχοσφήνας το οποίο με τις κατάλληλες συνθήκες θα εκδηλώσει επίπεδη ολίσθηση	71
Φωτογραφία 5-6: Πανοραμική φωτογραφία της Σπηλιάς του Νταβέλη με τα δύο πρανή (α), Πανοραμική φωτογραφία του αριστερού πρανούς (β).....	72
Φωτογραφία 5-7: Κατακόρυφες ασυνέχειες στο αριστερό πρανές.....	73
Φωτογραφία 5-8: Κατακόρυφες ασυνέχειες στο αριστερό πρανές.....	74
Φωτογραφία 5-9: Κατακόρυφη ανοιχτή ασυνέχεια στο αριστερό πρανές.....	75
Φωτογραφία 5-10: Κατακόρυφη ασυνέχεια που τέμνεται από μικρότερες ασυνέχειες και ανάμεσα άρρηκτο πέτρωμα.....	75
Φωτογραφία 5-11: Η τομή με το ασβεστιτικό υλικό.....	101
Φωτογραφία 5-12: Γραμμές ολίσθησης ή γραμμές λόγω τριβής επάνω στο ασβεστιτικό υλικό	102
Φωτογραφία 5-13: Ασβεστιτικό υλικό επάνω στην εμφάνιση του αριστερού πρανούς	102

Σχήματα

Σχήμα 5–1: Δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών.....	62
Σχήμα 5–2: Δίκτυο Schmidt με τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών.....	63
Σχήμα 5–3: Δίκτυο Schmidt με τα αποτελέσματα test Markland.....	63
Σχήμα 5–4: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J4	69
Σχήμα 5–5: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J3 – J4	70
Σχήμα 5–6: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J3	71
Σχήμα 5–7: Δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών.....	77
Σχήμα 5–8: Δίκτυο Schmidt με τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών.....	77
Σχήμα 5–9: Δίκτυο Schmidt με τα αποτελέσματα test Markland.....	78
Σχήμα 5–10: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J1 – J2	83
Σχήμα 5–11: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J3	88
Σχήμα 5–12: Δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών.....	89
Σχήμα 5–13: Δίκτυο Schmidt με τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών....	89
Σχήμα 5–14: Εφαρμογή test Markland	90
Σχήμα 5–15: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J1 – J5	95
Σχήμα 5–16: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J1 – J4	96
Σχήμα 5–17: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J5	97
Σχήμα 5–18: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J3 – J4	98
Σχήμα 5–19: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J3 – J5	99
Σχήμα 5–20: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J4 – J5	100
Σχήμα 6–1: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων των ασυνεχειών από τη θέση 1.....	107
Σχήμα 6–2: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 5m.....	107
Σχήμα 6–3: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 6m.....	108
Σχήμα 6–4: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 8m.....	108
Σχήμα 6–5: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 10m.....	109
Σχήμα 6–6: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 15m.....	109
Σχήμα 6–7: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 20m.....	110
Σχήμα 6–8: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων των ασυνεχειών από τη θέση 2.....	111

Σχήμα 6–9: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 5m.....	112
Σχήμα 6–10: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 6m.....	112
Σχήμα 6–11: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 8m.....	113
Σχήμα 6–12: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 10m.....	113
Σχήμα 6–13: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 15m.....	114
Σχήμα 6–14: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 20m.....	114
Σχήμα 6–15: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων των ασυνεχειών από τη θέση 3.....	116
Σχήμα 6–16: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 5m.....	116
Σχήμα 6–17: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 6m.....	117
Σχήμα 6–18: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 8m.....	117
Σχήμα 6–19: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 10m.....	118
Σχήμα 6–20: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 15m.....	118
Σχήμα 6–21: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 20m.....	119
Σχήμα 7–1: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 1 με persistence 8m.....	121
Σχήμα 7–2: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 1 με persistence 15m.....	121
Σχήμα 7–3: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 2 με persistence 8m, μήκος αγκυρίων 3m και κάρναβο 1,5m.....	122
Σχήμα 7–4: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 2 με persistence 10m, μήκος αγκυρίων 3m και κάρναβο 1m.....	122
Σχήμα 7–5: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 2 με persistence 20m, μήκος αγκυρίων 6m και κάρναβο 0,8m.....	123
Σχήμα 7–6: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 3 με persistence 20m και τοποθέτηση ενός αγκυρίου 1m.....	124

Περίληψη

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη ευστάθειας των πρηνών εισόδου αλλά και του εσωτερικού καρστικού εγκοίλου της Σπηλιάς του Νταβέλη. Η Σπηλιά εντοπίζεται στο όρος της Πεντέλης και συγκεκριμένα στα νοτιοδυτικά της κορυφής «Πυργάρι» σε υψόμετρο 720m. Η περιοχή τραβάει τα βλέμματα από την αρχαιότητα καθώς υποστηρίζεται πως από εκεί προήλθαν τα μάρμαρα του Παρθενώνα μέσω της Οδού Λιθαγωγίας η οποία ξεκινά ακριβώς έξω από τη Σπηλιά.

Η μελέτη της περιοχής ενδιαφέροντος ξεκίνησε από την ευρύτερη περιοχή της Πεντέλης και κατέληξε στην ανάλυση των συστημάτων των ασυνεχειών που διατέμνουν την βραχώμαζα. Μελετήθηκε γεωλογικά και μορφολογικά συνολικά το Πεντελικό όρος μέσω των χαρτών του ΙΓΜΕ από την περιοχή αλλά και συνολικά από δημοσιευμένα επιστημονικά άρθρα, διδακτορικά και διπλωματικές εργασίες της ευρύτερης περιοχής τόσο της Πεντέλης όσο και του Λεκανοπεδίου των Αθηνών. Ως προς τη γεωλογία η περιοχή γύρω από τη Σπηλιά δομείται από τα μάρμαρα της Πεντέλης, όπως αναφέρονται και στο φύλλο χάρτη του ΙΓΜΕ.

Για την πληρέστερη μελέτη του χώρου τα δύο πρηνή και έπειτα η Σπηλιά στο εσωτερικό της μελετήθηκαν ξεχωριστά. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας επί τόπου στο χώρο ενδιαφέροντος όπου κατεγράφησαν η κλίση και η φορά μέγιστης κλίσης των πρηνών εκατέρωθεν της εισόδου της Σπηλιάς. Εν συνεχεία, αποτυπώθηκαν τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών ως προς την απόσταση μεταξύ τους, το άνοιγμά τους, την ύπαρξη υλικού πλήρωσης, την εμμονή τους στο χώρο καθώς και την τραχύτητά τους.

Επιπροσθέτως πραγματοποιήθηκε έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη μέσω της σφύρας Schmidt, ενώ προσδιορίστηκε και η γωνία τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών με τη χρήση προφιλόμετρου. Με την ολοκλήρωση της εργασίας υπαίθρου όλα τα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό Dips της Rocscience και πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των συστημάτων των επιπέδων των ασυνεχειών που διατρέχουν τη βραχώμαζα και έγινε εκτίμηση των δυνητικών αστοχιών.

Έχοντας την τρισδιάστατη αποτύπωση του εσωτερικού της Σπηλιάς που πραγματοποίησε η εταιρεία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ κατέστη εφικτό να μελετηθεί και το εσωτερικό της Σπηλιάς. Από τα εργαλεία που παρέχει το λογισμικό επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων, CloudCompare, μετρήθηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί ως προς την κλίση και τον προσανατολισμό τους και έπειτα με το λογισμικό UnWedge της Rocscience προσομοιώθηκαν οι δυνητικές καταπτώσεις τεμαχίων της βραχώμαζας.

Οι αναλύσεις υπέδειξαν τους κινδύνους που υπάρχουν σχετικά με τις αστοχίες τόσο στα εξωτερικά πρηνή όσο και στο εσωτερικό της Σπηλιάς. Κρίνεται απαραίτητο να υπάρξει κάποια μέριμνα από τους αρμόδιους φορείς για να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ώστε ο χώρος να είναι ασφαλής για την επίσκεψη των πολιτών αλλά και γενικά για την προστασία ως ιστορικός χώρος.

Abstract

The subject of this study is the stability study of the entrance slopes and the inner karstic cave of the Cave of Davelis. The cave is located on the mountain of Penteli and specifically in the southwest of the peak "Pyrgari" at an altitude of 720m. The area has attracted attention since antiquity as it is claimed that the marbles of the Parthenon came from there via the Lithagogia Road which starts just outside the Cave.

The study of the area of interest started from the wider area of Penteli and ended with the analysis of the systems of unconformities that cut the rock mass. The geological and morphological study of the Pentelian mountain was carried out through the maps of the IGME for the area and also through published scientific articles, doctoral theses and dissertations of the wider area of Penteli and the Athens basin. As far as geology is concerned, the area around the Cave is structured by the marbles of Penteli, as mentioned in the map sheet of IGME.

For a more complete study of the site, the two slopes and then the Cave inside were studied separately. Measurements were taken using the geological compass on site at the site of interest where the dip and the dip direction of the slopes on either side of the entrance to the Cave were recorded. Subsequently, the characteristics of the unconformities were recorded in terms of their spacing, their opening, the presence of fill material, their persistence in the site and their roughness.

In addition, an indirect determination of the uniaxial compression strength was carried out using the Schmidt hammer, while the roughness angle of the surfaces of the discontinuities was determined using a profilometer. Upon completion of the fieldwork, all data was entered into Rocscience's Dips software and a determination of the plane systems of the discontinuities running through the rock mass was performed and an assessment of potential failures was made.

Having the three-dimensional mapping of the interior of the Cave made by the company LANDMARK - C. LOUTRIDES, it became possible to study the interior of the Cave. Using the tools provided by the 3D cloud point processing software, CloudCompare, the geological formations were measured in terms of their inclination and orientation and then with the UnWedge software of Rocscience the potential precipitation of rock mass fragments was simulated.

The analyses indicated the risks of failures on both the outer slopes and the interior of the Cave. It is necessary that the competent bodies must take the necessary measures to ensure that the site is safe for public visitation and generally for its protection as a historical site.

1. Εισαγωγή

Το Σπήλαιο Πεντέλης ή Σπήλαιο Αμώμων ή Σπήλαιο Νταβέλη εντοπίζεται στο νομό Αττικής, στο βορειοανατολικό τμήμα του Λεκανοπεδίου των Αθηνών. Βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του Πεντελικού όρους και συγκεκριμένα στη νότια πλευρά της κορυφής Πυργάρι σε υψόμετρο 720m. Σε ευθεία απόσταση απέχει από το βράχο της Ακρόπολης περίπου 17km και από το Αστεροσκοπείο Αθηνών περίπου 3km. Το συγκεκριμένο σπήλαιο φημολογείται πως πήρε το όνομά του από το λήσταρχο του 19^{ου} αιώνα, Χρήστο Νταβέλη, κάτι που όμως μέχρι σήμερα δεν έχει επιβεβαιωθεί.

Πεντελικό όρος

Το Πεντελικό όρος μαζί με την Πάρνηθα, τον Υμηττό και το όρος Αιγάλεω οριοθετούν το Λεκανοπέδιο των Αθηνών. Η Πεντέλη είναι το φυσικό βορειοανατολικό όριο του με διεύθυνση ανάπτυξης από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά. Η κορυφή του ονομάζεται Πυργάρι και έχει υψόμετρο 1.109m. Μικρότεροι γνωστοί λόφοι τριγύρω από την κορυφή είναι η Πύριζα, ο Άγιος Παντελεήμων, το Καστρί, η Βίγλα, ο Κουφός και το Διονυσοβούνι. Πρόκειται για το δεύτερο ψηλότερο βουνό στην Αττική.

Τα φυσικά πρηνή του Πεντελικού όρους έχουν ήπιες μορφολογικές κλίσεις με στρογγυλεμένες κορυφές. Κάποιες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται ανάλογα με τη θέση και τη φύση των γεωλογικών σχηματισμών. Για παράδειγμα τα μάρμαρα εμφανίζουν κλίσεις 60-80% και οι σχιστόλιθοι 40-60%. Οι πρόποδες του βουνού είναι ήπιοι. Είναι αισθητή η παρουσία από διάφορα καρστικά έγκοιλα γεωμορφών, διαφόρων διαστάσεων από τα οποία το πιο διάσημο είναι αυτό της Σπηλιάς του Νταβέλη.

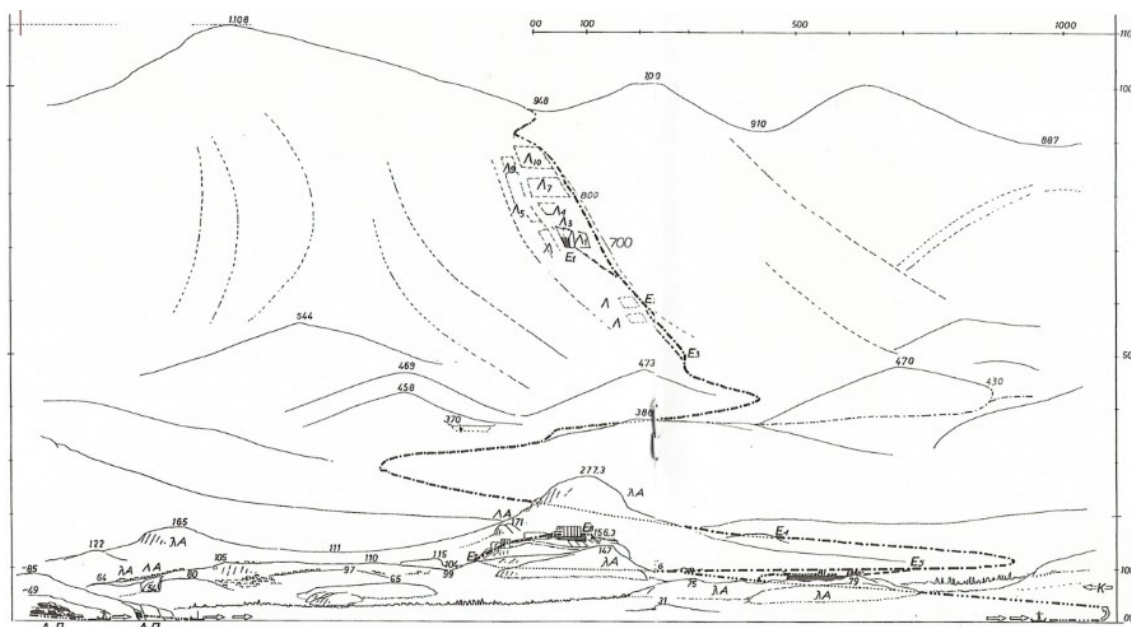


Εικόνα 1.1: Γεωμορφολογικός χάρτης λεκανοπεδίου Αττικής

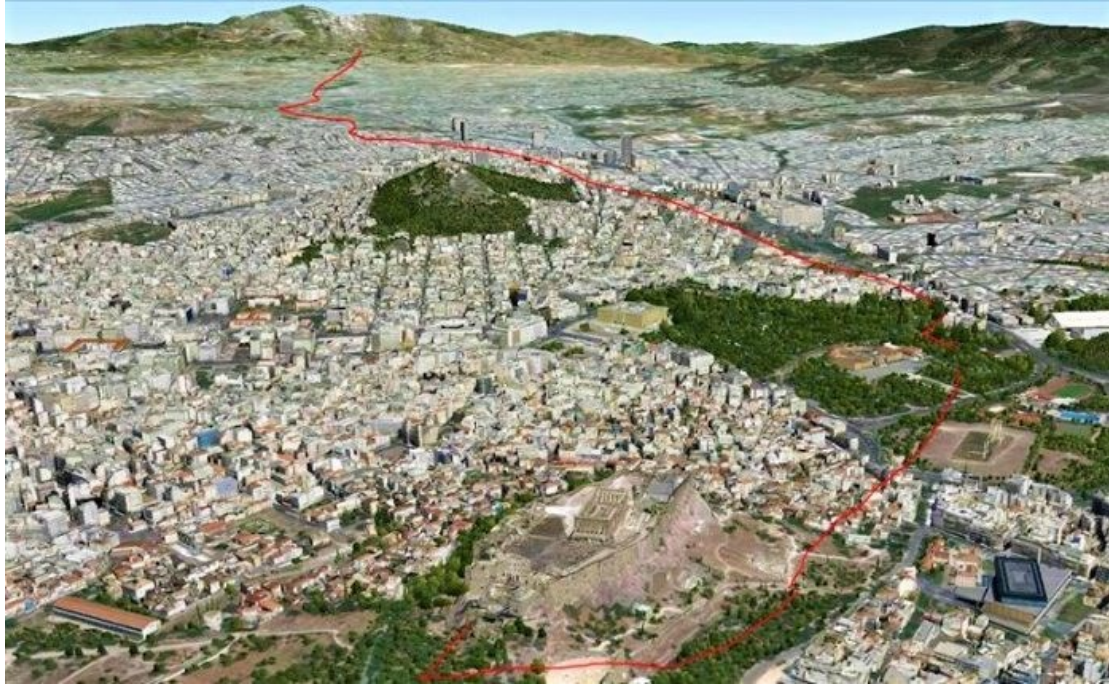
Στα νοτιοδυτικά απλώνεται το Λεκανοπέδιο των Αθηνών, στα βορειοανατολικά εντοπίζεται η πεδιάδα του Μαραθώνα, στα νότια βρίσκεται η κοιλάδα της Μεσογαίας και στα ανατολικά το Πεντελικό όρος φτάνει σχεδόν μέχρι τη θάλασσα και τον Κόλπο των Πεταλιών. Το Πεντελικό όρος αρχικά ονομαζόταν «Βριλησσός». Έχει συνδεθεί στην ιστορία από το φημισμένο, σε ποιότητα και ποσότητα, Πεντελικό μάρμαρο με το οποίο οι Αθηναίοι στην εποχή του Περικλή οικοδόμησαν τον Παρθενώνα.

Σε κατακόρυφο άξονα εμφανίζονται οι φλέβες μαρμάρου πάνω στον ορεινό όγκο της Πεντέλης και πάνω σε αυτόν υπήρχαν τα αρχαία λατομεία. Οι βασικές μεγάλες φλέβες είναι δύο και είναι παράλληλες. Πάνω σε αυτές τις φλέβες ανέπτυξαν τα λατομεία από τα οποία το κυριότερο και πιο ξακουστό είναι το Λατομείο της Σπηλιάς, τη γνωστή «Σπηλιά του Νταβέλη».

Η επιβεβαίωση πως η Σπηλιά αυτή είναι συνδεδεμένη με την εξόρυξη και μεταφορά του μαρμάρου ήρθε από την οδό της μεταφοράς του πετρώματος, τη γνωστή «Οδό Λιθαγωγίας» (Μ. Κορρέ "Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα", 1994) που ξεκινά ακριβώς έξω από τη Σπηλιά και καταλήγει στο βράχο της Ακρόπολης. Η συγκεκριμένη οδός μεταφοράς σήμερα δε διασώζεται αλλά ούτε προστατεύθηκε σαν αρχαιολογικός χώρος. Συναντάται όπως αναφέρθηκε λίγο έξω από την είσοδο του σπηλαιίου και η υπόλοιπη διαδρομή βασίζεται σε εικασίες στηριζόμενη σε γεωμορφολογικές και αρχαιολογικές παρατηρήσεις. Ο καθηγητής Αρχιτεκτονικής του ΕΜΠ κ. Μανώλης Κορρές μέσα από το βιβλίο του «Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα», 1993 ήταν ο πρώτος που χάραξε σε χαρτί τη διαδρομή της Οδού Λιθαγωγίας και παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 1.2 και Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.2: Σχεδιάγραμμα προσδιορισμού της Οδού Λιθαγωγίας (από το βιβλίο του Μ. Κορρέ (1994) «Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα»)



Εικόνα 1.3: Σχεδιάγραμμα προσδιορισμού της Οδού Λιθαγωγίας (<https://www.yraithros.gr/odos-lithagogias-arxaios-dromos-metaphoras-marmarou-penteli-parthenona/>)

Η διαδρομή της αρχαίας Οδού Λιθαγωγίας διατρέχει τους παρακάτω δήμους και οδούς (Μ. Κορρέ "Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα", 1994):

- Πεντέλη (Οδοί Σωκράτους, Αριστοφάνους και Περικλέους),
- Μελίσσια (Οδοί Αριστείδου, Αγίας Μαρίνας, Παλαιών Λατομείων, Δουκίσσης Πλακεντίας, Κέας), Βριλήσσια (Οδοί Τροίας, Μενελάου, Λεωφόρος Πεντέλης),
- Χαλάνδρι (από γήπεδο Χαλανδρίου ως το κέντρο Χαλανδρίου και μέσω των οδών Αντρέα Παπανδρέου και Εθνικής Αντιστάσεως ως τη Λεωφόρο Κηφισίας),
- Αθήνα (Εθνικός κήπος μέσω νότιας κλιτύος της Ακρόπολης, Ιερό Νύμφης, όπου διασταυρωνόταν με άλλη οδό, η οποία κατά μήκος της δυτικής πλευράς του Ηρωδείου οδηγούσε στην Ακρόπολη).

Το 2009 κατά τις εκσκαφές για τη θεμελίωση ενός κτιρίου στη λεωφόρο Πεντέλης, στον αριθμό 133 αποκαλύφθηκε ένα κομμάτι της αρχαίας Οδού Λιθαγωγίας. Η μελέτη, η αναγνώριση και η επιβεβαίωση έγινε από την αρχαιολόγο Μέλπω Πωλογιώργη. Μέχρι εκείνη τη χρονική περίοδο η διαδρομή της Οδού Λιθαγωγίας γινόταν σύμφωνα με αρχαιολογικά ευρήματα και γενικές γεωμορφολογικές παρατηρήσεις. Μικρά δείγματα βρέθηκαν ακόμη κατά την επισκευή οδικών δικτύων πλησίον στο γεφυράκι Δουκίσσης Πλακεντίας (Καμάρες), στην περιοχή των Μελισίων (Μ. Κορρέ "Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα", 1993).

Ιστορικά στοιχεία

Η Σπηλιά δεν ήταν πάντα με τη σημερινή μορφή της, δηλαδή ανοιχτή στο βουνό έχοντας άνοιγμα σαν είσοδο. Οι αρχαίοι Έλληνες τον 5^ο αιώνα π.Χ. ανακάλυψαν την ύπαρξή της κατά τη διάρκεια εκσκαφών για την αφαίρεση του λευκού πεντελικού μαρμάρου. Κατά την αρχαιότητα υπήρξε ιερό του Πανός. Στα Βυζαντινά χρόνια φιλοξένησε μοναχούς οι οποίοι χρησιμοποίησαν τη Σπηλιά σαν ησυχαστήριο, γι' αυτό και λέγεται και «Σπήλαιο των Αμώνων». Κατά τη νεότερη ιστορία υπάρχει μία παράδοση-εικασία πως η Σπηλιά ήταν το

κρησφύγετο του λήσταρχου Νταβέλη, από τον οποίο πήρε και το όνομά της, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχει επιβεβαιωθεί με επιστημονικά δεδομένα (Μ. Κορρέ "Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα", 1993).

Εξερεύνηση του σπηλαίου

Η «Σπηλιά του Νταβέλη» μελετήθηκε από τους Έλληνες σπηλαιολόγους Ιωάννη και Άννα Πετρόχειλου. Η είσοδος είναι επιβλητική και στα δεξιά της υπάρχουν τα δύο ναύδρια, του Αγίου Σπυρίδωνα και του Αγίου Νικολάου. Η Σπηλιά χαρακτηρίζεται από έναν τεράστιο θάλαμο όπου για να φτάσει κανείς στο χαμηλότερο σημείο της Σπηλιάς θα περπατήσει μια κατηφόρα μήκους 112m. Το πλάτος της Σπηλιάς κυμαίνεται από 40-45m. Στο κέντρο της Σπηλιάς υπάρχει ένα βάραθρο κατακόρυφο μήκους 15m ενώ στο τέλος του θαλάμου εντοπίζεται ένα δεύτερο βάραθρο με ελικοειδές πέρασμα βάθους 10m. Επίσης στο αριστερό τμήμα του τέλους του θαλάμου έχει εντοπιστεί ένα πέρασμα που καταλήγει σε μία κοιλότητα με νερό που είναι γνωστή ως «Λίμνη των Νυμφών».

Η περιοχή γύρω από τη Σπηλιά τις δεκαετίες 1970 και 1980 δέχτηκε πολλές παρεμβάσεις λόγω εργασιών που διεξήγαγε το Υπουργείο Άμυνας και οι οποίες προκάλεσαν αλλαγές τόσο στο εσωτερικό της Σπηλιάς όσο και στον εξωτερικό χώρο. Ακόμη ζημιές εντοπίστηκαν και στους ναούς του Αγίου Σπυρίδωνα και του Αγίου Νικολάου (Μπαλάνος, Γ. Πέρα από το αίνιγμα της Πεντέλης, 2004).

Ναοί Αγίου Σπυρίδωνα και Αγίου Νικολάου

Στα δεξιά της εισόδου της Σπηλιάς απαντώνται δύο ναύδρια. Έχουν κοινή είσοδο αλλά η ηλικία τους είναι διαφορετική. Το ένα εκκλησάκι που εντοπίζεται κυριολεκτικά μέσα στο βράχο και είναι αυτό του Αγίου Σπυρίδωνα, είναι το παλαιότερο ηλικιακά, χρονολογείται κατά το 10^ο ή 11^ο αιώνα μ.Χ (Υπουργείο Πολιτισμού – Εφορεία Παλαιοανθρωπολογίας-Σπηλαιολογίας Νότιας Ελλάδας, 2014). Οι τοίχοι τους είναι ο ίδιος ο βράχος και πάνω τους έχουν χαραχτεί διάφορες μορφές όπως άγγελοι, σταυροί και αετοί. Ο έτερος ναός βρίσκεται προς τη μεριά του θαλάμου της Σπηλιάς και είναι του Αγίου Νικολάου. Ηλικιακά είναι νεότερο. Εντός του παρεκκλησίου του Αγίου Νικολάου υπάρχουν στο δάπεδο δύο μικρές κρύπτες και μία ταφική λάρνακα, τα οποία μαρτυρούν πως ο χώρος είχε ταφικό χαρακτήρα (Π. Λαζαρίδης, Μεσαιωνικά Μνημεία Αθηνών και Αττικής, Αρχαιολογικό Δελτίο 28 - Χρονικά- (1973), σ. 61-71, Μουρίκη Ντ., Οι Τοιχογραφίες της Σπηλιάς Πεντέλης Δελτίο Χριστιανικής και Αρχαιολογικής Εταιρείας 1973-74, σ. 79-115).



Φωτογραφία 1-1: Εσωτερικό του ναού του Αγίου Νικολάου



Φωτογραφία 1-2: Εσωτερικό του ναού του Αγίου Σπυρίδωνα



Φωτογραφία 1-3: Η είσοδος της Σπηλιάς του Νταβέλη και τα δύο ναύδρια

Τοιχογραφίες βρίσκονται ακόμη και σήμερα και στους δύο ναούς και η χρονολόγησή τους έγινε από την επιγραφή του τρούλου του Αγίου Νικολάου, γύρω στο 1234 ή 1235 μ.Χ. Η πιο γνωστή τοιχογραφία είναι μιας ανδρικής μορφής που έγραφε «Ο ΑΘΗΝΩΝ ΜΙΧΑΗΛ» και εκτιμάται πως αναπαριστά το μητροπολίτη Αθηνών Μιχαήλ Χωνιάτη. Βρέθηκε στο ναό του Αγίου Σπυρίδωνα αλλά σήμερα φιλοξενείται στο Βυζαντινό και Χριστιανικό Μουσείο Αθηνών. Αντίστοιχα από το ναό του Αγίου Νικολάου στον ίδιο χώρο φιλοξενούνται τα εξής: ο τρούλος που απεικονίζει τον Παντοκράτορα και η τοιχογραφία της Αγίας Αικατερίνης με βασιλική στολή (Π. Λαζαρίδης, *Μεσαιωνικά Μνημεία Αθηνών και Αττικής, Αρχαιολογικό*

Δελτίο 28 - Χρονικά- (1973), σ. 61-71, Μουρίκη Ντ., Οι Τοιχογραφίες της Σπηλιάς Πεντέλης
Δελτίο Χριστιανικής και Αρχαιολογικής Εταιρείας 1973-74, σ. 79-115).



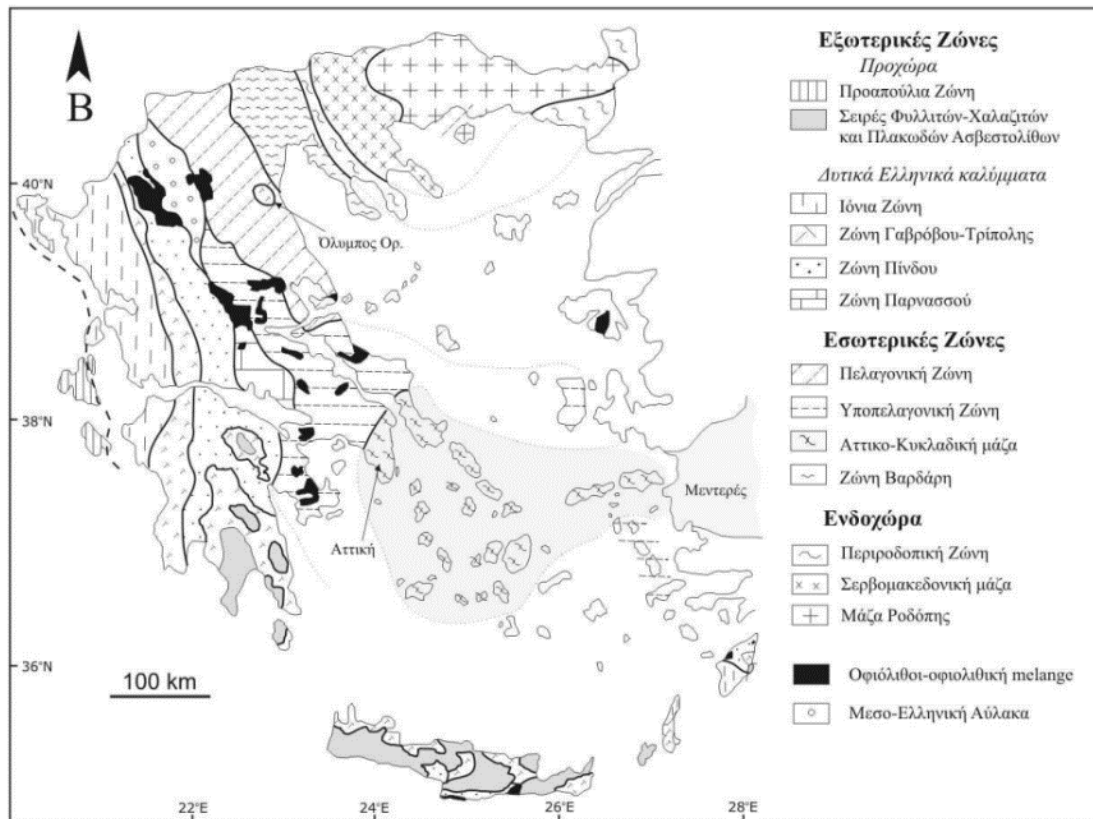
Φωτογραφία 1-4: Οι τοιχογραφίες εντός του ναού του Αγίου Νικολάου χαραγμένες στο μάρμαρο

2. Γεωλογικά – γεωτεχνικά χαρακτηριστικά

2.1 Γεωτεκτονική τοποθέτηση Αττικής

Η μελέτη για τη γεωλογία της Αττικής ξεκίνησε ήδη από τα τέλη του 18^{ου} αιώνα. Στη διάρκεια αυτών των χρόνων έχουν αποτυπωθεί διάφορες απόψεις αναφορικά με τις γεωτεκτονικές ενότητες που απαντώνται, τη στρωματογραφία τους αλλά και συνολικά τη γεωτεκτονική εξέλιξη της Αττικής. Ο Philipson (1898) ήταν ο πρώτος που εξέφρασε μία γνώμη και έκανε την πρώτη προσπάθεια για να κατηγοριοποιήσει τα πετρώματα της Αττικής στις γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας. Πιο συγκεκριμένα τοποθέτησε τη βόρεια Αττική στη ζώνη της Ανατολικής Ελλάδας και τη νότια Αττική στην Αττικοκυκλαδική ζώνη. Εν συνεχεία ο Ktenas (1923) τοποθέτησε το σύνολο της Αττικής στο ενδιάμεσο σύστημα της Αττικοκυκλαδικής κρυσταλλικής μάζας, ενώ λίγο μετά, το 1930, ο ίδιος ξεχώρισε τη ζώνη «Βερόρι - Σπάτι» που προς τα δυτικά έρχεται σε τεκτονική επαφή με τους σχηματισμούς της Πάρνηθας και προς τα ανατολικά υπέρκειται των σχηματισμών της Πεντέλης χωρίς βέβαια να διασαφηνίζει το είδος της επαφής τους, τεκτονική ή κανονική. Αργότερα το 1940, ο Renz μελετώντας τους ασβεστόλιθους του λεκανοπεδίου (Πάρνηθας, Τουρκοβούνια, Ακρόπολη, Λυκαβηττός) τους ενέταξε στη ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας. Οι Μαρίνος και Petrascheck (1956) τοποθέτησαν το σύνολο των σχηματισμών της Αττικής και ειδικά της Λαυρεωτικής στην Αττικοκυκλαδική ζώνη. Το 1966 ο Τάταρης μελέτησε την περιοχή του Αιγάλεω και κατέληξε πως είναι ένα τεκτονικό κέρασ και ανήκει στην Υποπελαγονική ζώνη. Ο Παπανικολάου (1986) διαχωρίζει μια νέα, αυτόχθονη ενότητα για το λεκανοπέδιο των Αθηνών, την ονομάζει «Ενότητα της Αττικής» η οποία περιλαμβάνει κυρίως το κεντρικό τμήμα του Λεκανοπεδίου. Επωθημένες πάνω από αυτή τη νέα ενότητα βρίσκονται οι ενότητες της Ανατολικής Ελλάδας, του Λαυρίου και του Αλμυροποτάμου. Έπειτα, σαν συνέχεια των όσων εξέφρασε ο Παπανικολάου, ο Κατσικάτσος (1977, 1986) τοποθέτησε τα αυτόχθονα μεταμορφωμένα της ενότητας της Αττικής και της ενότητας Αλμυροποτάμου στην Εύβοια στις ενότητες Ολύμπου – Όσσας και Κρανιάς – Ελασσόνας. Θεωρεί δηλαδή πως αυτές οι δύο ενότητες επεκτείνονται προς νότο μέχρι την Αττική και την Εύβοια. Ακόμη ο ίδιος ερευνητής εξέφρασε τη γνώμη πως οι ενότητες Ολύμπου – Όσσας και Κρανιάς – Ελασσόνας ανήκουν στην ενότητα Γαβρόβου – Τριπόλεως ως το μεταμορφωμένο τμήμα της. Σαν συνέχεια της μελέτης του απασχολήθηκε με το αυτόχθονο μεταμορφωμένο υπόβαθρο που συναντάται στη ΒΑ Αττική πάνω στο οποίο επωθείται το Νεοελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα. Η ενότητα Αφιδνών – Τουρκοβουνίων υπέρκειται του Τεκτονικού Καλύμματος και συναντάται, γεωγραφικά, ανάμεσα στην Πάρνηθα και στην Πεντέλη. Στη συγκεκριμένη ενότητα επωθούνται οι αμεταμόρφωτοι σχηματισμοί της Πάρνηθας και του όρους Αιγάλεω, όπου σύμφωνα με το μελετητή Κατσικάτσο ανήκουν στη ζώνη της Πελαγονικής. Επί του αυτόχθονου μεταμορφωμένου υποβάθρου στη ΒΑ Αττική επωθείται το Νεοελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα πάνω στο οποίο υπέρκειται η Ενότητα Αφιδνών – Τουρκοβουνίων. Η τελευταία ενότητα γεωγραφικά εντοπίζεται μεταξύ της περιοχής της Πάρνηθας και της Πεντέλης. Επί της ενότητας Αφιδνών – Τουρκοβουνίων επωθούνται οι μη μεταμορφωμένοι σχηματισμοί της Πάρνηθας και του όρους Αιγάλεω που σύμφωνα με τον Κατσικάτσο (1977, 1986) εντάσσονται στην Πελαγονική Ζώνη. Ο Παπαδέας το 2002 διαφοροποιήθηκε από όλες τις προηγούμενες απόψεις και εξέφρασε μία αλλιώςτική άποψη συνολικά για τη γεωλογία της Αττικής. Η στρωματογραφική στήλη ήταν ενιαία για όλη την Αττική και περιλάμβανε εναλλαγές ασβεστιτικών σχηματισμών

(ασβεστόλιθοι ή μάρμαρα) με σχιστολίθους ή γνευσίους. Πιστεύει πως το αντίκλινο Αθήνας – Καπανδριτίου είναι η ένωση των μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων της βορειοδυτικής Αττικής (Πάρνηθα) και των μεταμορφωμένων της νοτιοανατολικής Αττικής. Επίσης εξαιτίας της Αλπικής τεκτονικής εξέλιξης έγινε η μεταμόρφωση των πετρωμάτων, η οποία διαχώρισε τα μη μεταμορφωμένα πετρώματα από την Αττικοκυκλαδική μάζα. Στις σύγχρονες θεωρίες τώρα, οι ερευνητές εκτιμούν πως η πλειοψηφία των πετρωμάτων της Αττικής ανήκει στην Αττικοκυκλαδική ενότητα, η οποία ανήκει στις Εσωτερικές Ελληνίδες (Jacobshagen et al. 1978, Durr et al. 1978, Μουντράκης 1985, Κίλιας κ.αλ., 2004, Ring 2007 κ.α.). Στα δυτικά και βόρεια της Αττικής συναντώνται οι σχηματισμοί της Υποπελαγονικής Ζώνης (ή οι μη μεταμορφωμένοι σχηματισμοί της Πελαγονικής Ζώνης).



Εικόνα 2.1: Γεωτεκτονικός χάρτης (τροποποιημένος από Jacobshagen et al., 1978, Mountrakis et al., 1983) (Σπανός, 2012)

LEPSIUS (1963)	KOBER (1929)	SINDOWSKI (1949,1951)	ΜΑΡΙΝΟΣ & PETRASCHECK (1956), ΜΑΡΙΝΟΣ(1971,1974)	Photiades (2001)	ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟΣ (2002)	ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ (2004)
	Ανώτερη Βωστική Στερά (Σχηματισμοί Παρονήθης)				Ενώπιη Στερόλης Ιωρασκό - Πολιάκινο Ενώπιη Μορμυρόρα - Κατηράϊο - Λιθόφρακτοράο - Πολιάκινο	
Την Ανώτερη ασβεστολιθική βελήδα ή ασβεστολιθούς (C ₁) 250 Άνω Κρητικά	Κατώτερη Βωστική Στερά (UB)	ασβεστολιθικό-μαρματικό κλάσμα των Τυροφουνοϊών Άνω Κρητικός (C ₁ & C ₂) σπρίγματα Λιουρασκίου Α. Ιωρασκό (C ₂)	ανώτεροι σχετόλιθοι 170μ		Ασβεστολιθόι Τυροφουνοϊών & φλυσχαιδείς σχηματισμοί με αντηρίδες ασβεστολιθών Άνω Κρητικό	
Αθηναϊκοί σχετόλιθοι (C ₂) ανώτερος μαρματός οφθαλμός (C _{2a}) έχουν ασβεστολιθούς εντός τους (C _{2b}) 200	Ανώτερη Αττική Στερά (Oa)	ασβεστολιθόι Αρθητικό C ₂ Α. Τρωικό (Ραίτιο) - Ιωρασκό (Λιούτο)	ασβεστολιθός του Αρθητικό με μήγρες και ακαοθώματα 60μ Κατώτεροι σχετόλιθοι μήγρες 350μ Ιωρασκό έως Κ. Κρητικό	Αθηναϊκοί σχετόλιθοι (φάλαγγ) (Α. Κρητικό)	Ενώπιη Αρφαίων - Τυροφουνοϊών	Ασβεστολιθόι Σωόντιοι κατά θέσεις δευτερευτάσι σε εναλλαγές κωστικών ιζημάτων του Α. Κρητικού με βασικά και υπερβασικά σπρίγματα και τρυφίτες, μαφίτες και μαρμαρίκοι ασβεστολιθών (μείλαγγ)
Κατώτερη ασβεστολιθική βελήδα με ασβεστολιθούς (C ₃) μήγρες και σχετόλιθούς (C _{3a}) 100 Κ. Κρητικό-Ιωρασκό		ασβεστολιθός Αλκατοβουνοϊών C ₃ Α. Τρωικό (Ραίτιο) με πρωτολιθούς στη βάση	ασβεστολιθόι Αλκατοβουνοϊού	κρυσταλλικοί ασβεστολιθόι (>40μ.) νηρτικοί στο Άζτιο και πέλαγοι στο Σωόντιο	Νωσολιθώο Πεντακόο Κατάλαμο	Φωλλίτες, μεταφωλλίτες, κωστικές ασβεστολιθόι και κωστικές γυάλιγγες σε εναλλαγές με τεκτονικές σπυφές με συμμετρής κρυσταλλικούς ασβεστολιθούς του Τρωικού
Ανώτερη Μάρμαρα (Ma) Πρασαλλήρο ή Τρωικό 250μ.	Κατώτερη Αττική Στερά (Ua)	σπρίγματα Καρά C _{3a} M. - Άνω Κρητικό	Φωλλίτικο αλλόθρονο σπρίγμα Λιουρασκίως (ms) (Α. Κρητικό)	υπολιθώματα μαρματόν οροτόλιθον (>10μ.) «ρολιθώο Κατάλαμο» (μείση πεκτοική ενόστια) με σχετόλιθούς (100-250μ.) υπερκειμένους ασβεστολιθούς σχηματισμός (50μ.) , Άλβιο	Σχετόλιθοι με αντηρίδες μαρματόν	Ενώπιη Αλαμηνότιοι
μαρμαρινωτικοί σχετόλιθοι Κοκαρινούς (Gf)		Μάρμαρα Ρατίοο (Mu & Mo)	Ανώτερο Μάρμαρο 100μ. ογ (Mo)	αν. μάρμαρο (>150μ.) τρωικός έως νήσο υπερκειμένη φιλκίας	Μεταφώλλισης Μάρμαρα ΒΑ Αττικής Μεσοζωικό - Μ. Πόκκο	Παρα-αυτοθόνα σπρίγματα Αττικής
Κατώτερη Μάρμαρα (Ma) 500μ		λαμαρινόζοντες σχετόλιθοι (Λιούτο - Κ. Κρητικό) με πρωτολιθούς (Gf)	Σχετόλιθοι Κοκαρινούς ογ >300μ. (Gf)	σχετόλιθοι Κοκαρινούς (<200μ.) Ιωρασκίως φιλκίας	Σχετόλιθοι Σχηματισμοί ΒΑ Αττικής Κατ. - Μέσο Τρωικό	
δολομίτες και ασβεστολιθόκοι σχετόλιθοι Παρονήθης (Kd) 200μ. Αζωικό		Μάρμαρα Ρατίοο (Mu & Mo)	Κατώτερο Μάρμαρο ομ >600μ. (Mu)	κατ. μάρμαρο (350-500μ.) τρωικός έως νήσο υπερκειμένη φιλκίας	Μάρμαρα Πεντόλης Παλατοφουνοϊο-Κ.Μ. Τρωικό	
μαρμαρινωτικοί σχετόλιθοι (Ks) με γυάλιζοκοίς οφθαλμούς (σχετόλιθοι Βάρης) 100μ		Ασβεστολιθόι και δολομίτες Τρωικό				
		Σχετόλιθοι(λαμαρινόζοντες) Βάρης (Ks) Παλατοζωικό - Τρωικό				
		Γενόσιαι Πεντακόο				

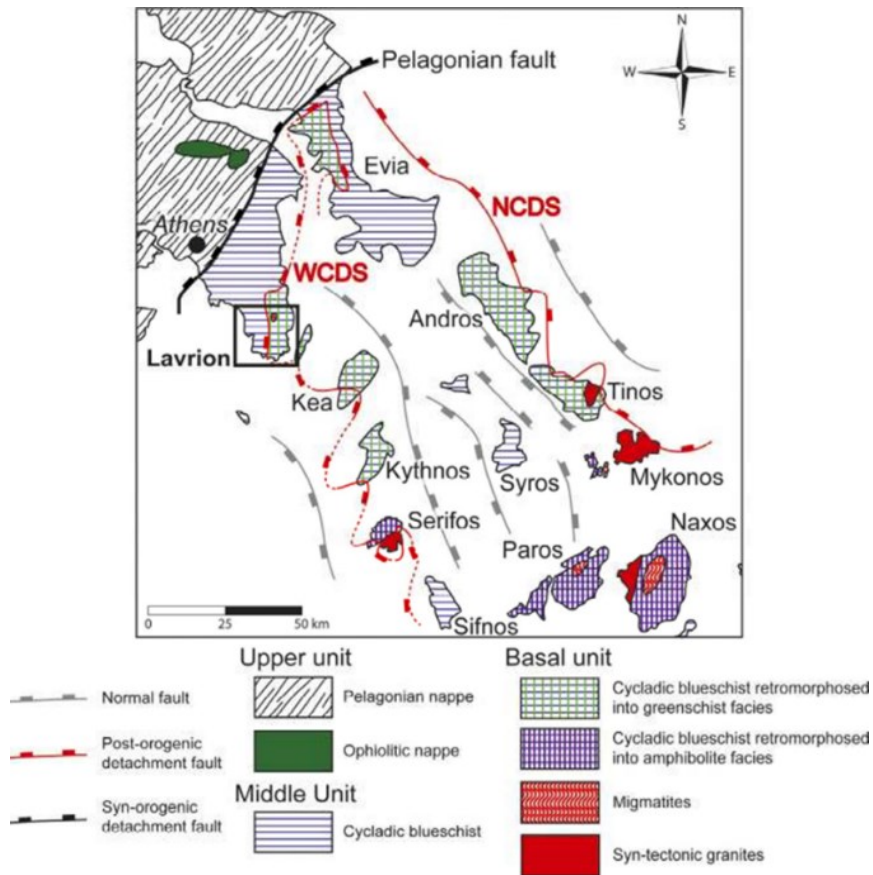
ΠΑΠΑΔΕΑΣ (2001)	
Ανώτερο Κρητικό	ολόγγης, Μοσφιόχο - Πολιάκινο (Πάονη - Αθήνα) ασβετολιθόι - μάρμαρα
Αν. Ιωρασκό - Κατ. Κρητικό	κωστική ιζηματα και λωτρίτες σχετολιθόι με γλωσσοκομή (Πάονη - Μαρμαρίο) οροτόλιθόι - κερρατόλιθοι (ΒΑ Υμητός - Αθήνα - Αζιόρα)
Τρωικό - Ιωρασκό	σχετολιθόι Α. Λιουρασκίως (Κωσικωκή - Αθήνα - Αζιόρα) Ασβετολιθόι, δολομίτες, μάρμαρα (Πάονη - Μαρμαρίο) βασικά, υπερβασικά, οροτόλιθοι (Πάονη - Μαρμαρίο) ασβετολιθόι, μαρμαρά και σχετολιθόι
Πέρμο - Άνω Αθηναϊκό	ασβετολιθόι - σχετολιθόι με αντηρίδες μαρματόν και βασικά εκρησσηση
Μέσο - Κάτω Αθηναϊκό	Ανώτερο Μάρμαρο Αρφαίων Αν. Αθιναϊκοφράκο
Αζωικό	κωστικωκόι ιζηματα και επενεστη μετλοφορία η φιλκίτικος τρυφός - μετατρυφός τερυφόνιοι Σχετολιθόι με αντηρίδες μαρματόν Κ. Αθιναϊκοφράκο Κατώτερο Μάρμαρα Πεντόλης- Αζιόρα Μέσο Αζιόρα

ρήγμα κανονικό

ρήγμα κανονικό με ένδειξη της ανόστης

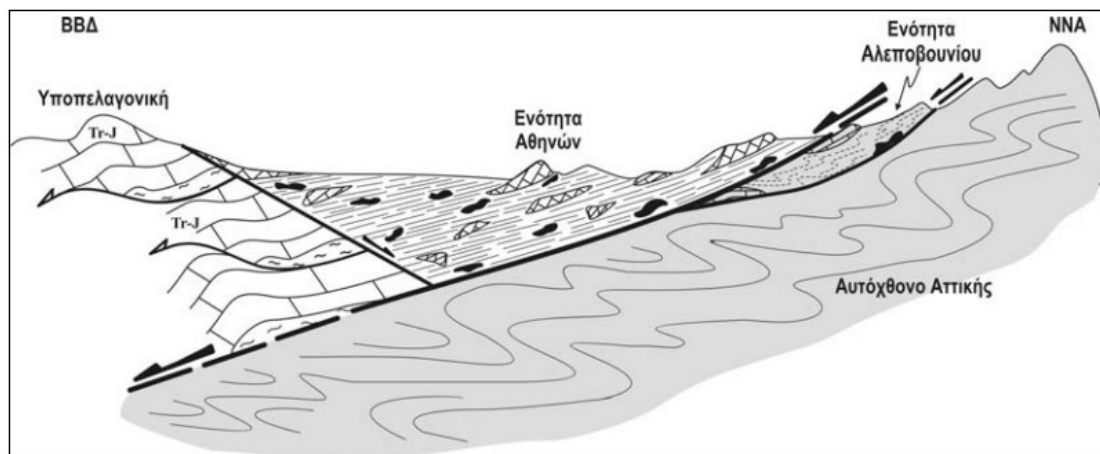
ασημωσία

Εικόνα 2.2: Παρουσίαση όλων των απόψεων που έχουν αποτυπωθεί για τη γεωλογία της Αττικής. (Lepsius 1983, Kober 1929, Sindowski 1949,1951, Μαρίνος & Petrascheck 1956, Photiades 2001, Κατσικάτος 2002, Παπαδέας 2002, Παπανικολάου 2004). Οι συμβολισμοί των σχηματισμών του Lepsius στην πρώτη στήλη, χρησιμοποιούνται και στους υπόλοιπους ερευνητές για την εύκολη ανάγνωση του πίνακα



Εικόνα 2.3: Σχηματικός γεωλογικός χάρτης της Αττικοκυκλαδικής ενότητας. Παρουσίαση των συστημάτων αποκόλλησης στις Κυκλάδες, WCDS - σύστημα αποκόλλησης Δυτικών Κυκλάδων; NCDS - Βόρειο Κυκλαδικό σύστημα αποκόλλησης (Durr et al., 1978, Jolivet et al., 2010, Jacobshagen, 1986, Grasemann et al. (2012), Scheffer et al., 2016, και Seman., 2016)

Η γεωλογία του Λεκανοπεδίου της Αττικής είναι διαμορφωμένη από το κανονικό ρήγμα μικρής κλίσης, αποκόλληση - detachment. Είναι μία μεγάλη σε έκταση τεκτονική δομή που οριοθετεί στα ανατολικά της τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Αττικής και δυτικά της την ενότητα της Υποπελαγονικής. Η συγκεκριμένη αποκόλληση έχει εφελκυστικό χαρακτήρα και έχει προκαλέσει βύθιση με διεύθυνση ΒΒΔ στα πετρώματα της Υποπελαγονικής και της Ενότητας των Αθηνών, ενώ έχει προκαλέσει ανύψωση με διεύθυνση ΝΝΑ στα πετρώματα της ενότητας Αλεποβουνίου και του Αυτόχθονου Μεταμορφωμένου της Αττικής.



Εικόνα 2.4: Η γεωλογική δομή του Λεκανοπεδίου της Αττικής (Παπανικολάου et al.2004)

Οι γεωτεκτονικές ενότητες που απαντώνται στην Αττική είναι:

➤ Ενότητα Αλμυροποτάμου

Οι σχηματισμοί της ενότητας επεκτείνονται στην Α-ΒΑ Αττική και απαρτίζουν τα όρη Πεντέλης, Υμηττού. Ο Παπανικολάου το 2002 διαχώρισε την ενότητα στις εξής επιμέρους:

- Ενότητα Βάρης. Είναι μεταμορφωμένο τμήμα με Τριαδική ηλικία πετρωμάτων αλλά δεν έχει διευκρινιστεί ποια είναι η γεωτεκτονική της τοποθέτηση. Έχει συνδεθεί εν μέρει με τους «Σχιστολίθους Βάρης» καθώς και με τους «Δολομίτες και Ασβεστολιθικούς Σχιστολίθους Πιρναρής» όπως ονομάσθηκαν από τον Lepsius (1893). Αποτελείται από σχιστόλιθους και μεταβασικά πετρώματα στη βάση της στρωματογραφικής στήλης και προς τα ανώτερα στρώματα εντοπίζονται δολομιτικά μάρμαρα. Η δομή της στήλης είναι πολύπλοκη με ισοκλινείς πτυχές και εσωτερικές εφίππευσεις.
- Ενότητα Υμηττού. Είναι υπερκείμενη ενότητα. Αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα του Τριαδικού – Ιουρασικού αλλά απαρτίζεται και από σχηματισμούς που η ηλικία τους δεν έχει προσδιοριστεί ακόμη. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Lepsius (1893) ταυτίζεται με το «Κατώτερο Μάρμαρο», το «Ανώτερο Μάρμαρο» και τους «Σχιστολίθους της Καισαριανής». Αποτελείται συνολικά από ακολουθία μαρμάρων και δολομιτών τα οποία μεταβαίνουν σε σχιστολίθους. Είναι πτυχωμένα με ισοκλινείς πτυχές, οι οποίες διατρέχουν αρκετά χιλιόμετρα. Οι σχιστόλιθοι σε κάποιες εμφανίσεις περιέχουν στη μάζα τους μεταβασικά και υπερβασικά πετρώματα.
- Ενότητα Πεντέλης. Συγκαταλέγεται στις εξωτερικές Ελληνίδες με σχηματισμούς που μπορούν να παρομοιαστούν με αυτούς της ενότητας της Τρίπολης. Η βάση της στρωματογραφικής της κολώνας ξεκινά με μετά-ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα και ακολουθούν οριζοντες παχυστρωματώδων μαρμάρων.

➤ Υποπελαγονική ενότητα

Αποτελείται κυρίως από αμεταμόρφωτα ιζηματογενή πετρώματα τα οποία εντοπίζονται στη ΒΔ Αττική και συγκεκριμένα στο Ποικίλο όρος, στο όρος Πάρνηθα και όρος Αιγάλεω (Marinos & Petracheck 1956, Παπανικολάου 1986). Το υπόβαθρο της ενότητας συγκροτείται από γνευσίους, μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους, αμφοβόλιτες με παρεμβολές μαρμάρων και αντιστοιχείται με το υπόβαθρο της Πελαγονικής ενότητας ηλικίας κάτω Παλαιοζωικό (Συριόπουλος κα., 1988). Στην ευρύτερη περιοχή της Πάρνηθας έχουν βρεθεί πετρώματα ηλικίας ανώτερου Παλαιοζωικού, αμεταμόρφωτα. Συνολικά είναι ασβεστόλιθοι Περμικής ηλικίας και σχιστόλιθοι έως ψαμμίτες περιέχοντας ασβεστολιθικούς φακούς του Λιθανθρακοφόρου (Clement 1971, Χριστοδούλου 1982, Δούτσος 2000).

Ο κορμός της στρωματογραφικής στήλης της Υποπελαγονικής δομείται από ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους που εμφανίζονται λευκοί, τεφρόλευκοι και σπάνια ροδόχροοι. Η φάση εναπόθεσης είναι νηριτική και εμφανίζονται από άστρωτοι έως παχυστρωματώδεις. Τα πετρώματα είναι κερματισμένα με πυκνές διακλάσεις και δευτερογενές πορώδες εξαιτίας της καρστικοποίησης. Το πάχος τους είναι σε κάποιες περιοχές εκατοντάδες μέτρα. Η βάσης της κολώνας είναι ένα ηφαιστειοϊζηματογενές σύμπλεγμα με εναλλαγές από τεφροπράσινους αργλικούς σχιστόλιθους, ψαμμίτες, πηλίτες,

κροκαλοπαγή, τόφφους. Ανάμεσά τους εντοπίζονται ασβεστόλιθοι, αρκόζες, γραουβάκες αλλά και κομμάτια λάβας που μαρτυρούν συνήθως κάποιο χαλαζιακό κερατοφύρη.

✓ **Αλλόχθονο Λεκανοπεδίου Αττικής ή «Σχιστόλιθοι των Αθηνών»**

Αποτελείται από την Ενότητα Αθηνών και την ενότητα Αλεποβουνίου, οι οποίες είναι η υπερκείμενη και η υποκείμενη αντίστοιχα της ενότητας των «Σχιστολίθων των Αθηνών» (Marinos et al. 1971, 1974). Το 1986 ο ερευνητής Κατσικάτσος ονόμασε τους «Σχιστολίθους των Αθηνών» Νεοελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα.

- **Ενότητα Αθηνών.** Εντοπίζεται στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του Λεκανοπεδίου και τοποθετείται τεκτονικά υπερκείμενη της Υποελαγονικής στα δυτικά ενώ στα ανατολικά τεκτονικά υπερκείμενη της ενότητας Αλεποβουνίου. Θα μπορούσε να υποστηρίξει κανείς πως η ενότητα Αθηνών διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα καθώς περιλαμβάνει σχηματισμούς οι οποίοι εμφανίζουν δύο διαφορετικές λιθοφάσεις όπως και διαφορετική τεκτονική παραμόρφωση. Το πρώτο τμήμα της αποτελείται από συμπαγείς, λευκούς, ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους ηλικίας Ανώτερο Κρητιδικό. Η φάση εναπόθεσης είναι νηρητική και είναι άστρωτοι. Το δεύτερο τμήμα της ενότητας είναι ένα *mélange*, δηλαδή μία χαοτική ζώνη πετρωμάτων ηλικίας Ανώτερο Κρητιδικό. Αποτελείται από κλαστικούς σχηματισμούς όπως άργιλοι, ψαμμίτες, πηλίτες, ψαμμιτικές μάργες αλλά και πελαγικούς πλακώδεις ασβεστολίθους που σπάνια εντοπίζονται με κονδύλους πυριτολίθων. Στις θέσεις των παλιών λατομείων στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του Λεκανοπεδίου έχουν χαρτογραφηθεί οι εναλλαγές των δύο τμημάτων που αναλύθηκαν. Οι επιφάνειες που φέρνουν σε επαφή τα δύο τμήματα είναι τεκτονικές.
- **Ενότητα Αλεποβουνίου.** Εμφανίζεται στο ανατολικό τμήμα του Λεκανοπεδίου και τεκτονικά εμφανίζεται σαν μία τεκτονική σφήνα. Βρίσκεται ανάμεσα στην υπερκείμενη Ενότητα Αθηνών και στους υποκείμενους μεταμορφωμένους σχηματισμούς του Υμηττού. Λιθολογικά χωρίζεται σε δύο τμήματα όπου το ένα υπέρκειται τεκτονικά από το άλλο. Το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα αποτελείται από συμπαγείς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους. Το χρώμα τους κυμαίνεται από λευκό έως ερυθρόλευκο. Η στρώση δεν είναι σαφής αλλά σε κάποιες εμφανίσεις είναι παχυστρωματώδεις. Το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα αποτελείται από μεταμορφωμένα έως ημι-μεταμορφωμένα σχιστομαργαϊκά πετρώματα και φυλλίτες. Είναι σχιστοποιημένα ιδίως ακριβώς κάτω από την τεκτονική επαφή προς τα υπερκείμενα ασβεστολιθικά πετρώματα της ενότητας Αλεποβουνίου. Πετρολογικά σε όλο το κάλυμμα υπάρχουν ασαφή όρια ανάμεσα στους σχηματισμούς και γι' αυτό συναντώνται φυλλίτες και μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι μαζί με πλακώδεις ασβεστολίθους αλλά και χαλαζίτες. Αρκετοί ερευνητές έχουν εκτιμήσει πως το κατώτερο κάλυμμα αντιστοιχεί με τα «Στρώματα Καρά» των Lepsius 1893, Kober 1929.

2.2 Μεταλικοί Σχηματισμοί

Οι μεταλλικοί σχηματισμοί χωρίζονται σε Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμούς. Οι Νεογενείς σχηματισμοί ανάλογα με τη φάση απόθεσής τους αλλά και με τη γεωγραφική τους κατανομή διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Παπανικολάου κ.α. 2004):



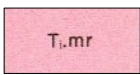
- ✓ Θαλάσσιοι (περιέχονται κυρίως θαλάσσιες αποθέσεις, καθώς και παράκτιες, παράλιες φάσεις – τους βρίσκουμε στο νότιο τμήμα του λεκανοπεδίου Αθηνών). Οι σχηματισμοί που απαντώνται είναι:
 - Μάργες, ψαμμίτες, μαργαϊκοί ψαμμίτες, λατυποπαγή, ασβεστόλιθοι (Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί)
 - Κλαστική σειρά που συναντώνται άργιλοι και ιλύες με παρουσία σχιστολιθικών λατύπων, αμμούχες μάργες, λατυποπαγή σε διαφορετικό ποσοστό εμφάνισης (άνω Μειοκαινικοί σχηματισμοί). Η συγκεκριμένη σειρά συνήθως είναι υποκείμενη των ανθρακικών άνω Μειοκαινικών σχηματισμών, οι οποίοι εμφανίζονται ως λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, ασβεστοψαμμίτες, κοραλλιογενείς και ωλιθικοί ασβεστόλιθοι.
- ✓ Ηπειρωτικοί (περιέχονται κυρίως λιμναίες έως λιμνοχερσαίες αποθέσεις). Τις αποθέσεις αυτές τις συναντάμε στο βόρειο τμήμα του λεκανοπεδίου Αθηνών. Έχουν εντοπιστεί και απολιθώματα της Πικερμικής πανίδας (Πύργος Βασιλίσσης). Οι σχηματισμοί που απαντώνται είναι:
 - Άμμοι και άργιλοι που είναι υπερκείμενοι των άνω Μειοκαινικών ηπειρωτικών σχηματισμών (Πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί).
 - Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, αμμούχες μάργες και μάργες (λιμναία φάση) και ερυθρές άργιλοι και λατυποπαγή (χερσαία φάση) (άνω Μειοκαινικοί ηπειρωτικοί - λιμναίοι σχηματισμοί).

Σε αρκετές θέσεις πάνω από τους Νεογενείς σχηματισμούς συναντώνται οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί. Αυτοί κυρίως είναι τα φερτά υλικά από τους ποταμούς του Λεκανοπεδίου, οι παράκτιες αποθέσεις, οι ποτάμιες αναβαθμίδες, τα πλευρικά κορήματα, τα ριπίδια και οι κώνοι κορημάτων.

2.3 Γεωλογική δομή Πεντέλης

Το όρος της Πεντέλης αποτελείται από μεσοζωικής ηλικίας πετρώματα. Μάρμαρα και μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι που γεωτεκτονικά ανήκουν στην ενότητα Αλμυροποτάμου Αττικής. Οι κύριοι ορίζοντες που απαντώνται στο Πεντελικό όρος είναι οι παρακάτω σύμφωνα με το φύλλο – χάρτη του ΙΓΜΕ “Κηφισιά” κλίμακας 1:50.000:

Απόσπασμα Υπομνήματος

Σχηματισμός	Περιγραφή
	Μάρμαρα βορειοανατολικής Αττικής που φιλοξενούν κοιτάσματα σιδηρομεταλλεύματος (Fe)
	Σχιστολιθικοί σχηματισμοί βορειοανατολικής Αττικής (J.sch) με ενστρώσεις μαρμάρων (J.mr) και σερπεντινιτών (σ)
	Μάρμαρα Πεντέλης (T..mr)

Το κατώτερο μάρμαρο, που αποτελεί τον κατώτερο ορίζοντα. Το χρώμα του είναι ελαφρώς κιτρινωπό. Σε κάποιες εμφανίσεις γίνεται πράσινο έως τεφροπράσινο διότι διάσπαρτα περιέχει χλωρίτη και μοσχοβίτη σχηματίζοντας φλεβίδια ή φακοειδής μορφές.

Ο υπερκείμενος σχηματισμός είναι αυτός των μαρμαρυγιακών σχιστολίθων της Καισαριανής. Ανάμεσά τους υπάρχουν ταινιωτές εμφανίσεις μαρμάρου με χρώμα κυανότεφρο. Ορυκτολογικά οι σχιστόλιθοι αποτελούνται από μοσχοβίτη, χαλαζία, επίδοτο και ασβεστίτη. Το ανώτερο μάρμαρο, το οποίο συναντάται στα υψηλότερα τμήματα του Πεντελικού όρους (Lepsius 1893). Απαρτίζεται από λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη μάρμαρα, με χρώμα που κυμαίνεται από τεφρόλευκο έως κυανόλευκο. Η δομή τους είναι λεπτοκρυσταλλική έως μεσοκρυσταλλική. Το πάχος του σχηματισμού, φθάνει τα 650m. Σε διάφορα σημεία συναντάται εναλλαγή μαρμάρων με σχιστόλιθους που έχουν διαφορετικό πάχος ανά εμφάνιση.

Σε όλη την έκταση της Πεντέλης ανάλογα και με τη μορφολογία υπάρχουν εμφανίσεις Τεταρογενών αποθέσεων, κυρίως λεπτόκοκκα υλικά με πάχος μικρότερο από 5m. Επίσης, διάφορα υλικά που προέρχονται από την αποσάθρωση και τη διάβρωση των μητρικών πετρωμάτων. Ακόμη, συναντώνται πλευρικά κορήματα, κώνοι κορημάτων και αλλουβιακά ριπίδια.

2.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Το υδρογραφικό δίκτυο του Πεντελικού όρους είναι αραιό χωρίς συγκεκριμένη κατεύθυνση ανάπτυξης. Οι κλάδοι του είναι της τάξης 3^{ης} και 4^{ης}. Στις περιοχές ανάπτυξης των μαρμάρων η επιφανειακή απορροή είναι χαμηλή (περίπου το 50-60% από τα συνολικά κατακρημνίσματα). Αντιθέτως στους σχιστολίθους η επιφανειακή απορροή είναι πιο αυξημένη (περίπου το 70-80% από τα συνολικά κατακρημνίσματα).

Το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνό με χαρακτηριστικά δενδριτικού τύπου έχοντας αυξημένες κλίσεις στην κοίτη ροής και έντονη χειμαρρική δράση. Στη νοτιοδυτική πλευρά τα υδατορέματα ίσως είναι τα πιο σημαντικά καθώς έχουν διαμορφώσει παράλληλες, επιμήκεις υδρολογικές λεκάνες. Η πιο σημαντική είναι η λεκάνη του ρέματος «Βαθύ» το οποίο χαμηλότερα συμβάλλει με το ρέμα Χαλανδρίου και ενώνονται με τον ποταμό Κηφισό που διαπερνά όλο σχεδόν το λεκανοπέδιο της Αττικής.

Σε μεγάλα βάθη στο Πεντελικό όρος εντοπίζεται πλούσια υπόγεια υδροφορία, η οποία μέσω γεωτρήσεων αξιοποιείται για αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες. Κατά τους χειμερινούς μήνες, συνήθως, σε κάποια σημεία στην επαφή των περατών μαρμάρων με τους αδιαπέρατους σχιστολίθους το νερό αναβλύζει λόγω υπερχειλίσης των υπογείων υδάτων. (Μερτζάνης Α., Σκοτίδα Α., Ευθυμίου Γ., Ζακυνθινός Γ., 2004)

Γεωλογία Σπηλιάς Νταβέλη – Μορφολογία

Ο θάλαμος της Σπηλιάς του Νταβέλη καθώς και τα πρανή που υπάρχουν δεξιά και αριστερά από την είσοδο βρίσκονται εντός των μαρμάρων. Τα δύο πρανή είναι σχεδόν κατακόρυφα ενώ το αριστερό είναι παρακατακόρυφο. Το ύψος τους φτάνει μέχρι και τα 40m. Είναι πολύ απότομα και με μεγάλες κλίσεις. Η είσοδος της Σπηλιάς είναι επιβλητική με διαστάσεις περίπου 30m πλάτος και 20m ύψος.



Φωτογραφία 2-1: Τα δύο πρανή και η είσοδος της Σπηλιάς



(α)



(β)

Φωτογραφία 2-2: Το τέλος του θαλάμου (α), εσωτερικό της Σπηλιάς (β)

3. Δεδομένα Τρισδιάστατης απεικόνισης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα τρισδιάστατης απεικόνισης που αποκτήθηκαν από την εταιρία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ. Η Σπηλιά έχει αποτυπωθεί εξ ολοκλήρου με το όργανο GeoSlam ZEB-REVO και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε από το λογισμικό CloudCompare.

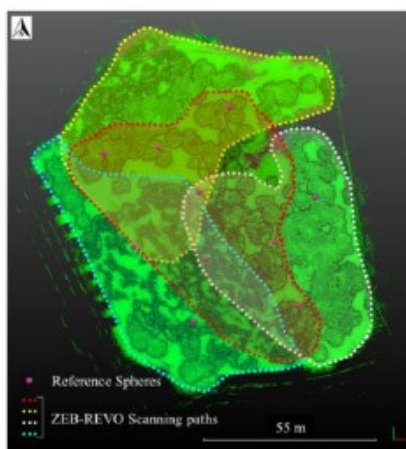
3.1 Τρισδιάστατοι Σαρωτές Laser

Οι κινητοί σαρωτές λέιζερ αποτυπώνουν με μεγάλη ακρίβεια και ανάλυση τη γεωμετρία των αντικειμένων και παράγουν τρισδιάστατα νέφη σημείων τα οποία είναι αρκετά πυκνά και αποδίδουν με μεγάλη λεπτομέρεια την κατανομή του χώρου αποτύπωσης. Τα κινητά συστήματα σάρωσης (MLS - Mobile Laser Systems) αξιοποιούν την τεχνολογία σάρωσης με λέιζερ με άλλους αισθητήρες (πχ αδρανειακές μονάδες μέτρησης – IMU). Ο φορητός τους εξοπλισμός επιτρέπει την ψηφιοποίηση σε σύνθετα και δύσβατα περιβάλλοντα. Είναι εφικτό να τα τοποθετήσουμε σε κινητά αντικείμενα επιλογής μας, όπως σε ένα όχημα ή ένα UAV και καθώς θα κινούνται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος θα σκανάρουν και θα αποθηκεύουν πολλές χιλιάδες σημεία το δευτερόλεπτο.

Η τεχνολογία SLAM έχει εξαλείψει κατά μεγάλο βαθμό τα προβλήματα με την ακρίβεια των φορητών σαρωτών σχετικά την τροχιά τους και το επίπεδο ακριβείας τους. Για αυτό το λόγο υπάρχει μέλλον όσον αφορά τη χρήση αυτών των οργάνων σε χώρους όπου δε χρειάζεται να υπάρχει σήμα GNSS ή επαφή με δορυφόρους. Τέτοιοι χώροι είναι τα υπόγεια έργα, οι στοές, τα σπήλαια, κ.ά. (Cabo, et al., 2018). Είναι γνωστό πως τα GPS δε μπορούν να λειτουργήσουν σε εσωτερικούς χώρους καθώς η αρχή λειτουργίας τους είναι να έχουν οπτική επαφή με δορυφόρους. Άρα αυτομάτως είναι αδύνατη η αποτύπωση εσωτερικών χώρων κτιρίων, ορυχείων, στοών, σπηλαίων, κ.ά. Η λύση για την επίτευξη αποτύπωσης χώρων χωρίς τη χρήση GPS ήρθε από τη τεχνολογία Zebedee της CSIRO όπου τη χρησιμοποιεί και η εταιρεία GeoSLAM στα όργανα ZEB1 και στο ZEB-REVO χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους Simultaneous Localisation & Mapping (SLAM). Οι αλγόριθμοι SLAM επεξεργάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων του laser σε συνδυασμό με τα δεδομένα θέσης του IMU και εφαρμόζουν ρουτίνες αναγνώρισης χαρακτηριστικών ώστε να εκτελέσουν το cloud-to-cloud registration, αυτόματα και με υψηλό επίπεδο ακρίβειας, στα δεδομένα των μετρήσεων. Οπότε, το λογισμικό SLAM της GeoSLAM και οι συσκευές laser δεν απαιτείται να είναι ακίνητες κατά τη διάρκεια της σάρωσης και φυσικά δεν απαιτούν οπτική επαφή με τον ουρανό και κατ' επέκταση με τους δορυφόρους του GPS.

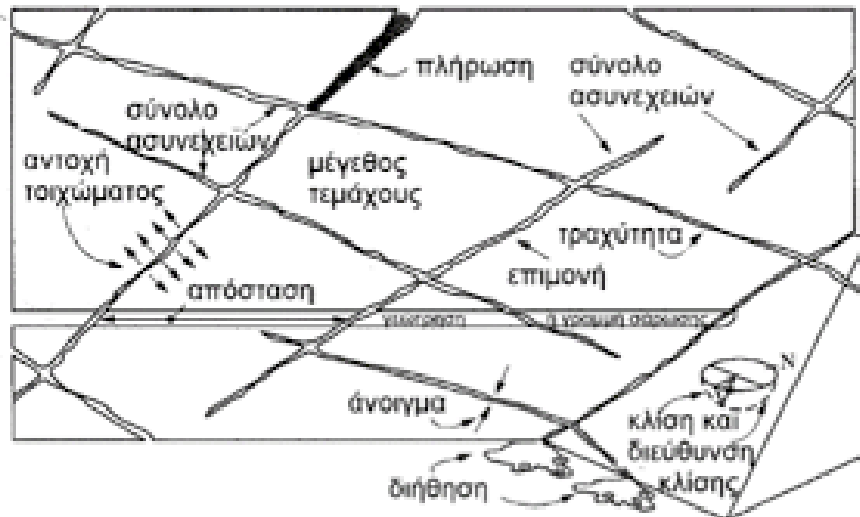
Τα δεδομένα συλλογής από τα κινητά συστήματα σάρωσης (MLS) εκτελούν αυτόματη επεξεργασία δεδομένων μέσω κατάλληλου λογισμικού. Για κάθε σάρωση δημιουργείται ένα ξεχωριστό τρισδιάστατο μοντέλο και στη συνέχεια αν υπάρχουν περισσότερες σαρώσεις για τον ίδιο χώρο εκτελείται η διαδικασία ευθυγράμμισης και συνένωσης των διαφόρων νεφών σάρωσης. Το αποτέλεσμα από αυτή τη διαδικασία είναι η εξαγωγή ενός τρισδιάστατου τελικού μοντέλου. Αν υπάρχουν περισσότερες από μία σάρωση σε ένα χώρο καλό είναι να έχει προβλεφθεί επαρκής επικάλυψη μεταξύ των σαρώσεων. Αυτό προϋποθέτει πως πριν τη διαδικασία της σάρωσης θα πρέπει να έχουν τοποθετηθεί κάποιοι στόχοι ώστε να καταγράφονται και να επιτυγχάνεται η επικάλυψη.

Στην *Εικόνα 3.1* διακρίνονται οι περιοχές σάρωσης και οι περιοχές επικάλυψης από τις τμηματικές σαρώσεις.



Εικόνα 3.1: Σάρωση μίας περιοχής με το φορητό σαρωτή τον φορητό σαρωτή laser ZEB-REVO (WLS) (Cabo, et al., 2018)

Στη γεωτεχνική μηχανική η αποτύπωση με όργανο τρισδιάστατης σάρωσης συμβάλλει στο χαρακτηρισμό της βραχώμαζας αλλά και στον προσδιορισμό των γεωλογικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού. Έως και σήμερα η χαρτογράφηση ενός πεδίου ενδιαφέροντος γίνεται με την καταγραφή των γεωλογικών σχηματισμών σε χάρτη προκαθορισμένης κλίμακας, με τη γεωλογική πυξίδα για την καταγραφή δεδομένων, όπως η κλίση και η φορά μέγιστης κλίσης. Επίσης αποτύπωση του πεδίου με φωτογραφική μηχανή για ανάδειξη κρίσιμων σημείων ή ιδιαίτερων εμφανίσεων. Πραγματοποιείται καταγραφή των ασυνεχειών και των χαρακτηριστικών τους (τραχύτητα, απόσταση, άνοιγμα, η εμμονή τους στο χώρο, ύπαρξη υλικού πλήρωσης, κ.ά) όπως διακρίνονται και στην *Εικόνα 3.2*. Η αποτύπωση, με όργανο τρισδιάστατης σάρωσης, των πεδίων πραγματοποιείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα σε σχέση με την παραδοσιακή χαρτογράφηση. Ακόμη όλα τα δεδομένα είναι άμεσα διαθέσιμα και σε ψηφιακή μορφή. Επίσης από τα πρωτογενή δεδομένα έως και κάποιο αποτέλεσμα από την επεξεργασία υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής τους σε διάφορα λογισμικά, όπως το AutoCAD, και να ακολουθήσει μία νέα επεξεργασία.



Εικόνα 3.2: Παράμετροι χαρακτηρισμού βραχώμαζας (Hudson, 1989)

Πιο συγκεκριμένα οι πληροφορίες που λαμβάνονται από το νέφος σημείων που δημιουργήθηκε είναι:

1. Πληροφορίες ως προς τη γεωμετρία. Παρέχεται η δυνατότητα εντοπισμού ενός ρήγματος αλλά και η πληροφορία σχετικά με τα χαρακτηριστικά του, διεύθυνση και κλίση. Επίσης γίνεται εντοπισμός ασυνεχειών και καταγραφή των χαρακτηριστικών τους (τραχύτητα, απόσταση, άνοιγμα, η εμμονή τους στο χώρο, ύπαρξη υλικού πλήρωσης, κ.ά). Σε γενικές γραμμές όλες οι πληροφορίες είναι σε τρισδιάστατη μορφή οπότε αποτυπώνουν πλήρως το χώρο.
2. Πληροφορίες ως προς την οπτικοποίηση του χώρου ενδιαφέροντος καθώς παρέχει έγχρωμες εικόνες και εικόνες έντασης λέιζερ μέσω των οποίων προσδιορίζεται το είδος των σχηματισμών αλλά και η ύπαρξη παρουσίας νερού.

3.2 Δεδομένα τρισδιάστατης για την Σπηλιά του Νταβέλη από την εταιρεία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ

Η εταιρεία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας μας παραχώρησε τα δεδομένα σχετικά με την τρισδιάστατη αποτύπωση της Σπηλιάς του Νταβέλη. Όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο *Αναλύσεις ευστάθειας θαλάμου* το συγκεκριμένο νέφος σημείων χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η ευστάθεια στο εσωτερικό της Σπηλιάς. Η χρήση της γεωλογικής πυξίδας στο εσωτερικό της Σπηλιάς είναι ανέφικτη καθώς τα πετρώματα είναι καλυμμένα με ένα λεπτό έως και αρκετά παχύ σε κάποια σημεία στρώμα από βρύα. Τα βρύα οφείλονται στην εισροή και κίνηση του νερού η οποία ευνοείται λόγω των ασυνεχειών εντός της βραχώμαζας.

Η εταιρεία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ ιδρύθηκε το 1968 στην Αθήνα. Η έδρα της από το 2005 είναι στον Άγιο Δημήτριο Αττικής σε ιδιόκτητα γραφεία και απασχολεί περίπου 10 εργαζόμενους. Ο σκοπός της είναι η εισαγωγή τοπογραφικών οργάνων υψηλής τεχνολογίας στη χώρα μας. Καλύπτει τις ανάγκες σχετικά με τοπογραφικό εξοπλισμό σε κατασκευαστικές εταιρείες, τεχνικά - μελετητικά γραφεία, τεχνικές υπηρεσίες Δήμων ακόμα και ιδιώτες

μηχανικούς. Παρέχει δυνατότητα τόσο ενοικίασης εξοπλισμού όσο και πώλησης. Η εταιρεία συνεχώς βελτιώνεται και ακολουθεί τους ρυθμούς εξέλιξης της τεχνολογίας. Αυτός άλλωστε είναι ο λόγος για τον οποίο κατέχει ηγετική θέση στην ελληνική αγορά. Διαθέτει εξειδικευμένους τεχνικούς οι οποίοι παρέχουν service στα όργανα και υποστηρίζουν συνολικά τους πελάτες της εταιρείας. Τα όργανα που διαθέτουν δίνουν ολοκληρωμένες λύσεις σε εφαρμογές όπως δορυφορικές, γεωδαιτικές, βιομηχανικές, οδοποιίας, φωτογραμμετρικές, πλοήγησης, τοπογραφικές αλλά και σε εφαρμογές κτηματολογίου. Από το 2007 μέχρι και σήμερα έχει συνάψει συνεργασίες με πολλές μεγάλες εταιρείες από όλο τον κόσμο και μέχρι σήμερα παραμένει ο αντιπρόσωπός τους στην Ελλάδα. Κάποιες από αυτές είναι η εταιρεία Topogeo, Sokkia, Javad GNSS, Carlson, Nedo, FOIF, ALTUS, CLAUSS, PENTAX, GeoSLAM, Senceive, Z+F, RUIDE, κ.ά. Αξίζει να σημειωθεί πως έχει βραβευτεί αρκετές φορές από διάφορες εταιρείες – συνεργάτες της. Πιο συγκεκριμένα από την εταιρεία Sokkia έχει βραβευτεί δύο φορές, το 2007 ως η 3^η καλύτερη αντιπροσωπεία σε πωλήσεις στην Ευρώπη και το 2008 ως την πιο παλιά αντιπροσωπεία στην Ευρώπη. Επίσης, το 2014 από την εταιρεία PENTAX βραβεύτηκε ως η καλύτερη νέα αντιπροσωπεία της στην Ευρώπη. Μία ακόμη βράβευση έγινε το 2019 από την εταιρεία RUIDE λαμβάνοντας το βραβείο «Sales Growth Award 2019».

3.3 GeoSLAM ZEB-REVO

Το 2016 η εταιρεία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ πραγματοποίησε για διαφημιστικούς λόγους τρισδιάστατη χαρτογράφηση στη Σπηλιά του Νταβέλη στην Πεντέλη χρησιμοποιώντας το όργανο GeoSlam ZEB-REVO, το ελαφρύ περιστρεφόμενο laser-scanner και η αποτύπωση έγινε σε μόλις 20 λεπτά. Το συγκεκριμένο όργανο έχει το πλεονέκτημα ότι δε χρειάζεται να είναι ακίνητο όση ώρα πραγματοποιείται η σάρωση του χώρου σε αντίθεση με τα υπόλοιπα terrestrial laser scanner. Επίσης η αποτύπωση δεν απαιτεί μεγάλο εργατικό δυναμικό, αρκεί ένας άνθρωπος ο οποίος θα το κρατάει και θα περπατάει στο χώρο (Εικόνα 3.3) με αποτέλεσμα να αποτυπώνονται ακόμη και τα πιο απόκρυφα, δύσβατα σημεία. Επίσης ένα άλλο πλεονέκτημα του οργάνου είναι πως δεν απαιτεί τοποθέτηση στόχων και το λογισμικό GeoSLAM Hub Software κάνει αυτόματα το cloud registration. Οπότε η δουλειά γραφείου σχεδόν μηδενίζεται για την επεξεργασία και παραγωγή του συνολικού νέφους σημείων. Η ακρίβεια του οργάνου είναι της τάξης των 2-3 εκατοστών και η ταχύτητα σάρωσης είναι 43.200 σημεία/δευτερόλεπτο.

Σύμφωνα με την τρισδιάστατη απεικόνιση που έλαβε χώρα οι διαστάσεις της Σπηλιάς υπολογιστήκαν με ακρίβεια εκατοστού σε:

Μήκος θαλάμου: 85m

Μέγιστο πλάτος: 40m

Ύψος: 20 m



Εικόνα 3.3: Αποτύπωση στο χώρο της Σπηλιάς του Νταβέλη

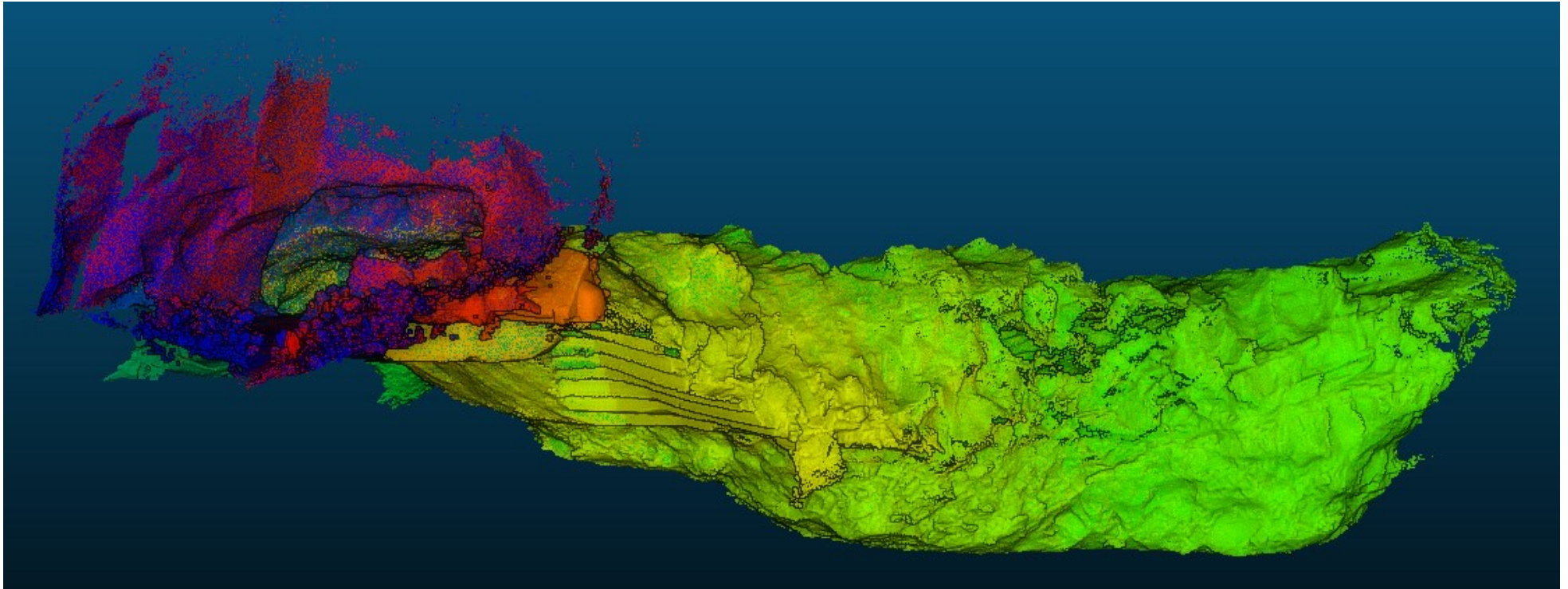


Εικόνα 3.4: Όργανο GeoSlam ZEB-REVO με το οποίο πραγματοποιήθηκε η αποτύπωση

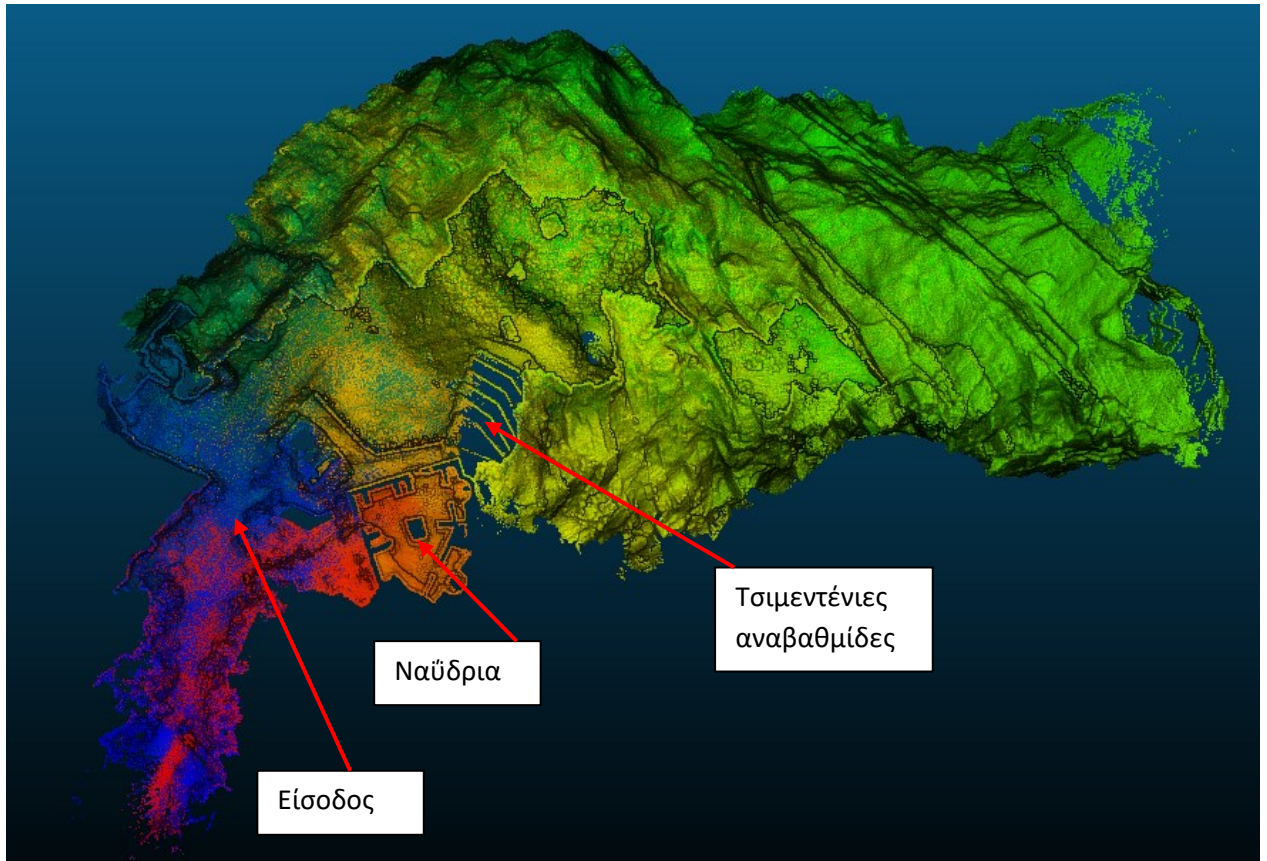
Τα τεχνητά χαρακτηριστικά του οργάνου παρουσιάζονται στον πίνακα:

Ταχύτητα συλλογής δεδομένων	43.200 σημεία/sec
Ακρίβεια 3D μέτρησης	±0.1% (τυπικά)
Μέγιστη εμβέλεια	Έως 30m (15m σε εξωτερικούς χώρους)
Κλάση Laser	Class 1 (ασφαλές για τα μάτια)
Γωνιακό οπτικό πεδίο	+270 x 360 °
Βάρος (κεφαλής laser)	1 kgr
Διαστάσεις (κεφαλής laser)	86 x 113 x 287 mm

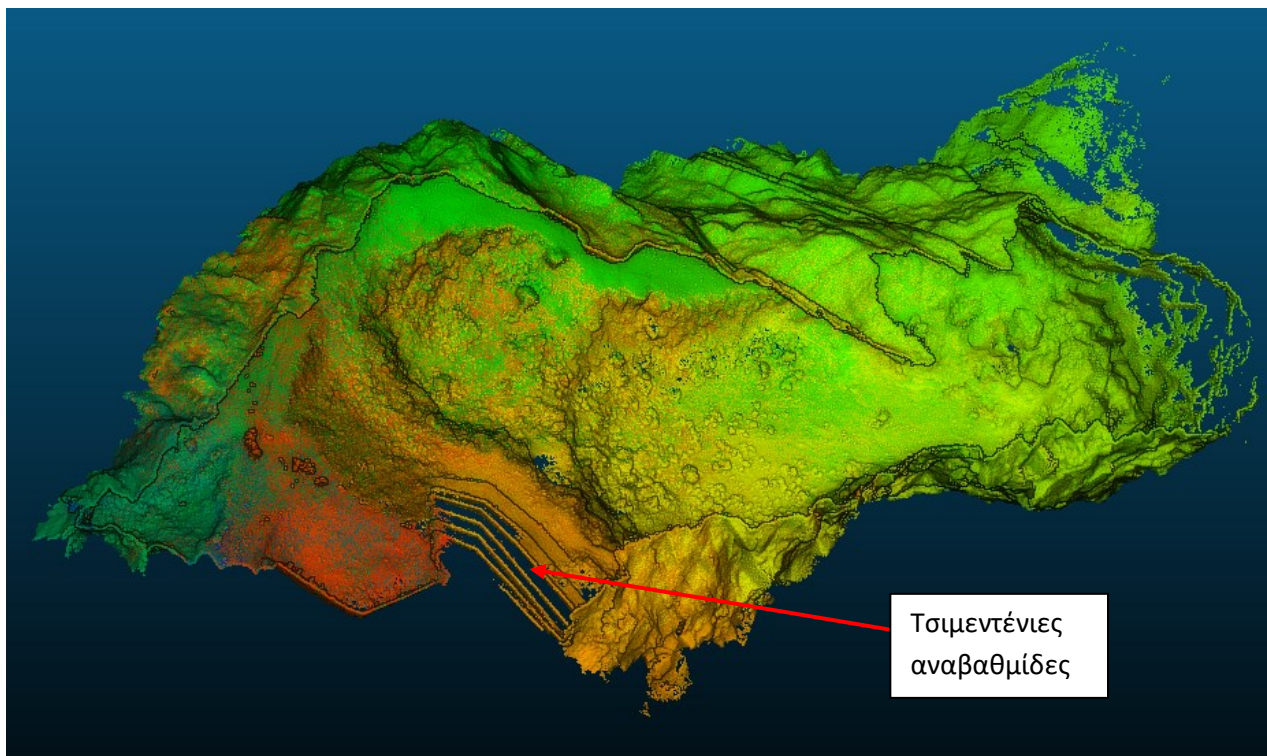
Πηγή: <http://geoslam.landmark.com.gr/zeb-revo/>



Εικόνα 3.5: Η Σπηλιά του Νταβέλη σε τρισδιάστατη απεικόνιση



Εικόνα 3.6: Κάτοψη της εισόδου της Σπηλιάς του Νταβέλη από το τρισδιάστατο μοντέλο



Εικόνα 3.7: Κάτοψη της Σπηλιάς του Νταβέλη από το τρισδιάστατο μοντέλο

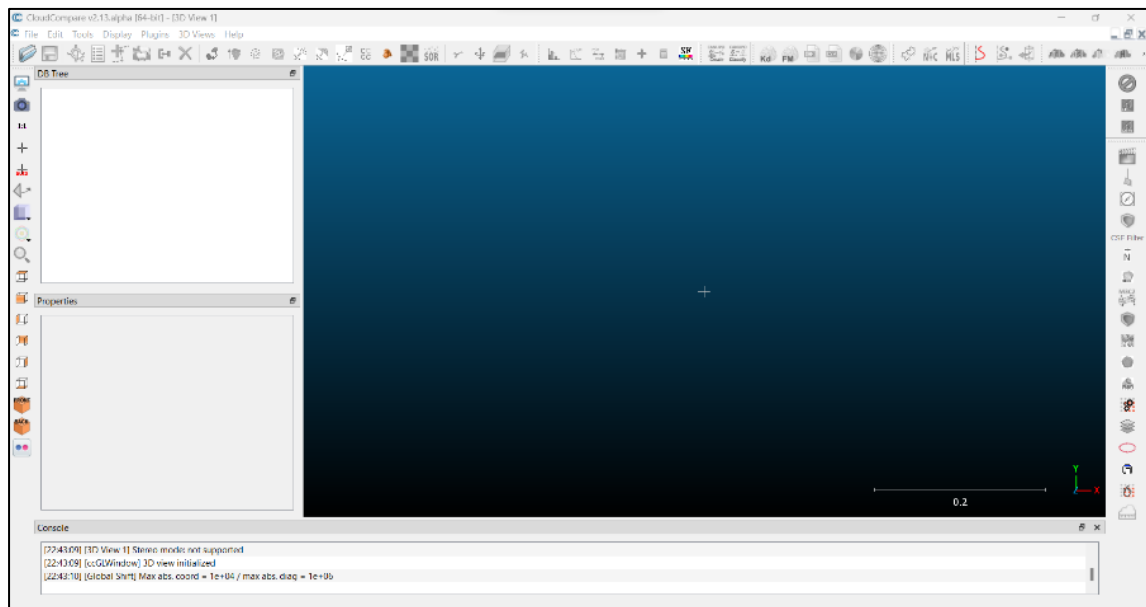
3.4 Λογισμικό CloudCompare

Το CloudCompare είναι λογισμικό επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων που προέρχονται από σαρωτές λέιζερ. Έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί τριγωνικά πλέγματα και βαθμονομημένες εικόνες.

Η δημιουργία του ξεκίνησε το 2003 με το διδακτορικό του Daniel Girardeau-Montaut. Υπήρξε συνεργασία μεταξύ της Telecom ParisTech και του τμήματος E&A της EDF. Ο στόχος ήταν η έγκαιρη ανίχνευση αλλαγών μέσω τρισδιάστατων νεφών σημείων υψηλής πυκνότητας από σαρωτές λέιζερ σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπως εργοστάσια ή σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Από το 2009 έως και σήμερα κυκλοφορεί με ελεύθερο λογισμικό και ανοιχτό κώδικα για δημόσια χρήση με άδεια GPL. Είναι ανοιχτού κώδικα λογισμικό και οι χρήστες είναι ελεύθεροι να επεκτείνουν τις δυνατότητες του λογισμικού. Το CloudCompare αναπτύσσεται σε γλώσσα προγραμματισμού C++.

Έχει σχεδιαστεί για να πραγματοποιεί άμεση σύγκριση πυκνών τρισδιάστατων (3D) νεφών σημείων. Η εκτέλεση των εργασιών που προσφέρει στηρίζεται σε μία δομή δεδομένων που λέγεται octree και έχει εξαιρετικές επιδόσεις. Το CloudCompare προοριζόταν να επεξεργαστεί πολύ μεγάλα νέφη σημείων από επίγειους σαρωτές λέιζερ σε τυπικούς υπολογιστές (περισσότερα από 10 εκατομμύρια σημεία, από το 2005 ήδη). Στη συνέχεια επεκτάθηκε η χρήση του στη σύγκριση ενός νέφους σημείου και ενός τριγωνικού πλέγματος. Κατά τη διάρκεια των ετών εμφανίστηκαν αρκετοί αλγόριθμοι επεξεργασίας σύννεφων σημείων (καταχώριση, επεξεργασία χρωμάτων, διανυσμάτων, διαχείριση αισθητήρων, αυτόματη τμηματοποίηση, κ.ά) αλλά και εργαλεία βελτίωσης οθόνης (προσαρμοσμένες χρωματικές ράμπες, χειρισμός βαθμονομημένων εικόνων, κ.ά).

Το CloudCompare αντιμετωπίζει όλα τα τρισδιάστατα δεδομένα ως σύννεφα σημείων.



Εικόνα 3.8: Οθόνη έναρξης του λογισμικού CloudCompare

Το λογισμικό ενδείκνυται για τον εντοπισμό αλλαγών όπως παραδείγματος χάρη μιας εδαφικής καθίζησης, μιας καθίζησης σε κάποιο κτήριο, κ.ά. παρέχει τη δυνατότητα της

απευθείας σύγκρισης δύο νεφών σημείων χωρίς τη δημιουργία ενδιάμεσου πλέγματος. Συνολικά προσφέρει βασικά εργαλεία για τη χειροκίνητη επεξεργασία και απόδοση τρισδιάστατων νεφών και τριγωνικών πλεγμάτων. Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας που παρέχει προσφέρουν μεθόδους για αρκετές εκτελέσεις εργασιών όπως:

- Υπολογισμός διαστάσεων (απόστασης, μεγέθους ενός αντικειμένου, κ.ά)
- Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων (χωρική δοκιμή, κ.ά)
- Τμηματοποίηση (επισήμανση συνδεδεμένων εξαρτημάτων, βάσει μπροστινής διάδοσης, κ.ά)
- Εκτίμηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών (πυκνότητα, καμπυλότητα, τραχύτητα, προσανατολισμός γεωλογικού επιπέδου, υπολογισμός κλίσης & φορά μέγιστης κλίσης, κ.ά)
- Δημιουργία κατόψεων, τομών, κ.ά.

4. Γεωτεχνικά Χαρακτηριστικά των βραχωδών σχηματισμών της περιοχής ενδιαφέροντος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επί τόπου μετρήσεις από το ύπαιθρο με τη χρήση της σφύρας Schmidt (Schmidt hammer rebound hardness, SH) για τον προσδιορισμό της σκληρότητας των πετρωμάτων καθώς και για τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Επιπλέον έγινε χρήση του προφιλόμετρου μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός του συντελεστή τραχύτητας (JRC). Το τελικό αποτέλεσμα που προέκυψε είναι ο υπολογισμός της γωνίας τραχύτητας για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.

4.1 Διατμητική αντοχή

Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών επιτόπου στο χώρο ενδιαφέροντος είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία. Γι' αυτό υπάρχουν κριτήρια που στηρίζονται σε βιβλιογραφικά και εργαστηριακά δεδομένα μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής.

Η κάθε βραχώμαζα από τη στιγμή που εμφανίζει ασυνέχειες παύει να θεωρείται συνεχές και ισότροπο μέσο. Οι ασυνέχειες είναι αυτές που καθορίζουν την αντοχή της βραχώμαζας. Όλες οι ασυνέχειες δυνητικά μπορούν να προκαλέσουν κάποιο είδος αστοχίας.

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε η παραδοχή πως οι μόνες δυνάμεις που ασκούνται στη βραχώμαζα είναι οι θλιπτικού τύπου και έτσι η διατμητική να είναι η κύρια αντοχή των ασυνεχειών. Η εφελκυστική αντοχή θεωρείται μηδενική.

Στη φύση δεν συναντώνται λείες επιφάνειες. Οι φυσικές ασυνέχειες που απαντώνται σε κάθε βραχώμαζα εμφανίζουν αντίσταση στην ολίσθηση ανάλογα με το βαθμό αποσάθρωσής τους, την πλήρωσή τους με ασβεστιτικό υλικό, την τραχύτητά τους, κ.ά. Στις λείες επιφάνειες η διατμητική αντοχή υπολογίζεται από τη γραμμική περιβάλλουσα των Mohr – Coulomb με τη σχέση:

$$\tau = \sigma_n * \tan\phi, \text{ όπου } \phi \text{ η γωνία τριβής.}$$

4.1.1 Κριτήριο Barton – Bandis (1973)

Οι Barton – Bandis μέσα από πειραματικά δεδομένα κατέληξαν σε ένα μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας για τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μίας βραχώμαζας. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί είναι ο συντελεστής τραχύτητας (JRC), η έμμεση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (JCS) αλλά και η ορθή τάση (σ_n).

$$\tau = \sigma_n \tan \left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b \right) \quad (1)$$

Ο παράγοντας ϕ_b αντιπροσωπεύει τη βασική γωνία τριβής, η οποία είναι μία σταθερά που εκφράζει την ελάχιστη αντίσταση τριβής ανάμεσα σε δύο λείες και επίπεδες επιφάνειες ενός υγιούς βραχώδους σχηματισμού. Οι τιμές που κυμαίνεται είναι μεταξύ 22° και 37° και

εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος αλλά και τα ποσοστά υγρασίας (Horne & Deere, 1962, Coulson, 1971).

Επειδή στη φύση οι επιφάνειες των ασυνεχειών δεν είναι ποτέ λείες και επίπεδες μέσα από πειραματικά δεδομένα προσδιορίστηκε η γωνία τραχύτητας. Χρησιμοποιώντας τη βασική γωνία τριβής προσαυξάνοντας με τη γωνία τραχύτητας, μαθηματική σχέση (1) προκύπτει η γωνία τριβής για το σχηματισμό της περιοχής ενδιαφέροντος, τα μάρμαρα. Οι μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται είναι ο συντελεστής τραχύτητας (JRC), η έμμεση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (JCS) αλλά και η ορθή τάση (σ_n).

$$i = JRC \cdot \log_{10} \left[\frac{JCS}{\sigma_n} \right]$$

Για τα πρανή έξω από τη Σπηλιά του Νταβέλη η ορθή τάση (σ_n) υπολογίζεται από το ύψος του πρανούς επί το ειδικό βάρος του πετρώματος.

Υπολογισμός ορθής τάσης:

Πρανές	Ύψος πρανούς	Ειδικό βάρος	Ορθή τάση
Αριστερό	40m	26,5 kN/m ³	1.060 kN/m ²
Δεξί	40m		(1,06 N/m ²)

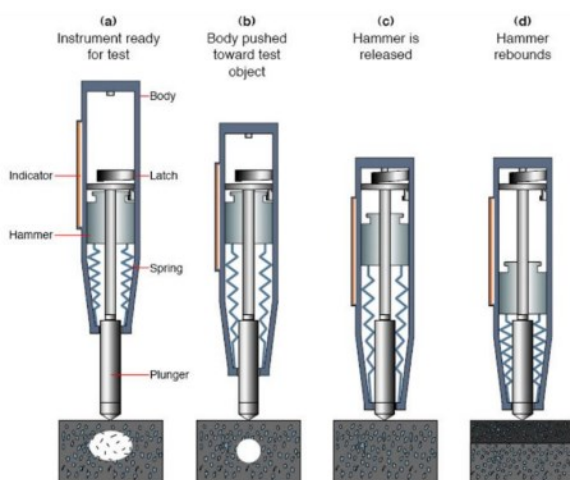
4.1.2 Δοκιμή σκληρότητας αναπήδησης με τη σφύρα Schmidt

Η δοκιμή σκληρότητας αναπήδησης με τη σφύρα Schmidt (Schmidt hammer rebound hardness, SH), γνωστή και ως μέθοδος του κρουσιμέτρου αναπήδησης, επιτυγχάνει τον προσδιορισμό της επιφανειακής σκληρότητας του πετρώματος και έμμεσα την τιμή της μέσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Το κρουσίμετρο ή σφύρα αναπήδησης Schmidt είναι ένα όργανο φορητό και ελαφρύ το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί δίνοντας τα ίδια ακριβή αποτελέσματα τόσο στο εργαστήριο όσο και στο ύπαιθρο. Η δοκιμή του οργάνου θεωρείται μη καταστροφική και ενδείκνυται να γίνεται σε πετρώματα μέτριας σκληρότητας. Στις περιπτώσεις που τα πετρώματα είναι πολύ σκληρά ή πολύ μαλακά, η δοκιμή έχει περιορισμένη εφαρμογή. Στα πολύ μαλακά πετρώματα δημιουργεί θραύση ενώ στα πολύ σκληρά δεν προκύπτει κάποια τιμή καθώς είναι εκτός ορίου του οργάνου. Ανάλογα με το είδος του πετρώματος επιλέγεται και ο τύπος της σφύρας που θα χρησιμοποιηθεί. Υπάρχουν δύο τύποι οργάνων, η σφύρα τύπου N και η τύπου L. Κατά την ISRM (Aydin, 2009) η σφύρα τύπου N είναι λιγότερο ευαίσθητη στις ανωμαλίες της επιφάνειας του πετρώματος και καλό είναι να προτιμάται σε επιτόπου εφαρμογές. Η σφύρα τύπου L δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε ασθενή, πορώδη και αποσαθρωμένα πετρώματα.

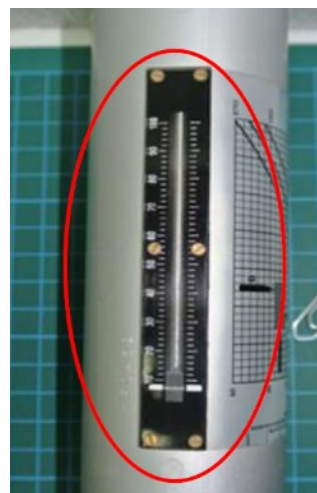


Εικόνα 4.1: Σφύρα Schmidt

Η σφύρα Schmidt αποτελείται από ένα χαλύβδινο έμβολο και μία χαλύβδινη πλάκα πιεζόμενη από ελατήρια. Το έμβολο καθώς πιέζεται στην επιφάνεια του πετρώματος τα ελατήρια που πιέζουν την πλάκα τεντώνονται και ωθούν την πλάκα προς το άκρο του εμβόλου μέχρι να φτάσει σε ένα εσωτερικό όριο. Το χαλύβδινο έμβολο πιέζεται σταθερά πάνω στην επιφάνεια του πετρώματος, μέχρι να απελευθερωθεί το ελατήριο κρούσεως όπου και ακούγεται ο χαρακτηριστικός κρότος. Η χαλύβδινη πλάκα προσκρούει στο έμβολο και αναπηδά σε μια ορισμένη απόσταση με ενέργεια ίση με 2,207 N/m στη σφύρα τύπου N και με 0,735 N/m στη σφύρα τύπου L. Στην εξωτερική πλευρά της μονάδας του οργάνου υπάρχει μία κλίμακα η οποία καταγράφει μία τιμή μόλις ακουστεί ο κρότος. Πατώντας το κουμπί στο πλάι της μονάδας, το έμβολο ασφαλίζεται στη θέση οπισθοχώρησης και η τιμή παραμένει σταθερή πάνω στην κλίμακα του οργάνου. Η τιμή αυτή είναι ο δείκτης σκληρότητας αναπήδησης R (rebound hardness) και μας δείχνει το ύψος αναπήδησης το οποίο είναι ανάλογο με τη σκληρότητα του πετρώματος.



Εικόνα 4.2: Τομή σφύρας Schmidt που αποτυπώνει βήμα βήμα τη λειτουργία της

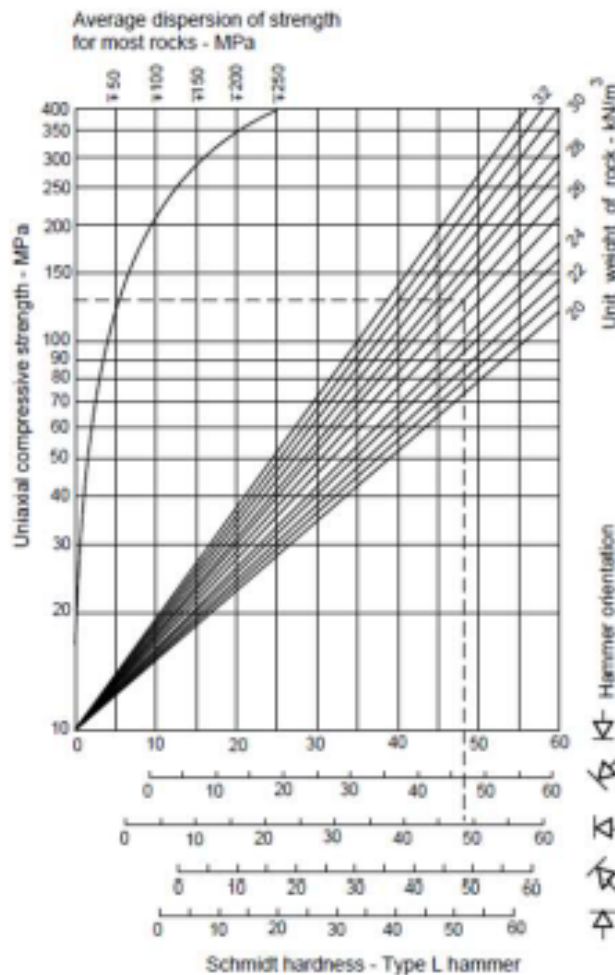


Εικόνα 4.3: Κλίμακα οργάνου

Τα πλεονεκτήματα της δοκιμής είναι η μεγάλη ευκολία στην εφαρμογή, ο μικρός εξοπλισμός και η άμεση εξαγωγή αποτελεσμάτων. Το μειονέκτημα της δοκιμής είναι πως τα αποτελέσματα περιορίζονται στην επιφάνεια του πετρώματος και όχι στη συνολική έκταση του πετρώματος σε βάθος.

Σε κάθε θέση στα δύο πρηνή πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον 20 μετρήσεις. Στις περιοχές των ασυνεχειών ή του ασβεστιτικού υλικού που πραγματοποιήθηκε δοκιμή και προέκυψε θραύση του πετρώματος οι κρούσεις απορρίπτονταν. Από τις 20 μετρήσεις απορρίπτονταν οι 10 μικρότερες και έπειτα υπολογίζονταν ο μέσος όρος τους. Μετά την ολοκλήρωση όλων των μετρήσεων σε κάθε πρηνές, υπολογίστηκε ο μέσος όρος όλων των μέσων όρων για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής αναπήδησης.

Χρησιμοποιώντας το νομογράφημα των Deere and Miller, 1996, στην *Εικόνα 4.4* πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός της μέσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Από βιβλιογραφικές αναφορές (Τσουβαλα, 2009) προκύπτει πως η πυκνότητα των μαρμάρων της Πεντέλης ισούται με $2,7 \text{ gr/cm}^3$ ή $26,5 \text{ kN/m}^3$.



Εικόνα 4.4: Νομογράφημα με καμπύλες αναπήδησης – αντοχής μέσω πειραματικών δεδομένων με σφύρα Schmidt τύπου L για τον υπολογισμό της έμμεσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Deere and Miller, 1996)

Η τιμή που θα προκύψει από το διάγραμμα συσχέτισης θα περιγράφει την αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας σε κάθε πρανές. Ο δείκτης JCS (Joint Compressive Strength) συμπίπτει με την έμμεση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Η μέση τιμή αναπήδησης που προκύπτει από τις επί τόπου δοκιμές για κάθε πρανές δίνεται στον Πίνακα 4-1.

Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται οι αναλυτικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη σφύρα Schmidt στα δύο πρανή, στις ανοιχτές ασυνέχειες αλλά και στο ασβεστιτικό υλικό.

Πίνακας 4-1: Μέση τιμή αναπήδησης για κάθε πρανές

ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΠΡΑΝΕΣ

Ασυνέχειες																						
27	28	29	29	31	32	32	35	36	36	38	40	40	41	42	44	45	45	46	48	429	42,9	
13	20	26	26	28	30	31	34	34	34	35	35	36	37	38	38	41	41	42	42	385	38,5	
20	23	24	24	26	30	32	33	35	36	37	38	40	41	41	48	48	49	50	52	444	44,4	
13	20	26	26	28	30	31	34	34	34	35	35	36	37	38	38	41	41	42	42	385	38,5	
20	23	24	24	26	30	32	33	35	36	37	38	40	41	41	48	48	49	50	52	444	44,4	
18	20	23	26	28	30	32	32	33	34	36	37	37	38	39	42	42	43	44	47	405	40,5	
30	34	37	38	38	40	40	40	41	42	42	42	43	44	45	46	48	48	49	49	456	45,6	
10	15	15	16	18	19	19	20	21	22	22	23	24	28	30	30	31	37	38	42	305	30,5	
11	12	13	19	20	20	22	24	25	27	29	31	31	34	35	35	36	36	38	39	344	34,4	
32	33	33	34	35	36	37	38	39	39	40	41	42	42	43	43	43	46	47	49	436	43,6	
15	16	29	30	30	34	34	37	38	38	38	39	40	42	44	46	47	47	51	52	446	44,6	40,72
Ασβεστιτικό υλικό																						
8	10	10	11	12	13	14	16	17	18	20	21	22	25	25	26	26	27	28	29	249	24,9	
7	9	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	251	25,1	
8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	25	26	27	27	29	30	246	24,6	24,87

ΔΕΞΙ ΠΡΑΝΕΣ

Ασυνέχειες

23	24	27	29	30	32	33	34	36	37	38	39	40	41	43	44	45	47	48	49	434	43,4	
24	25	26	27	29	30	31	33	34	35	37	38	39	40	41	43	44	45	47	48	422	42,2	
26	27	28	29	30	32	33	34	35	37	38	49	40	41	42	44	45	46	47	49	441	44,1	
10	15	15	16	18	19	19	20	21	22	22	23	24	28	30	30	40	31	35	36	299	29,9	
11	12	13	19	20	20	22	24	25	27	29	31	31	34	35	35	39	36	37	38	345	34,5	
9	12	13	14	15	16	18	21	23	24	27	28	29	30	31	32	33	34	35	41	320	32	37,68

Το δεξί πρηνές είναι κερματισμένο και σε κάποιες θέσεις εντοπίζεται ανάμεσα από κλειστές ασυνέχειες άρρηκτη μάζα πετρώματος. Το αριστερό πρηνές είναι σχεδόν άρρηκτο με λίγες ασυνέχειες οι οποίες είναι είτε κλειστές είτε ανοιχτές αλλά πληρωμένες με ασβεστιτικό υλικό. Η εκτίμηση της έμμεσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη θα πραγματοποιηθεί για τις ασυνέχειες αλλά και για το ασβεστιτικό υλικό.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και το νομογράφημα *Εικόνα 4.4* προκύπτει πως για το δεξί πρηνές η τιμή του δείκτη JCS για τις ασυνέχειες ισούται με 85 MPa. Αντίστοιχα η τιμή του δείκτη JCS για το αριστερό πρηνές ισούται με 88 MPa, ενώ για το ασβεστιτικό υλικό ισούται με 40 MPa.

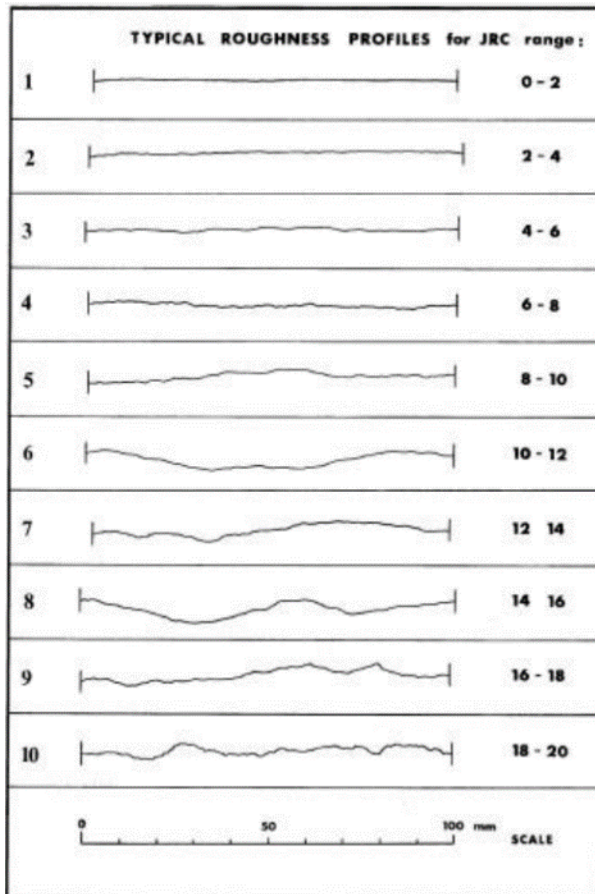
4.1.3 Συντελεστής τραχύτητας JRC

Ο προσδιορισμός του συντελεστή τραχύτητας (JRC) πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης της επιφάνειας της εκάστοτε ασυνέχειας με τον πίνακα των τυπικών προφίλ που δημιουργήθηκε από τους Barton and Choubey το 1977. Το όργανο που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της επιφάνειας της ασυνέχειας λέγεται προφιλόμετρο. Η σύγκριση γίνεται οπτικά μεταξύ της αποτύπωσης του οργάνου και αυτού που ταιριάζει από τον πίνακα των Barton and Choubey το 1977 και προσδιορίζεται η τιμή του JRC. Οι τιμές του JRC είναι από 0 έως 20, όπου αντιστοιχούν σε λείες και επίπεδες έως ανεπίπεδες και τραχείες, αντίστοιχα.

Στην περιοχή ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκε το προφιλόμετρο τόσο στα δύο πρηνή όσο και στην επιφάνεια του ασβεστιτικού υλικού (όπου ήταν εφικτό). Ακολούθως με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα των τυπικών προφίλ που δημιουργήθηκε από τους Barton and Choubey το 1977 στην *Εικόνα 4.6* αποδόθηκε τιμή σε κάθε ένα από τα προφίλ που αποτυπώθηκαν από το ύπαιθρο.






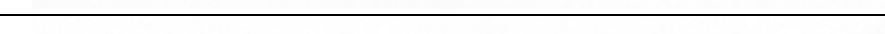




Εικόνα 4.5: Προφιλόμετρο



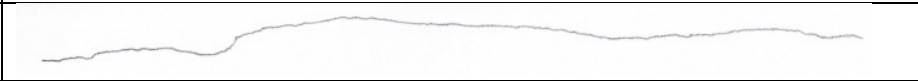


Εικόνα 4.6: Προφίλ τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές JRC (Barton and Choubey, 1977)

Αριστερό πρανές

Συντελεστής τραχύτητας	Προφίλ
JRC = 4	
JRC = 9	
JRC = 4	
JRC = 10	
JRC = 9	
JRC = 8	
JRC = 15	
JRC = 17	


Για λόγους ασφαλείας η επιλεγείσα τιμή για το συντελεστή τραχύτητας JRC για τις ασυνέχειες είναι η μικρότερη, δηλαδή JRC = 4.

Δεξί πρανές

Συντελεστής τραχύτητας	Προφίλ
JRC = 18	
JRC = 17	
JRC = 8	

Για λόγους ασφαλείας η επιλεγείσα τιμή για το συντελεστή τραχύτητας JRC για τις ασυνέχειες είναι η μικρότερη, δηλαδή JRC = 8.

Ασβεστικό υλικό (αριστερό πρανές)

Συντελεστής τραχύτητας	Προφίλ
JRC = 10	

Για λόγους ασφαλείας η επιλεγείσα τιμή για το συντελεστή τραχύτητας JRC είναι η μικρότερη, δηλαδή JRC = 4.

Χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα υπολογίστηκε η γωνία τραχύτητας i σύμφωνα με την οποία πραγματοποιήθηκαν όλες οι αναλύσεις στο λογισμικό Dips. Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που έγιναν.

Η βασική γωνία τριβής ϕ_b για τα μάρμαρα είναι 32° .

Πίνακας 4-2: Υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της γωνίας τραχύτητας i και της γωνίας εσωτερικής τριβής

Αριστερό πρανές

Ασυνέχειες								
Ορθή τάση (σ_n)	ϕ_b	$\tan\phi_b$	JRC	JCS	JCS/ σ_n	$\log(\text{JCS}/\sigma_n)$	$i=\text{JRC}*\log(\text{JCS}/\sigma_n)$	$\phi=\phi_b+\text{JRC}*\log(\text{JCS}/\sigma_n)$
1,06	32	0,7559	4	88	83,01887	1,919	7,677	39,68

Ασβεστιτικό υλικό								
Ορθή τάση (σ_n)	ϕ_b	$\tan\phi_b$	JRC	JCS	JCS/ σ_n	$\log(\text{JCS}/\sigma_n)$	$i=\text{JRC}*\log(\text{JCS}/\sigma_n)$	$\phi=\phi_b+\text{JRC}*\log(\text{JCS}/\sigma_n)$
1,06	32	0,7559	4	40	37,73585	1,577	6,307	38,31

Δεξί πρανές

Ασυνέχειες								
Ορθή τάση (σ_n)	ϕ_b	$\tan\phi_b$	JRC	JCS	JCS/ σ_n	$\log(\text{JCS}/\sigma_n)$	$i=\text{JRC}*\log(\text{JCS}/\sigma_n)$	$\phi=\phi_b+\text{JRC}*\log(\text{JCS}/\sigma_n)$
1,06	32	0,7559	8	85	80,18868	1,904	15,233	47,23

Η γωνία τριβής για το αριστερό πρανές είναι 39° για τις ασυνέχειες ενώ για το ασβεστιτικό υλικό ισούται με 38° . Αντίστοιχα για τις ασυνέχειες του δεξιού πρανούς η γωνία τριβής είναι 47° .

Παρατηρείται πως η γωνία τραχύτητας i στο αριστερό πρανές τόσο για τις ασυνέχειες όσο και για το ασβεστιτικό υλικό δεν έχει πολύ μεγάλη διαφορά. Όμως η αντίστοιχη γωνία στο δεξί πρανές είναι πολύ μεγαλύτερη. Από τις τιμές JRC είχε αποτυπωθεί πως η τραχύτητα στο δεξί πρανές είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το αριστερό πρανές.

Όλες οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό Dips έλαβαν υπόψη αυτές τις τιμές της γωνίας τριβής για το κάθε πρανές. Λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια, η τιμή για τη γωνία τριβής που χρησιμοποιήθηκε είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη γωνία τριβής που προέκυψε από τους υπολογισμούς.

5. Μικροτεκτονικές Αναλύσεις

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δύο πρανή ως προς την κλίση τους και τη φορά μέγιστης κλίσης τους. Πραγματοποιήθηκε η στατιστική επεξεργασία όλων των μετρήσεων, χωριστά σε κάθε πρανές και ακολούθησαν οι στερεογραφικές προβολές στο δίκτυο Schmidt. Για το τελικό αποτέλεσμα σχετικά με την ύπαρξη ή μη αστοχίας αλλά και το είδος της αστοχίας εφαρμόστηκαν η ανάλυση Markland καθώς και η βελτίωση Hocking.

5.1 Εργασίες πεδίου και μεθοδολογία διαχείρισης των δεδομένων

Για τον έλεγχο της πιθανότητας ανάπτυξης δυνητικών αποσφηνώσεων αλλά και της ευστάθειας των πρανών πριν την είσοδο στη Σπηλιά του Νταβέλη, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε επιλεγμένες θέσεις στα πρανή. Περισσότερες από 100 μετρήσεις, με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας, ασυνεχειών πραγματοποιήθηκαν σε κάθε πρανές και στη συνέχεια προβλήθηκαν οι πόλοι αυτών σε τεκτονικό δίκτυο Schmidt.



Φωτογραφία 5-1: Επί τόπου μετρήσεις με τη γεωλογική πυξίδα στο αριστερό πρανές

Με τη χρήση του λογισμικού Dips έγινε η στατιστική επεξεργασία των πόλων και χαράχθηκαν οι περιοχές ίσης πυκνότητας αυτών. Από τη συγκέντρωση των πόλων προέκυψαν οι πόλοι των κυρίων συστημάτων ασυνεχειών και τα επίπεδά τους. Από την επεξεργασία των επιπέδων των ασυνεχειών θα ελεγχθεί η πιθανότητα ανάπτυξης δυνητικών αποσφηνώσεων στα πρανή πριν την είσοδο της Σπηλιάς του Νταβέλη. Για κάθε πρανές η μικροτεκτονική ανάλυση σκοπό έχει την εξέταση εκδήλωσης μιας κινηματικής δυνητικής εκδήλωσης επίπεδης ολίσθησης, σφηνοειδής ολίσθησης ή εκδήλωση ανατροπών.

Η επιλογή της στερεογραφικής προβολής που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη εργασία είναι στο δίκτυο Schmidt (Equal Area).

Η συνολική μελέτη αφορά τον έλεγχο των δυνητικών ολισθήσεων που ενδέχεται να εκδηλωθούν κατά μήκος των επιπέδων ασυνεχειών, ή κατά μήκος της τομής δύο επιπέδων ασυνεχειών υπό μορφή σφηνοειδών αποκολλήσεων ή και εκδήλωσης ανατροπών και καταπτώσεων.

Για τον έλεγχο των δυνητικών ολισθήσεων χρησιμοποιήθηκαν:

- ❖ Τα επίπεδα των κυριότερων συστημάτων ασυνεχειών της βραχόμαζας όπως προσδιορίζονται με τη στατιστική επεξεργασία στο δίκτυο Schmidt.
- ❖ Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των επιπέδων των πρανών λίγο πριν την είσοδο της Σπηλιάς του Νταβέλη. Με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας μετρήθηκε η κλίση και η φορά μέγιστης κλίσης (Dip/Dip direction) στα κυριότερα συστήματα ασυνεχειών της βραχόμαζας. Επίσης μετρήθηκαν και τα στοιχεία των δύο πρανών τα οποία προσδιορίζουν τις δυνητικές αστοχίες. Στα συνημμένα διαγράμματα, τα επίπεδα των πρανών είναι τοποθετημένα κάτω από τα κύρια επίπεδα που δίνονται στον πίνακα στο υπόμνημα με κόκκινο χρώμα. Επίσης σε κάθε ανάλυση που εφαρμόστηκε η βελτίωση Hocking, έπειτα από το test Markland που υπέδειξε τις δυνητικές αστοχίες, τα επίπεδα των ασυνεχειών που μελετώνται παρουσιάζονται με μπλε χρώμα.
- ❖ Τα επίπεδα των κατακόρυφων ασυνεχειών που έχουν καταγραφεί στο αριστερό πρανές (όπως κοιτάμε την είσοδο της Σπηλιάς) και μπορεί να επηρεάσουν την εξωτερική περιοχή της Σπηλιάς σε κάποιο μελλοντικό χρόνο.
- ❖ Η γωνία τριβής κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας αστοχίας.

Η πιθανότητα ή όχι εκδήλωσης ολισθήσεων με βάση την ανωτέρω ανάλυση δεν είναι και ικανή συνθήκη για δημιουργία ολίσθησης. Απαιτείται και η συνεκτίμηση των πραγματικών διατμητικών παραμέτρων αντοχής της επιφάνειας ολίσθησης και η πιθανότητα ύπαρξης επιπέδων με τα ως άνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να έχουν επαρκώς μεγάλη μήκη ώστε να συνιστούν επιφάνειες αποσφηνώσεων. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι κυρίως ο εντοπισμός επιπέδων ασυνεχειών κατά μήκος των οποίων μπορούν να υπάρξουν συνθήκες ολίσθησης.

Η γωνία εσωτερικής τριβής που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των δυνητικών ολισθήσεων προκύπτει από τις αναλύσεις που έγιναν στην παράγραφο 4, στον Πίνακα 4-2 με τους υπολογισμούς της γωνίας τραχύτητας αλλά και από βιβλιογραφικά δεδομένα (Τσουβαλα, 2009) για αντίστοιχους σχηματισμούς στην ευρύτερη περιοχή του όρους της Πεντέλης. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί γωνία τριβής ϕ που κυμαίνεται από 36° έως 42° . Δηλαδή εντός της περιοχής ασφάλειας. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε κάθε πρανές για τον έλεγχο της εμφάνισης αστοχιών ή την εξάλειψη αστοχιών. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αναλύσεις. Η κατώτερη τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής που χρησιμοποιήθηκε είναι 36° και έτσι έλαβε υπόψη και τις δυσμενέστερες συνθήκες της βραχόμαζας, όπως υπέδειξε η γωνία τραχύτητας. Είναι τιμές σαφώς συντηρητικές προς την κατεύθυνση της ευστάθειας.

Παρουσιάζονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα των μικροτεκτονικών αναλύσεων για τα πρανά που περιβάλλουν την είσοδο της Σπηλιάς του Νταβέλη.

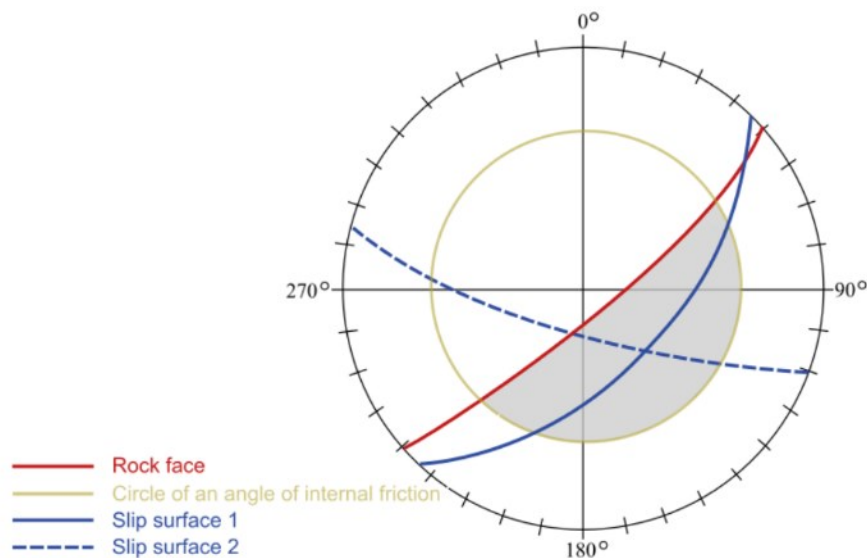
5.2 Ανάλυση Markland

Η ανάλυση Markland (1972) είναι μια κινηματική μέθοδος ανάλυσης με στόχο την αξιολόγηση της πιθανότητας αστοχίας της σφήνας. Η κινηματική μέθοδος ανάλυσης, η οποία είναι γεωμετρική, εξετάζει ποιες περιπτώσεις αστοχίας του πρανούς είναι πιθανές σε μια κερματισμένη βραχώδη μάζα. Η πιθανότητα και ο τύπος της αστοχίας καθορίζονται από γωνιακές σχέσεις μεταξύ των ασυνεχειών και του πρανούς.

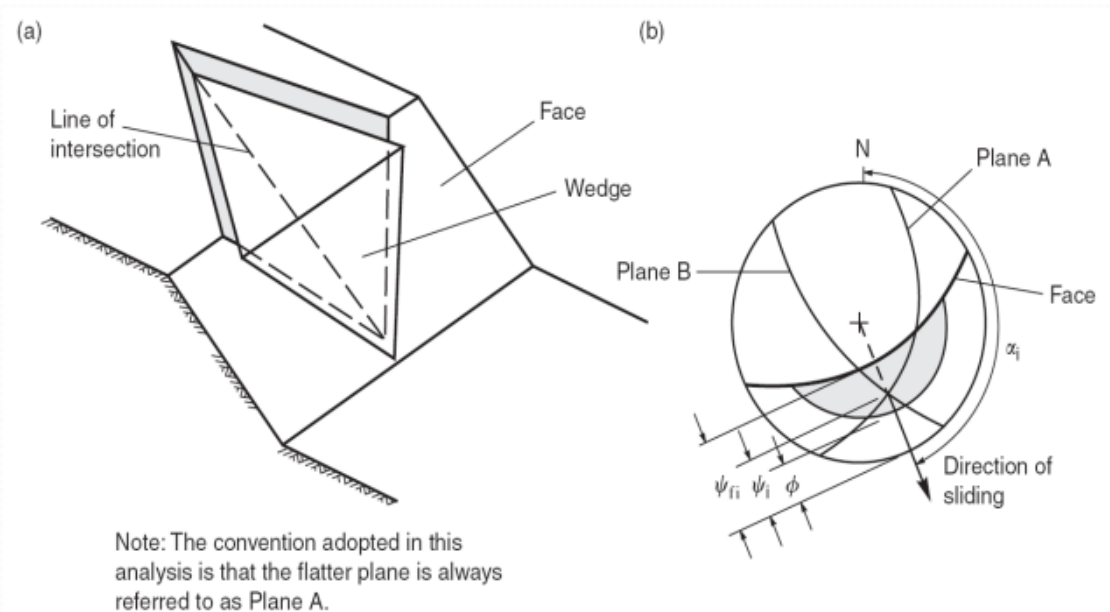
Η ανάλυση αυτή όπως και οι περισσότερες αναλύσεις περιορίζονται για βραχώδη πρανή.

Αν η επιφάνεια του πρανούς έχει συνεχή κλίση, τότε η προβολή της τομής είναι πιο σημαντική από τη γεωμετρία της κάτοψης. Παρόλα αυτά, πολλά βραχώδη πρανή αποτελούνται από πολλές επιφάνειες με διαφορετικές κλίσεις. Αν δεν ληφθούν υπόψιν οι ανώτερες εδαφικές μάζες, τότε τα πρανή μονής επιφάνειας (single-faced slopes (SFS)) μπορούν να προσδιοριστούν σαν πρανή που έχουν μια μονή επιφάνεια με συνεχή κλίση και τα πολυεπιφανειακά πρανή (multi-faced slopes (MFS)) προσδιορίζονται ως πρανή με δύο ή περισσότερες επιφάνειες με διαφορετικές κλίσεις.

Η ανάλυση Markland χρησιμοποιεί την εσωτερική γωνία τριβής του σχηματισμού για να καθορίσει τι αστοχία θα υπάρξει, αν υπάρξει. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η κλίση και η φορά μέγιστης κλίσης του πρανούς. Μέσα στην επιφάνεια που θα οριοθετηθεί ανάμεσα στο μέγιστο κύκλο της επιφάνειας του πρανούς και της περιφέρειας του εσωτερικού κύκλου, κώνου, που αντιστοιχεί στην εσωτερική γωνία τριβής θα φανερωθεί ποια επίπεδα ασυνεχειών θα αστοχήσουν. Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση Markland αναφέρει ποια ή ποιες τομές των επιπέδων των ασυνεχειών ικανοποιούν τις συνθήκες για να εκδηλώσουν μία αστοχία. Παρά ταύτα δε συγκεκριμενοποιεί το είδος της ολίσθησης που πρόκειται να εκδηλωθεί.



Εικόνα 5.1: Ανάλυση Markland στη στερεογραφική προβολή

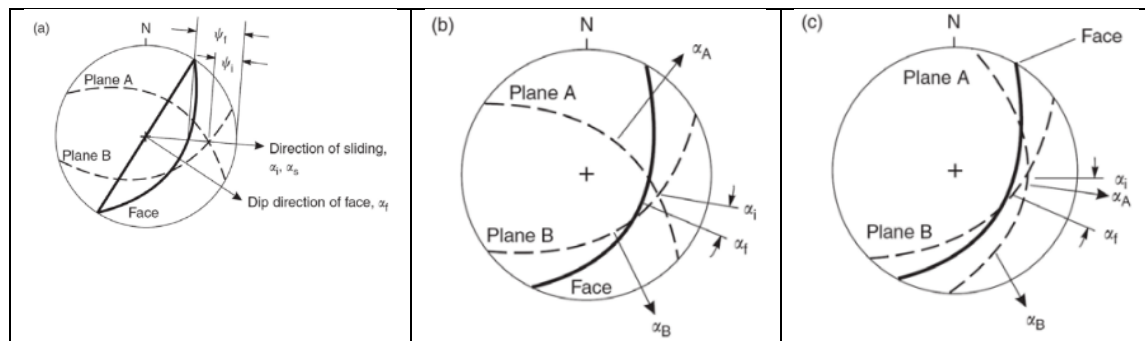


Εικόνα 5.2: Στερεογραφική αποτύπωση του test Markland (1972) όπου διαφαίνεται η αστοχία της βραχοσφήνας

5.3 Βελτίωση Hocking

Μια βελτίωση της ανάλυσης Markland είναι η βελτίωση Hocking (1976). Διαφοροποίησε την κύλιση σε ένα επίπεδο (single plane sliding) που σχηματίζει τη βάση της σφήνας, από την κύλιση κατά μήκος της γραμμής της τομής δύο ασυνεχιών (double plane sliding).

Κατά τη βελτίωση του Hocking, όταν η διεύθυνση κλίσης του άξονα ενός εκ των δύο επιπέδων των επιφανειών των ασυνεχιών που ορίζουν τη βραχοσφήνα εντοπίζεται **εντός** της γωνίας που ορίζεται από τη διεύθυνση κλίσης του άξονα της βραχοσφήνας και τη διεύθυνση κλίσης του πρανούς, τότε η ολίσθηση που θα εκδηλωθεί θα είναι επίπεδη και θα εκδηλωθεί κατά τη διεύθυνση κλίσης του επιπέδου που ο άξονάς του βρίσκεται εντός της προαναφερθείσας γωνίας (Εικόνα 5.3). Αν η διεύθυνση κλίσης του άξονα καμίας εκ των δύο επιπέδων των επιφανειών των ασυνεχιών που ορίζουν τη βραχοσφήνα δε βρίσκεται εντός της προαναφερόμενης γωνίας, τότε η ολίσθηση εκδηλώνεται κατά μήκος του άξονα της βραχοσφήνας.



Εικόνα 5.3: Σύμφωνα με τη βελτίωση Hocking τα δίκτυα (a) και (b) παρουσιάζουν ολίσθηση κατά μήκος του άξονα της βραχοσφήνας. Ενώ στο δίκτυο (c) η βραχοσφήνα θα ολισθήσει κατά μήκος του επιπέδου της επιφάνειας της ασυνέχειας A.

5.4 Rocscience

Η Rocscience είναι μια εταιρεία που ιδρύθηκε το 1996. Είναι ηγέτιδα εταιρεία στην ανάπτυξη δισδιάστατων και τρισδιάστατων (2D & 3D) λογισμικών και ειδικεύεται σε λογισμικά που αφορούν κυρίως πολιτικούς μηχανικούς, μεταλλειολόγους και γεωτεχνικούς μηχανικούς. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά **Dips** και **UnWedge**.

5.4.1 Dips

Το Dips είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για την ανάλυση γεωλογικών δεδομένων μέσω στερεογραφικής προβολής. Παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης και παρουσίασης γεωτεχνικών δεδομένων σύμφωνα με τους άξονες προσανατολισμού τους, διαγραμμάτων πυκνότητας, τομών, κ.ά. Επίσης μπορούν να πραγματοποιηθούν κινηματικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό κρίσιμων ζωνών, αξόνων και τομών σε δίκτυο Schmidt σε συνδυασμό με την κινηματική ανάλυση των τρόπων πιθανής αστοχίας σφηνών και επιπέδων.

Η κινηματική ανάλυση που παρέχει το Dips επιτρέπει τον προσδιορισμό κρίσιμων ζωνών, διανυσμάτων και διασταυρώσεων. Πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της δυνητικής αστοχίας, αν είναι επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση, άμεση ή καμπτική ανατροπή.

5.4.2 UnWedge

Το UnWedge είναι ένα τρισδιάστατο λογισμικό ανάλυσης ευστάθειας για υπόγειες ανασκαφές σε βραχώδεις σχηματισμούς με πολλά συστήματα ασυνεχειών. Παρέχει ανάλυση σε τεμνόμενα επίπεδα ασυνεχειών και δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης σε τρισδιάστατη μορφή (3D). Το UnWedge προσδιορίζει τις σφήνες που θα αστοχήσουν στην περίμετρο της υπόγειας εκσκαφής αλλά και κατά μήκος της. Επίσης υπάρχει δυνατότητα να υπολογιστούν μέτρα υποστήριξης για να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός ασφάλειας. Ακόμη δίνει τη δυνατότητα πιθανολογικής ανάλυσης με τη χρήση μοντέλων οριακής ισορροπίας για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας.

5.5 Αναλύσεις τεχνικογεωλογικών συνθηκών ευστάθειας στο δεξί πρανές



(α)



(β)

Φωτογραφία 5-2: Πανοραμική φωτογραφία της Σπηλιάς του Νταβέλη με τα δύο πρανή (α), Πανοραμική φωτογραφία του δεξιού πρανούς (β)

Όπως δείχνει και η φωτογραφία το συγκεκριμένο πρανές είναι κερματισμένο, το πέτρωμα εμφανίζει πολλές ασυνέχειες και το χρώμα του είναι σκούρο γκρι. Επίσης ο έντονος κερματισμός του διαμορφώνει και το χαμηλότερο τμήμα του πρανούς που αποτελείται από πολλά μικρά έως πολύ μεγάλα κομμάτια της βραχώμαζας που έχουν αποκολληθεί και πέσει στο έδαφος. Οι ασυνέχειες κατά συντριπτική πλειοψηφία είναι κλειστές και είναι τραχείες. Κάποιες λίγες είναι ανοιχτές που όμως δε ξεπερνούν κάποια λίγα χιλιοστά.



Φωτογραφία 5-3: Ασυνέχεια στο δεξί πρανές



Φωτογραφία 5-4: Μάρμαρα δεξιού πρανούς

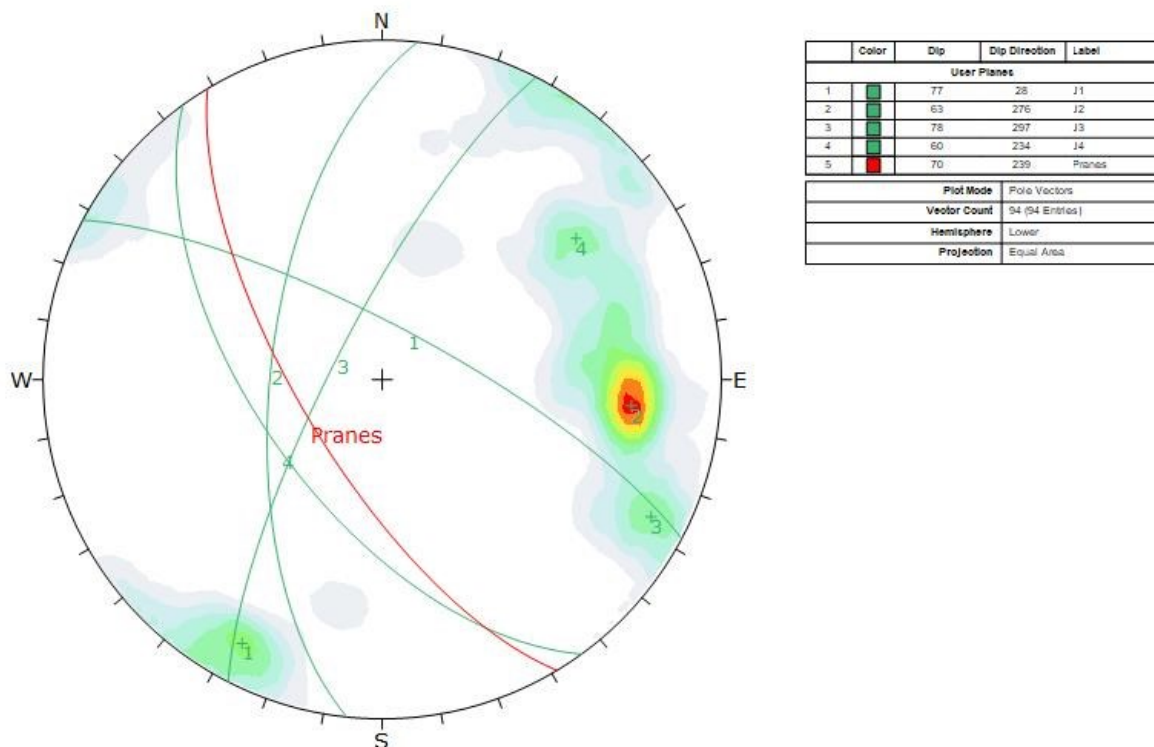
Η κλίση και η φορά μέγιστης κλίσης του πρανούς δεν έχει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις κατά το μήκος του από την είσοδο της Σπηλιάς μέχρι και την άκρη του. Οι τιμές της κλίσης κυμαίνονται από 67° έως 71° και 226 έως 244 η φορά μέγιστης κλίσης του. Έπειτα από τη στατιστική επεξεργασία η τιμή του πρανούς με την οποία έγιναν οι αναλύσεις είναι **70/239**.

Από βιβλιογραφικές αναφορές η γωνία εσωτερικής τριβής έχει τιμές από 36° έως 42° . Για την ασφάλεια της μελέτης του χώρου οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν για όλες τις ενδιάμεσες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής ανά δύο τιμές, δηλαδή 36° , 38° , 40° και 42° .

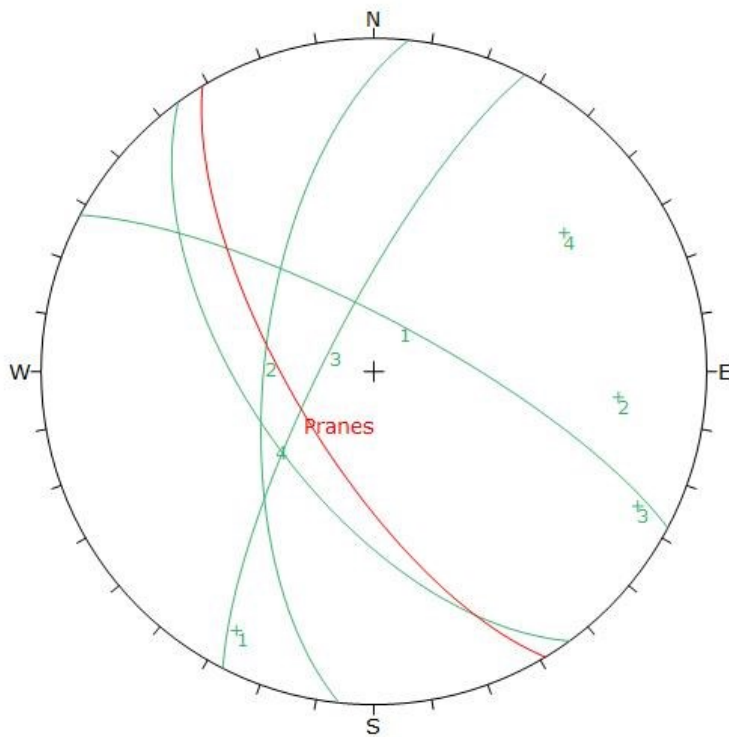
Παρότι υπολογίστηκε για το πρανές (Πίνακας 4-2) η γωνία τραχύτητας επιλέχθηκε να μη παρουσιαστεί, μελετήθηκε μόνο πειραματικά, καθώς είναι στην περιοχή εκτός ασφάλειας. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων δεν υπήρξε κάποια διαφορά στις δυνητικές αστοχίες που εντοπίζονται συνολικά στην έκταση του δεξιού πρανούς για κάθε μία τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως διαμορφώθηκαν από τη στατιστική επεξεργασία των τεκτονικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Ακολουθούν στα σχήματα (Σχήμα 5-1 και Σχήμα 5-2) οι στερεογραφικές προβολές στο δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και με τις μέσες επιφάνειες των ασυνεχειών αντιστοίχως.

Κύριο σύστημα ασυνεχειών	Κλίση/Φορά μέγιστης κλίσης (Dip/Dip direction)
J1	77/028
J2	63/276
J3	78/297
J4	60/234
Pranes	70/239



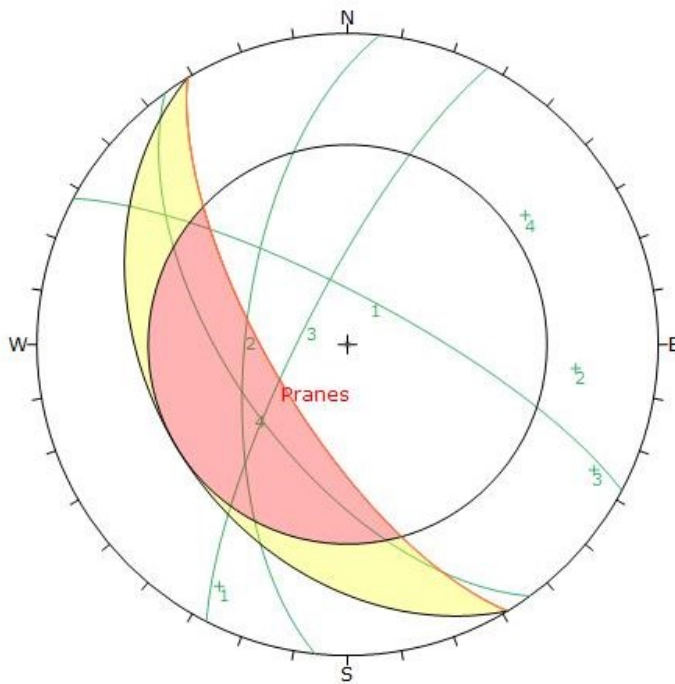
Σχήμα 5-1: Δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών



	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	Red	77	28	J1
2	Green	63	276	J2
3	Green	78	297	J3
4	Green	60	234	J4
5	Red	70	239	Pranes
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		94 (94 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Σχήμα 5-2: Δίκτυο Schmidt με τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών

Εφαρμόζοντας το test Markland πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των δυνητικών ολισθήσεων.



Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		70		
Slope Dip Direction		239		
Friction Angle		36°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1921	4369	43.97%
User Planes				
1	Red	77	28	J1
2	Green	63	276	J2
3	Green	78	297	J3
4	Green	60	234	J4
5	Red	70	239	Pranes
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		94 (94 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Σχήμα 5-3: Δίκτυο Schmidt με τα αποτελέσματα test Markland

Στο Σχήμα 5-3 από την απεικόνιση των κύριων επιπέδων ασυνεχειών σε συνδυασμό με τη διεύθυνση και κλίση του πρανούς προκύπτουν οι εξής γεωμετρικά δυνητικές περιπτώσεις αστοχίας.

Ανατροπή: Το επίπεδο 77/028 που αναφέρεται σε σύστημα διακλάσεων δίνει οριακά τη δυνατότητα εκδήλωσης ανατροπών.

Ολίσθηση: Παρουσιάζεται η πιθανότητα δημιουργίας ολισθήσεων στην τομή των κατωτέρω ζευγών επιπέδων ασυνεχειών:

J2 – J4: 63/276 – 60/234

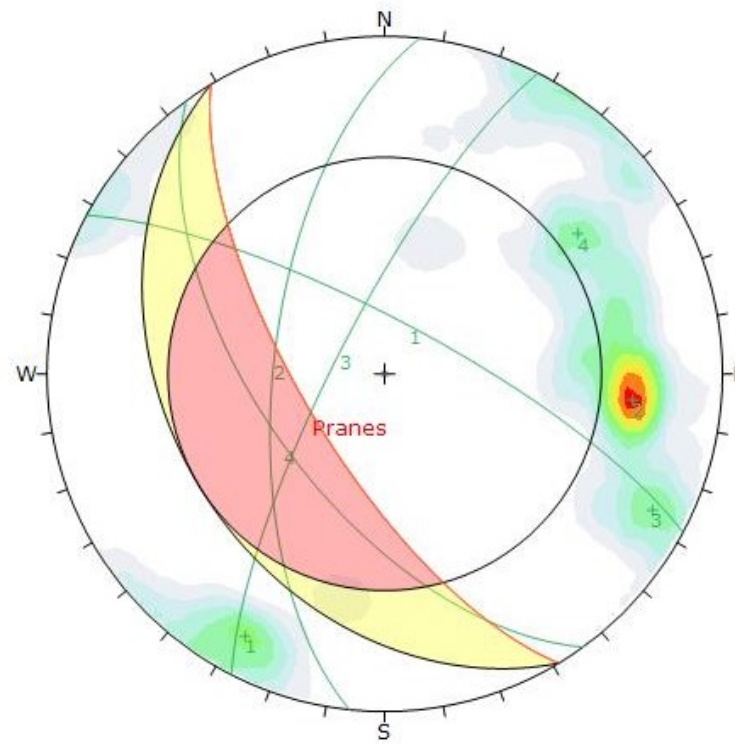
J3 – J4: 78/297 – 60/234

J2 – J3: 63/276 – 78/297

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη βελτίωση του Hocking για κάθε ζεύγος ασυνεχειών ώστε να προσδιοριστεί αν η ολίσθηση που δυνητικά θα συμβεί θα είναι επίπεδη ή σφηνοειδής.

Για την πληρέστερη διερεύνηση των ασυνεχειών στο πρανές της περιοχής μελέτης όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με μία μεταβλητή, τη γωνία εσωτερικής τριβής. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε πως δεν υπάρχει καμία διαφοροποίηση σχετικά με τα ζεύγη των επιπέδων των ασυνεχειών που παρουσιάζουν ολίσθηση.

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 36°



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

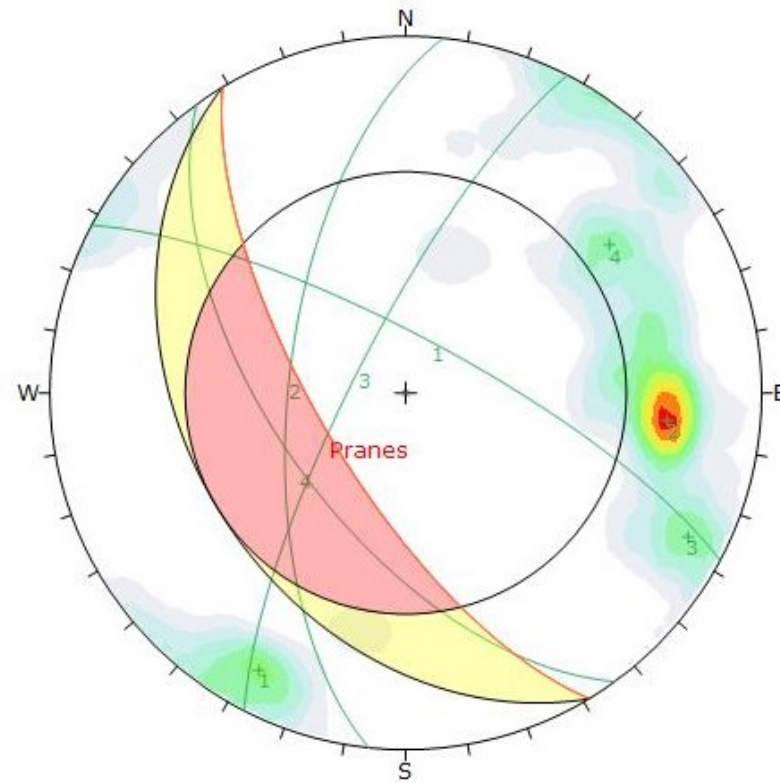
Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	12.17%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip	70			
Slope Dip Direction	239			
Friction Angle	36°			
		Critical	Total	%
	Wedge Sliding	1921	4369	43.97%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	77	28	J1
2	63	276	J2
3	78	297	J3
4	60	234	J4
5	70	239	Pranes

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	94 (94 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 38°



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	12.17%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

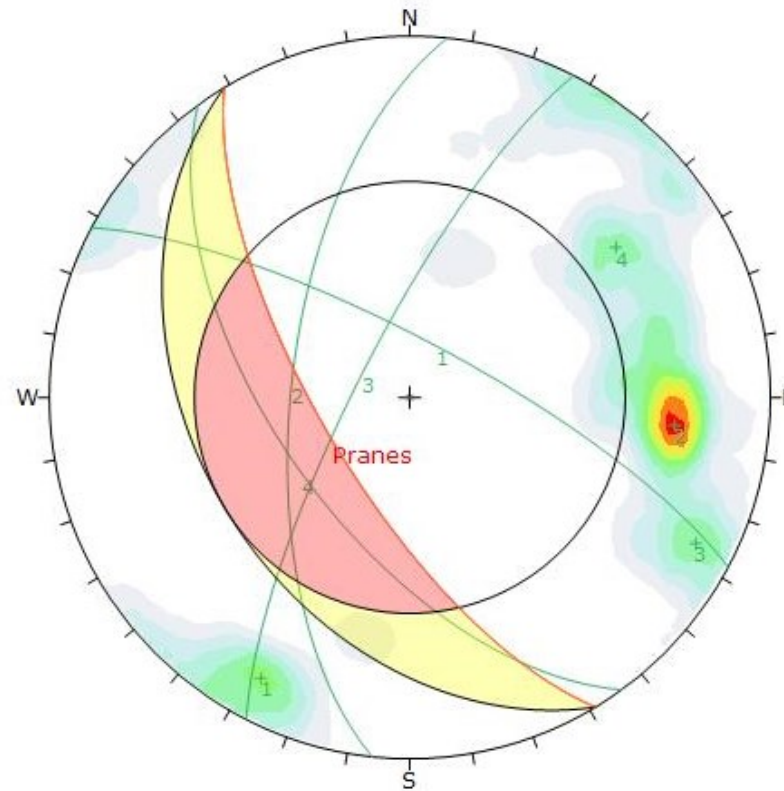
Kinematic Analysis		Wedge Sliding
Slope Dip	70	
Slope Dip Direction	239	
Friction Angle	38°	

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	1868	4369	42.76%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		77	28	J1
2		63	276	J2
3		78	297	J3
4		60	234	J4
5		70	239	Pranes

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	94 (94 Entries)	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 40°



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	12.17%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

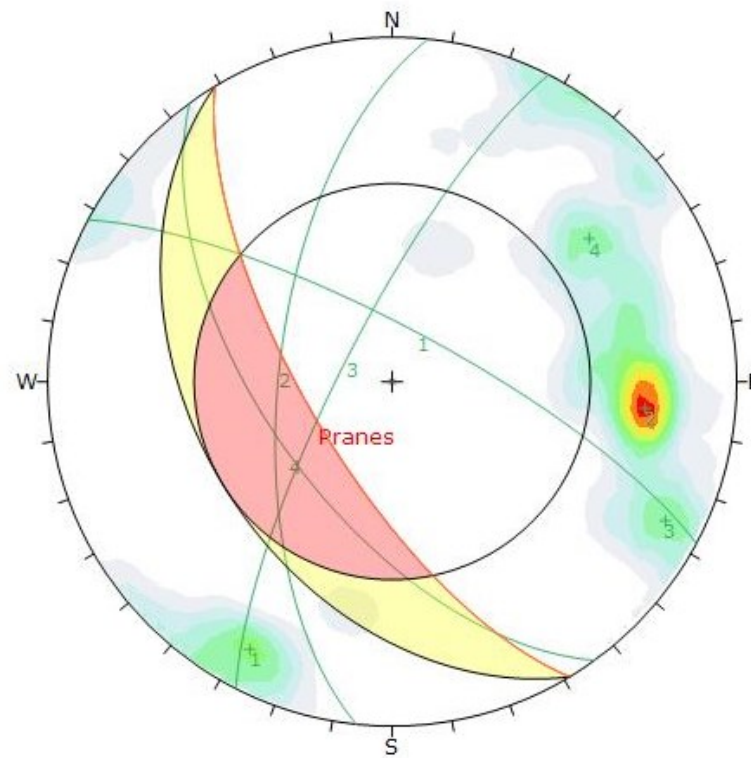
Kinematic Analytic	Wedge Sliding
Slope Dip	70
Slope Dip Direction	239
Friction Angle	40°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	1784	4369	40.83%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	77	28	J1
2	63	276	J2
3	78	297	J3
4	60	234	J4
5	70	239	Pranes

Pole Mode	Pole Vectors
Vector Count	94 (94 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 42°



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data		Pole Vectors	
Maximum Density	12.17%		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		

Kinematic Analysis		Wedge Sliding	
Slope Dip	70		
Slope Dip Direction	239		
Friction Angle	42°		

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	1706	4369	39.05%

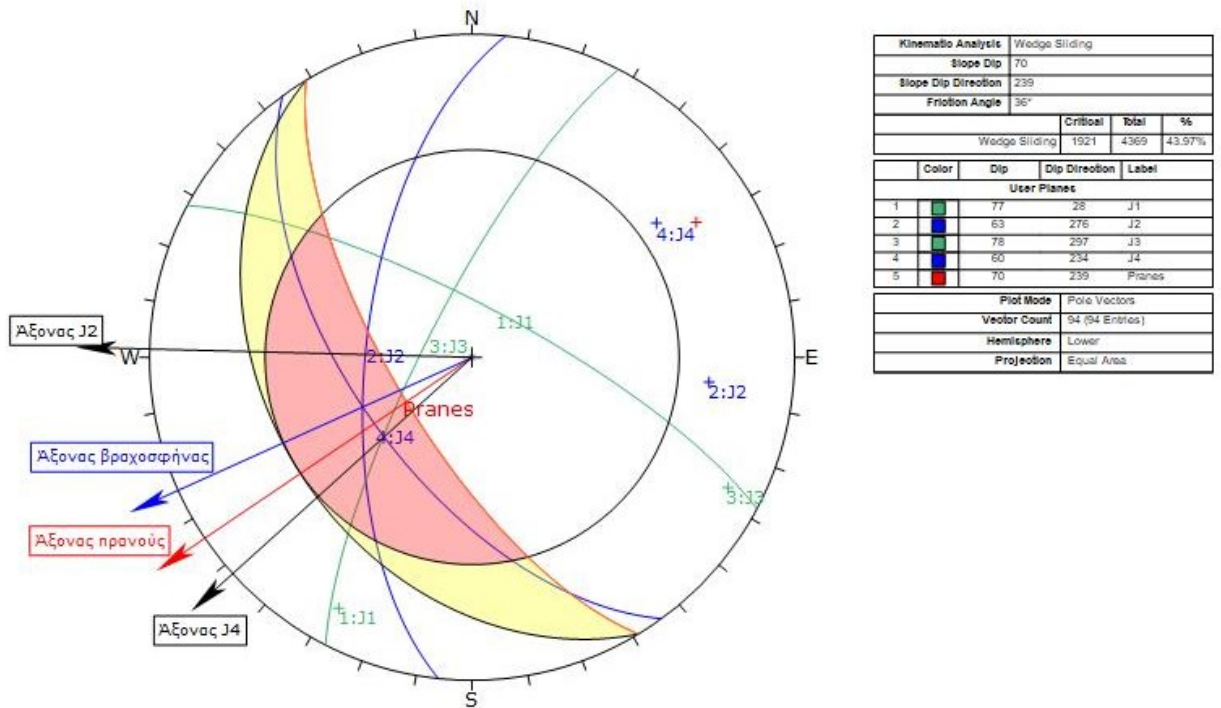
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	77	28	J1
2	63	276	J2
3	78	297	J3
4	60	234	J4
5	70	239	Pranes

Plot Mode		Pole Vectors	
Vector Count	94 (94 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		

Επιλέχθηκε να γίνει ανάλυση των ζευγών των ασυνεχειών για τη γωνία εσωτερικής τριβής των 36° και όλα τα συμπεράσματα θα είναι υπέρ της ασφάλειας.

Ζεύγος ασυνεχειών J2 – J4: 63/276 – 60/234

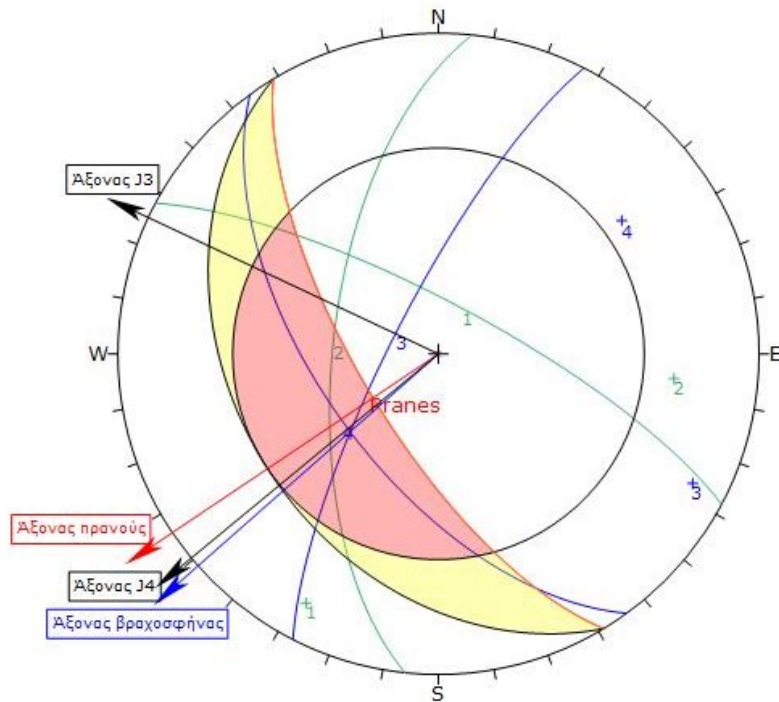
Στο Σχήμα 5–4 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J2 και J4 και του άξονα της βραχοσφήνας. Παρατηρείται ότι μεταξύ της διεύθυνσης κλίσης του πρανούς και του άξονα της βραχοσφήνας δε βρίσκεται καμία από τις δύο διευθύνσεις κλίσης των επιφανειών των ασυνεχειών J2 και J4 της βραχοσφήνας. Επομένως η ολίσθηση που αναμένεται θα είναι σφηνοειδής.



Σχήμα 5–4: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J4

Ζεύγος ασυνεχειών J3 – J4: 78/297 – 60/234

Στο Σχήμα 5–5 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J3 και J4 και του άξονα της βραχοσφήνας. Παρατηρείται πως μεταξύ της διεύθυνσης κλίσης του πρανούς και του άξονα της βραχοσφήνας βρίσκεται ο άξονας της ασυνέχειας J4. Επομένως η ολίσθηση που αναμένεται είναι επίπεδη και θα εκδηλωθεί στη διεύθυνση του επιπέδου J4.

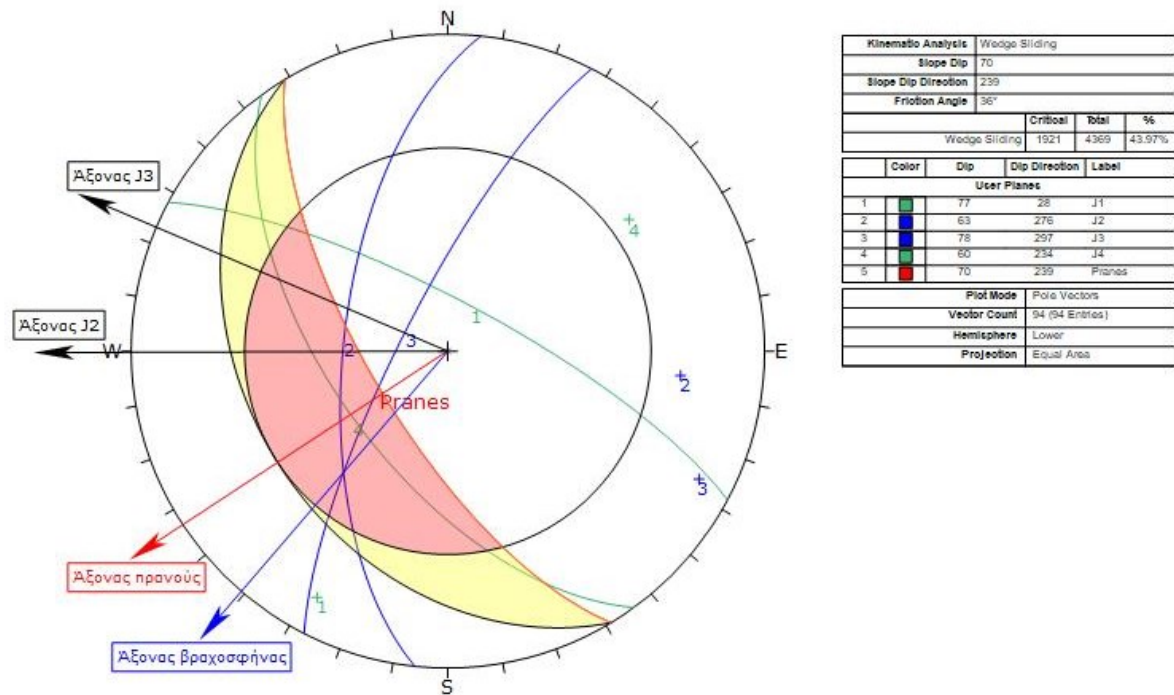


Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		70		
Slope Dip Direction		239		
Friction Angle		36°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1921	4369	43.97%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	77	28	J1	
2	63	276	J2	
3	78	297	J3	
4	60	234	J4	
5	70	239	Planes	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		94 (94 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Σχήμα 5-5: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J3 – J4

Ζεύγος ασυνεχειών J2 – J3: 63/276 – 78/297

Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J2 και J3 και του άξονα της βραχοσφήνας. Φαίνεται πως ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πρανούς και του άξονα της βραχοσφήνας δε βρίσκεται καμία από τις δύο διευθύνσεις κλίσης των ασυνεχειών J2 και J3 που ορίζουν τη βραχοσφήνα. Οπότε η ολίσθηση που αναμένεται θα είναι σφηνοειδής.



Σχήμα 5–6: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J3



Φωτογραφία 5-5: Άκρο του δεξιού πρηνούς στο οποίο διαφαίνεται ένα τεμάχιο βραχοσφήνας το οποίο με τις κατάλληλες συνθήκες θα εκδηλώσει επίπεδη ολίσθηση

5.6 Αναλύσεις τεχνικογεωλογικών συνθηκών ευστάθειας στο αριστερό πρανές



Φωτογραφία 5-6: Πανοραμική φωτογραφία της Σπηλιάς του Νταβέλη με τα δύο πρανή (α), Πανοραμική φωτογραφία του αριστερού πρανούς (β)

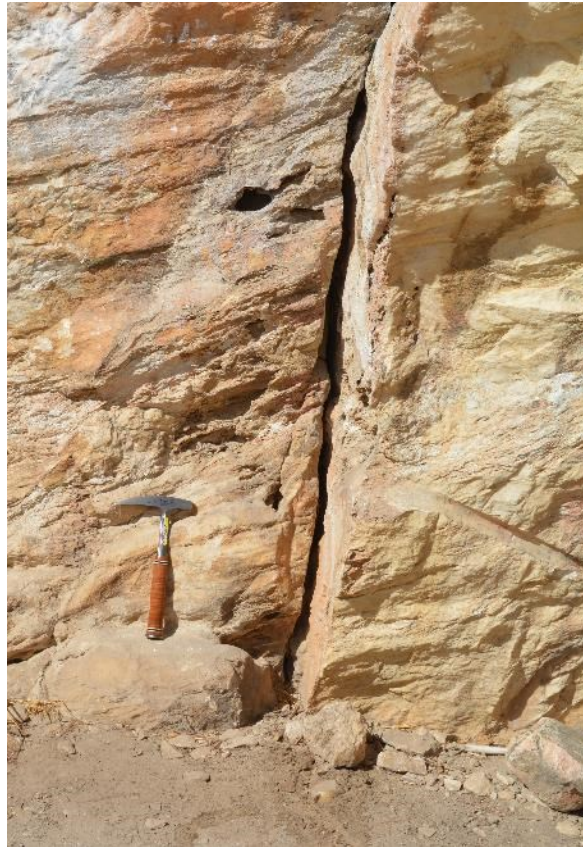
Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες (Φωτογραφία 5-7 και Φωτογραφία 5-8) το συγκεκριμένο πρανές έχει κάποιες ασυνέχειες που το τέμνουν κατακόρυφα αλλά και κάποιες που τέμνουν αυτές τις ασυνέχειες (Φωτογραφία 5-10). Οι κατακόρυφες ασυνέχειες είναι κλειστές και πληρωμένες με ασβεστιτικό υλικό όπως και η πλειοψηφία των ασυνεχειών. Το άνοιγμά τους κυμαίνεται από 0 – 6cm και μετρήθηκε στην επιφάνεια του πρανούς διότι μόνο εκεί δεν είχαν ασβεστιτικό υλικό. Το πρανές εμφανίζει τμήματα του πετρώματος ανάμεσα από τις κατακόρυφες ασυνέχειες, κυρίως, στα οποία μπορεί να χαρακτηριστεί άρρηκτο (Φωτογραφία 5-10).



Φωτογραφία 5-7: Κατακόρυφες ασυνέχειες στο αριστερό πρανές



Φωτογραφία 5-8: Κατακόρυφες ασυνέχειες στο αριστερό πρηνές



Φωτογραφία 5-9: Κατακόρυφη ανοιχτή ασυνέχεια στο αριστερό πρανές



Φωτογραφία 5-10: Κατακόρυφη ασυνέχεια που τέμνεται από μικρότερες ασυνέχειες και ανάμεσα άρρηκτο πέτρωμα

Η κλίση και η φορά μέγιστης κλίσης του πρανούς δεν έχει μεγάλες διακυμάνσεις κατά το μήκος του από την είσοδο της Σπηλιάς μέχρι και την άκρη του. Οι τιμές που μετρήθηκαν κυμαίνονται από 67° – 88° η κλίση του και 119 – 122 και 299 – 308 η φορά μέγιστης κλίσης του. Από τις

συγκεκριμένες τιμές της φοράς μέγιστης κλίσης επιβεβαιώνεται πως το αριστερό πρανές είναι παρακατακόρυφο, γεγονός που από την επί τόπου παρατήρηση του χώρου είχε σημειωθεί. Έπειτα από τη στατιστική επεξεργασία το πρανές δε θα έχει μία τιμή καθώς είναι ένα παρακατακόρυφο πρανές και δεν είναι σαφές εκ των προτέρων πως θα αστοχήσει, αν αστοχήσει. Οπότε οι τιμές για τις οποίες έγιναν οι διερευνήσεις για τυχόν αστοχίες είναι 75/303 και 88/123. Από βιβλιογραφικές αναφορές η γωνία εσωτερικής τριβής έχει τιμές από 36° – 42°. Για την ασφάλεια της μελέτης του χώρου οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν για όλες τις ενδιάμεσες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής ανά δύο τιμές, δηλαδή 36°, 38°, 40° και 42°. Σε αυτό το πρανές σε αντίθεση με το δεξί προέκυψαν διαφορές στις αστοχίες που παρουσιάζουν ανάλογα με τη γωνία εσωτερικής τριβής. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά.

Αναλύσεις με τη γωνία τραχύτητας που προέκυψε από τους υπολογισμούς στον Πίνακα 4-2 πραγματοποιήθηκαν πειραματικά αλλά επιλέχθηκε να μη παρουσιαστούν γιατί είναι στην περιοχή εκτός ασφάλειας.

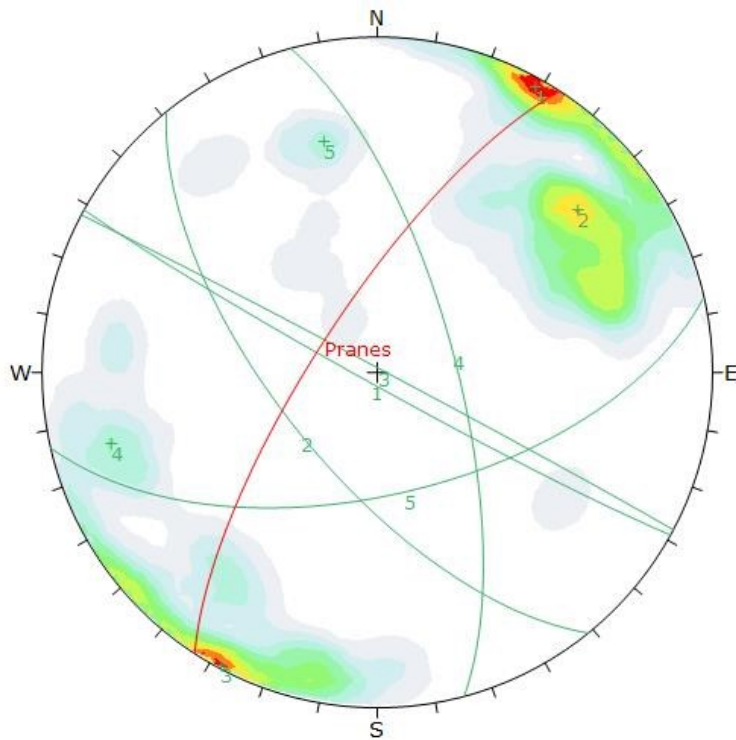
Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως διαμορφώθηκαν από τη στατιστική επεξεργασία των τεκτονικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Κύριο σύστημα ασυνεχειών	Κλίση/Φορά μέγιστης κλίσης (Dip/Dip direction)
J1	87/209
J2	66/231
J3	89/028
J4	71/075
J5	60/167
Pranes	75/303
	88/123

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση για καθεμιά από τις τιμές του πρανούς.

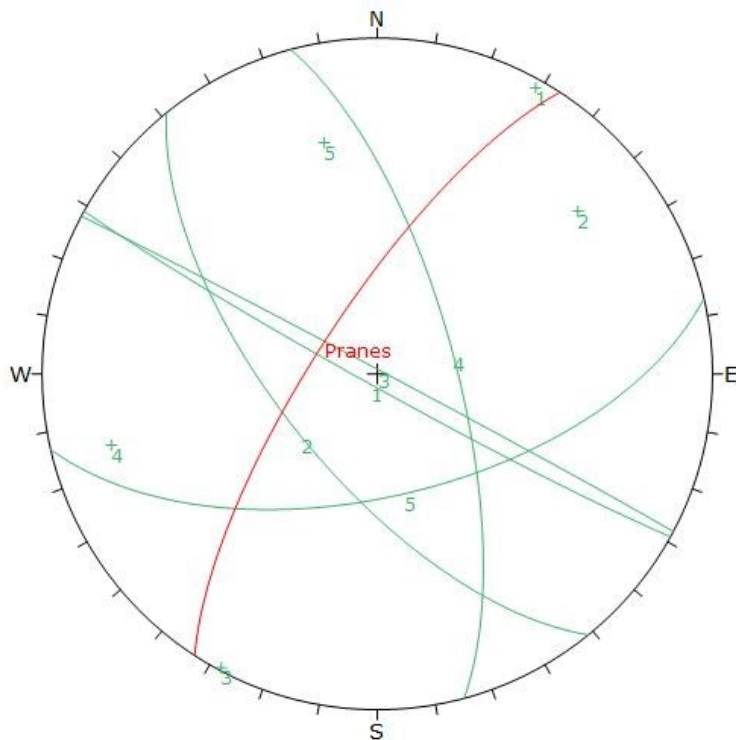
Πρανές με στοιχεία 75/303

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5–7 και Σχήμα 5–8) παρουσιάζονται οι στερεογραφικές προβολές στο δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και με τις μέσες επιφάνειες των ασυνεχειών αντιστοίχως.



	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	Green	87	209	J1
2	Green	66	231	J2
3	Green	89	28	J3
4	Green	71	75	J4
5	Green	60	167	J5
6	Red	75	303	Pranes
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

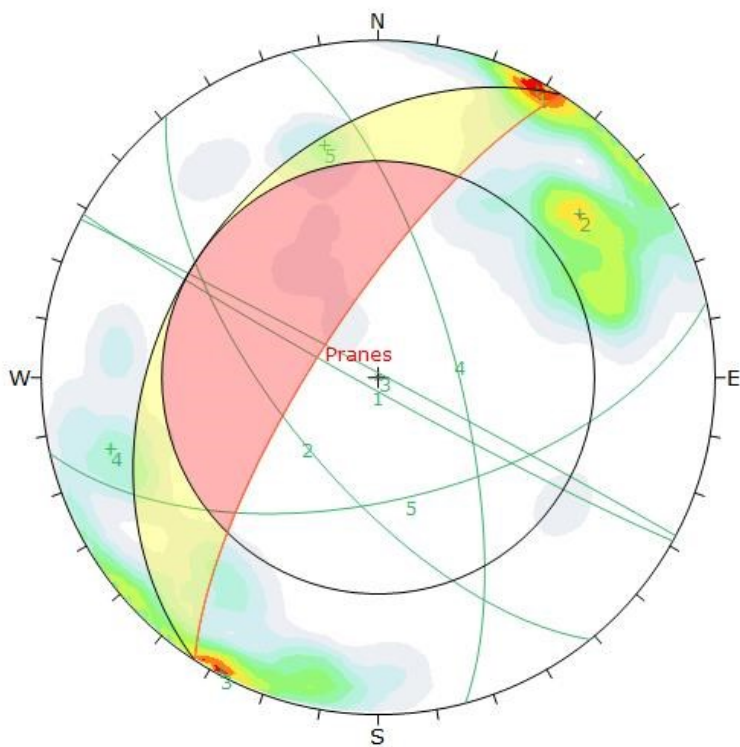
Σχήμα 5-7: Δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών



	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	Green	87	209	J1
2	Green	66	231	J2
3	Green	89	28	J3
4	Green	71	75	J4
5	Green	60	167	J5
6	Red	75	303	Pranes
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Σχήμα 5-8: Δίκτυο Schmidt με τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών

Εφαρμόζοντας το test Markland έλαβε χώρα ο έλεγχος των δυνητικών ολισθήσεων.



Kinematic Analysis:		Wedge Sliding		
Slope Dip:		75		
Slope Dip Direction:		303		
Friction Angle:		36°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1470	6553	22.43%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	75	303	Pranes	
Plot Mode:		Pole Vectors		
Vector Count:		115 (115 Entries)		
Hemisphere:		Lower		
Projection:		Equal Area		

Σχήμα 5–9: Δίκτυο Schmidt με τα αποτελέσματα test Markland

Στο Σχήμα 5–9 από την απεικόνιση των κύριων επιπέδων ασυνεχειών σε συνδυασμό με τη διεύθυνση και την κλίση του πρανούς προκύπτουν οι εξής γεωμετρικά δυνητικές περιπτώσεις αστοχίας.

Ανατροπή: Το επίπεδο 60/167 που αναφέρεται σε σύστημα διακλάσεων δίνει πολύ οριακά τη δυνατότητα εκδήλωσης ανατροπών.

Ολίσθηση: Παρουσιάζεται η πιθανότητα δημιουργίας ολισθήσεων στην τομή των κατωτέρω ζευγών επιπέδων ασυνεχειών:

J1 – J2: 87/209 – 66/231

J2 – J3: 66/231 – 89/028

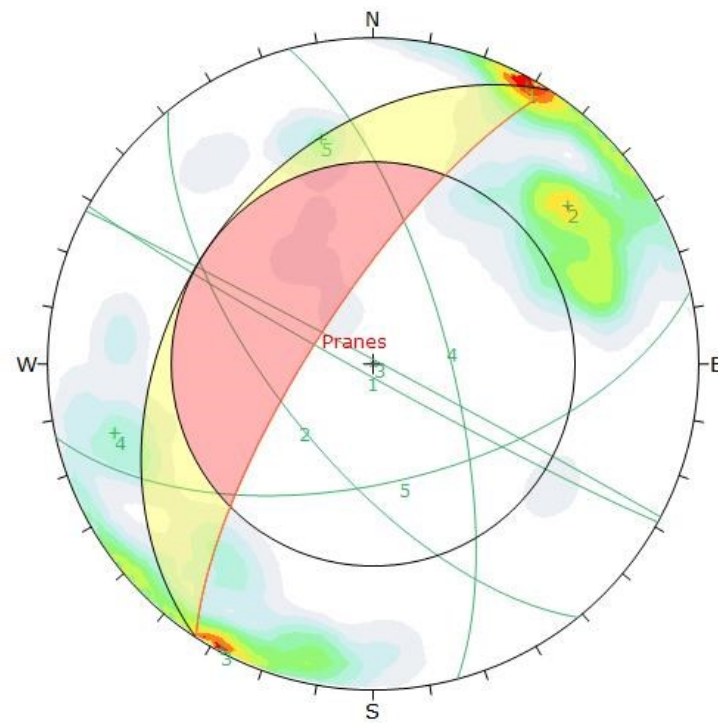
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη βελτίωση του Hocking για κάθε ζεύγος ασυνεχειών ώστε να προσδιοριστεί το είδος της ολίσθησης (επίπεδη ή σφηνοειδής) που θα εκδηλωθεί.

Για την πληρέστερη διερεύνηση των συνθηκών ευστάθειας του πρανούς στην περιοχή ενδιαφέροντος όπως προαναφέρθηκε έγιναν παραμετρικές αναλύσεις με μεταβλητή τη γωνία εσωτερικής τριβής.

Ζεύγος ασυνεχειών J1 – J2: 87/209 – 66/231

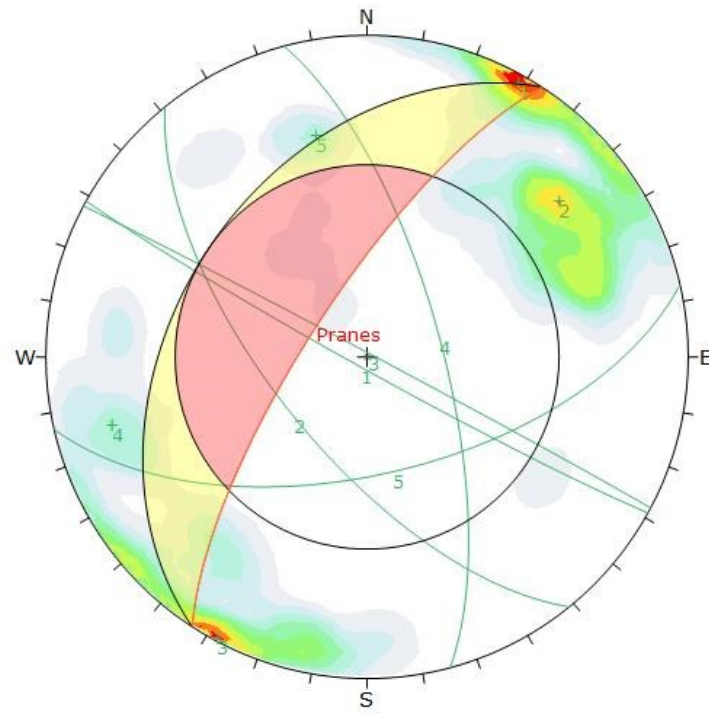
Το συγκεκριμένο ζεύγος ασυνεχειών εμφανίζει ολίσθηση σε όλες τις τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής, 36°, 38°, 40° και 42° για τις οποίες ελέγχθηκε.

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 38°



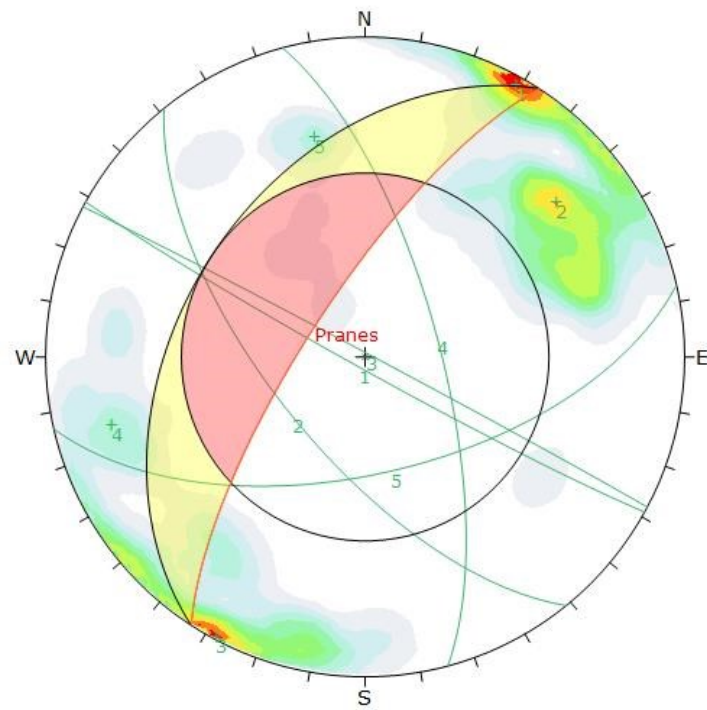
Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		75		
Slope Dip Direction		303		
Friction Angle		38°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1395	6553	21.29%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	75	303	Pranes	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 40°



Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		75		
Slope Dip Direction		303		
Friction Angle		40°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1326	6553	20.24%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	75	303	Pranes	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

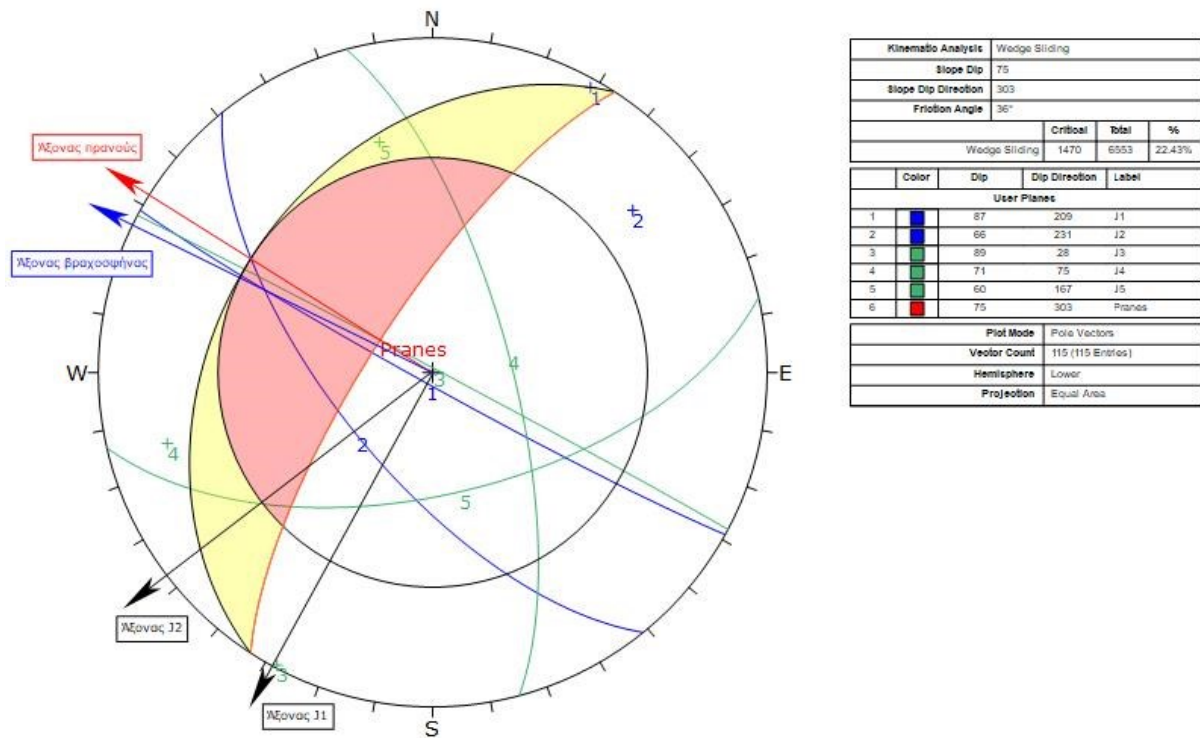
Γωνία
εσωτερικής
τριβής 42°



Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		75		
Slope Dip Direction		303		
Friction Angle		42°		
		Critical	Total	%
	Wedge Sliding	1256	6553	19.17%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	75	303	Pranes	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Στο Σχήμα 5–10 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J1 και J2 και του άξονα της βραχοσφήνας. Παρατηρείται πως μεταξύ της διεύθυνσης κλίσης του πρανούς και του άξονα της βραχοσφήνας δε βρίσκεται κανένας άξονας από τις δύο επιφάνειες των ασυνεχειών J1 και J2 που ορίζουν τη βραχοσφήνα. Επομένως η ολίσθηση που αναμένεται είναι σφηνοειδής.

Η γωνία εσωτερικής τριβής δε θα επηρεάσει την ανάλυση σχετικά με το είδος της ολίσθησης και επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η γωνία των 36°.

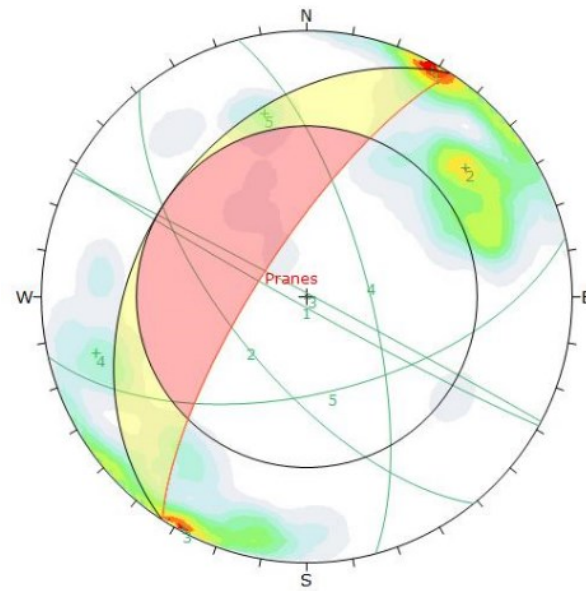


Σχήμα 5–10: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J1 – J2

Ζεύγος ασυνεχειών J2 – J3: 66/231 – 89/028

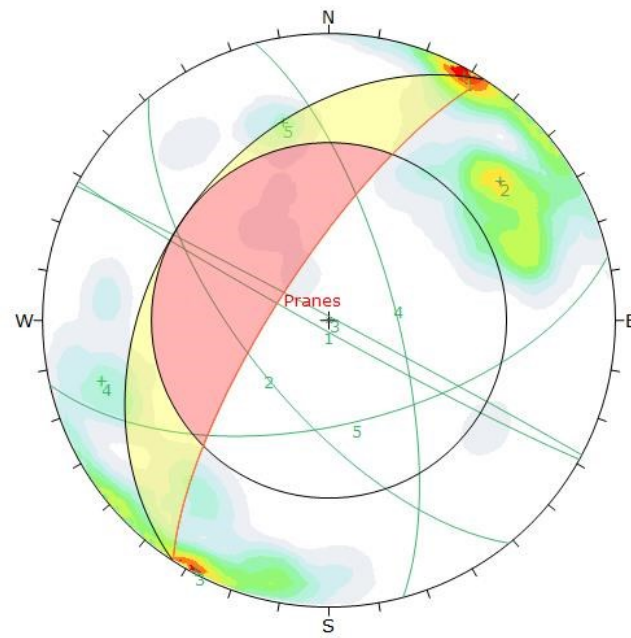
Το συγκεκριμένο ζεύγος ασυνεχειών εμφανίζει ολίσθηση στις τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής, 36°, 38°, 40° (είναι οριακά στην περιφέρεια) ενώ στην τιμή 42° είναι στην περιοχή της ασφάλειας.

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 36°



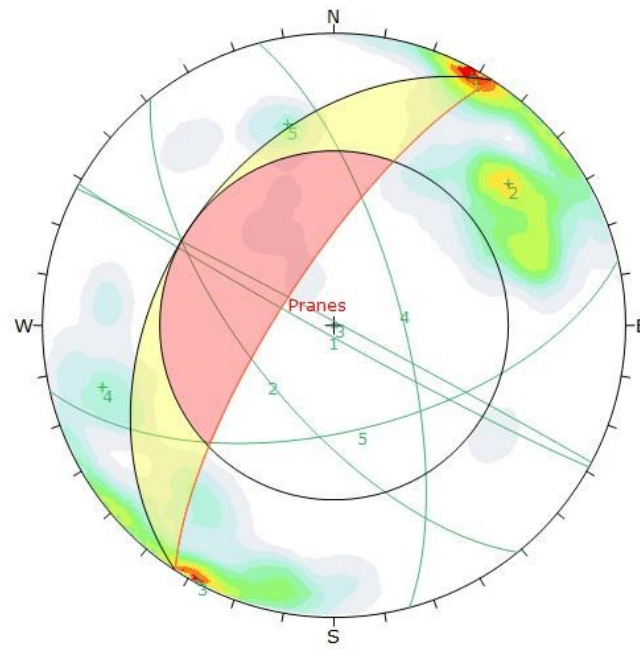
Kinematic Analysis		Wedge Sliding	
Slope Dip		75	
Slope Dip Direction		343	
Friction Angle		36°	
Wedge Sliding		Critical	Total
		1470	6553
		22.43%	
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	87	209	J1
2	66	231	J2
3	89	28	J3
4	71	75	J4
5	50	167	J5
6	75	303	Planes
Plot Mode		Pole Vectors	
Vector Count		115 (115 Entries)	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal Area	

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 38°



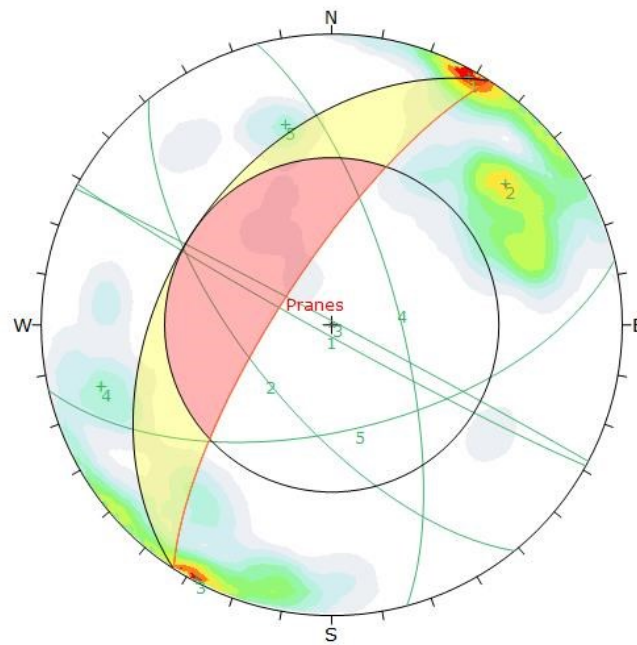
Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	75		
Slope Dip Direction	303		
Friction Angle	38°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	1395	6553	21.29%
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	87	209	J1
2	66	231	J2
3	89	28	J3
4	71	75	J4
5	60	167	J5
6	75	303	Pranes
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	115 (115 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 40°



Kinematic Analysis:		Wedge Sliding		
Slope Dip:		75		
Slope Dip Direction:		303		
Friction Angle:		40°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1326	6553	20.24%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	75	303	Pranes	
Plot Mode:		Pole Vectors		
Vector Count:		115 (115 Entries)		
Hemisphere:		Lower		
Projection:		Equal Area		

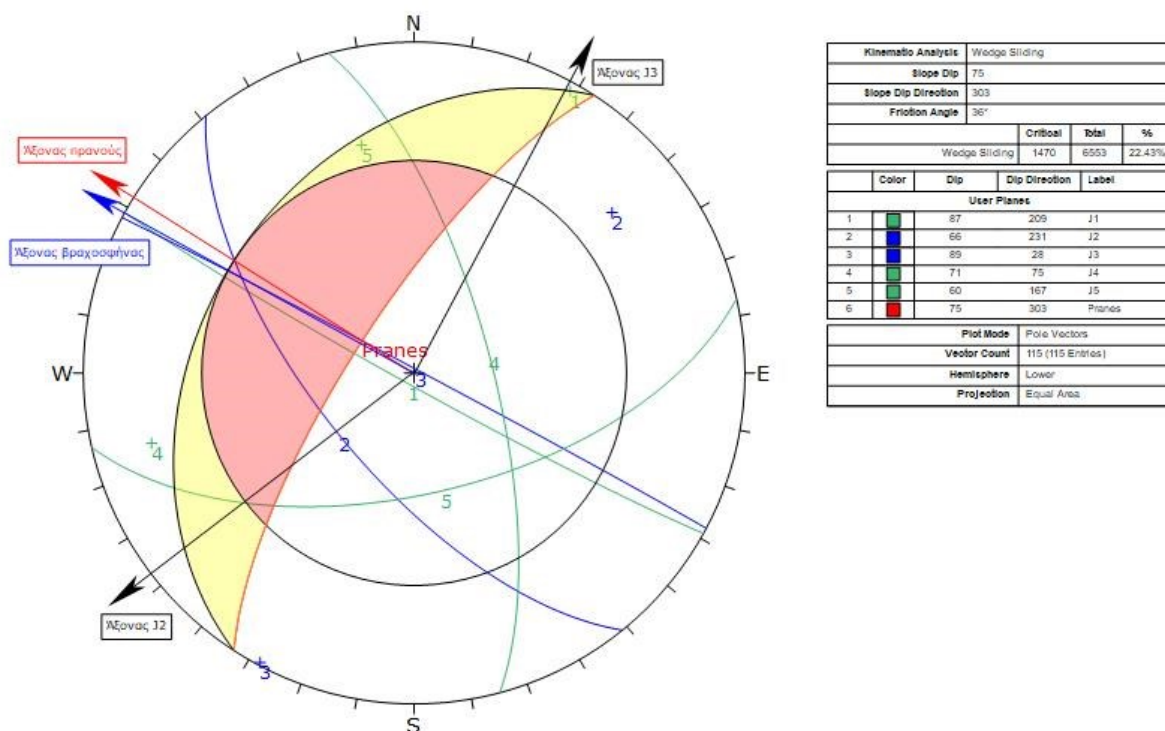
Γωνία
εσωτερικής
τριβής 42°



Kinematic Analysis		Wedge Sliding	
Slope Dip	75		
Slope Dip Direction	303		
Friction Angle	42°		
		Critical	Total
Wedge Sliding		1256	6553
		19.17%	
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	87	209	J1
2	66	231	J2
3	89	28	J3
4	71	75	J4
5	60	167	J5
6	75	303	Pranes
Plot Mode		Pole Vectors	
Vector Count		115 (115 Entries)	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal Area	

Στο Σχήμα 5–11 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J2 και J3 και του άξονα της βραχοσφήνας. Διακρίνεται πως ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πρανούς και του άξονα της βραχοσφήνας δε βρίσκεται κανένας άξονας από τις δύο επιφάνειες των ασυνεχειών J2 και J3 που ορίζουν τη βραχοσφήνα. Επομένως η ολίσθηση που αναμένεται θα είναι σφηνοειδής.

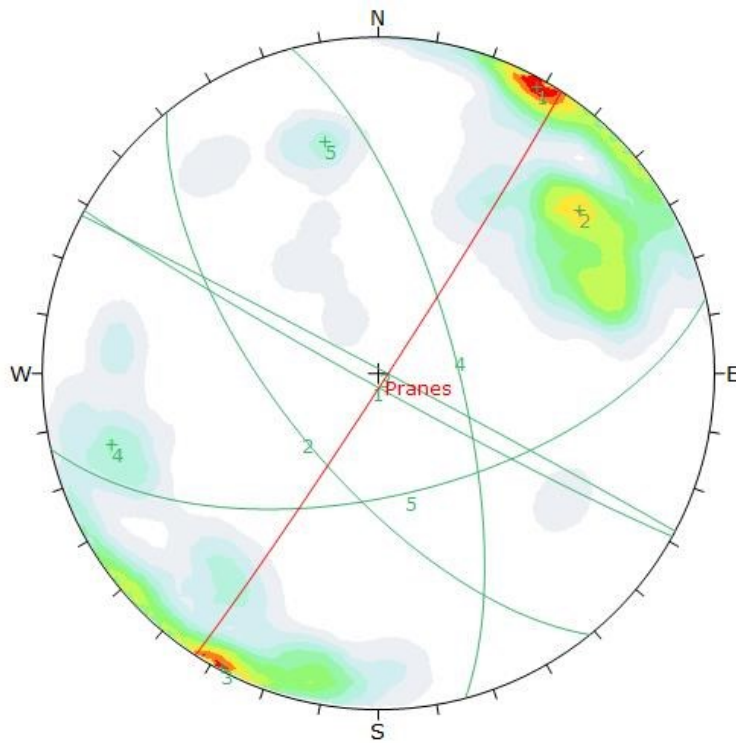
Η γωνία εσωτερικής τριβής δε θα επηρεάσει την ανάλυση σχετικά με το είδος της ολίσθησης και επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η γωνία των 36°.



Σχήμα 5–11: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J3

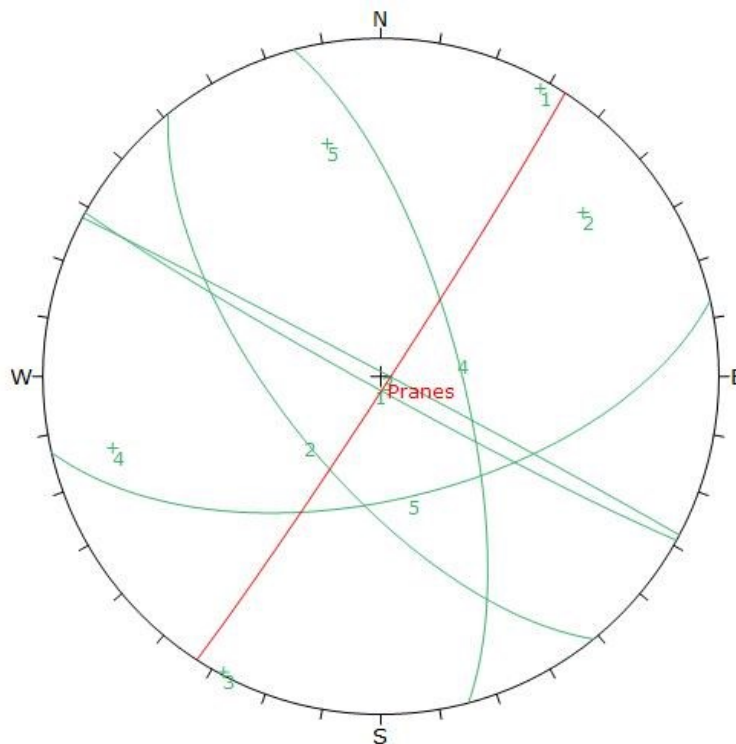
Πρανές με στοιχεία 88/123

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5–12 και Σχήμα 5–13) παρουσιάζονται οι στερεογραφικές προβολές στο δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και με τις μέσες επιφάνειες των ασυνεχειών αντιστοίχως.



	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		87	209	J1
2		66	231	J2
3		89	28	J3
4		71	75	J4
5		60	167	J5
6		88	123	Planes
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

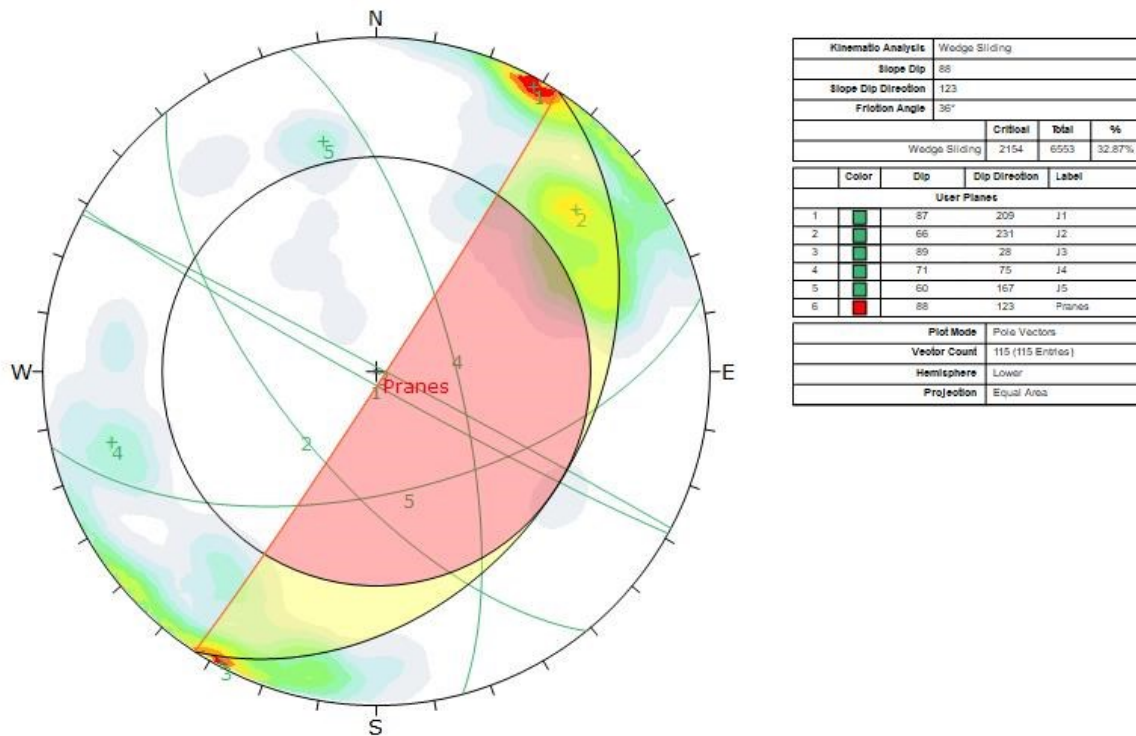
Σχήμα 5–12: Δίκτυο Schmidt με τις πυκνότητες και τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών



	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		87	209	J1
2		66	231	J2
3		89	28	J3
4		71	75	J4
5		60	167	J5
6		88	123	Planes
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Σχήμα 5–13: Δίκτυο Schmidt με τις μέσες επιφάνειες των συστημάτων των ασυνεχειών

Εφαρμόζοντας το test Markland πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των δυνητικών ολισθήσεων.



Σχήμα 5–14: Εφαρμογή test Markland

Στο Σχήμα 5–14 από την απεικόνιση των κύριων επιπέδων ασυνεχειών σε συνδυασμό με τη διεύθυνση και κλίση του πρανούς προκύπτουν οι εξής γεωμετρικά δυναμικές περιπτώσεις αστοχίας.

Ανατροπή: Κανένα από τα επίπεδα των ασυνεχειών δε φαίνεται να δίνει τη δυνατότητα εκδήλωσης ανατροπών.

Ολίσθηση: Παρουσιάζεται η πιθανότητα δημιουργίας ολισθήσεων στην τομή των κατωτέρω ζευγών επιπέδων ασυνεχειών:

J1 – J5: 87/209 – 60/167

J1 – J4: 87/209 – 71/075

J2 – J5: 66/231 – 60/167

J3 – J5: 89/028 – 60/167

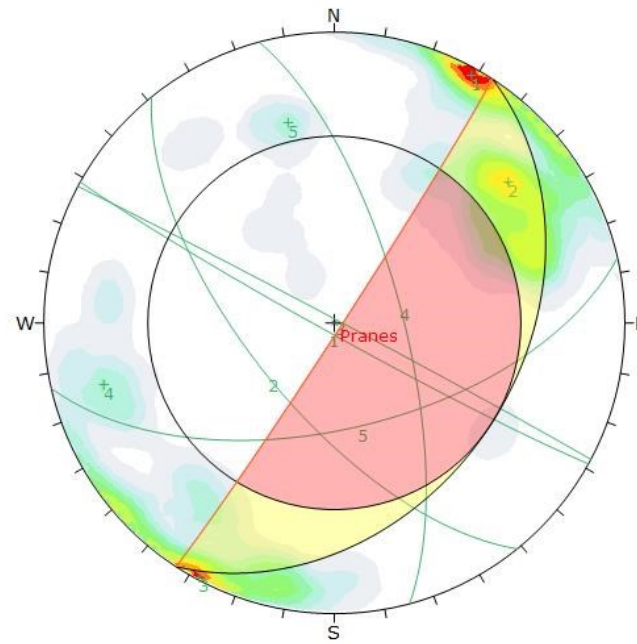
J3 – J4: 89/028 – 71/075

J4 – J5: 71/075 – 60/167

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η ανάλυση που έλαβε χώρα σύμφωνα με τη βελτίωση Hocking για κάθε ζεύγος ασυνεχειών με σκοπό τον προσδιορισμό του είδους της δυναμικής ολίσθησης, επίπεδη ή σφηνοειδής.

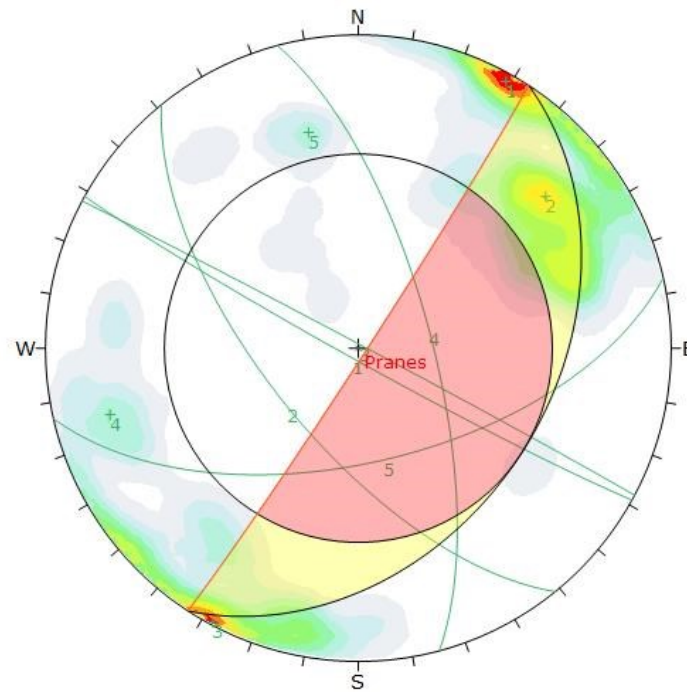
Για την ολόπλευρη διερεύνηση των ασυνεχειών στο αριστερό πρανές της περιοχής ενδιαφέροντος όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με μεταβλητή τη γωνία εσωτερικής τριβής. Από τις αναλύσεις προέκυψε πως δεν υπάρχει καμία διαφοροποίηση σχετικά με τα ζεύγη των επιπέδων των ασυνεχειών που παρουσιάζουν ολίσθηση.

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 36°



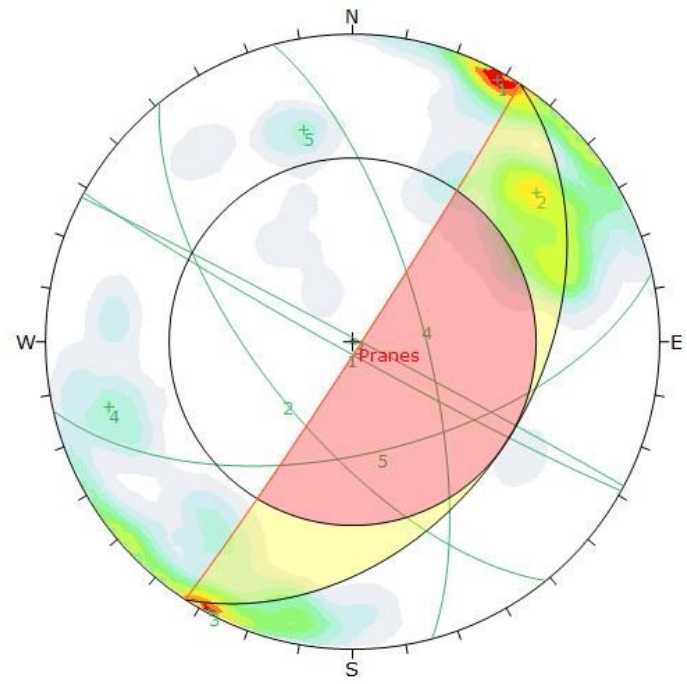
Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		88		
Slope Dip Direction		123		
Friction Angle		36°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		2154	6553	32.87%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	88	123	Planes	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 38°



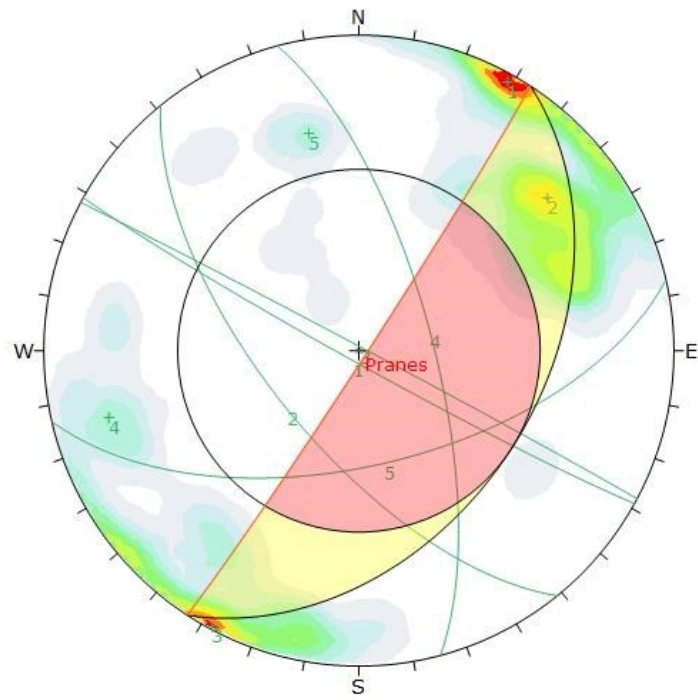
Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		86		
Slope Dip Direction		123		
Friction Angle		38°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		2074	6593	31.65%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	88	123	Planes	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 40°



Kinematic Analysis:	Wedge Sliding		
Slope Dip:	88		
Slope Dip Direction:	123		
Friction Angle:	40°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	2006	6553	30.61%
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	87	209	J1
2	66	231	J2
3	89	28	J3
4	71	75	J4
5	60	167	J5
6	88	123	Planes
Pole Mode:	Pole Vectors		
Vector Count:	115 (115 Entries)		
Hemisphere:	Lower		
Projection:	Equal Area		

Γωνία
εσωτερικής
τριβής 42°

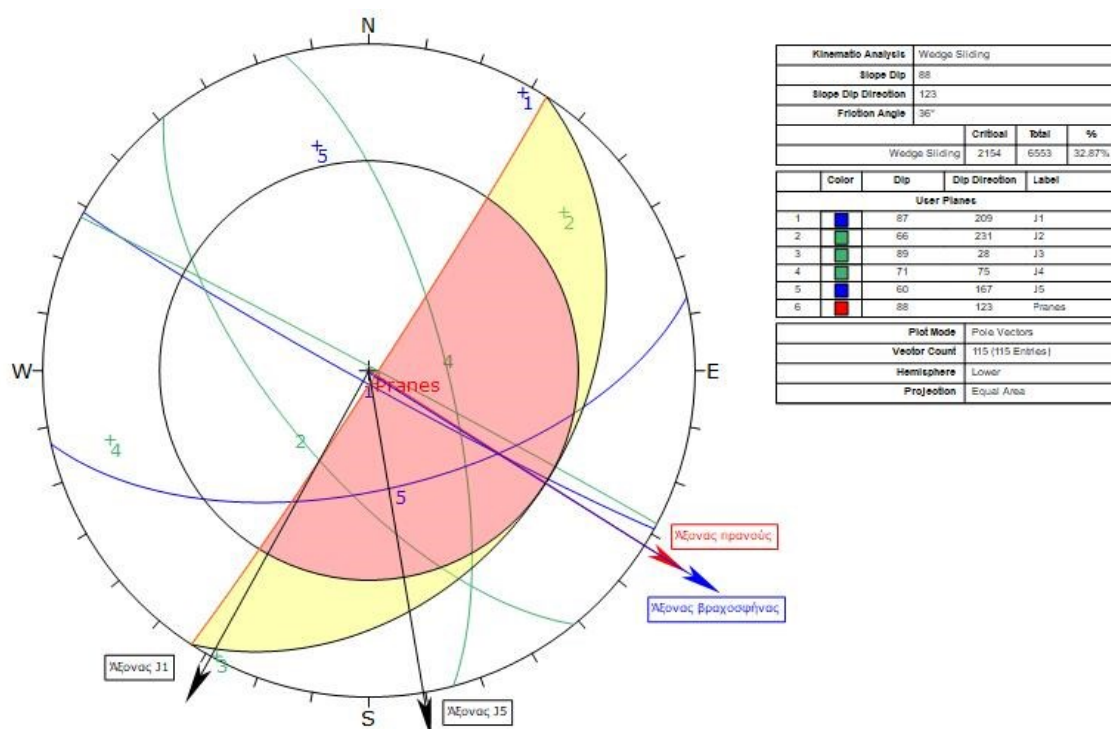


Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		88		
Slope Dip Direction		123		
Friction Angle		42°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		1918	6553	29.27%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	87	209	J1	
2	66	231	J2	
3	89	28	J3	
4	71	75	J4	
5	60	167	J5	
6	88	123	Pranes	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		115 (115 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Επιλέχθηκε να γίνει ανάλυση και παρουσίαση των ζευγών των ασυνεχειών για τη γωνία εσωτερικής τριβής των 36° και όλα τα συμπεράσματα θα είναι υπέρ της ασφάλειας.

Ζεύγος ασυνεχειών J1 – J5: 87/209 – 60/167

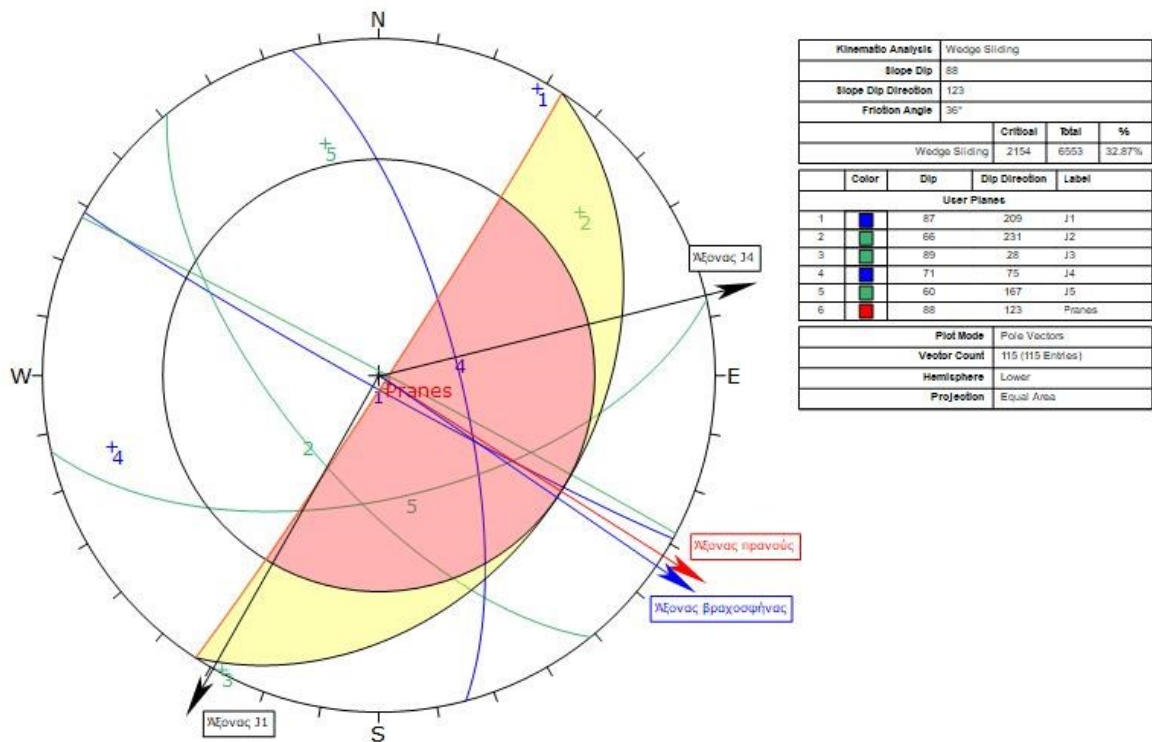
Στο Σχήμα 5–15 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J1 και J5 και του άξονα της βραχοσφήνας. Παρατηρείται πως ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πρανούς και του άξονα της βραχοσφήνας δε βρίσκεται κανένας άξονας από τις δύο επιφάνειες των ασυνεχειών J1 και J5 που ορίζουν τη βραχοσφήνα. Άρα η ολίσθηση που θα εκδηλωθεί θα είναι σφηνοειδής.



Σχήμα 5–15: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J1 – J5

Ζεύγος ασυνεχειών J1 – J4: 87/209 – 71/075

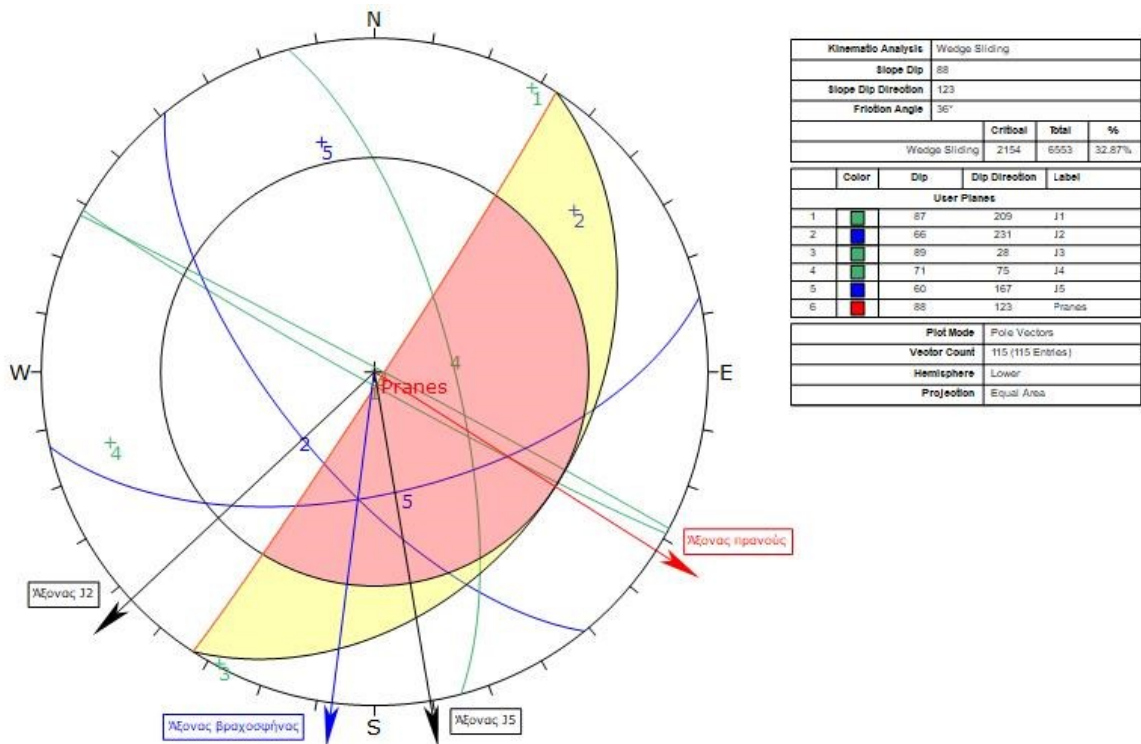
Στο Σχήμα 5–16 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J1 και J4 και του άξονα της βραχοσφήνας. Παρατηρείται πως δε βρίσκεται κανένας άξονας από τις δύο επιφάνειες των ασυνεχειών J1 και J4 που ορίζουν τη βραχοσφήνα ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πρανούς και του άξονα της βραχοσφήνας. Επομένως η ολίσθηση που αναμένεται θα είναι σφηνοειδής.



Σχήμα 5-16: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J1 – J4

Ζεύγος ασυνεχειών J2 – J5: 66/231 – 60/167

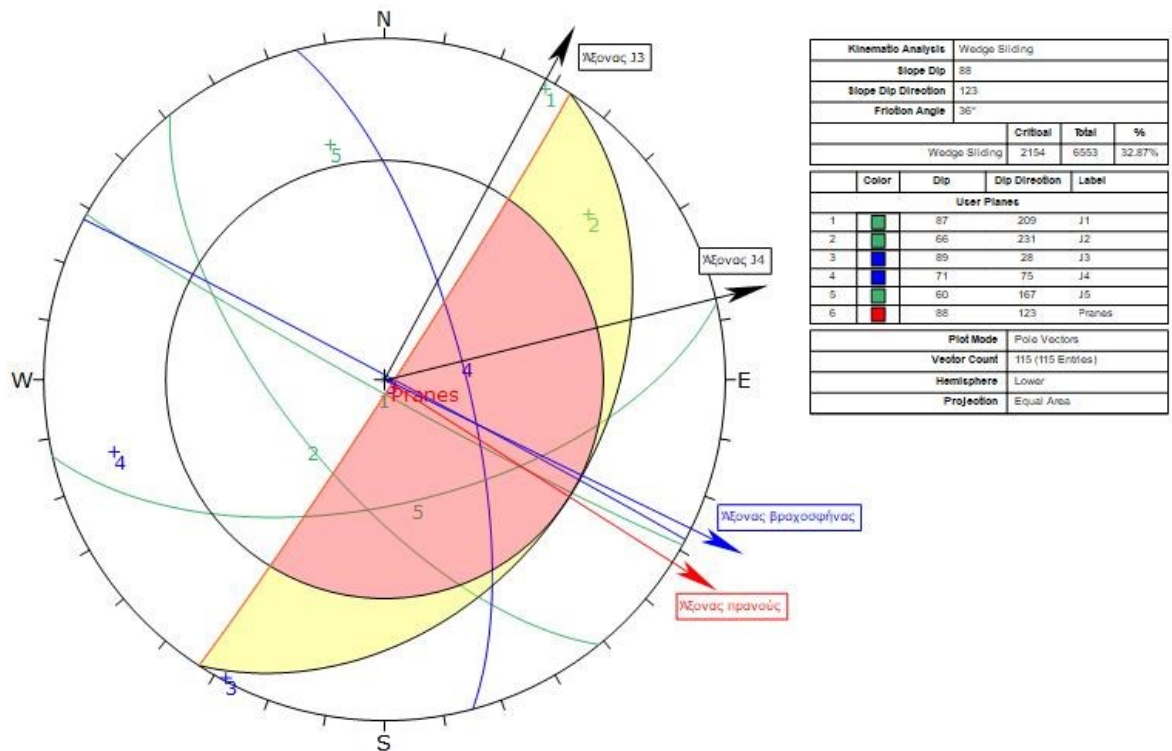
Στο Σχήμα 5-17 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρσανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J2 και J5 και του άξονα της βραχοσφήνας. Διαφαίνεται πως ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πρσανούς και του άξονα της βραχοσφήνας εντοπίζεται ο άξονας της ασυνέχειας J5. Επομένως η δυνητική ολίσθηση αναμένεται να είναι επίπεδη και θα εκδηλωθεί στη διεύθυνση του επιπέδου J5.



Σχήμα 5-17: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχειών J2 – J5

Ζεύγος ασυνεχειών J3 – J4: 89/028 – 71/075

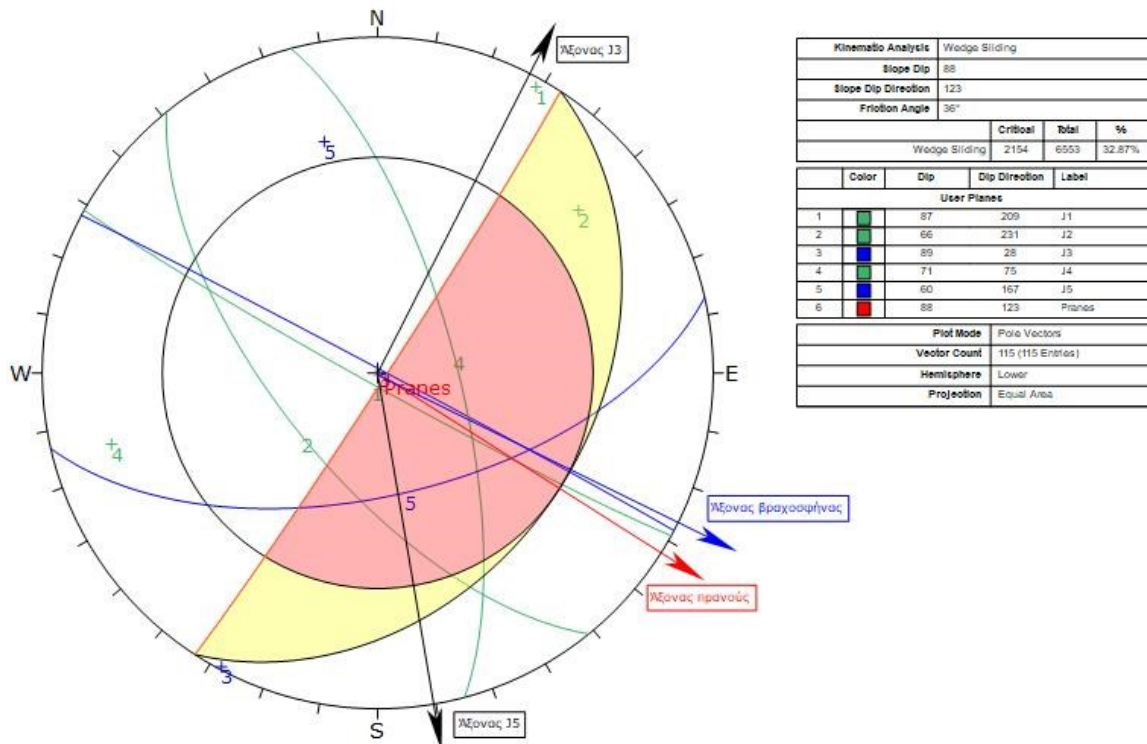
Στο Σχήμα 5-18 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρσανούς, των επιπέδων των ασυνεχειών J3 και J4 και του άξονα της βραχοσφήνας. Παρατηρείται πως ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πρσανούς και του άξονα της βραχοσφήνας δε βρίσκεται κανένας άξονας από τις δύο επιφάνειες των ασυνεχειών J3 και J4 που ορίζουν τη βραχοσφήνα. Επομένως η ολίσθηση που πιθανόν να εκδηλωθεί θα είναι σφηνοειδής.



Σχήμα 5-18: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχιών J3 – J4

Ζεύγος ασυνεχιών J3 – J5: 89/028 – 60/167

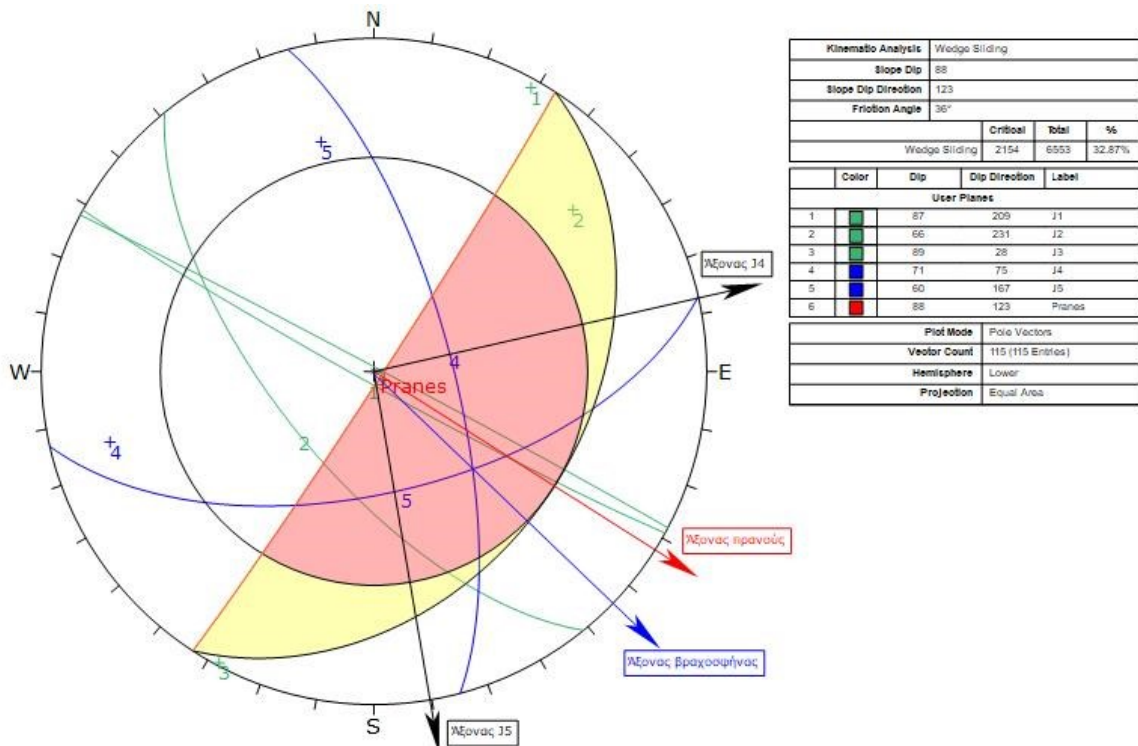
Στο Σχήμα 5-19 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πριανούς, των επιπέδων των ασυνεχιών J3 και J5 και του άξονα της βραχοσφήνας. Δεν παρατηρείται κάποιος άξονας από τις δύο επιφάνειες των ασυνεχιών J3 και J5 που ορίζουν τη βραχοσφήνα ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πριανούς και του άξονα της βραχοσφήνας. Επομένως η ολίσθηση που αναμένεται θα είναι σφηνοειδής.



Σχήμα 5-19: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχιών J3 – J5

Ζεύγος ασυνεχιών J4 – J5: 71/075 – 60/167

Στο Σχήμα 5-20 παρουσιάζονται η διεύθυνση κλίσης του πρηνούς, των επιπέδων των ασυνεχιών J4 και J5 και του άξονα της βραχοσφήνας. Ανάμεσα στη διεύθυνση κλίσης του πρηνούς και του άξονα της βραχοσφήνας δε βρίσκεται κάποιος άξονας από τις δύο επιφάνειες των ασυνεχιών J4 και J5 που ορίζουν τη βραχοσφήνα. Επομένως η ολίσθηση που αναμένεται θα είναι σφηνοειδής.



Σχήμα 5-20: Στερεογραφική προβολή Schmidt για την τομή του ζεύγους ασυνεχιών J4 – J5

Εύρημα στο αριστερό πρανές

Από την επί τόπου χαρτογράφηση εντοπίστηκε ένα τμήμα του πρανούς στο οποίο δε κατέστη εφικτό να προσδιοριστεί τι αντιπροσωπεύει. Είναι μία εμφάνιση επάνω στο πρανές, κοντά στο έδαφος του οποίου δεν ήταν εφικτό να προσδιοριστεί η φύση του. Αν είναι δηλαδή το ένα τμήμα μίας ασυνέχειας που αποκολλήθηκε το άλλο τμήμα της ή είναι κάποιος καθρέπτης ρήγματος. Η επιφάνειά του είναι καλυμμένη με ασβεστιτικό υλικό του οποίου το πάχος είναι σε μερικά σημεία μεγαλύτερο από 1cm. Οι γραμμές που φαίνονται σα γραμμές ολίσθησης μπορεί να προήλθαν από την τριβή κατά την αποκόλληση του άλλου τεμαχίων ή μπορεί και να είναι γραμμές ολίσθησης αν είναι ρήγμα. Το πιο ασφαλές συμπέρασμα είναι πως η κίνηση του νερού εντός του ανοίγματος ήταν υπαρκτή και έντονη λόγω του μεγάλου πάχους του ασβεστιτικού υλικού που έχει εναποτεθεί.

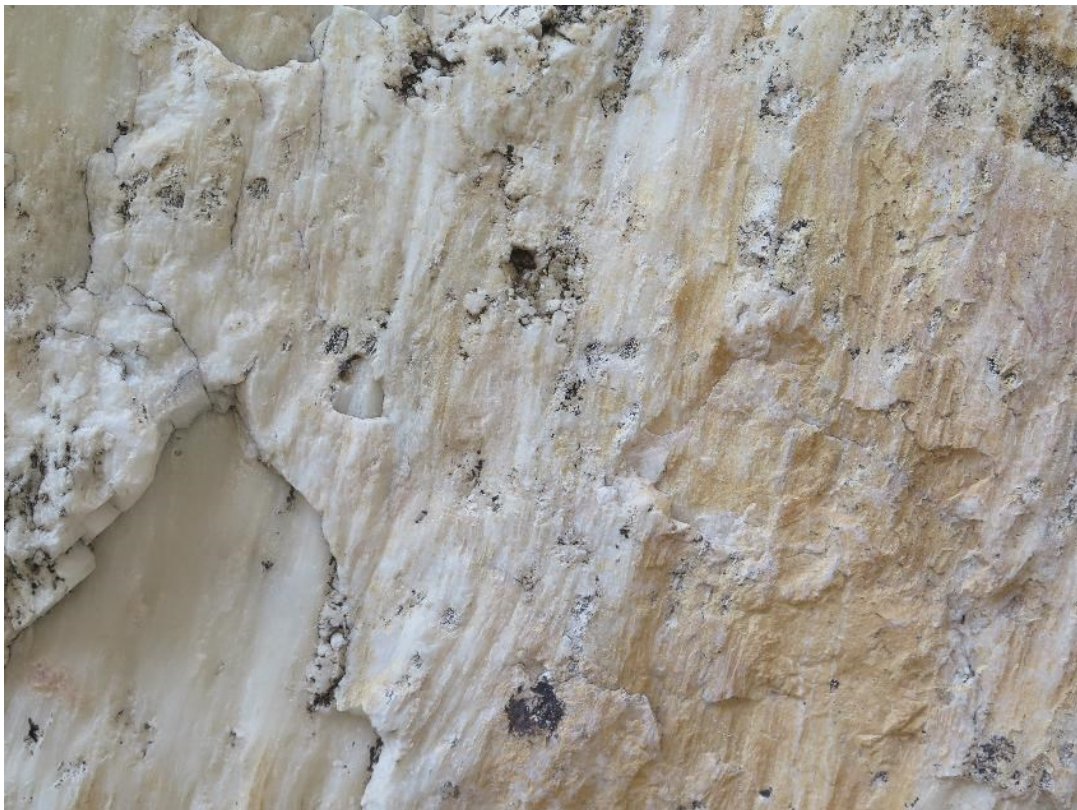
η συγκεκριμένη εμφάνιση μπορεί να προήλθε είτε από κάποιος μικροσεισμό είτε από επίπεδη ολίσθηση όταν εμφανίστηκαν οι κατάλληλες γεωτεχνικές συνθήκες.



Φωτογραφία 5-11: Η τομή με το ασβεστιτικό υλικό



Φωτογραφία 5-12: Γραμμές ολίσθησης ή γραμμές λόγω τριβής επάνω στο ασβεστίτικο υλικό



Φωτογραφία 5-13: Ασβεστίτικο υλικό επάνω στην εμφάνιση του αριστερού πρηνούς

6. Αναλύσεις ευστάθειας θαλάμου

Οι αναλύσεις στο λογισμικό UnWedge πραγματοποιήθηκαν αποκλειστικά για το εσωτερικό της Σπηλιάς. Επιλέχθηκε εντός της Σπηλιάς να γίνουν παραμετρικές αναλύσεις με μεταβλητή την εμμονή των ασυνεχειών (Persistence) σε τρεις τομές, δύο εγκάρσιες και μία οριζόντια. Χρησιμοποιώντας το πρόσθετο (plugins) εργαλείο “Compass” του λογισμικού CloudCompare πραγματοποιήθηκαν πολλές μετρήσεις της κλίσης και της φοράς μέγιστης κλίσης, σε κάθε τμήμα. Πραγματοποιήθηκαν σε κάθε θέση περισσότερες από 100 μετρήσεις και έπειτα χρησιμοποιώντας το λογισμικό Dips εντοπίστηκαν τα κύρια επίπεδα των συστημάτων των ασυνεχειών. Το λογισμικό UnWedge εντοπίζει τους επισφαλείς όγκους πέριξ του υπογείου χώρου ενδιαφέροντος με 3 επίπεδα ασυνεχειών. Στη συνέχεια ακολουθούν οι τομές με τα επίπεδα των συστημάτων των ασυνεχειών και οι αναλύσεις που έγιναν σε κάθε θέση και τα αποτελέσματά τους.

Ο συντελεστής ασφαλείας θεωρήθηκε η τιμή 1.4 που αντιστοιχεί σε περιβάλλον που επιδρούν οι σεισμοί και υπάρχει νερό. Αν προκύψει τιμή μικρότερη από την τιμή του συντελεστή ασφαλείας τότε αναμένεται να εκδηλωθεί αστοχία στη συγκεκριμένη σφήνα, ενώ όταν η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι μεγαλύτερη της επιτρεπτής τότε υπάρχει ασφάλεια.

Πίνακας 6-1: Επίπεδα των συστημάτων των ασυνεχειών μέσα από τη Σπηλιά του Νταβέλη

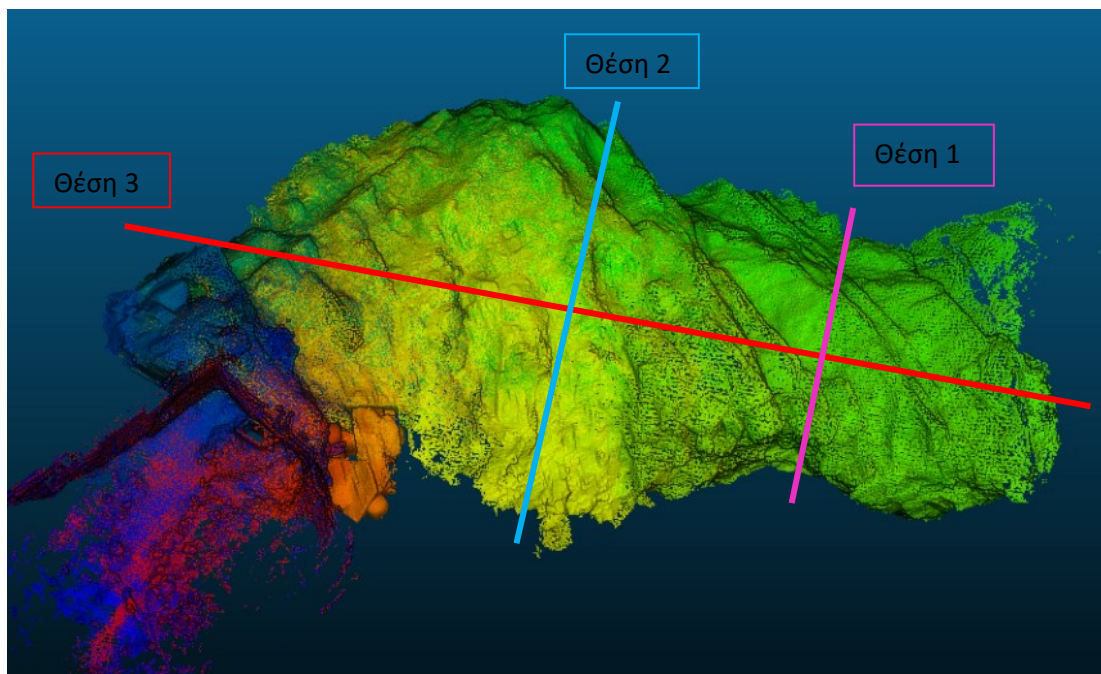
Θέση 1	Προς το τέλος του θαλάμου	11/243	52/007	75/215
Θέση 2	Στο τέλος των τσιμεντένιων αναβαθμίδων	23/140	54/056	29/036
Θέση 3	Οριζόντια τομή	72/249	03/322	32/045

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις είναι:

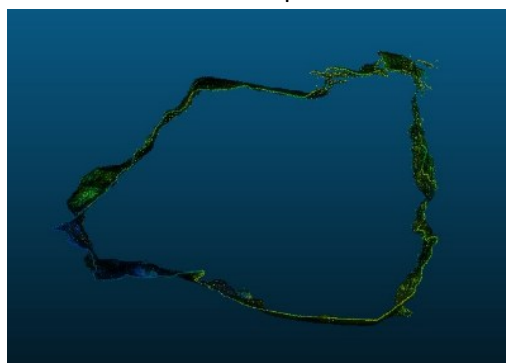
- Η πίεση έχει μονάδες μέτρησης MPa
- Η λειτουργία ανάλυσης πραγματοποιήθηκε σαν ανάλυση σήραγγας
- Ο σχεδιασμός έλαβε χώρα με συντελεστή ασφαλείας 1.4
- Ειδικό βάρος σχηματισμού (μάρμαρα) $0,026 \text{ MN/m}^3$
- Θεωρήθηκε πως η συνοχή είναι μηδέν ($c=0$)
- Η δομή των ασυνεχειών θεωρήθηκε πως έχει εμμονή 5m, 6m, 8m, 10m, 15m & 20m

Σε κάθε τομή χρησιμοποιήθηκε μία διαφορετική διατομή. Η κάθε μία διατομή προσδιορίστηκε από το λογισμικό CloudCompare κάνοντας την τομή και έπειτα στο λογισμικό AutoCAD σχεδιάστηκε η διατομή που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό UnWedge. Οι διαστάσεις των τομών υιοθετήθηκαν από τις μέγιστες διαστάσεις της Σπηλιάς όπως προέκυψαν από την τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα το πλάτος είναι 40m και το ύψος 20m.

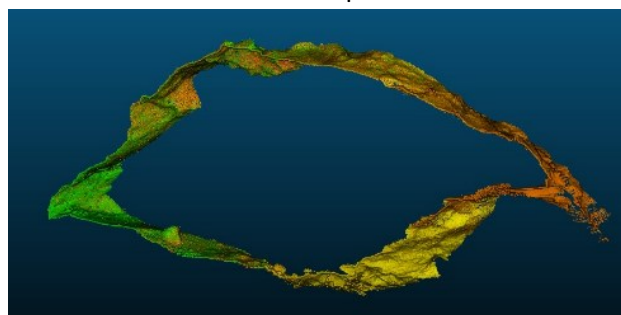
Στην *Εικόνα 6.1* αποτυπώνονται οι τρεις τομές σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις ευστάθειας.



Θέση 1



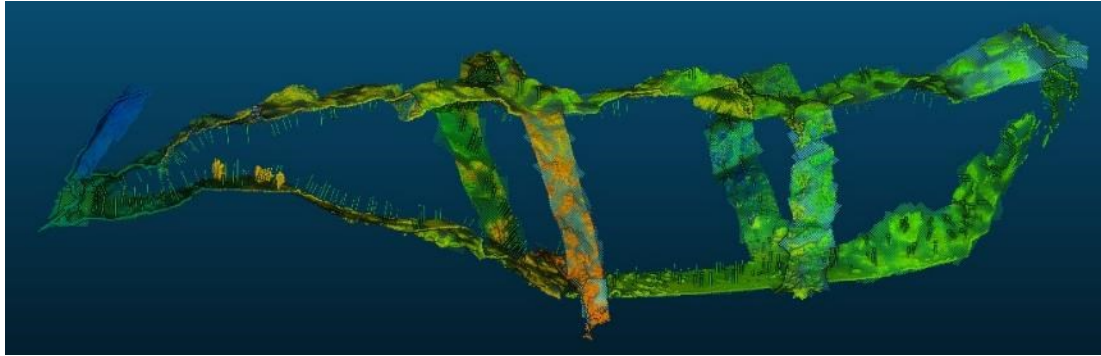
Θέση 2



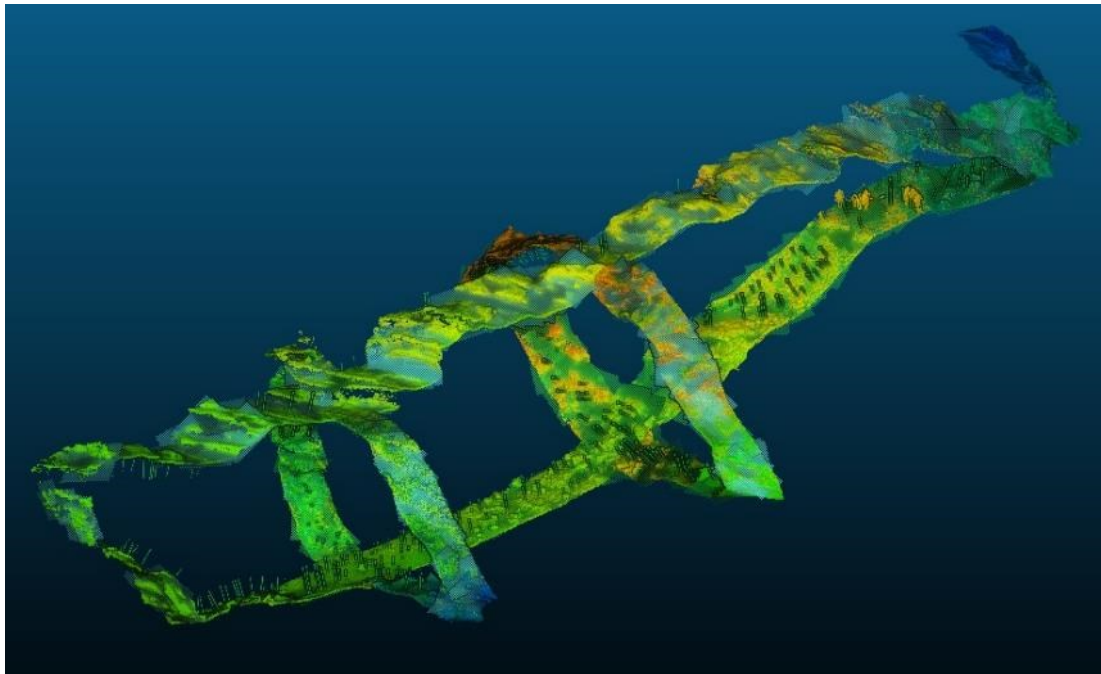
Θέση 3



Εικόνα 6.1: Οι διατομές της Σπηλιάς



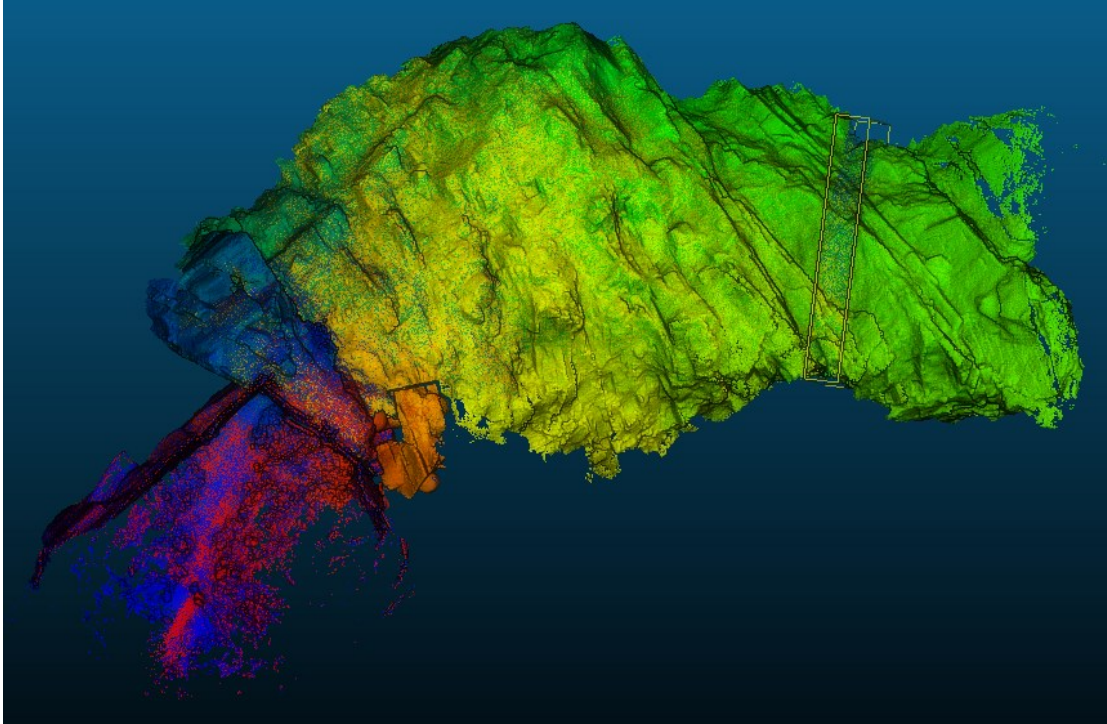
Εικόνα 6.2: Οι τρεις διατομές μπαίνοντας στο θάλαμο – διακρίνονται οι θέσεις των μετρήσεων



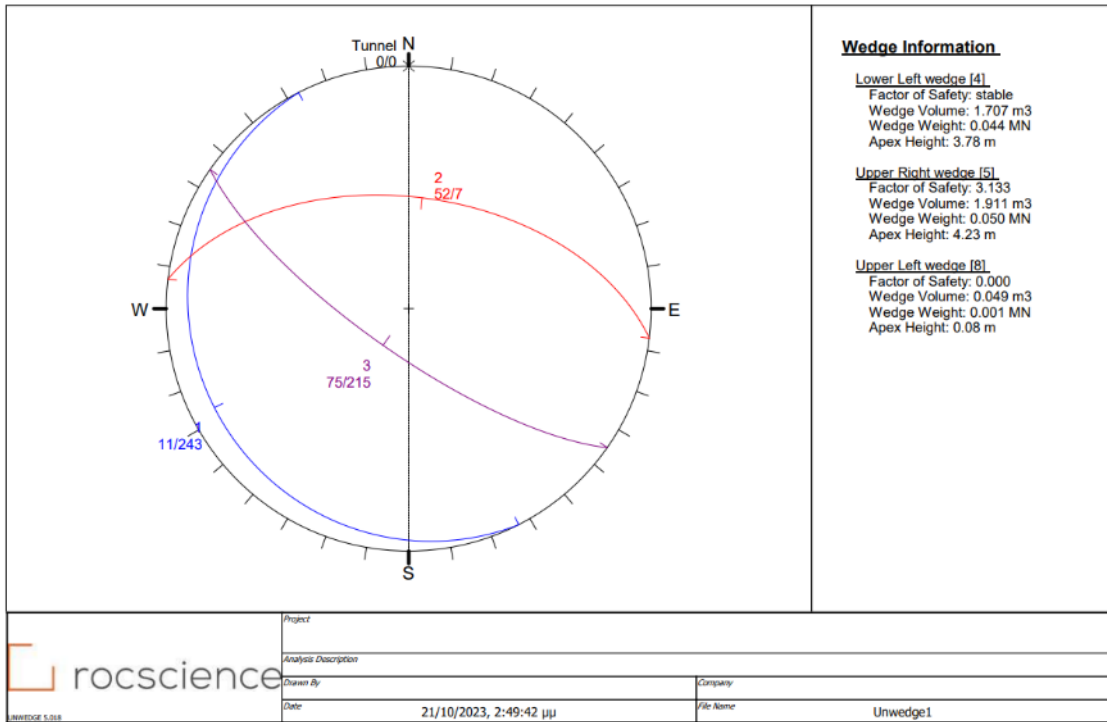
Εικόνα 6.3: Οι τρεις διατομές από το τέλος του θαλάμου - διακρίνονται οι θέσεις των μετρήσεων

Θέση 1 (Προς το τέλος του θαλάμου)

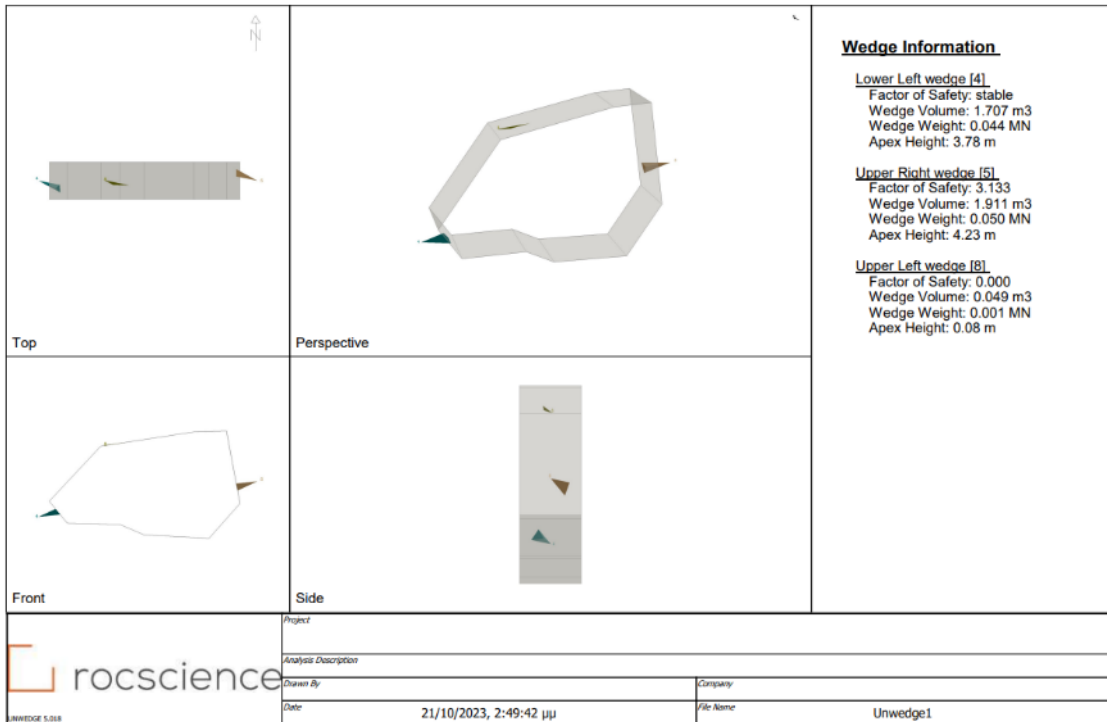
Η θέση 1 αντιπροσωπεύει μία τομή της Σπηλιάς που εντοπίζεται προς το τέλος του θαλάμου. Από την επί τόπου επίσκεψη στο χώρο, στο συγκεκριμένο σημείο ο θάλαμος έχει ύψος και πλάτος αρκετά μικρότερο από το μέγιστο, κάτι που επιβεβαιώθηκε και από το τρισδιάστατο νέφος σημείων.



Εικόνα 6.4: Οριοθέτηση του τμήματος – θέση 1



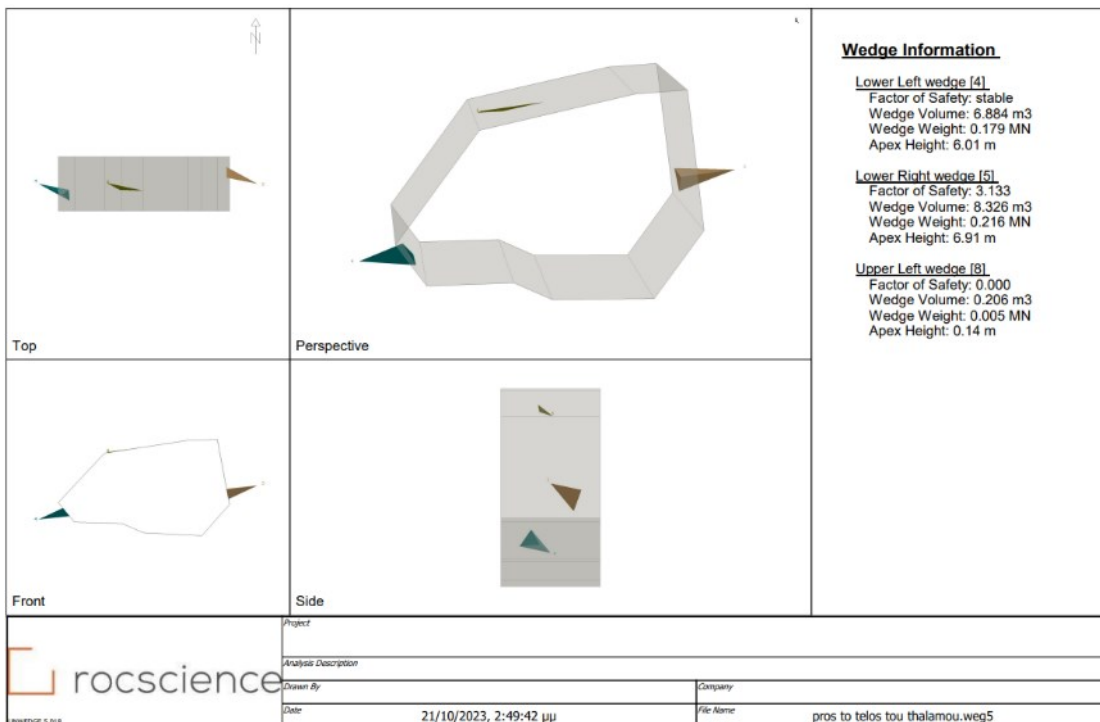
Σχήμα 6-1: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων των ασυνεχειών από τη θέση 1



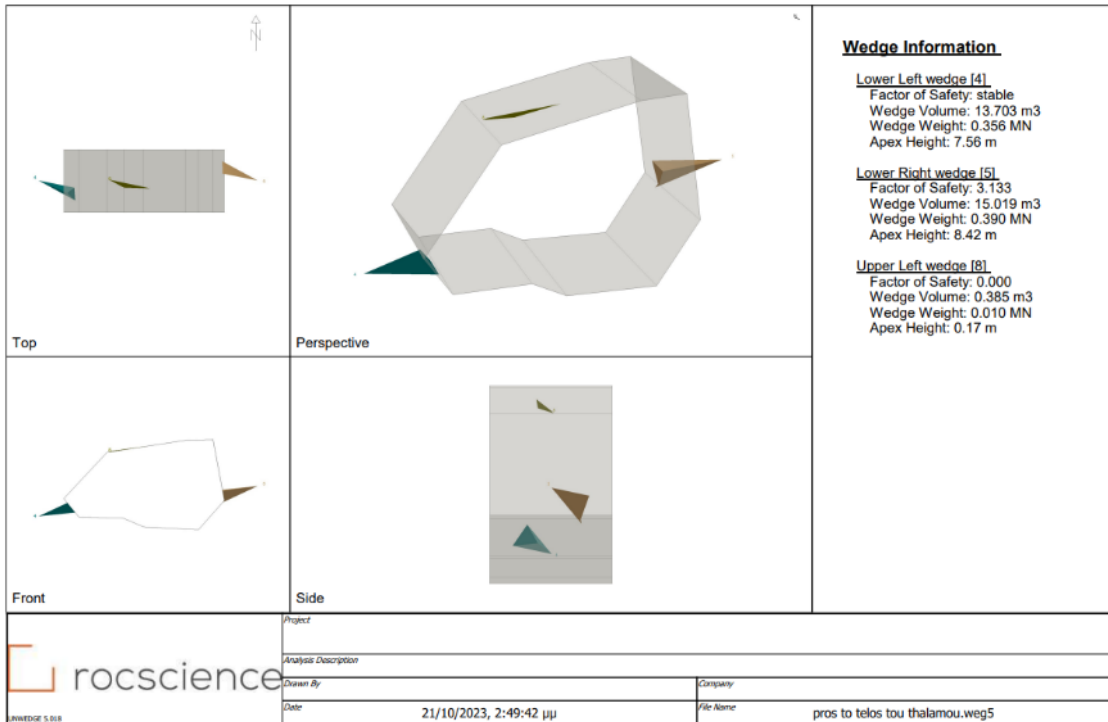
Σχήμα 6-2: Τριδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 5m



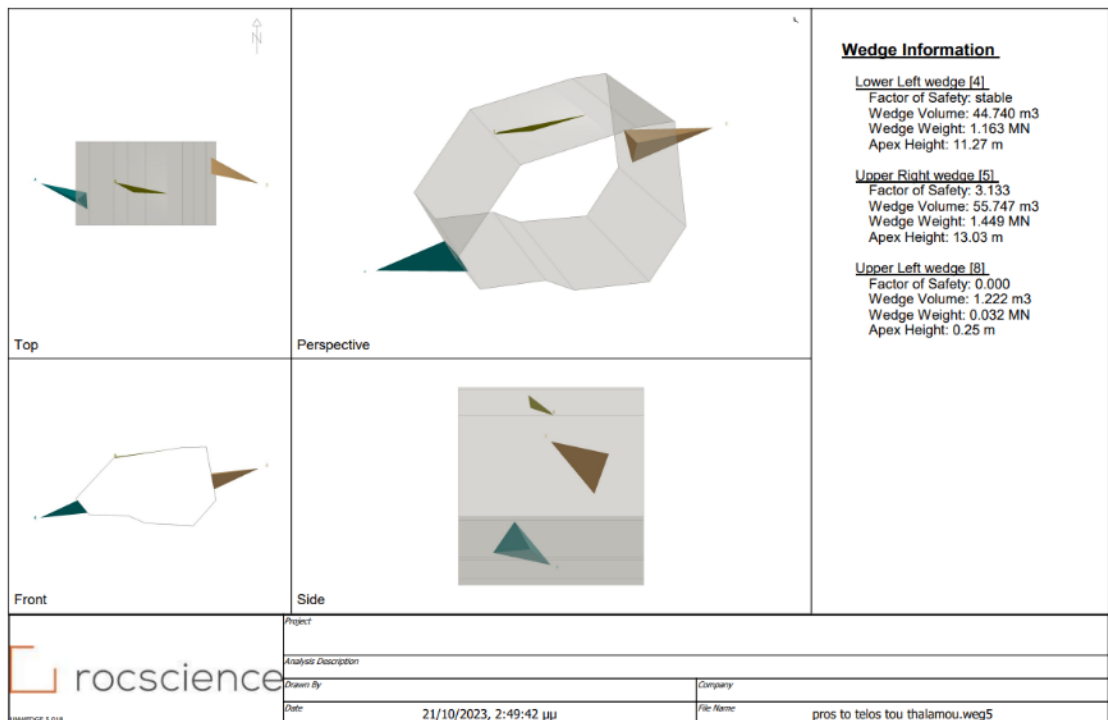
Σχήμα 6-3: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 6m



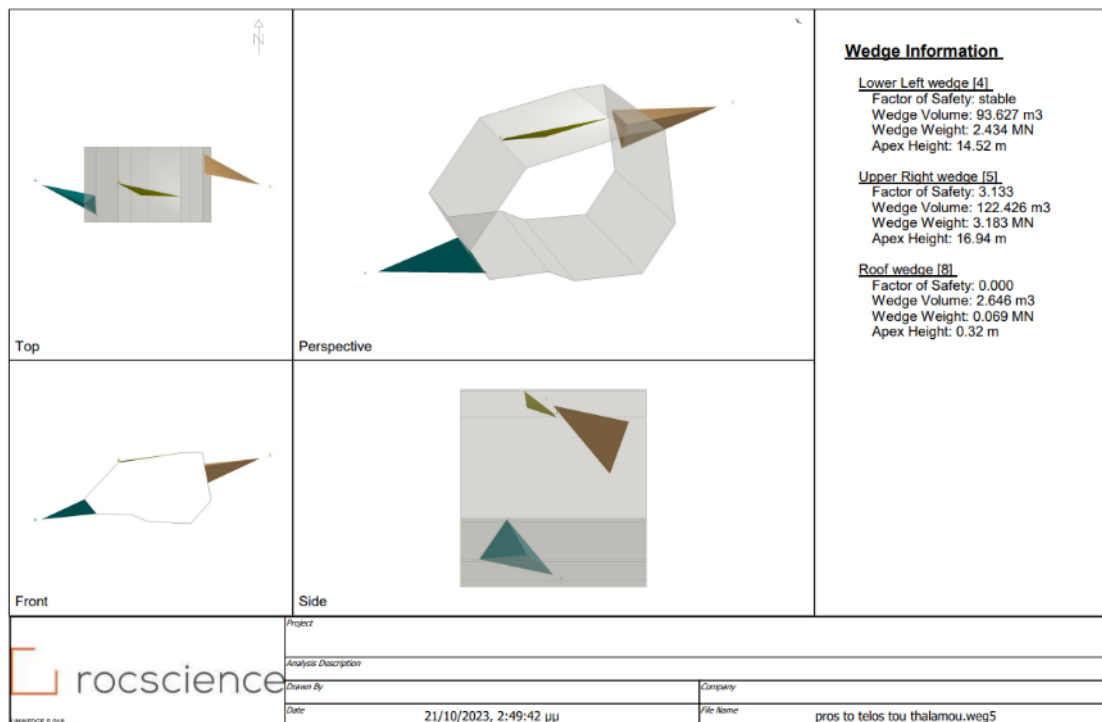
Σχήμα 6-4: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 8m



Σχήμα 6-5: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 10m



Σχήμα 6-6: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 15m

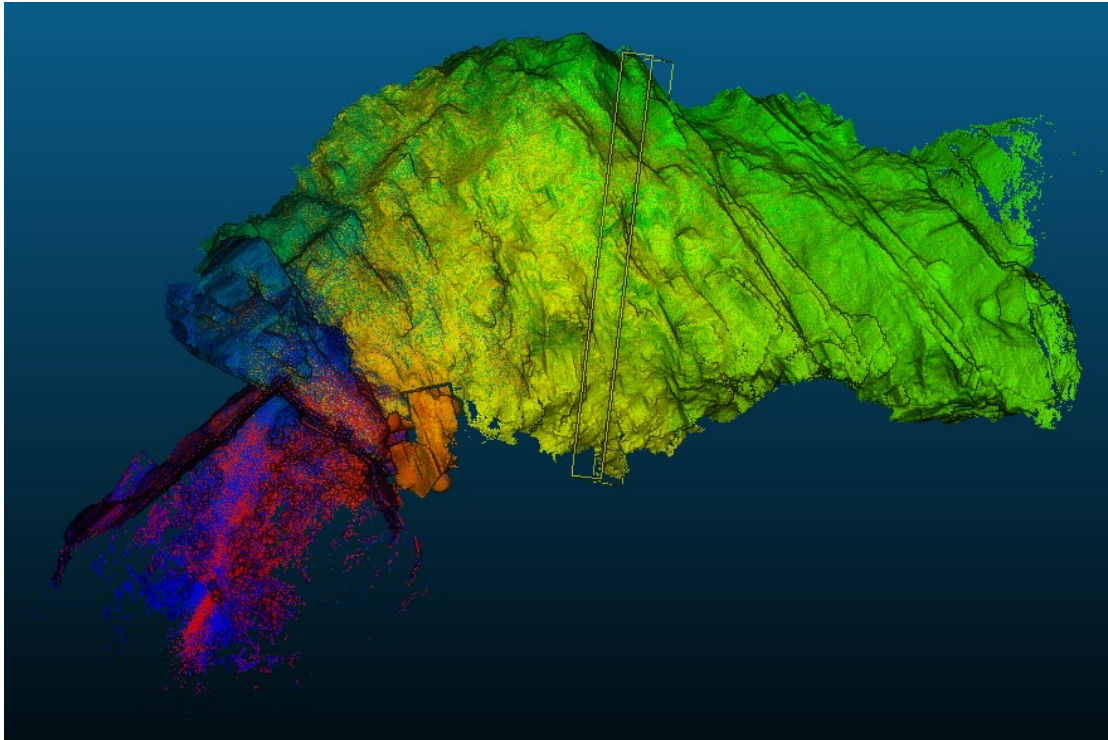


Σχήμα 6–7: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 1 με persistence 20m

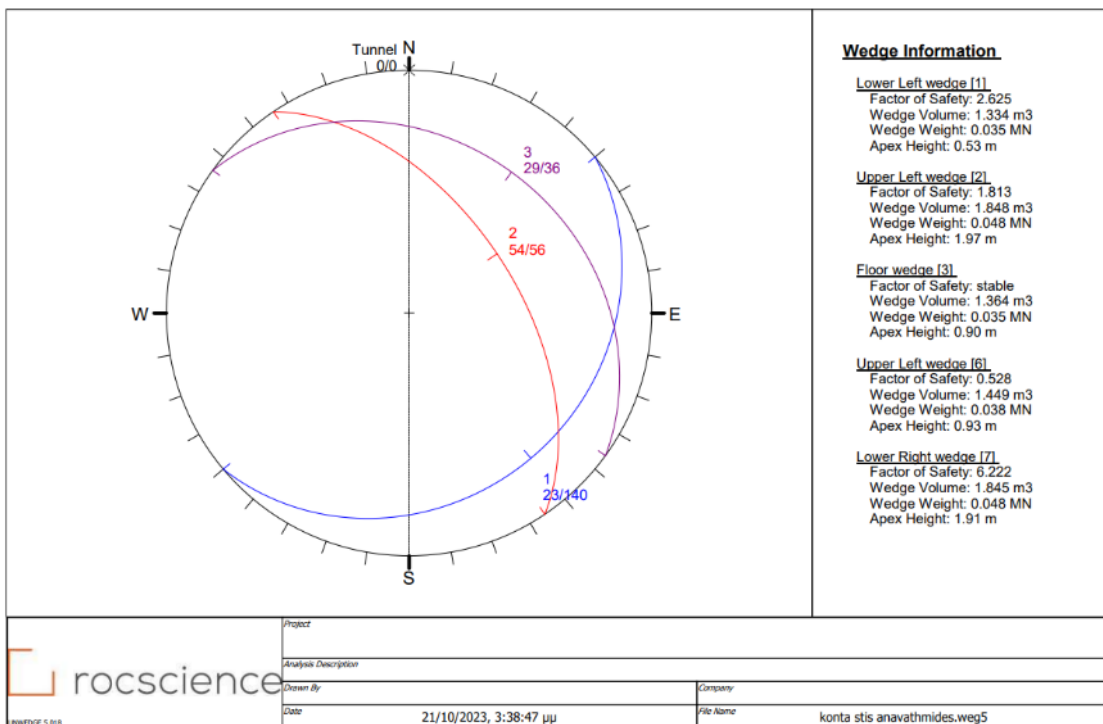
Οι παραμετρικές αναλύσεις φανερώνουν πως το τέλος της Σπηλιάς είναι ευσταθής. Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η τιμή της εμμονής των ασυνεχειών ο συντελεστής ασφαλείας σε όλες τις σφήνες είναι σταθερός. Ακόμη και στη σφήνα 5 (Lower Right wedge) παραμένει σταθερός, 3.133, και το μόνο που αλλάζει όπως και σε όλες τις σφήνες είναι ο όγκος των σφηνών.

Θέση 2

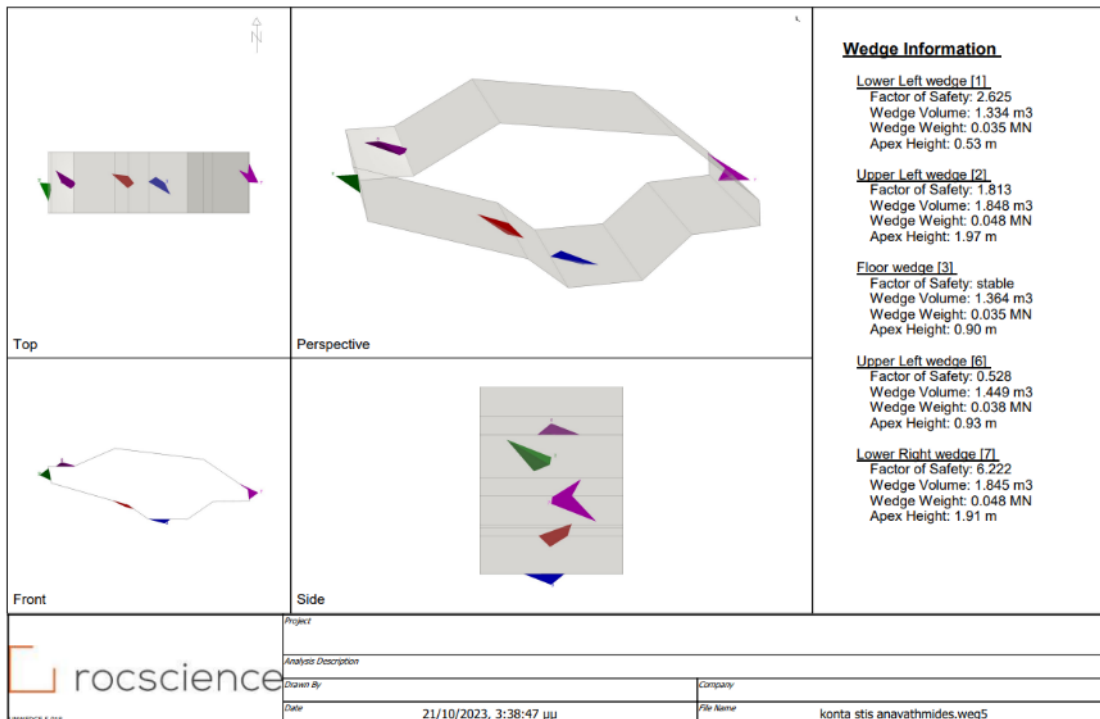
Η θέση 2 εντοπίζεται στο σημείο όπου τελειώνουν οι τιμμεντένιες αναβαθμίδες. Στο συγκεκριμένο σημείο η Σπηλιά έχει τις μεγαλύτερες διαστάσεις (όπως μετρήθηκαν από το τρισδιάστατο νέφος σημείων) και είναι ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διατομή.



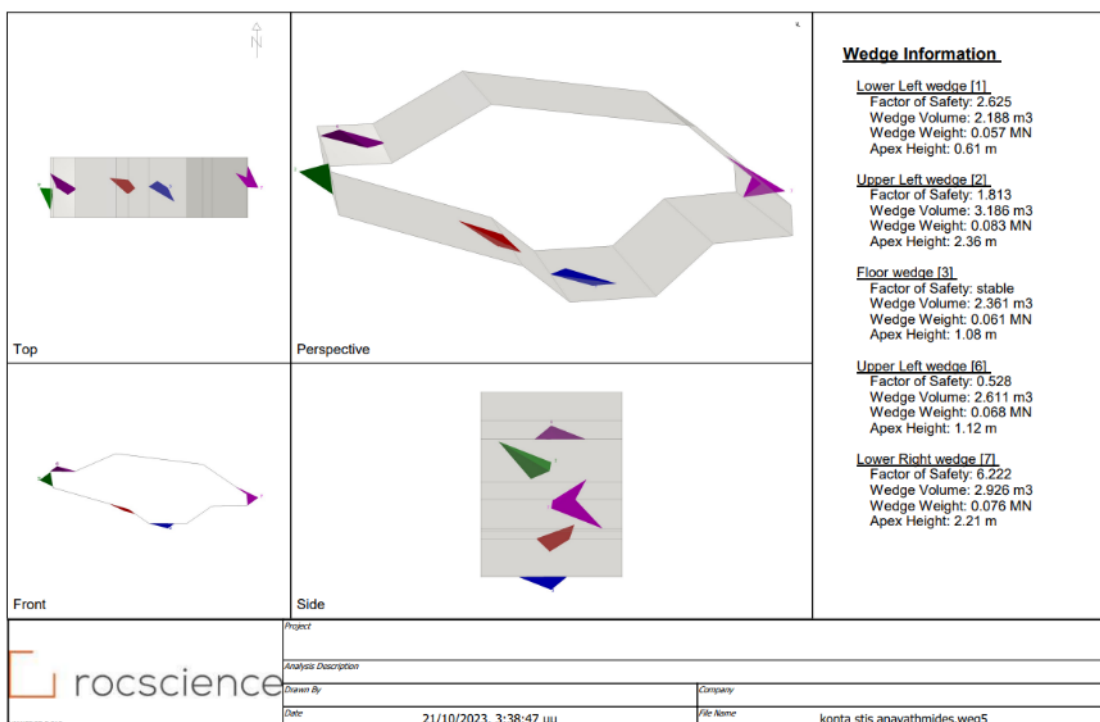
Εικόνα 6.5: Οριοθέτηση του τμήματος – θέση 2



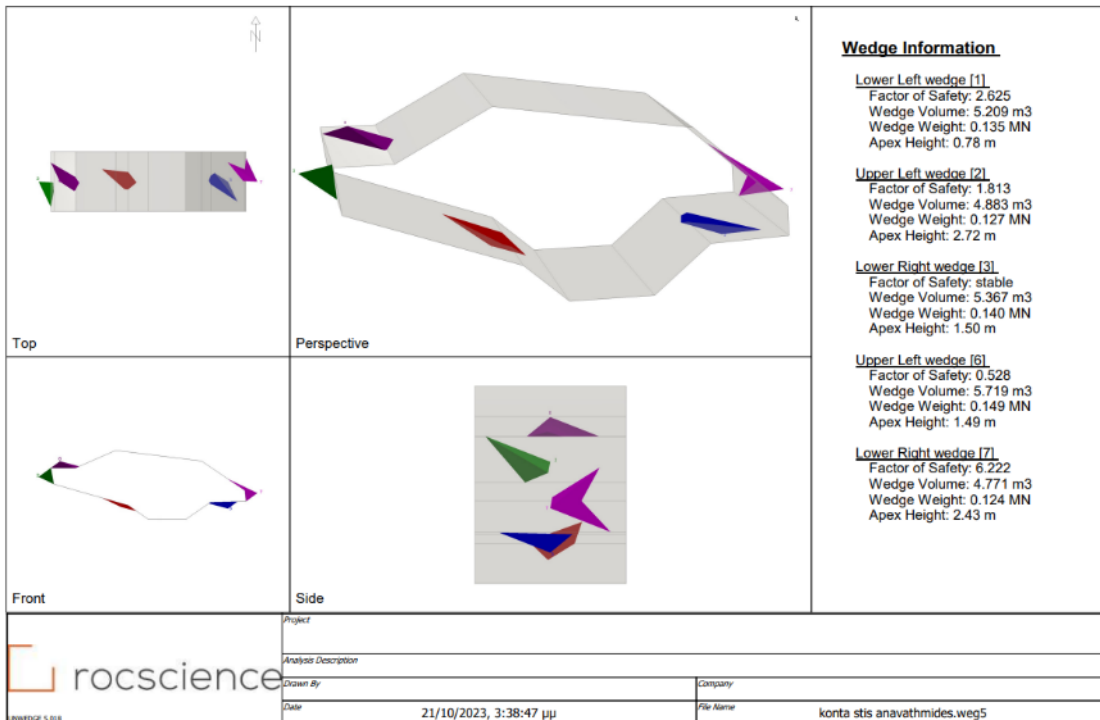
Σχήμα 6–8: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων των ασυνεχειών από τη θέση 2



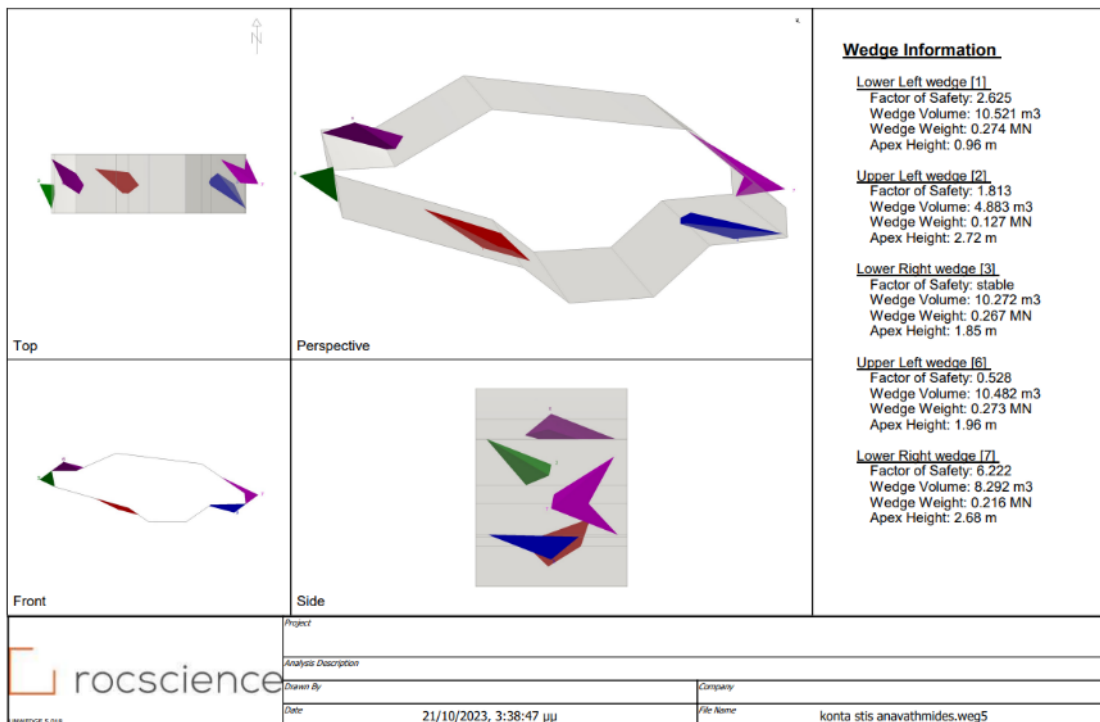
Σχήμα 6–9: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 5m



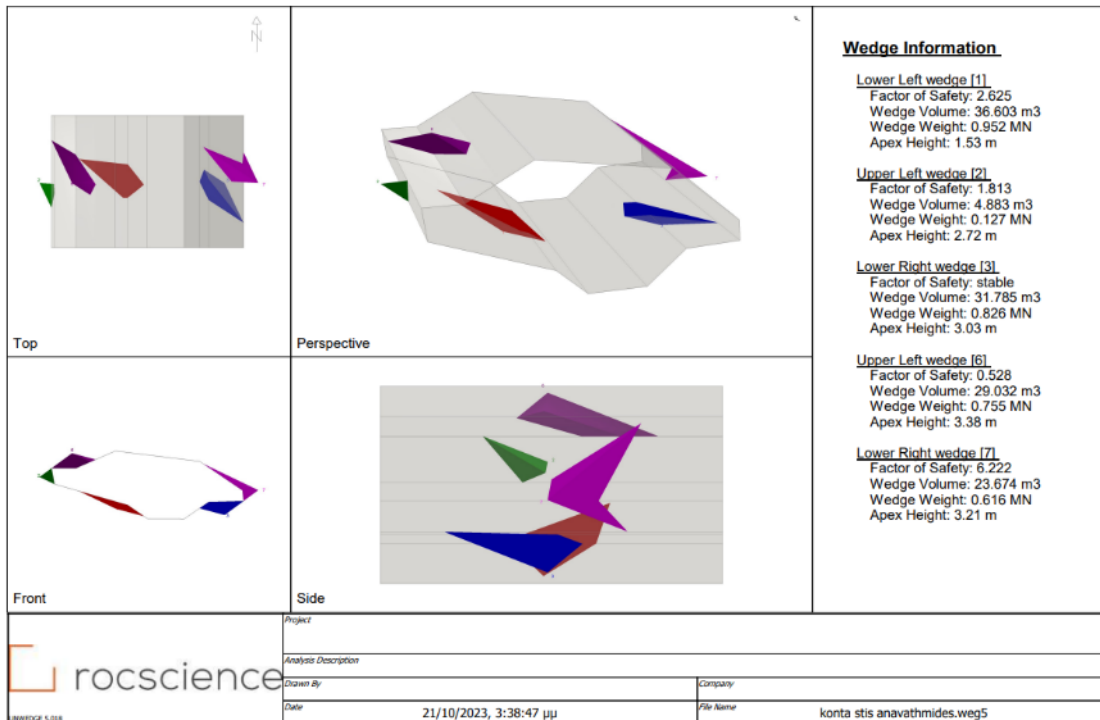
Σχήμα 6–10: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 6m



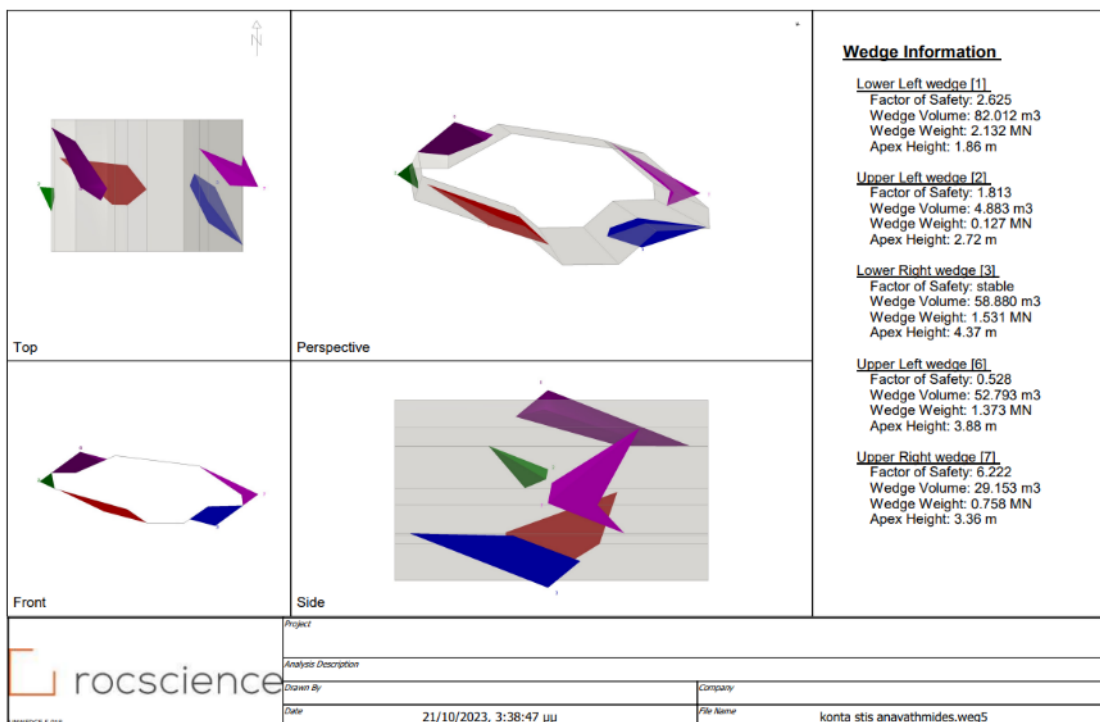
Σχήμα 6–11: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 8m



Σχήμα 6–12: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 10m



Σχήμα 6-13: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 15m



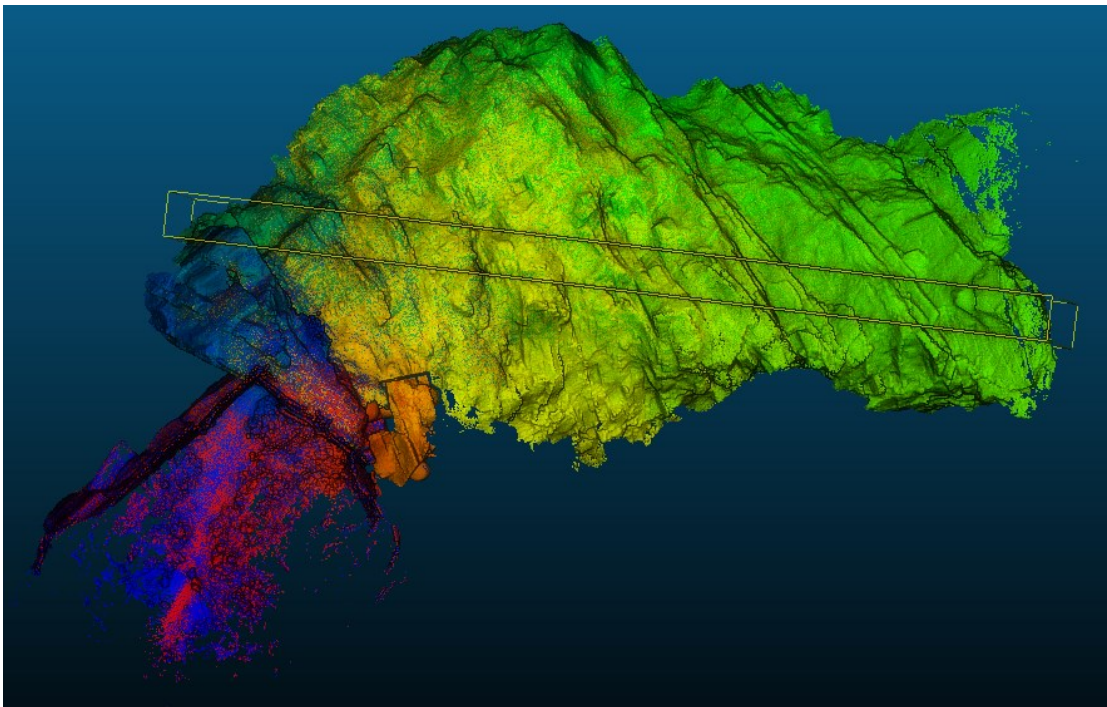
Σχήμα 6-14: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 2 με persistence 20m

Οι πλειοψηφία των σφηνών που δυνητικά μπορούν να εκδηλωθούν παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από τον ανώτερο επιθυμητό. Η μοναδική σφήνα που εμφανίζει μικρότερο συντελεστή από την τιμή του 1.4 είναι η σφήνα Upper Left wedge (6) και είναι πιθανή να εμφανίσει κάποια αστοχία κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες. Και σε αυτή τη διατομή

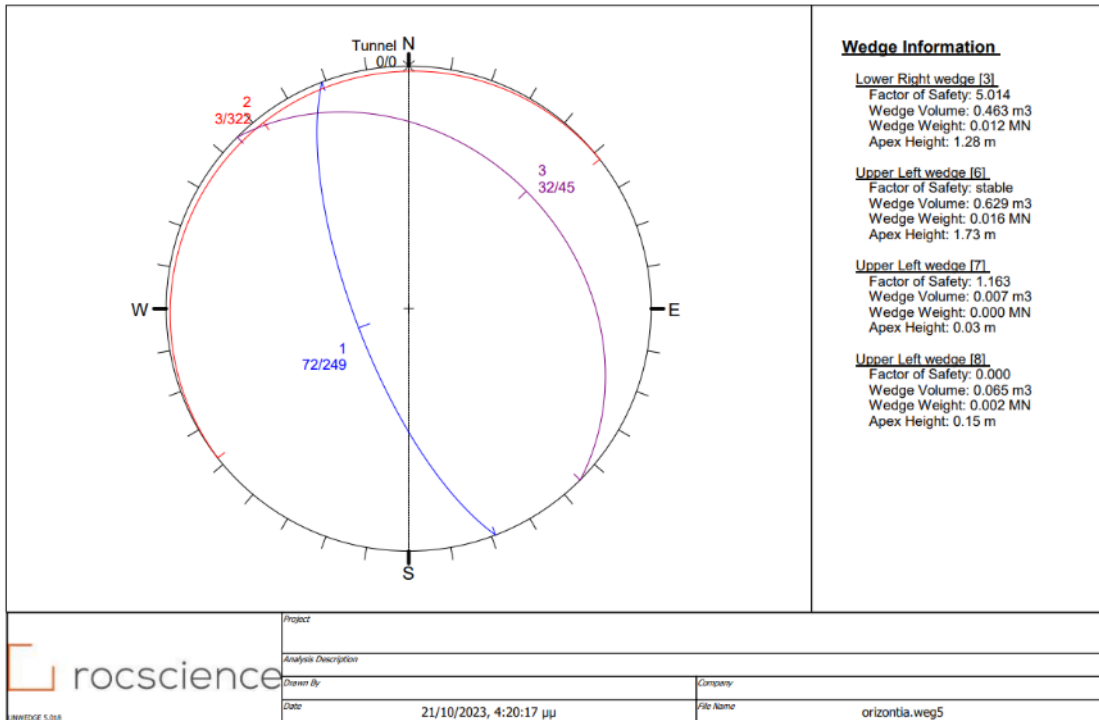
μεταβάλλοντας την εμμονή των ασυνεχειών το μόνο στοιχείο που αλλάζει είναι ο όγκος των σφηνών, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας παραμένει σταθερός σε κάθε σφήνα. Παρατηρείται πως η σφήνα Upper Left wedge (2) δεν μεταβάλλει τον όγκο της σφήνας από τα 8m εμμονής των ασυνεχειών.

Θέση 3

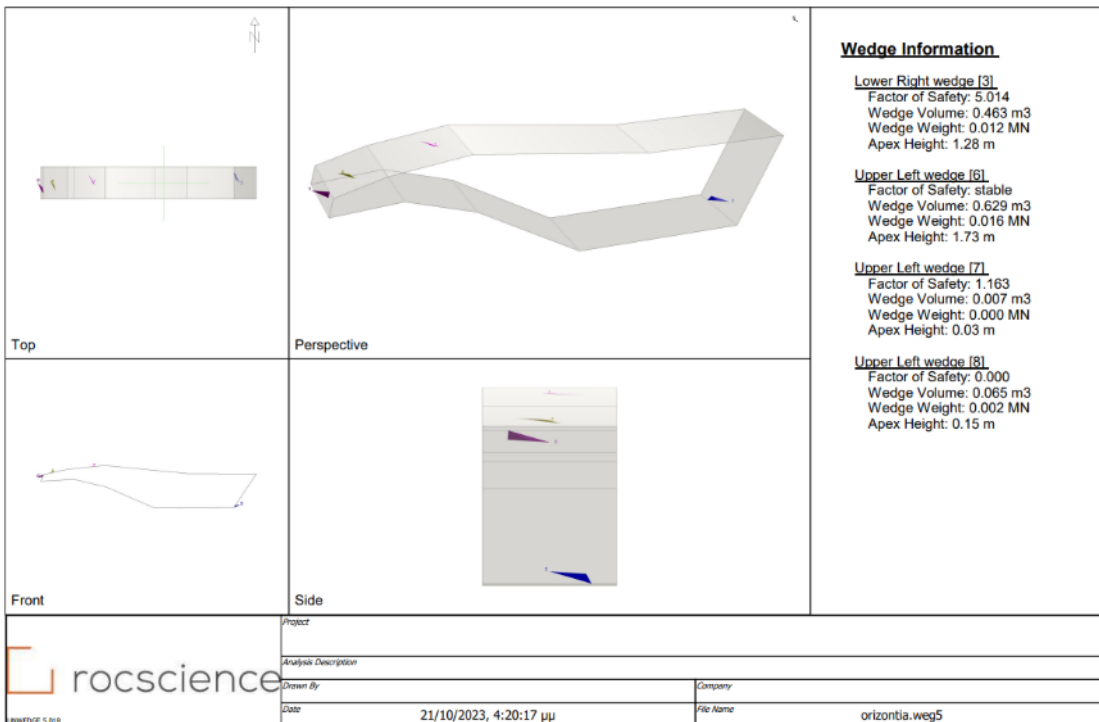
Η διατομή της θέσης 3 αποτυπώνει σε οριζόντια διάταξη το θάλαμο της Σπηλιάς. Από τα σημεία που διαπερνά η τομή τα χαρακτηριστικά του θαλάμου ποικίλουν σχετικά με τις διαστάσεις. Στο κεντρικό σημείο της διατομής η Σπηλιά παρουσιάζει το μέγιστο ύψος, όπως μετρήθηκε από το τρισδιάστατο νέφος σημείων.



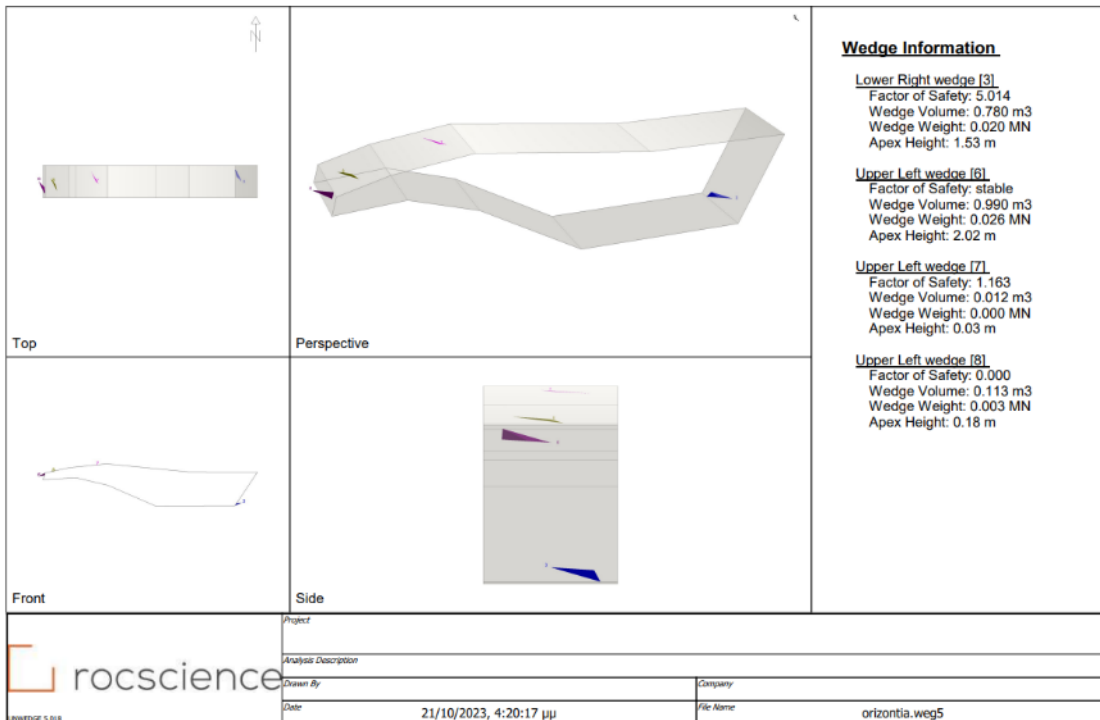
Εικόνα 6.6: Οριοθέτηση του τμήματος – θέση 3



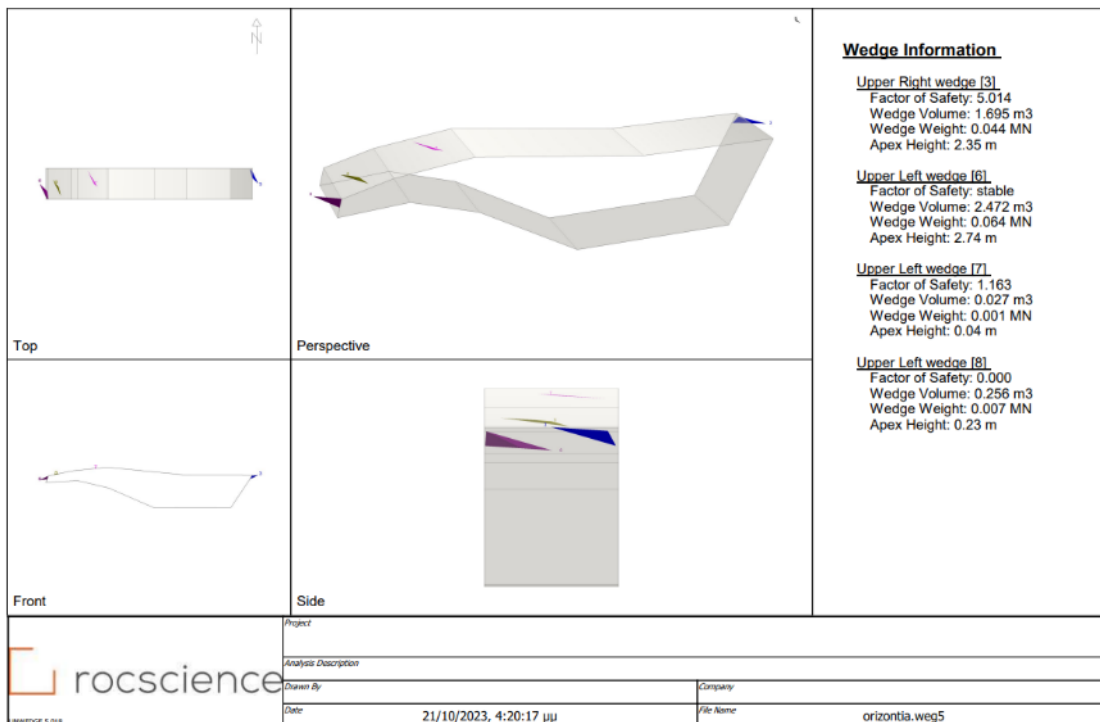
Σχήμα 6–15: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων των ασυνεχειών από τη θέση 3



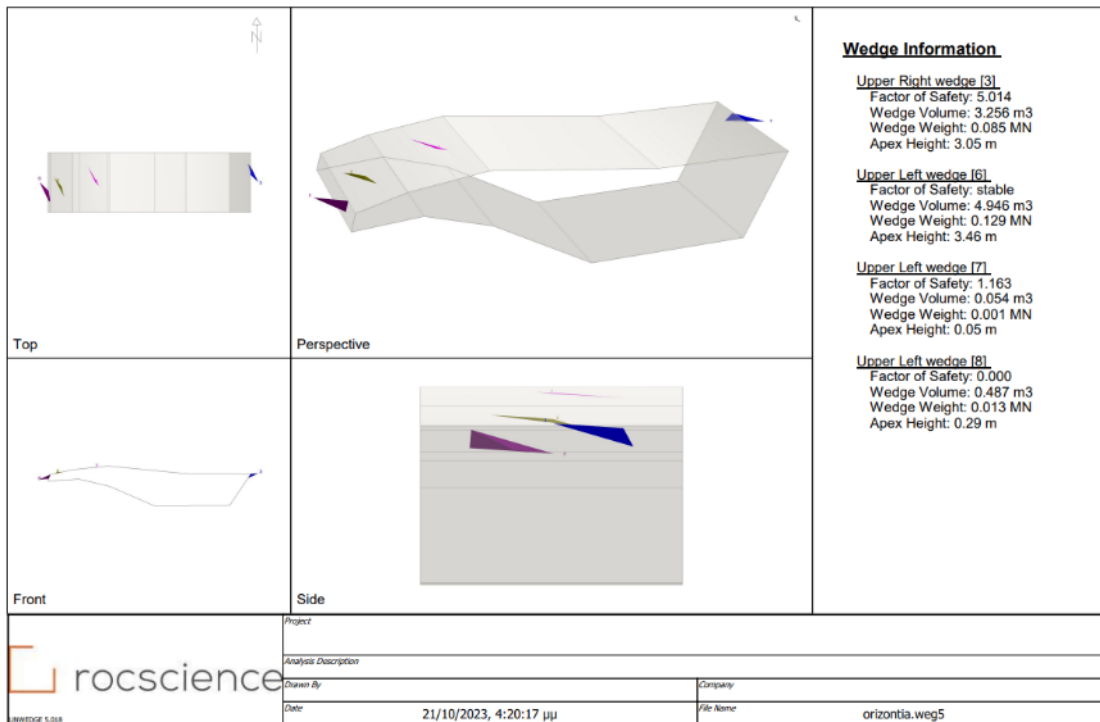
Σχήμα 6–16: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 5m



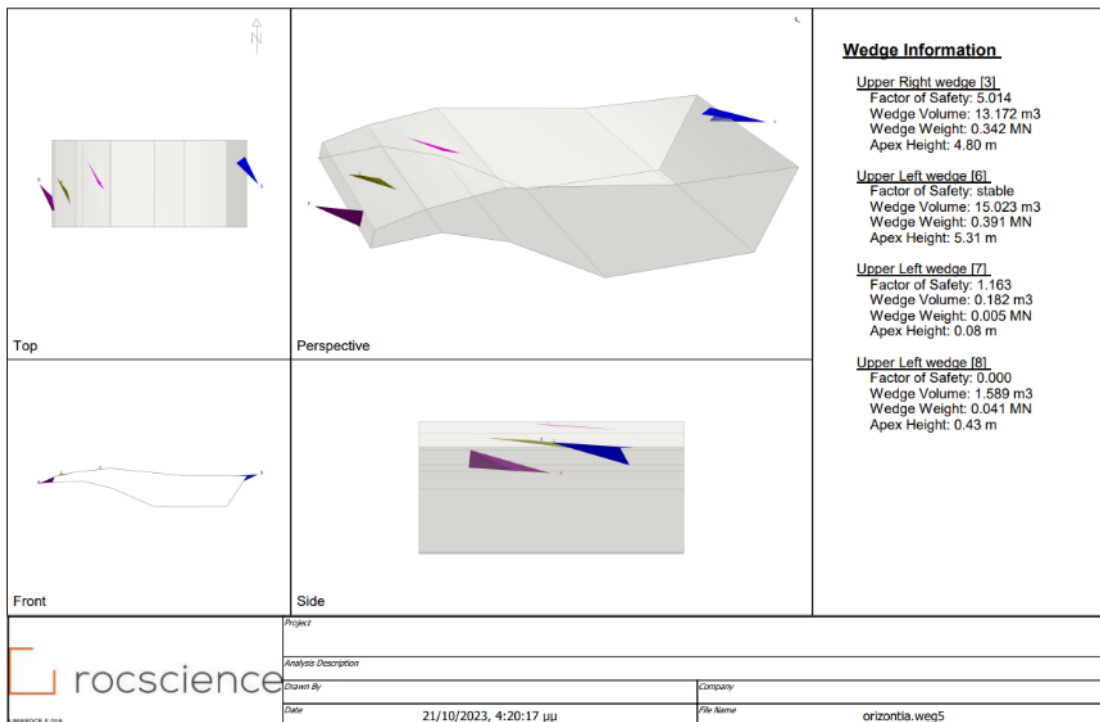
Σχήμα 6–17: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 6m



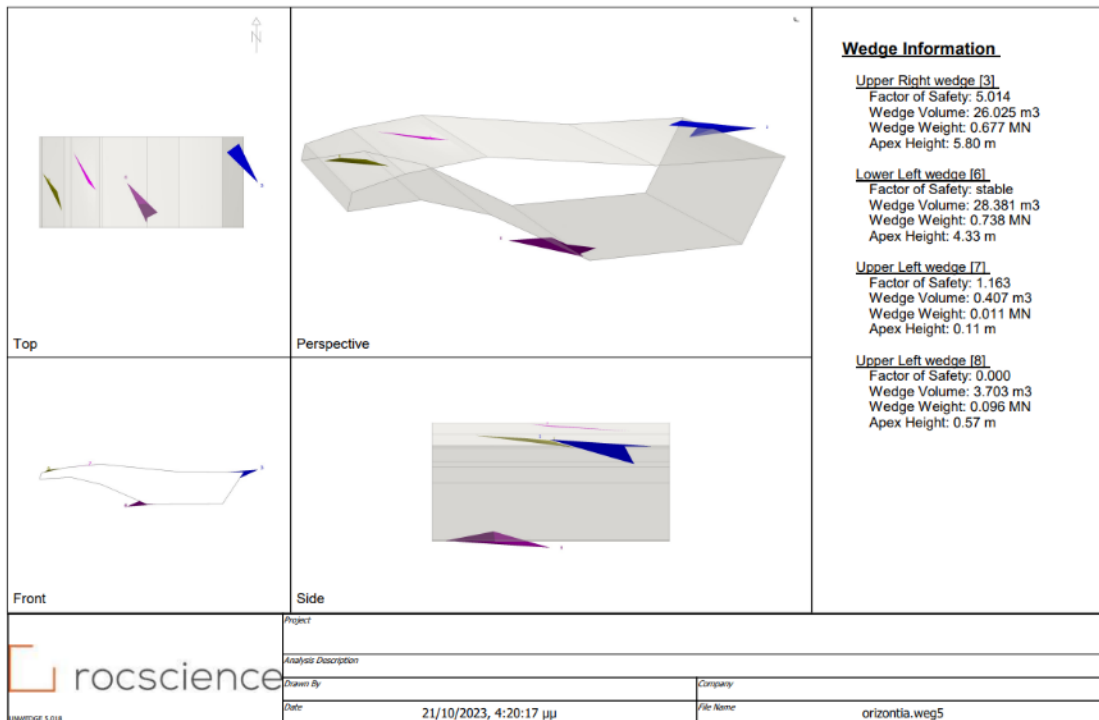
Σχήμα 6–18: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 8m



Σχήμα 6-19: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 10m



Σχήμα 6-20: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 15m



Σχήμα 6–21: Τρισδιάστατη προβολή σφηνών στη θέση 3 με persistence 20m

Και σε αυτή τη διατομή μεταβάλλοντας την εμμονή των ασυνεχιών το μόνο στοιχείο που αλλάζει είναι ο όγκος των σφηνών, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας παραμένει σταθερός σε κάθε σφήνα. Η σφήνα που παρουσιάζει συντελεστή ασφαλείας κατώτερο από τον αποδεκτό είναι η Upper Left wedge (7), έχει συντελεστή ασφαλείας 1.163. Οι υπόλοιπες σφήνες που δυνητικά μπορούν να εκδηλωθούν παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από τον ανώτερο επιθυμητό.

Ένα γενικό συμπέρασμα από όλες τις παραμετρικές αναλύσεις στο λογισμικό UnWedge είναι πως ο θάλαμος της Σπηλιάς του Νταβέλη είναι ευσταθής και μόνο κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορεί, κυρίως η οροφή του, να εκδηλώσει κάποιες καταπτώσεις με τη μορφή σφήνας.

7. Μέτρα Αντιστήριξης

Η επικινδυνότητα των κατολισθήσεων ώθησε την ανάγκη για ανάπτυξη μέτρων αντιστήριξης. Οι κύριοι παράγοντες που οδηγούν σε εκδήλωση κατολίσθησης είναι τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, το βάρος των επικρεμάμενων τεμαχίων αλλά και οι κλίσεις των πρανών.

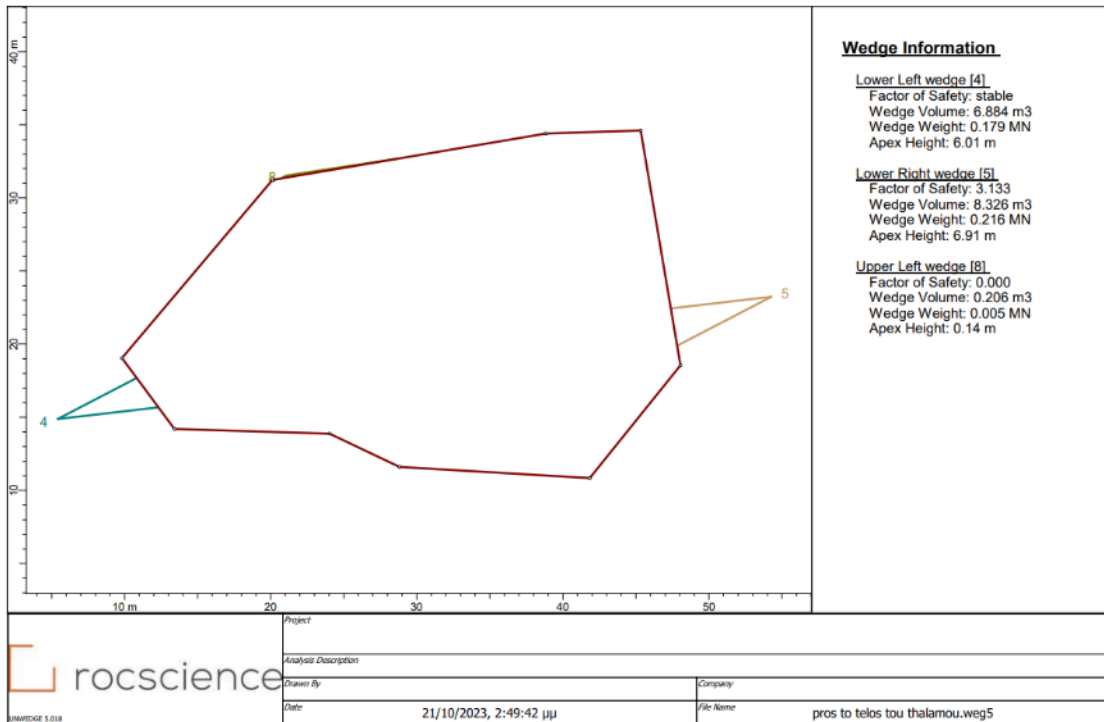
Από τις αναλύσεις στο λογισμικό Dips φανερώθηκε πως ο θάλαμος της Σπηλιάς του Νταβέλη ενδέχεται να εκδηλώσει κάποιες αστοχίες κυρίως με τη μορφή σφήνας. Εντός της Σπηλιάς το μέτρο αντιστήριξης που είναι πιθανό για την αποφυγή των καταπτώσεων είναι τα αγκύρια (είτε παθητικά, είτε απλές ηλώσεις, είτε προεντεταμένα, κ.ά.). Επίσης σε μεμονωμένες θέσεις στις περιπτώσεις κάπου μικρού όγκου που δυνητικά μπορεί να εκδηλώσει κατάπτωση είναι δυνατή η απομάκρυνση του όγκου μέσω της διαδικασίας του ξεσκαρώματος. Αν ο χώρος δεν ήταν αρχαιολογικός χώρος θα ήταν εφικτό να γίνει τοπική εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος (απλό ή ινοπλισμένο).

Όπως αναφέρθηκε και στην *Παράγραφο 5.4.2* το λογισμικό UnWedge παρέχει τη δυνατότητα να γίνουν παραμετρικές αναλύσεις και για τα μέτρα αντιστήριξης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εντός του θαλάμου χρησιμοποιώντας αγκύρια τύπου Swellex.

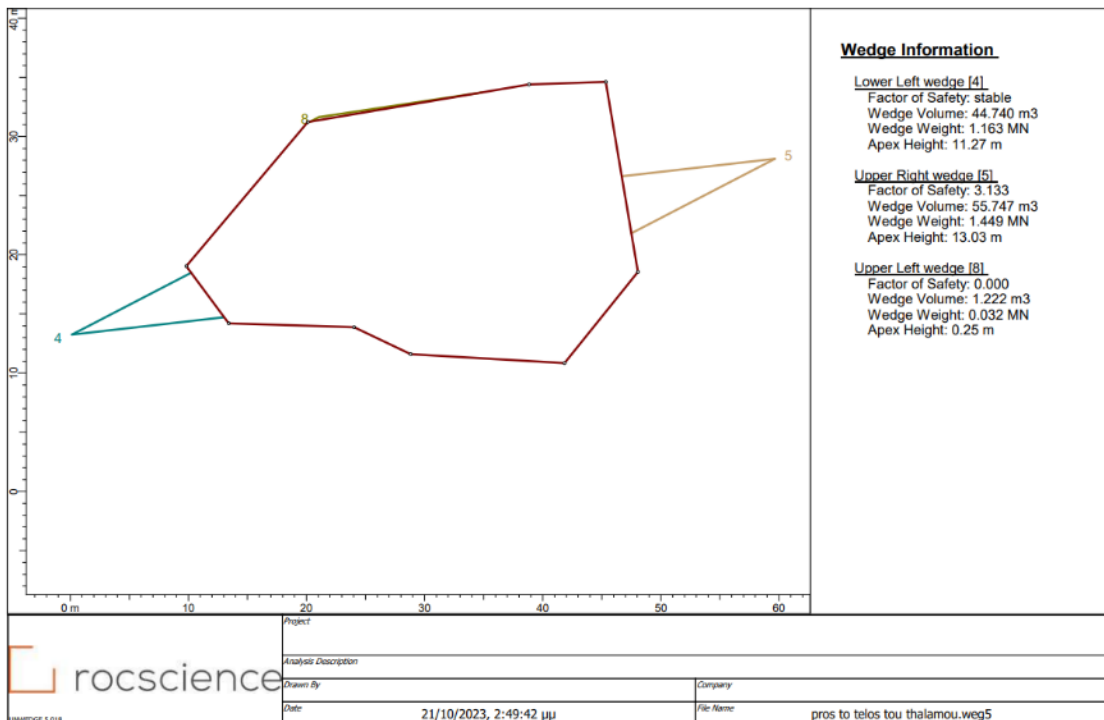
Κατά τον ίδιο τρόπο ανάλυσης με αυτόν στο Κεφάλαιο 6, δηλαδή ο θάλαμος της Σπηλιάς χωρίστηκε και μελετήθηκε σε 3 διατομές, παρουσιάζονται παρακάτω οι παραμετρικές αναλύσεις με μεταβλητές το μήκος αλλά και τον κάρνα των αγκυριών.

Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας του χώρου ενδιαφέροντος, πρόκειται για έναν αρχαιολογικό χώρο, δεν είναι εφικτό να εφαρμοστούν ποικίλα μέτρα αντιστήριξης. Στις ενδεικτικές αναλύσεις που παρουσιάζονται αποτυπώνεται η γενικότερη εικόνα των μέτρων που μπορούν να εφαρμοστούν όπου απαιτείται.

Στη θέση 1 (προς το τέλος του θαλάμου της Σπηλιάς) όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (*Σχήμα 7-1* και *Σχήμα 7-2*) οι συντελεστές ασφαλείας παραμένουν σταθεροί παρότι μεταβάλλεται η εμμονή των ασυνεχειών και οι όγκοι των σφηνών. Η σφήνα Lower Right wedge (5) εμφανίζει συντελεστή ασφαλείας 3.133, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο από τον ανώτερο αποδεκτό οπότε δεν είναι απαραίτητη η τοποθέτηση μέτρων αντιστήριξης. Αν χρειαστεί ίσως τοποθετηθούν κάποια μεμονωμένα αγκύρια. Επίσης στη σφήνα Upper Left wedge (8) ενδείκνυται η μέθοδος του ξεσκαρώματος καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μηδέν και οι όγκοι είναι αρκετά μικροί. Οπότε συμπερασματικά η συγκεκριμένη θέση είναι ευσταθής.



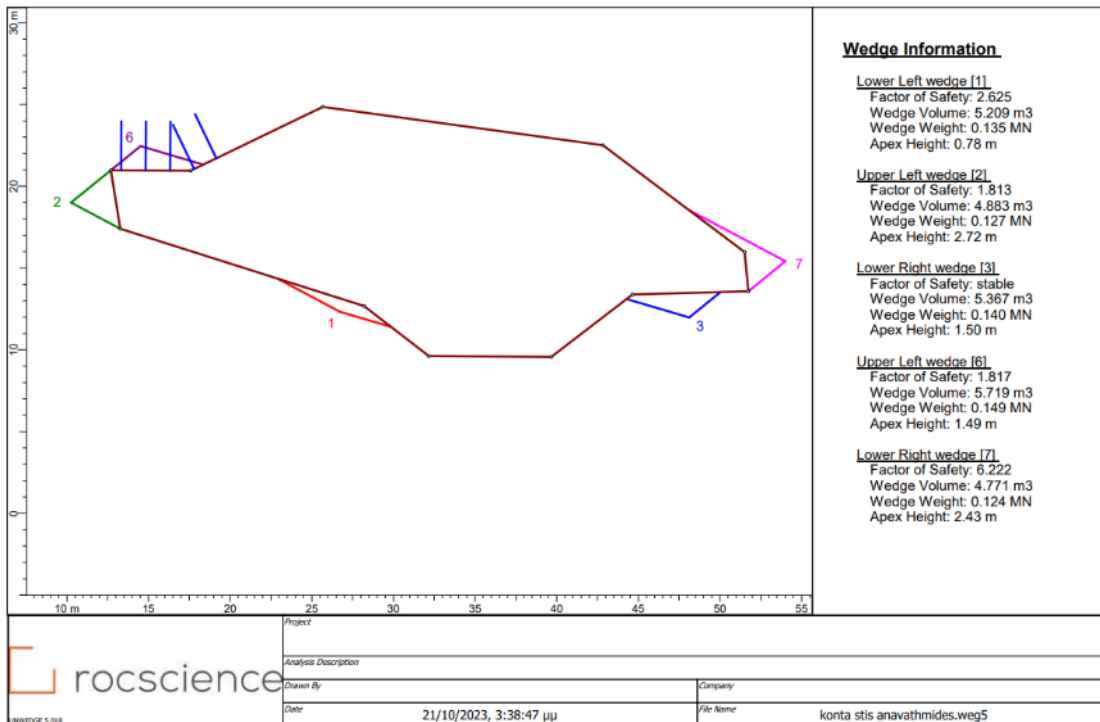
Σχήμα 7-1: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 1 με persistence 8m



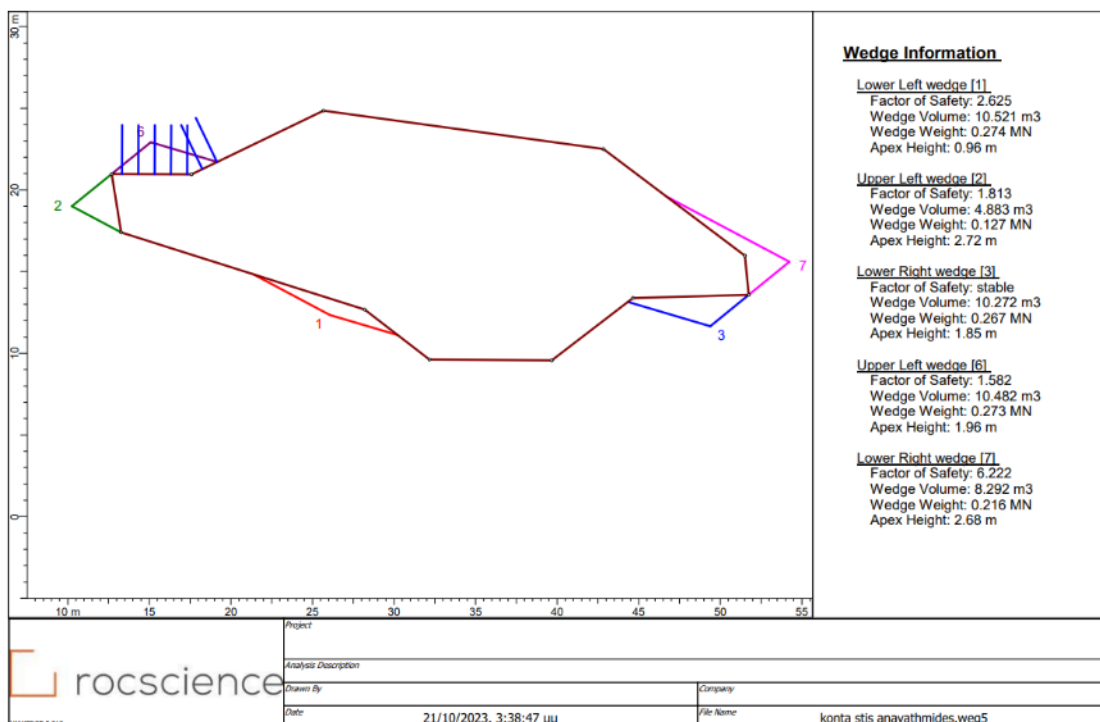
Σχήμα 7-2: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 1 με persistence 15m

Στη θέση 2 (κοντά στο τέλος των τοιμεντένιων αναβαθμίδων) η μοναδική σφήνα που είναι πιθανή για εκδήλωση αστοχίας είναι η σφήνα Upper Left wedge (6) έχοντας συντελεστή ασφαλείας 0.528, δηλαδή μικρότερο από τον αποδεκτό. Και σε αυτή την περίπτωση το μέτρο αντιστήριξης που προτείνεται είναι τα αγκύρια. Στα παρακάτω σχήματα αποτυπώνονται οι

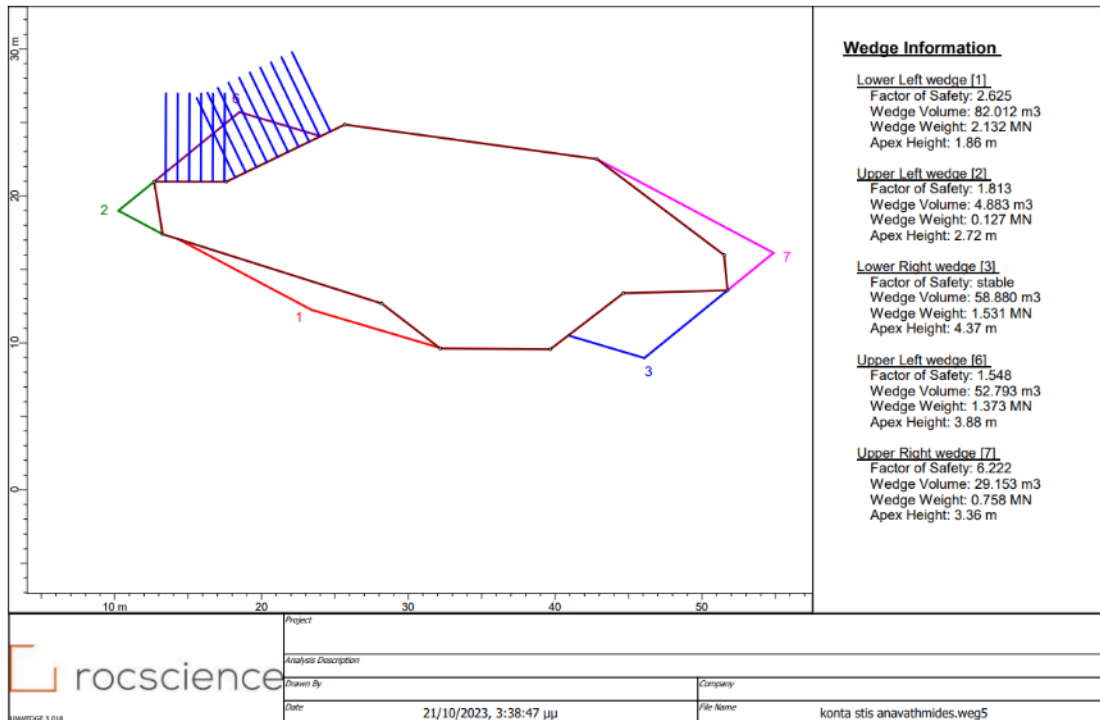
παραμετρικές αναλύσεις που έλαβαν χώρα με μεταβλητές την εμμονή των ασυνεχειών, τον κάρναβο και το μήκος των αγκυρίων.



Σχήμα 7-3: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 2 με persistence 8m, μήκος αγκυρίων 3m και κάρναβο 1,5m



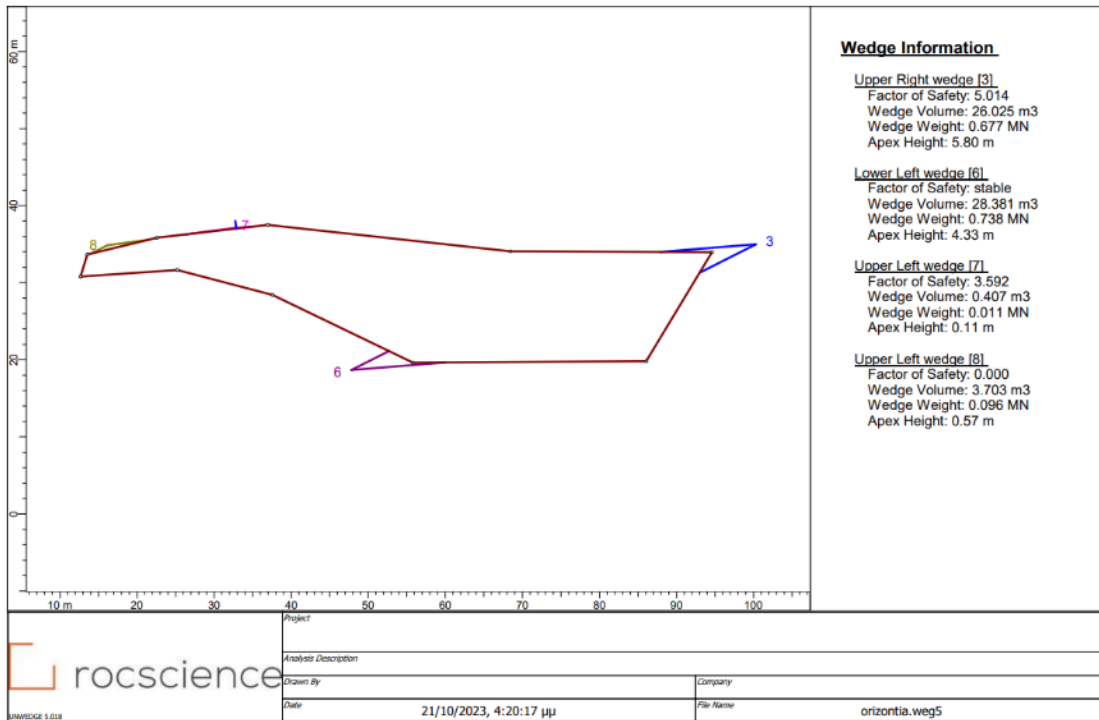
Σχήμα 7-4: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 2 με persistence 10m, μήκος αγκυρίων 3m και κάρναβο 1m



Σχήμα 7-5: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 2 με persistence 20m, μήκος αγκυρίων 6m και κάρναβο 0,8m

Διαπιστώνεται πως ακόμη και αν αυξάνεται η εμμονή των ασυνεχειών μεταβάλλοντας τον κάρναβο των αγκυρίων επιτυγχάνεται ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας. Άρα και στη συγκεκριμένη διατομή που περιλαμβάνει και το μέγιστο πλάτος της Σπηλιάς με κάποια αγκύρια όποτε χρειαστεί και αν χρειαστεί ο θάλαμος είναι ευσταθής.

Στη θέση 3 (οριζόντια διατομή) η μοναδική σφήνα που είναι πιθανή για εκδήλωση αστοχίας είναι η σφήνα Upper Left wedge (7) εμφανίζοντας συντελεστή ασφαλείας 1.163, δηλαδή μικρότερο από τον αποδεκτό. Επειδή οι όγκοι της σφήνας είναι πολύ μικροί θα είναι αποτελεσματικό να πραγματοποιηθεί κάποιο ξεσκάρωμα των επισφαλών όγκων της σφήνας. Στον αντίποδα μπορούν να τοποθετηθούν και κάποια μεμονωμένα αγκύρια. Για τη σφήνα Upper Left wedge (8) που παρουσιάζει μηδενικό συντελεστή ασφαλείας συνίσταται το ξεσκάρωμα κάποιων όγκων. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με μεταβλητές την εμμονή των ασυνεχειών, τον κάρναβο και το μήκος των αγκυρίων. Πραγματοποιώντας τις παραμετρικές αναλύσεις και τοποθετώντας αγκύρια σε διάφορα μήκη φάνηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας της σφήνας Upper Left wedge (7) μεταβαλλόταν πάρα πολύ ή παρέμενε ο ίδιος.



Σχήμα 7-6: Περιμετρική σχεδίαση στη θέση 3 με persistence 20m και τοποθέτηση ενός ακυρίου 1m

8. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η Σπηλιά του Νταβέλη είναι ένας ιστορικός χώρος που εντοπίζεται στα νοτιοδυτικά της κορυφής Πυργάρι του Πεντελικού όρους. Βρίσκεται σε υψόμετρο 720m. Ο χώρος είναι συνδεδεμένος με την κατασκευή του Παρθενώνα καθώς υποστηρίζεται πως τα μάρμαρα με τα οποία χτίστηκε προήλθαν από τη Σπηλιά του Νταβέλη. Έξω από τη Σπηλιά ξεκινά ο δρόμος μεταφοράς του μαρμάρου, η Οδός Λιθαγωγίας, η οποία μελετήθηκε από τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. Μανώλη Κορρέ. Σε διάφορα σημεία του Λεκανοπεδίου της Αττικής έχουν εντοπιστεί ευρήματα όπως πλακόστρωτα, τοιχεία, κ.ά. και έχει κατορθωθεί να χαραχτεί η πορεία της συγκεκριμένης οδού. Επίσης, όπως αναφέρεται και στο όνομα της σπηλιάς έχει συνδεθεί με το λήσταρχο Νταβέλη χωρίς όμως να υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Αυτά αποδεικνύουν πως ο χώρος χρειάζεται τη δέουσα προσοχή από τους αρμόδιους φορείς ώστε να διαφυλαχτεί αυτή η πολιτιστική κληρονομιά μας.

Στο χώρο όπου εντοπίζεται η Σπηλιά του Νταβέλη υπάρχουν τα μάρμαρα της Πεντέλης σύμφωνα με το φύλλο χάρτη του ΙΓΜΕ “Κηφισιά”. Μακροσκοπικά τα πρώτα συμπεράσματα για το χώρο ενδιαφέροντος είναι πως τα πετρώματα είναι σκληρά με πολλές ασυνέχειες. Οι πιο χαρακτηριστικές εντοπίζονται στο αριστερό πρηνές όπου το διασχίζουν από το έδαφος μέχρι το πιο ψηλό σημείο του. Επίσης η πλειοψηφία των ασυνεχειών είναι πληρωμένες με ασβεστιτικό υλικό.

Η κίνηση του νερού είναι εμφανής τόσο στα εξωτερικά πρηνή όσο και εντός του θαλάμου της σπηλιάς κάτι το οποίο μαρτυρείται από τη μεγάλη υγρασία εντός του θαλάμου της Σπηλιάς αλλά και από τις ασυνέχειες με την εναπόθεση ασβεστιτικού υλικού.

Χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη αποτύπωση που πραγματοποίησε η εταιρεία LANDMARK – Γ. ΛΟΥΤΡΙΔΗΣ και το λογισμικό CloudCompare κατέστη εφικτό να μελετηθεί το εσωτερικό της Σπηλιάς καθώς με τις κλασσικές μεθόδους χαρτογράφησης δεν ήταν εφικτές οι μετρήσεις. Στο εσωτερικό οι επιφάνειες του μαρμάρου είναι καλυμμένες με βρύα με αποτέλεσμα να μη μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με τη γεωλογική πυξίδα. Για να είναι πιο πλήρης η μελέτη του θαλάμου πραγματοποιήθηκαν 5 τομές στις οποίες πάρθηκαν μετρήσεις κλίσης και φοράς μέγιστης κλίσης μέσω του λογισμικού CloudCompare και του τρισδιάστατου νέφους σημείων. Αυτή η τρισδιάστατη απεικόνιση είναι μία πολύ μεγάλη εξέλιξη και φυσικά ένα πεδίο δόξης λαμπρό και για τη γεωλογία καθώς μπορούμε να μελετήσουμε έναν υπόγειο χώρο με σύγχρονες μεθόδους τοπογραφίας αλλά πάντα στηριζόμενοι στις κλασσικά όργανα όπως είναι η γεωλογική πυξίδα. Με τα όργανα τρισδιάστατης αποτύπωσης αποδεικνύεται πως η αποτύπωση εσωτερικών χώρων μπορεί να πραγματοποιηθεί απαλλαγμένη από την άμεση επαφή με δορυφόρους.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας κατορθώθηκε να υπολογιστούν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των βραχωδών σχηματισμών εκτός της Σπηλιάς. Πιο συγκεκριμένα με τη σφύρα Schmidt και το προφιλόμετρο υπολογίστηκαν η έμμεση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη καθώς και η γωνία τραχύτητας i . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σφύρα Schmidt σχετικά με τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη προήλθαν από το νομογράφημα των Deere and Miller, 1996 και παρουσιάζονται στον πίνακα:

Αριστερό πρηνές	Ασυνέχειες	40,72
	Ασβεστιτικό υλικό	24,87

Δεξί πρανές

Ασυνέχειες

37,68

Έπειτα με τη χρήση του προφιλόμετρου προσεγγίστηκε η τιμή JRC χρησιμοποιώντας τα τυπικά προφίλ των Barton and Choubey το 1977. Μέσω του κριτηρίου Barton – Bandis (1973) υπολογίστηκε η γωνία τραχύτητας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι:

	JRC	4
Αριστερό πρανές	Γωνία τραχύτητας ασυνεχειών	39,68
	Γωνία τραχύτητας ασβεστιτικού υλικού	38,31
Δεξί πρανές	JRC	8
	Γωνία τραχύτητας ασυνεχειών	47,23

Στο δεξί πρανές έπειτα από τη στατιστική επεξεργασία όλων των μετρήσεων προέκυψαν 4 συστήματα ασυνεχειών και τα στοιχεία του πρανούς είναι κλίση και φορά μέγιστης κλίσης 70/239. Από τα 4 συστήματα ασυνεχειών σύμφωνα με την ανάλυση Markland μόνο τα 3 δυνητικά μπορούν να αστοχήσουν. Εφαρμόστηκε η βελτίωση Hocking και διαπιστώθηκε ότι στο δεξί πρανές δυνητικά μπορούν να εκδηλωθούν 2 σφηνοειδείς ολισθήσεις και 1 επίπεδη ολίσθηση.

Το αριστερό πρανές από τις επί τόπου επισκέψεις φάνηκε πως είναι παρακατακόρυφο, κάτι που επιβεβαίωσαν οι μετρήσεις για αυτό και επιλέχθηκε να γίνουν οι αναλύσεις και με τα δύο στοιχεία του πρανούς που προέκυψαν από τη στατιστική επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα το αριστερό πρανές έχει στοιχεία κλίσης και φοράς μέγιστης κλίσης 75/303 και 88/123. Και σε αυτό το πρανές πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων των ασυνεχειών της βραχόμαζας και προέκυψαν 5 συστήματα ασυνεχειών. Για το πρανές με στοιχεία 75/303 αστοχούν 3 επίπεδα ασυνεχειών σύμφωνα με την ανάλυση Markland και εφαρμόζοντας τη βελτίωση Hocking διαπιστώθηκε πως μπορούν να εκδηλωθούν μόνο σφηνοειδείς ολισθήσεις. Ακολούθως για το πρανές με στοιχεία 88/123 αστοχούν δυνητικά και τα 5 συστήματα ασυνεχειών σύμφωνα με την ανάλυση Markland. Χρησιμοποιώντας τη βελτίωση Hocking διαπιστώθηκε πως δυνητικά μπορούν να εκδηλωθούν 5 σφηνοειδείς ολισθήσεις και 1 επίπεδη ολίσθηση.

Ακολουθώντας τη στατιστική επεξεργασία σε όλες τις μετρήσεις που πάρθηκαν από το λογισμικό CloudCompare από κάθε τομή πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις εντός του θαλάμου σχετικά με την ευστάθειά του. Με το λογισμικό UnWedge επετεύχθη η ανάλυση για τον εντοπισμό σφηνών που δυνητικά μπορούν να εκδηλώσουν αστοχία. Από τις παραμετρικές αναλύσεις για το εσωτερικό του θαλάμου της Σπηλιάς του Νταβέλη προέκυψε πως η πλειοψηφία των επισφαλών όγκων εντοπίζεται στην οροφή του θαλάμου. Οι αστοχίες εντός της Σπηλιάς θα είναι με τη μορφή σφήνας. Ο συντελεστής ασφαλείας που χρησιμοποιήθηκε είναι η τιμή 1.4 που αντιστοιχεί σε περιβάλλον που επιδρούν οι σεισμοί και υπάρχει νερό. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές διατομές, δύο εγκάρσιες και μία οριζόντια. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας προέκυψε πως συνολικά ο θάλαμος της Σπηλιάς του Νταβέλη δεν έχει πρόβλημα ευστάθειας. Εμφανίζει κάποιες αστοχίες με τη μορφή σφήνας αλλά δεν εκπνέουν κάποια ανησυχία σχετικά με την ασφάλεια των επισκεπτών. Σίγουρα κατά την επίσκεψη στο χώρο χρειάζεται η απαιτούμενη προσοχή όπως σε όλους τους ανυποστήρικτους εσωτερικούς χώρους.

Για την αποφυγή της οποιασδήποτε αστοχίας και κατάπτωσης μπορούν να εφαρμοστούν μέτρα αντιστήριξης όπως αγκύρια τύπου Swellex ή ξεσκάρωμα των επισφαλών όγκων. Από τις παραμετρικές αναλύσεις με μεταβλητή την εμμόνη των ασυνεχειών, το μήκος και τον κάρναβο των αγκυρίων διαπιστώθηκε πως ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας επιτυγχάνεται με κάρναβο αγκυρίων, από 0,8m έως 1,5m και μήκος αγκυρίων από 1m έως 6m.

Τόσο τα εξωτερικά πρηνή όπως και το εσωτερικό της Σπηλιάς είναι σε καθεστώς ευστάθειας. Φυσικά η τοποθέτηση μέτρων αντιστήριξης προσφέρει μία ασφάλεια τόσο για την ασφάλεια των επισκεπτών αλλά και για την προστασία του χώρου.

Είναι βέβαιο πως όλα τα παραπάνω χρειάζεται να μελετηθούν και συνδυαστικά με το βάρος των υπερκειμένων σχηματισμών αλλά και με τις πιέσεις του νερού. Η κίνηση του νερού είναι δεδομένη και ειδικά σε ένα σχηματισμό όπως είναι τα μάρμαρα τα οποία σε πολλές εμφανίσεις εντός της Σπηλιάς είναι καρστικοποιημένα. Επίσης από τις επί τόπου επισκέψεις είναι φανερό η ύπαρξη του νερού καθώς εντός της Σπηλιάς σε πολλά σημεία «ψιχαλίζει» και σε άλλα τρέχει το νερό κατά μήκος του πετρώματος.

9. Βιβλιογραφία

ΙΓΜΕ, 2010. Φύλλο χάρτη ΙΓΜΕ «Κηφισιά» κλίμακας 1:50.000

Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., 2002. Τεχνική Γεωλογία, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

Λόζιος, Σ., 1994. Τεκτονική ανάλυση μεταμορφωμένων σχηματισμών βορειοανατολικής Αττικής. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Λουπασάκης Κ., 2013. «Τεχνική Γεωλογία Ι» Διαφάνειες Μαθήματος, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Λουπασάκης Κ., 2019. Παρουσιάσεις Τεχνικής Γεωλογίας Υπογείων Έργων, ΕΜΠ

Μερτζάνης Α., Σκοτίδα Α., Ευθυμίου Γ., και Ζακυνθινός Γ., 2004. Διαχρονική Εξέλιξη της Κατάστασης Περιβάλλοντος (Γεωλογία-Γεωμορφές) και των Χρήσεων Γης, σε Αργούντα Λατομεία του Πεντελικού Όρους (Αττική), DOI: 10.12681/bgsg.16624

Νομικός Π., 2015. Εισαγωγή στη Μηχανική των πετρωμάτων, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και βοηθήματα, Αθήνα

Παπαζήση Α., 2009. Πειραματική μελέτη και προσομοίωση της διατμητικής συμπεριφοράς ασυνεχειών βραχομάζας κατόπιν σιμεντενέσεων, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη

Παπανικολάου Δ., Λόζιος Σ., Σούκης Κ. και Σκούρτσος Εμ., 2004. Γεωλογική Δομή του Αλλόχθονου Συστήματος των Σχιστόλιθων Αθηνών, DOI: 10.12681/bgsg.16513

Περιφέρεια Αττικής & Δήμος Πεντέλης, 2017. Οδός Λιθαγωγίας, Αθήνα

Ρόζος Δ., (2007), ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ. Αθήνα

Σπανός Δ., 2012. Γεωδυναμική Εξέλιξη της Αττικής, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα

Τσουβαλα Σ., 2009. Τρισδιάστατη Προσομοίωση Υπόγειας Εκμετάλλευσης του Μαρμάρου Διονύσου, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Aydin A. (2009). "ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version". Int J Rock Mech Min Sci, 46:627–634

Aydin A., Basu A (2005). "The Schmidt hammer in rock material characterization", Eng Geol, 81(1):1-14.

Basu A., Aydin A (2004). "A method for normalization of Schmidt hammer rebound values". Int J Rock Mech Min Sci, 41(7):1211-1214.

Coulson, J.H. (1970) "The effects of surface roughness on shear strength of joints in rock", Ph.D. Thesis, Univ. Illinois, US Dept. Army Corps Eng., Miss. River Div., Omaha, Nebr., Tech. Rep. MRD-2-70: 283p.

Landmark, 2023.

<https://www.landmark.com.gr/>

Landmark, 2023. GeoSLAM ZEB-REVO

<https://www.landmark.com.gr/product-detail/geoslam-zeb-revo/>

Naturagraeca, 2023. Ορεινοί όγκοι

<https://www.naturagraeca.com/ws/122,184,7,1,1,%CE%A0%CE%B5%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CE%8C%CF%81%CE%BF%CF%82>

Rocscience, 2023. Dips,

<https://www.rocscience.com/software/dips>

Rocscience, 2023. UnWedge,

<https://www.rocscience.com/software/unwedge>

Wikipedia, 2023. Πεντελικό όρος

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B5%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%8C%CF%81%CE%BF%CF%82

Wikipedia, 2023. Σπήλαιο Πεντέλης

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%80%CE%AE%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF_%CE%A0%CE%B5%CE%BD%CF%84%CE%AD%CE%BB%CE%B7%CF%82

Wikipedia, 2016. CloudCompare

<https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Introduction>

Yoon W.S., Jeong U.J., Kim J.H., 2002. Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes, DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00144-8

«Investigation of the stability conditions of the karst cavity and the entrance's slopes of the cave of Davelis in Penteli»

Penteli Cave or Ammon Cave or Daveli Cave is located in the prefecture of Attica, in the northeastern part of the Athens basin. It is located on the southwestern side of the Mount Pentelicus or Pentelikon mountain and specifically on the south side of the Pyrgari peak at an altitude of 720m. This cave is rumoured to have taken its name from the 19th-century letharist Christos Davelis, but this has not been confirmed to date.

Mount Pentelicus or Pentelikon mountain along with Parnitha, Ymittos and Mount Egaleo delimit the Athens basin. Penteli is the natural northeastern boundary with a direction of development from northwest to southeast. Its peak is called Pyrgari and has an altitude of 1,109m.

The natural slopes of Mount Pentelicus or Pentelikon mountain have gentle morphological gradients with rounded tops. The foothills of the mountain are gentle. The presence of various karstic incaves of geomorphs of various dimensions is noticeable, the most famous of which is that of the Cave of Davelis.

The entrance of the Cave is imposing with dimensions of about 30m wide and 20m high. It is characterised by a huge chamber and a 112m long downhill passage through which one reaches the lowest point of the Cave. The width of the cave varies from 40-45m. At the left part of the end of the chamber, a passage has been identified that leads to a smaller karstic structure that has water and is known as the "Lake of Nymphs".

To the right of the entrance of the cave there are two temples, those of Agios Spyridon and Agios Nikolaos. They have a common entrance but their age is different. One chapel, which is located literally in the rock and is that of Agios Spyridon, is the oldest in age. Their walls are the rock itself and various figures such as angels, crosses and eagles have been carved on them. The other church is located towards the side of the chamber of the Cave and is that of St. Nicholas. It is younger in age.

The study of the geology of Attica began as early as the end of the 18th century. During these years, various opinions have been expressed regarding the geotectonic units found, their stratigraphy and the overall geotectonic evolution of Attica. In modern theories, researchers estimate that the majority of the rocks of Attica belong to the Attic-Cycladic unit, which belongs to the Inner Hellenides (Jacobshagen et al. 1978, Durr et al. 1978, Moundrakis 1985, Kiliadis et al. 2004, Ring 2007 etc.). In the west and north of Attica the Sub-Pelagic Zone (or the unmetamorphosed Pelagic Zone) formations are found.

The geology of the Attica Basin is shaped by the normal detachment fault. It is a large tectonic structure that bounds the Attica metamorphic rocks to the east and the Sub-Pelagonian unit to the west. This detachment is of a tensile nature and has caused subduction in a NNE direction in the rocks of the Sub-Pelagonian and the Athens Unit, and has caused uplift in a SNE direction in the rocks of the Aleppouvouni Unit and the Native Metamorphic of Attica. The geotectonic units that occur in Attica are the Almyropotamos unit, the Sub-Pelagonian unit and the Allochthonous of the Attica Basin or "Athens Shale". The Almyropotamos section extends into E-NE Attica and comprises the Penteli and Hymettus mountains. It is divided into the sub-units, the Varis section, the Ymittos section and the Penteli section. The Sub-Pelagonian section consists mainly of non-metamorphosed sedimentary rocks which are found in NW Attica, in particular on Mount Poikilo,

Mount Parnitha and Mount Egaleo. The basement of the unit is composed of gneisses, marble schists, amphibolites with marble intercalations and corresponds to the basement of the Palaeozoic age lower Palaeozoic Palaeogene unit. The core of the Sub-Pelagonian stratigraphic column consists of limestones and dolomitic limestones. The base of the column is a volcanic-sedimentary complex with alternations of tephra-green clayey shales, sandstones, pebbles, conglomerates and topi. The Attica Basin Allochthon or "Athens Shales" consists of the Athens Unit and the Alepouvounion Unit, which are the overlying and underlying units of the Athens Shales respectively. The Athens unit is located in the central and western part of the basin and is located tectonically overlying the Sub-Pelagonian in the west and tectonically overlying the Aleppouvouni unit in the east. The Aleppouvouni unit occurs in the eastern part of the basin and appears as a tectonic wedge. It is located between the overlying Athens Unit and the underlying metamorphic formations of the Hymettus.

The post-alpine formations found in the Athens basin are divided into Neogene and Quaternary formations. The Neogene formations, depending on their depositional phase and their geographical distribution, are divided into marine and continental formations. In several places, the Quaternary formations occur above the Neogene formations. These are mainly the sedimentary material from the rivers of the basin, coastal deposits, river terraces, lateral deposits, riprap and cones of boulders.

Mount Penteli consists of rocks of Mesozoic age. Marbles and marble schists that geotectonically belong to the Almiropotamos section. Throughout the whole area of the Mount Pentelicus or Pentelikon Mountain, depending on the morphology, there are occurrences of Quaternary deposits, mainly fine-grained materials with a thickness of less than 5 m. There are also various materials derived from the weathering and erosion of the parent rocks. In addition, slope debris, cones of cavities and alluvial ribs are found.

The chamber of the Cave of Davelis and the slopes to the right and left of the entrance are located within the marble formation.

The company LANDMARK - G. LOUTRIDES in the context of the preparation of this thesis provided us with the data concerning the 3D mapping of the Cave of Davelis. In 2016, the company LANDMARK - G. LOUTRIDES carried out for promotional purposes a 3D mapping in the Cave of Davelis in Penteli using the GeoSlam ZEB-REVO instrument. Stability analyses of the interior of the chamber were carried out with the help of the point cloud. The use of the geological compass inside the cave is impractical as the rocks are covered with a thin to quite thick layer of moss in some places. The moss is due to the inflow and movement of water which is favoured by the discontinuities within the rock mass.

The GeoSlam ZEB-REVO instrument is a lightweight rotating laser-scanner and the site was mapped in just 20 minutes. This instrument has the advantage that it does not need to be stationary while the site scan is being carried out, unlike other terrestrial laser scanners. Also the mapping does not require a large workforce, only one person holding it and walking around the site is enough. It is also possible to mount them on mobile objects of choice, such as a vehicle or UAV, and as they move through the area of interest they will scan and store many thousands of points per second. Also another advantage of the instrument is that it does not require target placement and the GeoSLAM Hub Software software automatically does the cloud registration. The accuracy of the instrument is in the range of 2-3 cm and the scanning speed is 43,200 points/second. The 3D imaging that took place revealed the dimensions of the cave that were

calculated to the nearest centimeter, chamber length: 85m, maximum width: 40m and height: 20m.

CloudCompare is software for processing 3D point clouds from laser scanners. Its creation started in 2003 with a PhD project with the aim of early change detection through high-density 3D point clouds from laser scanners in industrial facilities such as factories or power plants. From 2009 to the present it has been released as free software and open source for public use under a GPL license. It is open source software and users are free to extend the capabilities of the software. CloudCompare is developed in C++ programming language. The software is suitable for detecting changes such as for example a ground subsidence, a subsidence in a building, etc. The processing algorithms provided offer methods for several tasks such as dimension calculation, calculation of statistics, estimation of geometric features as well as creation of floor plans, sections, etc.

Mobile laser scanners capture the geometry of objects with high accuracy and resolution and produce 3D point clouds that are dense enough to capture the distribution of the imaging space in great detail. Mobile Laser Systems (MLS) make use of laser scanning technology. Their portable equipment allows digitization in complex and difficult environments.

SLAM technology has largely eliminated the problems with the accuracy of handheld scanners in terms of their trajectory and level of precision. For this reason there is a future for the use of these instruments in areas where there is no need for a GNSS signal or contact with satellites (e.g. underground works, tunnels, caves, etc.). (Cabo, et al., 2018)). It is well known that GPSs cannot operate indoors as their operating principle is to have line-of-sight contact with satellites. Therefore, it is automatically impossible to map the interiors of buildings, mines, galleries, tunnels, etc. The solution to achieve mapping of spaces without the use of GPS came from CSIRO's Zebedee technology where it is also used by GeoSLAM on the ZEB1 and ZEB-REVO instruments using Simultaneous Localisation & Mapping (SLAM) algorithms.

The collection data from mobile scanning systems (MLS) perform automatic data processing through appropriate software. A separate 3D model is created for each scan and then if there are multiple scans for the same area, the process of aligning and merging the different scan clouds is performed. The result from this process is the extraction of a final 3D model. If there is more than one scan at a site it is advisable to provide sufficient overlap between scans.

In geotechnical engineering, the 3D scanning instrument contributes to the characterization of the rock mass and the determination of the geological characteristics of the formation. To date, mapping of a field of interest is done by recording the geological formations on a map of a predetermined scale, using the geological compass to record data such as dip and time of maximum dip. Also capture the field with a camera to highlight critical points or special appearances. Recording of the discontinuities and their characteristics (roughness, distance, opening, their persistence in space, existence of infill material, etc.). The mapping, with a 3D scanning instrument, of the fields is carried out in a very short time compared to traditional mapping. Furthermore, all the data is readily available in digital form. Also from the primary data up to some result from the processing there is the possibility to import them into different software such as AutoCAD and to follow a new processing.

The geotechnical characteristics of the rock formations of the area of interest were studied in terms of their shear strength. The Barton - Bandis criterion (1973) was used where Barton - Bandis through experimental data arrived at a non-linear failure criterion for the shear strength of the unconformities of a rock mass. The variables used are the coefficient of roughness (JRC), the

indirect uniaxial compressive strength (JCS) and also the normal stress (σ_n). Since in nature the surfaces of discontinuities are never smooth and flat, the angle of roughness (i) was determined from experimental data.

For the slopes outside the Davelis Cave the normal stress (σ_n) is calculated from the height of the slope times the specific gravity of the rock.

The Schmidt hammer rebound hardness (SH) test, achieves the determination of the surface hardness of the rock and indirectly the value of the average uniaxial compressive strength. At least 20 measurements were taken at each location on the two slopes. In areas of discontinuities or calcareous material where testing was performed and rock fracture occurred, the impacts were rejected. Of the 20 measurements, the 10 smallest were discarded and then averaged. After all measurements on each slope were completed, the average of all averages was calculated to determine the average rebound value. Using the Deere and Miller, 1996 nomogram, the determination of the average uniaxial compressive strength was performed.

The right slope is eroded and in some places an unbroken mass of rock is found between closed discontinuities. The left slope is almost unconformable with a few discontinuities which are either closed or open but filled with calcareous material. Indirect uniaxial compressive strength assessment was carried out for the discontinuities as well as for the calcareous material.

For the right slope the value of the JCS index for the discontinuities is equal to 85MPa. Similarly, the value of JCS index for the left slope is equal to 88 MPa, while for the calcareous material is equal to 40MPa.

The roughness coefficient (JRC) is determined by comparing the area of the discontinuity in question with the table of typical profiles created by Barton and Choubey in 1977. The instrument used to record the surface area of the discontinuity is called a profilometer. In the area of interest, the profilometer was used on both slopes and on the surface of the calcareous material (where possible). For safety reasons the chosen value for the roughness coefficient JRC for the left slope discontinuities is the lowest value, i.e. JRC = 4.

On the right slope also for safety reasons the selected value for the roughness coefficient JRC for the discontinuities is the lowest, i.e. JRC = 8. Similarly for the calcareous material on the left slope the selected value for the JRC roughness coefficient is the lowest, i.e. JRC = 4.

The basic friction angle ϕ_b for marbles is 32° , as shown by literature data. Using all the data, the angle of roughness i was calculated according to which all analyses were performed in the Dips software. More specifically, the angle of friction for the left slope is 39° for the unconformities while for the calcareous material it equals 38° . Similarly for the discontinuities of the right slope the friction angle is 47° .

All analyses performed in the Dips software took into account these values of the friction angle for each slope. Considering safety, the value for the friction angle used is much smaller than the corresponding friction angle obtained from the calculations.

For each slope the microtectonic analysis carried out is intended to examine the manifestation of a kinematic potential manifestation of plane slip, wedge-sliding slip or overturning event. In order to check the possibility of the development of potential debris flows and the stability of the slopes before the entrance to the Cave of Davelis, measurements were taken at selected locations on the slopes. More than 100 measurements, using the geological compass, were made on each slope and then projected their poles onto a Schmidt tectonic grid.

Using the Dips software, the poles were statistically processed and their equal density regions were plotted. From the concentration of the poles, the poles of the main discontinuity systems

and their planes were obtained. From the processing of the levels of the discontinuities, the possibility of potential development of potential debris flows on the slopes before the entrance to Davelis Cave was tested.

The stereographic projection chosen to be used in this work is on the Schmidt (Equal Area) grid. The study of the site concerns the control of potential slips that may occur along the unconformity levels, or along the intersection of two unconformity levels in the form of wedge-sliding detachments or the occurrence of overturning and collapses.

The probability of slippage based on the above analysis is not a sufficient condition for the creation of a slip. It is also necessary to take into account the actual shear strength parameters of the slip surface and the possibility of the existence of planes with the above geometric characteristics, which must be of sufficiently long length to constitute a deflection surface. The internal friction angle used to control the potential slip is derived from the analyses carried out in this work. It was chosen to use a friction angle ϕ ranging from 36° to 42° . That is within the safety range. Tests were carried out on each slope to check for the occurrence of failures or to eliminate failures. The lower value of the internal friction angle used is 36° and thus took into account the worst conditions of the rock mass as indicated by the angle of roughness.

Within the framework of this study, analyses of the technogeological stability conditions of both the right and the left slope located before the entrance of the Cave were carried out, which are almost vertical while the left slope is para-vertical.

The right slope (entering the cave is on our right hand) is wavy, the rock shows many discontinuities and its color is dark grey. Also, the intense crenulation also shapes the lower part of the slope, which consists of many small to very large pieces of rock mass that have been detached and fallen to the ground. The vast majority of the unconformities are closed and are rough. A few are open but do not exceed a few millimeters.

The slope and the direction of maximum slope gradient does not vary very much along its length from the entrance of the cave to its edge. The slope values range from 67° to 71° and the dip direction of maximum slope from 226 to 244. After statistical processing the value of the slope with which the analyses were performed is 70/239.

For the safety of the site study the analyses carried out were performed for all intermediate values of the internal friction angle with a pace of 2, i.e. 36° , 38° , 40° and 42° . From the results of the analyses, there was no difference in the potential failures detected overall in the right slope area for each one value of internal friction angle.

From the visualization of the main discontinuity planes in combination with the direction and slope inclination, the following geometrically potential failure cases according to the Markland test are obtained. The 77/028 level, which refers to a branching system, gives a marginal possibility of overturning. The possibility of slippage at the intersection of the following pairs of unconformity levels is shown below:

J2 - J4: 63/276 - 60/234

J3 - J4: 78/297 - 60/234

J2 - J3: 63/276 - 78/297

All pairs of discontinuities were analysed in Dips software and according to Hocking's refinement for each pair of discontinuities it was determined whether the slip that would potentially occur is planar or wedge-sliding.

For a more complete investigation of the discontinuities in the slope of the study area, parametric analyses were carried out with one variable, the angle of internal friction. The results of the

analyses showed that there is no differentiation with respect to the pairs of sliding discontinuity levels.

The analyses revealed that the pairs of unconformities J2 - J4: 63/276 - 60/234 and J2 - J3: 63/276 - 78/297 the slip expected will be wedge-sliding as it is observed that between the slope dip direction and the axis of the rock wedge, neither of the two dip directions of the rock wedge unconformity surfaces in each pair is located. In the J3 - J4: 78/297 - 60/234 unconformity pair the slip expected is flat and will occur in the J4 plane direction as it is observed that between the slope inclination direction and the rock wedge axis is the axis of the J4 unconformity.

The left slope (entering the cave is on our left hand) has some discontinuities that intersect it vertically and some that intersect these discontinuities. The vertical discontinuities are closed and filled with calcareous material like the majority of the discontinuities. Their opening ranges from 0 - 6 cm and was measured at the surface of the slope because that is the only place where they were not covered with calcareous material. The slope shows parts of the rock between the vertical discontinuities, mainly, where it can be characterized as unconformable.

The slope and the direction of maximum slope gradient does not vary greatly along its length from the entrance of the cave to its edge. The values measured range from 67° - 88° the slope and 119° - 122° and 299° - 308° the direction of maximum slope. These values of the maximum slope direction confirm that the left slope is paracontinuous, a fact that was noted from the on-site observation of the site. After the statistical treatment the slope will not have a value as it is a paracontinuous slope and it is not clear in advance how it will fail if it fails. So the values for which the investigations for any failures were made are 75/303 and 88/123. For the safety of the site study, the analyses carried out were performed for all intermediate values of the internal friction angle with a pace of 2°, i.e. 36°, 38°, 40° and 42°. In this slope in contrast to the right one, differences in the failures were obtained depending on the angle of internal friction.

From the visualization of the main unconformity planes in combination with the direction and slope inclination of the slope (slope with data 75/303), the following geometrically potential failure cases are obtained.

The 60/167 level, which refers to a branching system, very marginally allows for the possibility of tipping. The possibility of slippage at the intersection of the following pairs of discontinuity levels is shown:

J1 - J2: 87/209 - 66/231

J2 - J3: 66/231 - 89/028

In all pairs of discontinuities the analyses were performed in Dips software and according to Hocking's improvement for each pair of discontinuities it was determined whether the slip that will potentially occur is flat or wedge-sliding. For a more complete investigation of the stability conditions of the slope in the area of interest, as mentioned above, parametric analyses were performed with the internal friction angle as a variable.

From the analyses it was found that for the pairs of unconformities J1 - J2 and J2 - J3 the slip expected will be wedge-sliding as it is observed that between the slope inclination direction and the axis of the rock wedge neither of the two inclination directions of the rock wedge unconformity surfaces in each pair is located. For the J2 - J3 unconformity pair there is a difference in the occurrence of slips at the selected values of the internal friction angle, only the value of 42° is within the safety range.

From the visualisation of the main discontinuity levels in combination with the direction and slope gradient (slope with data 88/123) the following geometrically potential failure cases according to the Markland test are obtained.

None of the discontinuity levels seem to give the potential for overturning. The possibility of slippage at the intersection of the following pairs of discontinuity levels is shown:

J1 - J5: 87/209 - 60/167

J1 - J4: 87/209 - 71/075

J2 - J5: 66/231 - 60/167

J3 - J5: 89/028 - 60/167

J3 - J4: 89/028 - 71/075

J4 - J5: 71/075 - 60/167

All pairs of discontinuities were analysed in the Dips software and according to Hocking's refinement for each pair of discontinuities it was determined whether the slip that would potentially occur is planar or wedge-sliding.

For the comprehensive investigation of the discontinuities in the left slope of the area of interest, parametric analyses were carried out with the internal friction angle as a variable. The analyses showed that there is no variation with respect to the pairs of the unconformity plane pairs showing slip.

The analyses revealed that the discontinuity pairs J1 - J5: 87/209 - 60/167, J1 - J4: 87/209 - 71/075, J3 - J4: 89/028 - 71/075, J3 - J5: 89/028 - 60/167 and J4 - J5: 71/075 - 60/167 the slip expected will be wedge-sliding as it is observed that between the slope dip direction and the rock wedge axis neither of the two dip directions of the rock wedge unconformity surfaces in the respective pair is located. In the J2 - J5: 66/231 - 60/167 unconformity pair the slip expected is flat and will occur in the direction of the J4 plane as it is observed that between the slope inclination direction and the rock wedge axis is the axis of the J5 unconformity.

The stability analyses performed in UnWedge software were carried out exclusively for the interior of the Cave. It was chosen within the Cave to perform parametric analyses with persistence of discontinuities (Persistence) as a variable in three sections (two transverse and one horizontal). Using the "Compass" plug-in tool of CloudCompare software, several measurements of the slope and the dip direction of maximum slope were made in each section. More than 100 measurements were made at each location and then using the Dips software the main levels of the discontinuity systems were identified.

A value of 1.4 was chosen as the safety factor corresponding to an earthquake-affected environment with water present. If a value less than the value of the safety factor is obtained then failure is expected to occur at that wedge, while when the value of the safety factor is greater than the allowable value then safety is achieved.

The dimensions of the sections coincide with the maximum dimensions of the cave, the width is 40m and the height 20m.

Location 1 represents a section of the Cave located towards the end of the chamber. Post 2 is located at the point where the concrete terraces end. At this point the Cave has the largest dimensions and is the reason why this section was chosen. The cross-section of location 3 depicts in a horizontal arrangement the chamber of the Cave.

A general conclusion from all the parametric analyses in UnWedge software is that the chamber of the Cave of Davelis is stable and only under certain conditions can, especially the roof, manifest some collapses in the form of wedge. Within the Cave, the bracing measure that can be placed to prevent collapses are anchors (either passive, simple cantilevers, prestressed, etc.). Also in individual locations it is possible to remove the mass through the process of scarification. Due to the specific nature of the site of interest, which is an archaeological site, it is not possible to apply a variety of retaining measures.