



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΙΩΑΚΕΙΜ Κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ
ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΟΝΗΣ ΚΗΠΙΝΑΣ
ΣΤΟΥΣ ΚΑΛΑΡΡΥΤΕΣ ΗΠΕΙΡΟΥ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ»
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: «ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ»

Θεσσαλονίκη 2021





ΙΩΑΚΕΙΜ Κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΟΝΗΣ ΚΗΠΙΝΑΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΛΑΡΡΥΤΕΣ ΗΠΕΙΡΟΥ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
UAV

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία», Κατεύθυνση «Τεχνική Γεωλογία»

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 15/07/2021

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Βασίλειος Μαρίνος, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων
Γεώργιος Παπαθανασίου, Επ. Καθηγητής Δ.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Επιτροπής
Θωμάς Μακεδών, ΕΔΙΠ Α.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Επιτροπής



© Ιωακείμ Κ. Κωνσταντινίδης, Γεωλόγος, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΟΝΗΣ ΚΗΠΙΝΑΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΛΑΡΡΥΤΕΣ ΗΠΕΙΡΟΥ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Ioakeim K. Konstantinidis, Geologist, 2021

All rights reserved.

UAV–BASED ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT IN KIPINAS MONASTERY, KALARRITES, EPIRUS, – *Master Thesis*

Citation:

Κωνσταντινίδης Ι. Κ., 2021. – Εκτίμηση της Επικινδυνότητας Εκδήλωσης Βραχοκαταπτώσεων στη Περιοχή της Μονής Κηπίνας στους Καλαρρύτες Ηπείρου, με τη Χρήση UAV. *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 106 σελ.*

Konstantinidis I. K., 2021. – UAV–Based Rockfall Hazard Assessment in Kipinas Monastery, Kalarrites, Epirus. *Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), 106 pp.*

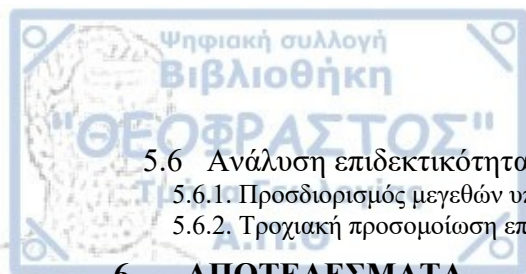
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Αντικείμενο έρευνας	11
1.2 Περιοχή έρευνας.....	12
1.3 Μεθοδολογία	14
1.4 Εργαλεία έρευνας	14
1.5 Διάρθρωση κεφαλαίων	15
2. ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	16
2.1 Βραχοκατάπτωση (rockfall)	16
2.2 Επιδεκτικότητα (susceptibility).....	21
2.3 Επικινδυνότητα (hazard)	22
2.4 Διακινδύνευση (risk)	23
3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	25
3.1 Γενικά	25
3.2 Γεωμορφολογία	28
3.3 Λιθολογία	30
3.4 Τεκτονικό καθεστώς και σεισμολογικά δεδομένα	35
3.5 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα	42
4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ UAV – ΣΜηΕΑ (Unmanned Aerial Vehicle – Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων).....	47
4.1 Γενικά	47
4.2 Μέθοδος φωτογραμμετρίας (Structure from Motion – SfM).....	48
4.3 Τρισδιάστατα μοντέλα νέφους σημείων (3D Point Cloud).....	50
5. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	51
5.1 Υπαίθρια επίσκεψη	51
5.1.1. Τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση	51
5.1.2. Πρόγραμμα εικονοληψίας από πτήση UAV	64
5.2 Ανάπτυξη τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων	65
5.3 Επεξεργασία τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων.....	66
5.4 Ανάλυση προσανατολισμού και απόστασης επιφανειών.....	68
5.4.1. Ανάλυση προσανατολισμού επιφανειών	68
5.4.2. Ανάλυση απόστασης (spacing) επιφανειών.....	69
5.5 Κινηματική Ανάλυση	70



5.6	Ανάλυση επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων.....	70
5.6.1.	Προσδιορισμός μεγεθών υπαρχόντων και δυνητικών αστοχιών	70
5.6.2.	Τροχιακή προσομοίωση επισφαλών τεμαχών	71
6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	73
6.1	Κύριες οικογένειες ασυνεχειών.....	73
6.2	Αποστάσεις ασυνεχειών	76
6.3	Βέλτιστα μοντέλα αστοχιών.....	77
6.4	Επιδεκτικότητα έναντι βραχοκαταπτώσεων	79
6.4.1	Κατανομή όγκου υπαρχόντων και δυνητικών αστοχούντων τεμαχών	79
6.4.2	Δυνητικές τροχιές και ενεργειακό καθεστώς επισφαλών τεμαχών	85
7.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ (Rockfall Hazard and Risk Rating System)	88
7.1	Γενικά	88
7.2	Θεωρητικό υπόβαθρο συστημάτων αξιολόγησης.....	89
7.3	Rockfall Hazard & Risk Rating System.....	91
7.4	Αποτελέσματα	96
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία που εκπονείται κατά το τελευταίο εξάμηνο του μεταπτυχιακού προγράμματος “Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία” με κατεύθυνση τη Τεχνική Γεωλογία, του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κυρίου Βασιλείου Μαρίνου, πρώην Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και νυν Επίκουρου Καθηγητή του Τομέα Γεωτεχνικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Αθηνών.

Οφείλω πρώτο απ’ όλους λοιπόν να ευχαριστήσω τον κύριο Βασίλειο Μαρίνο, όχι μόνο για την καθοδήγησή του στην μελέτη και τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, αλλά κυρίως για τον υποστηρικτικό του ρόλο καθ’ όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας από το προπτυχιακό ακόμα επίπεδο μέχρι και σήμερα. Ο κύριος Μαρίνος αποτελεί πρότυπο επιστήμονα και δασκάλου και αποτέλεσε το έναυσμα για την ενασχόλησή μου με την Τεχνική Γεωλογία από τις προπτυχιακές μου σπουδές. Η παρούσα εργασία είναι το αποκύημα της ενεργούς, συνεχούς συνεργασίας μας μέσω της οποίας διδάχθηκα, εκπαιδεύτηκα και κλήθηκα να κάνω τα πρώτα μου ερευνητικά βήματα μετά την προτροπή του για συμμετοχή σε διεθνή και εγχώρια συνέδρια. Μέσω αυτού θεωρώ πως έλαβα την πληρέστερη δυνατή εμπειρία θα μπορούσα να έχω ως μεταπτυχιακό φοιτητής σχετικά με το αντικείμενο που μου κέντρισε το ενδιαφέρον από τη πρώτη στιγμή που ξεκίνησα τη προπτυχιακή μου φοίτηση στο Τμήμα Γεωλογίας. Η συνεχής διάθεση του για δουλειά σε συνδυασμό με τη προσωπική μου αδιάκοπη προσπάθεια για βελτίωση αποτέλεσε το βασικό άξονα εξέλιξης μου τόσο ως επιστήμονα αλλά και ως άνθρωπο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω επίσης στον κύριο Γεώργιο Παπαθανασίου, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης για τη πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του τόσο σχετικά με τη παρούσα εργασία όσο και συνολικά σε επιστημονικά θέματα που με βοήθησαν να βελτιωθώ και να εξελιχθώ στο χώρο των γεωπιστημών με τη βοήθεια ενός έμπειρου και πολύ ικανού καθηγητή και επιστήμονα. Η πόρτα, ή καλύτερα το τηλέφωνο, του κυρίου Παπαθανασίου ήταν πάντα ανοιχτό για οτιδήποτε χρειάστηκα κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Η συνεισφορά του ήταν καθοριστική καθώς βοήθησε ενεργά στην κατανόηση των μεθόδων και στην αποσαφήνιση των δυνατοτήτων και των ορίων αυτών.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη στους δύο παραπάνω, για την ευκαιρία που έδωσαν να δημοσιεύσω τμήμα της παρούσας εργασίας με τη μορφή άρθρου σε ένα διακεκριμένο διεθνή επιστημονικό περιοδικό. Σίγουρα οι ευκαιρίες αυτές δεν μου δόθηκαν άνευ λόγου, αλλά αποτελούν αποτέλεσμα της προσωπικής μου δουλειάς και προσπάθειας, παρόλα αυτά, χωρίς τη πίστη τους στις δυνατότητές και το χαρακτήρα μου κάτι τέτοιο δεν θα ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον κύριο Θωμά Μακεδών, μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., για τη σημαντική βοήθεια του στην ορθή και ολοκληρωμένη εκπαίδευση μου ως Τεχνικός Γεωλόγος μέσω του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ευστράτιο Καραντανέλλη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας για την πολύτιμη βοήθειά και υποστήριξή του καθ’ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου τόσο προπτυχιακών όσο και μεταπτυχιακών. Ο κύριος Καραντανέλλης υπήρξε πάντα διαθέσιμος και διατεθειμένος να συνεπικουρήσει τη διδακτική και ερευνητική διαδικασία, προσφέροντας με ιδιαίτερη ευχαρίστηση τον χρόνο καθώς και τις γνώσεις του, αποτελώντας τον άνθρωπο που με έφερε για πρώτη φορά σε επαφή από το προπτυχιακό επίπεδο με το βασικό αντικείμενο τόσο της παρούσα εργασίας όσο και των περισσότερων ερευνητικών μου εργασιών.

Επιπρόσθετα, οφείλω να ευχαριστήσω του συναδέλφους, αλλά και πρώτιστα φίλους μου, Πηνελόπη Σωτηρίου και Φώτιος Παρασκευόπουλος – Τσιακίρης, για τη σημαντική βοήθεια τους και την



αψεγάδιαστη επαγγελματική τους συνεργασία κατά την υπαίθρια επίσκεψη στη θέση ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στην υλικοτεχνική υποδομή του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Παρά τις δυσχερείς οικονομικές συνθήκες και τον μειωμένο προϋπολογισμό του Πανεπιστημίου, το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας υπήρξε άρτια εξοπλισμένο με τεχνολογία αιχμής, όπως οι σύγχρονες μέθοδοι τηλεανίχνευσης που χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα έρευνα. Μου δόθηκε έτσι η ευκαιρία να χρησιμοποιήσω τα εργαλεία αυτά στο πλαίσιο της διπλωματικής μου εργασίας, μαθαίνοντας έτσι τον σωστό χειρισμό τους και οδηγούμενος ταυτοχρόνως σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα με τη καθοριστική όμως βοήθεια ιδιαίτερα καταρτισμένων ατόμων που ήταν πάντα πρόθυμα να μεταδώσουν τις γνώσεις τους.

Τέλος, θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου κατά το μακρό ταξίδι των σπουδών μου, με πρώτους τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Σοφία. Αυτοί, μαζί με τους φίλους μου έπαιξαν ενεργό ρόλο, ίσως όχι διδακτικό, αλλά προπάντων υποστηρικτικό καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου. Η έρευνα καθώς και η σύνταξη αυτού του κειμένου πιθανόν θα ήταν αδύνατη χωρίς την ηθική τους συμπαράσταση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι βραχοκαταπτώσεις, γενικά, κατηγοριοποιούνται ως το είδος κατολίσθησης όπου αποτελείται από την αποκόλληση τεμάχους βράχου, ποικίλων διαστάσεων και μεγέθους, από ένα απότομο βραχώδες πρανές, κατά μήκος μιας επιφάνειας, χωρίς καθόλου ή με ελάχιστη διατμητική αντοχή και η πτώση πραγματοποιείται λόγω βαρύτητας υπό τη μορφή ελεύθερης πτώσης (free falling), αναπήδησης (bouncing) ή κύλισης (rolling) στην επιφάνεια του πρανού (Varnes, 1978). Σύμφωνα με τον Hoek (2000), μπορεί τα αποτελέσματα των φαινομένων βραχοκαταπτώσεων να έχουν σαφώς μικρότερο οικονομικό αντίκτυπο στους οικισμούς που επηρεάζουν, σε σχέση με μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις, αλλά λόγω των ραγδαίων ταχυτήτων που εκδηλώνονται οι καταπτώσεις, το μέγεθος θνησιμότητας που σχετίζεται με αυτές είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για άλλου είδους αστοχίες (της ίδιας τάξης μεγέθους). Επομένως καθίσταται σαφές πως οι βραχοκαταπτώσεις συνιστούν έναν από τους πιο ισχυρούς φυσικούς κινδύνους, ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές, και φέρουν την ικανότητα να μετατραπούν σε καταστροφικά γεγονότα σε περίπτωση που εκδηλωθούν κοντά στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η ακριβή πρόβλεψη των επισφαλών θέσεων εκδήλωσης καταπτώσεων, του μεγέθους τους και της σφοδρότητας τους αποτελεί διαδικασία εξέχουσας σημασίας. Γενικά οι παραπάνω όροι μπορούν να εκφραστούν μέσω της εκτίμησης της επιδεκτικότητας, της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης αντίστοιχα.

Διαχρονικά οι διαδικασίες εκτίμησης της επικινδυνότητας (hazard) καθώς και της διακινδύνευσης (risk) σε σχέση με φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, αποτελούν από τις πιο δύσκολες και απαιτητικές προκλήσεις στην επιστήμη της τεχνικής γεωλογίας. Η δυσκολία αυτή έγκειται στη παρουσία πολλών "γκρίζων" ζωνών σε σχέση με τα διαθέσιμα δεδομένα. Βασικό στοιχείο για τη μελέτη των παραπάνω εννοιών, σε σχέση με τις καταπτώσεις βράχων, είναι η παρουσία ενός ικανοποιητικού ιστορικού παρακολούθησης, σχετικά με τη χωρική αλλά και τη χρονική κατανομή των συγκεκριμένων φαινομένων, για κάθε περιοχή όπου αυτά έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν. Άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτή την αντίληψη γύρω από τις αναλύσεις εκτίμησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης είναι: οι περιορισμένες δυνατότητες ποσοτικοποίησης και σχηματικής απεικόνισης της κατανομής των βραχοκαταπτώσεων, η αδυναμία για ολιστική μελέτη και ανάλυση των ιδιοτήτων τους καθώς και η έλλειψη μέσων για την εκτίμηση της ετερογένειας και διακύμανσης της τρωτότητας των διαφόρων δυνητικών επισφαλών στοιχείων σε περίπτωση πραγματοποίησης βραχοκαταπτώσεων. Την τελευταία δεκαετία, οι περισσότεροι από τους παραπάνω αποτρεπτικούς παράγοντες, σε σχέση με τις αναλύσεις εκτίμησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης, έχουν μετριαστεί ή και ξεπεραστεί πλήρως σε κάποιες περιπτώσεις με την εισαγωγή των νέας τεχνολογίας μεθόδων τηλεανίχνευσης (remote sensing technologies) ως κοινή πρακτική σε τέτοιου είδους μελέτες. Τα εργαλεία τηλεανίχνευσης διαχωρίζονται σε δύο (2) κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο των αισθητήρων (sensors) που χρησιμοποιούν. Διαχωρίζονται δηλαδή, στους ενεργούς (active) όπως είναι η τεχνολογία επίγειας σάρωσης με λέιζερ LiDaR (Light Detection and Ranging) και στους παθητικούς (passive) όπως είναι η μέθοδος της φωτογραμμετρίας με τη χρήση UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Συγκεκριμένα η δεύτερη μέθοδος, της φωτογραμμετρίας με τη χρήση UAV, θεωρείται ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στη μελέτη γενικά κατολισθητικών φαινομένων λόγω της ευκολίας χρήσης του, καθώς και του χαμηλού του κόστους, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη για πολλαπλές ακριβείς μετρήσεις με στόχο τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου εδαφικού μοντέλου υψηλής ποιότητας που αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τη πραγματική περιοχή μίας κατολίσθησης.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην Ιερά Μονή Κηπίνας, όπου βρίσκεται νότια του οικισμού Καλαρρύτες στα βόρεια Τζουμέρκα. Το συγκεκριμένο μοναστήρι αποτελεί ένα μοναδικό ιστορικό μνημείο που κατασκευάστηκε περί το 1212 μ.Χ., καθώς είναι χτισμένο μέσα στο ασβεστολιθικό πρανές και βρίσκεται επικρεμάμενο πάνω από το οδικό δίκτυο όπως ακριβώς και τα ασβεστολιθικά τεμάχια που το περικυκλώνουν. Η μορφολογία της περιοχής αποτελείται από υψηλά ($\geq 60\text{m}$) απότομα πρανή με πολύ μεγάλες γωνίες κλίσης ($\geq 80^\circ$). Σε αυτή την γεωμετρικά δυσμενή, όπως περιγράφεται, τοποθεσία εδράζεται ένα από τα πιο εντυπωσιακά θρησκευτικά μνημεία της χώρας. Κατά το παρελθόν, έχουν παρατηρηθεί σημαντικές καταπτώσεις βραχών με αποτέλεσμα την καταστροφή ενός μέρους του δρόμου κάτω από το πρανές μελέτης, χωρίς όμως αυτές οι μετακινήσεις να έχουν ποσοτικοποιηθεί και καταγραφεί επαρκώς. Η συγκεκριμένη θέση αποτελεί ιδιαίτερης σημασίας τόσο



λόγω της σημαντικότητας του μνημείου και την ανάγκη διατήρησης του μέσα στα χρόνια αλλά και λόγω της αυξανόμενης τουριστικής δραστηριότητας που λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου στη συγκεκριμένη τοποθεσία.

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι πραγματοποίηση μίας λεπτομερούς ανάλυσης εκτίμησης της επικινδυνότητας και μίας πρώιμη απόπειρας καθορισμού της διακινδύνευσης στη περιοχή μελέτης, μέσω των δεδομένων που λήφθηκαν από το UAV. Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος ένα νέο σύστημα αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων αναπτύχθηκε, μέσω αξιολόγησης παλαιότερων, και προτάθηκε, βασιζόμενο κυρίως σε μορφολογικές και δομικές πληροφορίες, που εξάχθηκαν μέσω επεξεργασίας των δεδομένων του UAV, για την εκτίμηση της επικινδυνότητας. Ενώ τέλος, στα παραπάνω προστέθηκαν και παράγοντες τρωτότητας και συνεπειών για την εκτίμηση της διακινδύνευσης.

Μέσω της παραπάνω μεθοδολογίας, καθώς και της εξέλιξης αυτής, δύναται να πραγματοποιηθεί η ποσοτικοποίηση των βραχοκαταπτωτικών φαινομένων, με τελικό στόχο τη πρόταση συγκεκριμένων μέτρων προστασίας καθώς και την εκτίμηση των απαραίτητων παραμέτρων σχεδιασμού αυτών, στη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας. Σίγουρα το παραπάνω αποτελεί μία απαιτητική διαδικασία, αλλά εκτιμάται πως η παρούσα εργασία αποτελεί ένα ισχυρό θεμέλιο για την υλοποίησή της.

ABSTRACT

Rockfalls, in general, are classified as a type of landslide that consists of a detachment of a rock block (or several individual blocks) from a vertical or even sub-vertical cliff that followed by rapid downward motion characterized by four main phases: free-falling, bouncing, rolling and sliding (Varnes, 1978). Although rockfalls have a much lower level of economic risk than large-scale landslides, the rapid velocities associated with rockfall events result in a similar number of fatalities (on the same order of magnitude) as ones occurred by all other landslide types (Hoek, 2000). Therefore, rockfall events consist one of the most powerful geological hazards in mountainous landscapes with the potential to turn catastrophic if they occur near anthropogenic environment. Thus, the accurate foresight of possible locations to produce these phenomena and also their magnitude and impact is of high significance. In general, the above terms can be expressed with the parameters of susceptibility, hazard and risk respectively.

Rockfall hazard and risk analyses are inherently some of the most elaborate and challenging assessments among the geo-engineering society. The difficulties and the complexity of them derived from the lack of accurate data (spatial- and temporal-based), site-specific rockfall's properties, limited capabilities in the quantification and the visual interpretation of rockfall's spatial distribution and the heterogeneity of vulnerability of various elements at risk. Most of the above deterring factors, during the last decade have been eased and, in many cases, surpassed by the introduction of innovative remote sensing technologies as a common practice in hazard and risk assessments. These technologies can be based on passive sensors such as photogrammetric surveys via Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), also known as Unmanned Aerial Vehicles (UAV). UAVs are considered as a flexible and powerful tool for rockfall investigations due to its low-cost and ease of transportability in harsh environments. Specifically, the utilization of Structure from Motion (SfM) methodology enabled the production of ultra high-resolution orthomosaic and Digital Terrain Models (DTMs) of hazardous regions by intersecting the matched features between the overlapping offset images and interpret them as detailed 3D point clouds. The compound of them with traditional engineering geological field surveys can lead to an accurate, precise and time-effective local scale modelling of the rockfall events.

This study focuses on the cultural heritage area of Kipinas Monastery in Epirus, Greece, at a site where the Monastery is situated into a limestone rock cliff. Specifically, the monastery is situated in North Tzoumerka, south of Kalarites village. The morphology of the site consists of high ($\geq 60\text{m}$) very steep slopes ($\geq 80^\circ$). In this unwelcoming location, Kipinas Monastery is literally chiseled and built into the surrounding rock mass, around 1212 A.D., constituting this way one of Greece's most beautiful and impressive churches. However, in this location various rockfall events occurred in the past years, with fallen blocks identified near the tarmac of the road that leads to monastery. In general, the impact of rockfall events on archaeological sites, historical monuments and generally on cultural heritage areas in the Greek territory is significant, since most of the landscapes are mountainous and the sites are usually found near or on top of steep rock slopes. Adding up the significant tourist activity in such locations, the risk can be significantly increased.

The principal aim of this research is to perform an in-depth qualitative rockfall hazard analysis and a preliminary approach of risk analysis, based on a UAV derived dataset of the area. In order to achieve this goal, a new rockfall hazard and risk rating system is presented, via the modification of some preexisting systems, based on morphological and structural information of the rock mass derived from the analysis of the 3D point cloud. The factors of vulnerability and commercial impact were also taken into account for the risk estimation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο έρευνας

Διαχρονικά οι διαδικασίες εκτίμησης της επικινδυνότητας (hazard) καθώς και της διακινδύνευσης (risk) σε σχέση με φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, αποτελούν από τις πιο δύσκολες και απαιτητικές προκλήσεις στην επιστήμη της τεχνικής γεωλογίας. Η δυσκολία αυτή έγκειται στη παρουσία πολλών “γκρίζων” ζωνών σε σχέση με τα διαθέσιμα δεδομένα. Βασικό στοιχείο για τη μελέτη των παραπάνω εννοιών, σε σχέση με τις καταπτώσεις βράχων, είναι η παρουσία ενός ικανοποιητικού ιστορικού παρακολούθησης για κάθε περιοχή όπου αυτά έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν. Η συμπεριφορά ενός πρανούς κατά το παρελθόν, έναντι βραχοκαταπτώσεων, αποτελεί σε μεγάλο βαθμό το “κλειδί” για τη κατανόηση του και τη πρόβλεψη της μελλοντικής του συμπεριφοράς. Συνήθως, ειδικά στη χώρα μας, τα διαθέσιμα δεδομένα είναι αρκετά περιορισμένα, τόσο σε σχέση με τη χωρική αλλά και τη χρονική κατανομή των συγκεκριμένων φαινομένων. Άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτή την αντίληψη γύρω από τις αναλύσεις εκτίμησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης είναι: οι περιορισμένες δυνατότητες ποσοτικοποίησης και σχηματικής απεικόνισης της κατανομής των βραχοκαταπτώσεων, η αδυναμία για ολιστική μελέτη και ανάλυση των ιδιοτήτων τους καθώς και η έλλειψη μέσων για την εκτίμηση της ετερογένειας και διακύμανσης της τρωτότητας των διαφόρων δυνητικών επισφαλών στοιχείων σε περίπτωση πραγματοποίησης βραχοκαταπτώσεων.

Την τελευταία δεκαετία, οι περισσότεροι από τους παραπάνω αποτρεπτικούς παράγοντες, σε σχέση με τις αναλύσεις εκτίμησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης, έχουν μετριαστεί ή και ξεπεραστεί πλήρως σε κάποιες περιπτώσεις με την εισαγωγή των νέας τεχνολογίας μεθόδων τηλεανίχνευσης (remote sensing technologies) ως κοινή πρακτική σε τέτοιου είδους μελέτες. Τα εργαλεία τηλεανίχνευσης διαχωρίζονται σε δύο (2) κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο των αισθητήρων (sensors) που χρησιμοποιούν. Διαχωρίζονται δηλαδή, στους ενεργούς (active) όπως είναι η τεχνολογία επίγειας σάρωσης με λέιζερ LiDaR (Light Detection and Ranging) και στους παθητικούς (passive) όπως είναι η μέθοδος της φωτογραμμετρίας με τη χρήση UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Συγκεκριμένα η δεύτερη μέθοδος, της φωτογραμμετρίας με τη χρήση UAV, θεωρείται ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στη μελέτη γενικά κατολισθητικών φαινομένων λόγω της ευκολίας χρήσης του, καθώς και του χαμηλού του κόστους, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη για πολλαπλές ακριβείς μετρήσεις με στόχο τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου εδαφικού μοντέλου υψηλής ποιότητας που αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τη πραγματική περιοχή μίας κατολίσθησης. Βέβαια προκειμένου η ολιστική αυτή προσέγγιση στη περιοχή μελέτης, να αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν τη πραγματική εικόνα του φαινομένου που αναλύεται, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός αυτών των νέων τεχνολογιών με επιτόπου μετρήσεις και παρατηρήσεις τεχνικογεωλογικής φύσης.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία συντάσσεται με στόχο την εκτίμηση της επικινδυνότητας εκδήλωσης φαινομένων βραχοκαταπτώσεων και σε μία πρώτη εκτίμηση της διακινδύνευσης στη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας στους Καλαρρύτες Ηπείρου. Για την πραγματοποίηση αυτών των εκτιμήσεων έγινε χρήση της μεθόδου της φωτογραμμετρίας μέσω UAV σε συνδυασμό με μία εκτεταμένη και λεπτομερή τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση στη περιοχή μελέτης. Στα πλαίσια της εκτίμησης τόσο της επικινδυνότητας όσο και της διακινδύνευσης στη συγκεκριμένη θέση, λόγω έλλειψης ποσοτικοποιημένων δεδομένων από παλαιότερες καταγραφές φαινομένων βραχοκατάπτωσης, προτάθηκε ένα νέο ημί – ποσοτικό σύστημα αξιολόγησης (Rockfall Hazard and Risk Rating System) όπου λαμβάνει υπόψιν του μία πληθώρα στοιχείων (γεωμετρικά, μορφολογικά, γεωλογικά, γεωτεχνικά, επίδραση σε ανθρωπογενής δραστηριότητες, κ.λπ.) για την περιοχή μελέτης. Οι παράμετροι αυτοί στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με έναν μοναδικό συντελεστή βαρύτητας για κάθε μία και εξάγεται ένας αριθμός τόσο για την επικινδυνότητα όσο και για τη διακινδύνευση. Έτσι καθίσταται δυνατή η κατηγοριοποίηση της περιοχής μελέτης σε διαφορετικές ζώνες ανάλογα με το επίπεδο τόσο της επικινδυνότητας όσο και της διακινδύνευσης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, που παρουσιάζεται και αναλύεται εκτενώς στη συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί ένα εφικτό μέσο για την εκτίμηση τόσο της επικινδυνότητας όσο και της διακινδύνευσης σε περιοχές όπου

απειλούνται από φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων και τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα είναι ελάχιστα έως και ανύπαρκτα.

1.2 Περιοχή έρευνας

Η εξεταζόμενη περιοχή έρευνας και εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αποτέλεσαν τα ανθρακικά πρανή όπου εδράζεται η Ιερά Μονή Κηπίνας, νότια του οικισμού Καλαρρύτες στα βόρεια Τζουμέρκα (Εικόνα 3.). Το συγκεκριμένο μοναστήρι αποτελεί ένα μοναδικό ιστορικό μνημείο που κατασκευάστηκε περί το 1212 μ.Χ., καθώς είναι χτισμένο μέσα στο ασβεστολιθικό πρανές και βρίσκεται επικρεμάμενο πάνω από το οδικό δίκτυο όπως ακριβώς και τα ασβεστολιθικά τεμάχια που το περικυκλώνουν (Εικόνα 1. και Εικόνα 2.).

Σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής, η τοπογραφία της χαρακτηρίζεται ως ορεινή με τα υψόμετρα να κυμαίνονται από 580m έως και 730m. Γενικά, η μορφολογία της αποτελείται από υψηλά ($\geq 60m$) απότομα πρανή με πολύ μεγάλες γωνίες κλίσης ($\geq 80^\circ$). Σε αυτή την αφιλόξενη, όπως περιγράφεται, τοποθεσία εδράζεται ένα από τα πιο εντυπωσιακά θρησκευτικά μνημεία της χώρας.

Κατά το παρελθόν, έχουν παρατηρηθεί σημαντικές καταπτώσεις βραχωδών τεμαχίων με αποτέλεσμα την καταστροφή ενός μέρους του δρόμου κάτω από το πρανές μελέτης, χωρίς όμως αυτές οι μετακινήσεις να έχουν ποσοτικοποιηθεί και καταγραφεί επαρκώς. Η συγκεκριμένη θέση αποτελεί ιδιαίτερης σημασίας τόσο λόγω της σημαντικότητας του μνημείου και την ανάγκη διατήρησης του μέσα στα χρόνια αλλά και λόγω της αυξανόμενης τουριστικής δραστηριότητας που λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Επιπρόσθετα, υπάρχουν μοναχοί οι οποίοι κατοικούν στη Μονή και σε κοντινά κτίσματα αυτής, με τα οικήματα τους να είναι πολύ επιδεκτικά στη περίπτωση εκδήλωσης κάποιου φαινομένου βραχοκατάπτωσης.

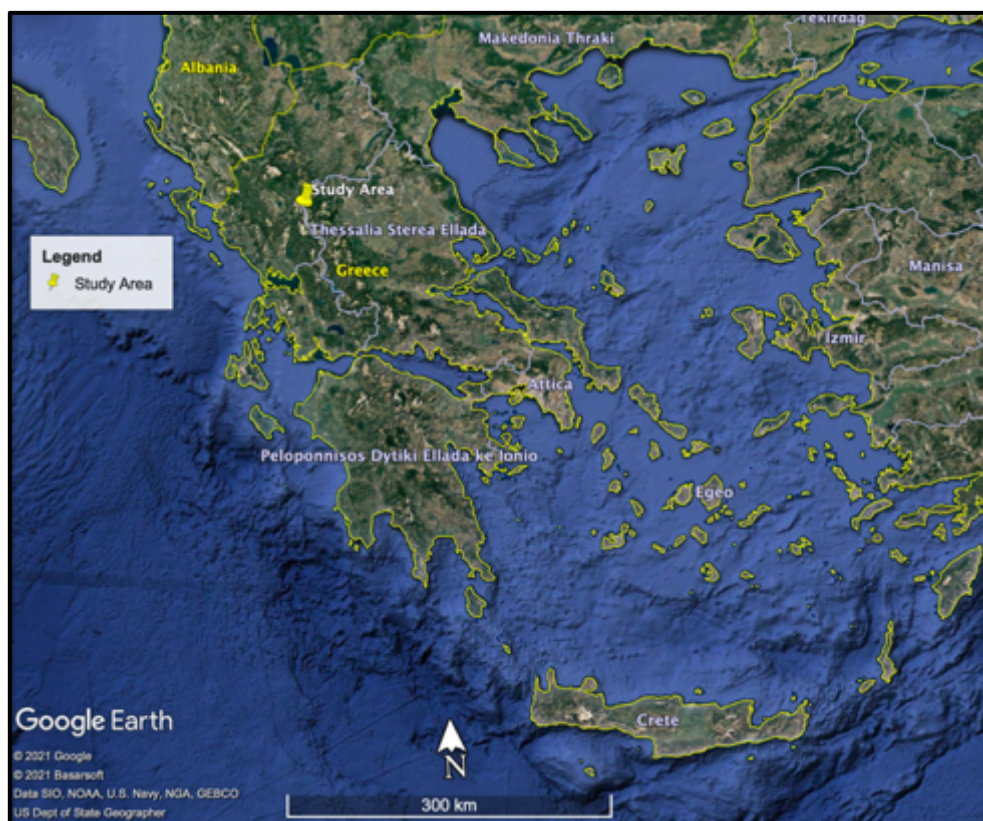
Επομένως, καθίσταται σαφές πως για λόγους ασφαλείας είναι επιτακτική η έρευνα στη περιοχή με στόχο των καθορισμό του βαθμού τόσο της επικινδυνότητας όσο και της διακινδύνευσης, έτσι ώστε να γίνει δυνατή η πρόταση και η παραμετροποίηση μέτρων αντιμετώπισης-αντιστήριξης. Μέσω αυτών θα γίνει δυνατή η εξάλειψη ή τουλάχιστον ο μετριασμός οποιουδήποτε μελλοντικού κινδύνου κατάπτωσης, καθώς η γνώση του παρελθόντος μπορεί να αποτελέσει οδηγό για το μέλλον.



Εικόνα 1. Η θέση έδρασης της περιοχής μελέτης, της Ιεράς Μονής Κηπίνας.



Εικόνα 2. Η θέση έδρασης της περιοχής μελέτης και ο δρόμος που οδηγεί στην Ιερά Μονή Κηπίνας.



Σχήμα 1. Δορυφορική εικόνα της Ελλάδας, όπου επισημαίνεται η θέση μελέτης (Google Earth, 2021, τροποποιημένη)

1.3 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία όπου ακολουθήθηκε, για την εκτέλεση της παρούσας μελέτης και θα αναλυθεί μέσα στα επόμενα κεφάλαια, παρουσιάζεται σε χρονολογική σειρά επιγραμματικά παρακάτω:

1. εκπόνηση τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης στην περιοχή μελέτης με στόχο τον καθορισμό του τεχνικογεωλογικού μοντέλου,
2. καθορισμός μηχανισμού αστοχίας στο υπό εξέταση πρανές,
3. πραγματοποίηση επιτόπου δοκιμών στην βραχώμαζα με στόχο την εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών τόσο του βράχου όσο και των ασυνεχειών,
4. πραγματοποίηση πτήσης του UAV και λήψη των απαραίτητων δεδομένων,
5. επισήμανση χαρακτηριστικών σημείων στην υπό εξέταση περιοχή και μέτρηση των συντεταγμένων τους μέσω συσκευής GPS για την γεωαναφορά των δεδομένων από το UAV,
6. κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud) από τα χωρικά δεδομένα που λήφθηκαν από το UAV,
7. επεξεργασία παραγόμενων πληροφοριών με υπολογιστικές μεθόδους με την κατασκευή τεκτονικών διαγραμμάτων,
8. επεξεργασία και τμηματοποίηση του παραγόμενου μοντέλου σε τέσσερις (4) υπό-περιοχές, με βάση κυρίως τη μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πρανούς καθώς την μεταβολή της τρωτότητας και της σημασίας των κατασκευών που βρίσκονται υποκείμενες του πρανούς,
9. πραγματοποίηση ημί – αυτοματοποιημένης δομικής ανάλυσης για όλες τις υπό-περιοχές, μέσω των κατάλληλων λογισμικών, με στόχο την εύρεση των κύριων οικογενειών ασυνεχειών καθώς και του προσανατολισμού αυτών,
10. έλεγχος και αντιπαραβολή των εξαγόμενων δεδομένων από τα τρισδιάστατα μοντέλα με τις ληφθείσες υπαίθριες μετρήσεις με στόχο τη διόρθωση το πρώτων σε περίπτωση σημαντικών διαφορών,
11. υλοποίηση κινηματικών αναλύσεων και καθορισμός του κατάλληλου μοντέλου αστοχίας για κάθε υπό – περιοχή,
12. σύνταξη ημί – αυτοματοποιημένου εντοπισμού και διαστασιολόγησης των βραχοτεμαχών που έχουν αστοχήσει κατά το παρελθόν για κάθε υπό – περιοχή, μέσω υπολογιστικών λογισμικών,
13. σύνταξη ημί – αυτοματοποιημένου εντοπισμού και διαστασιολόγησης των δυνητικών βραχοτεμαχών για αστοχία για κάθε υπό – περιοχή, μέσω υπολογιστικών λογισμικών,
14. ανάλυση των ήδη προκαθορισμένων δυνητικών τεμαχών για αστοχία, για κάθε υπό-περιοχή, μέσω τροχιακών προσομοιώσεων με στόχο την εκτίμηση των αποτελεσμάτων (ενέργεια, ταχύτητα, χρόνος διαδρομής, ύψος αποκόλλησης και αναπήδησης) για κάθε πιθανό φαινόμενο βραχοκατάπτωσης τόσο πριν όσο ύστερα από την εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης-αντιστήριξης,
15. σύνταξη ενός νέου ημί – ποσοτικού συστήματος αξιολόγησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης για πρανή έναντι φαινομένων καταπτώσεων βράχων
16. εφαρμογή του παραπάνω νέου συστήματος αξιολόγησης σε κάθε υπό – περιοχή και κατηγοριοποίηση ζωνών επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι φαινομένων βραχοκαταπτώσεων.

1.4 Εργαλεία έρευνας

Η παρούσα εργασία βασίστηκε πάνω στο κλασικό άξονα της τεχνικογεωλογικής μελέτης:

- λεπτομερή βιβλιογραφική επισκόπηση (εργασίες γραφείου),
- εργασίες υπαίθρου
- και ιδιαίτερα στη χρήση κατάλληλων λογισμικών για τη δημιουργία καθώς και για την επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων συννέφους σημείων.

Αναλυτικότερα, μέσω της βιβλιογραφικής επισκόπησης συγκεντρώθηκαν τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία σχετικά κάποιες βασικές έννοιες στο 2^ο Κεφάλαιο και με τη περιοχή μελέτης που παρουσιάζονται στο

3^ο Κεφάλαιο καθώς και το απαραίτητο υπόβαθρο περί των προϋπαρχόντων συστημάτων αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης για πρανή έναντι φαινομένων καταπτώσεων βράχων, όπως παρουσιάζεται στο 7^ο Κεφάλαιο, έτσι ώστε να δημιουργηθεί και να προταθεί το συγκεκριμένο σύστημα που εφαρμόστηκε στη παρούσα εργασία.

Κατά την υπαίθρια έρευνα στη περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκε εκτενής τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση. Πάρθηκαν μετρήσεις σχετικά με:

- τον προσανατολισμό των τεκτονικών στοιχείων,
- των φυσικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών (τραχύτητα, αντοχή τοιχωμάτων, απόσταση τοιχωμάτων, βαθμός αποσάθρωσης, υλικό πλήρωσης και εμμονή).

Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε και η πτήση UAV τύπου DJI Phantom 4 Pro V2.0 από την οποία και πάρθηκαν 362 φωτογραφίες συνολικά.

Εκτός από την τεχνικογεωλογική πληροφορία που αντλήθηκε από βιβλιογραφικές πηγές σε συνδυασμό με υπαίθριες παρατηρήσεις, όπως καθίσταται σαφές, στην παρακάτω μελέτη έγινε εκτενής χρήση πληθώρας διαφορετικών λογισμικών με στόχο την όσο των δυνατών ακριβέστερη και πληρέστερη εκμετάλλευση των καινοτόμων εργαλείων τηλεανίχνευσης. Συγκεκριμένα στη παρακάτω μελέτη συνολικά τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: Pix4DMapper (Pix4D, Switzerland), CloudCompare v2.11.1 Anogia (Telecom ParisTech and the R&D division of EDF), Discontinuity Set Extractor software (Riquelme et al., 2014) Dips v.7 (RocScience Inc., Ontario Canada), RocFall v.8 (RocScience Inc., Ontario Canada), RocPlane (RocScience Inc., Ontario Canada), CorelDRAW X8 (Corel Corporation, Ottawa, Ontario Canada). Η χρήση των παραπάνω έγινε σύμφωνα με άδειες που μας χορηγήθηκαν από το Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ) και συγκεκριμένα από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας.

1.5 Διάρθρωση κεφαλαίων

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της μελέτης, πραγματοποιείται μία πρώτη εισαγωγή στην τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη έρευνα και καθορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και η σημασία της, η ακολουθητέα μεθοδολογία και τα βασικά εργαλεία έρευνας.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται κάποιες σημαντικές έννοιες και ορισμοί για την παρούσα μελέτη, έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολα κατανοητές οι αναλύσεις οι σημαντικότητας των αποτελεσμάτων τους.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται με λεπτομέρεια οι γεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Οι γεωλογικές συνθήκες περιλαμβάνουν τα απαραίτητα λιθολογικά, τεκτονικά, υδρογεωλογικά και σεισμολογικά δεδομένα.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της μεθόδου της φωτογραμμετρίας με τη χρήση UAV και τα αποτελέσματα που μπορούν να προκύψουν από αυτή.

Στα Κεφάλαια 5 γίνεται αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας – μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στη παρούσα εργασία, από το σημείο συλλογής των δεδομένων μέχρι και την τελική επεξεργασία τους.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω μεθοδολογίας για τη περιοχή μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται μία εισαγωγή στα συστήματα αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης, παρουσιάζεται το επιστημονικό υπόβαθρο αυτών, αναπτύσσεται η μεθοδολογία σύνταξης του προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης της παρούσας εργασίας και τέλος πραγματοποιείται η εφαρμογή του στη περιοχή μελέτης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας έρευνας, αναλύονται τα πλεονεκτήματα αλλά και οι περιορισμοί της παρούσας μεθοδολογίας και προτείνονται οι απαραίτητες περιοχές για περεταίρω έρευνα.

2. ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Πριν την ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, κρίθηκε απαραίτητη η αποσαφήνιση και η περιγραφή των εννοιών και των όρων που αποτελούν τον κύριο άξονα της. Μέσω του παρόντος κεφαλαίου δίνεται η δυνατότητα καλύτερης κατανόησης της συλλογιστικής πορείας που ακολουθήθηκε για τη παρούσα μελέτη και γίνεται πιο εύκολη η ορθή η αντίληψη των αποτελεσμάτων αυτής καθώς και τη σημασία τους.

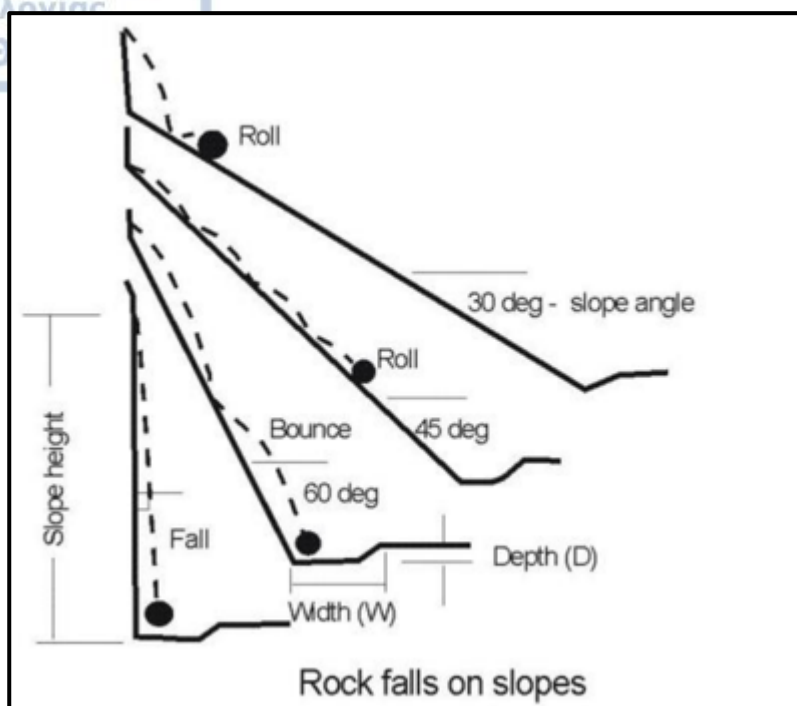
Οι έννοιες που θεωρήθηκε απαραίτητο να αναλυθούν είναι οι όροι βραχοκατάπτωση (rockfall), επιδεκτικότητα (susceptibility), επικινδυνότητα (hazard) και διακινδύνευση (risk). Οι ορισμοί και η ανάλυση των παραπάνω εννοιών λήφθηκαν από μια εκτενή λίστα ξενόγλωσσας βιβλιογραφίας και μεταφράστηκαν από το συντάκτη της παρούσας εργασίας προσπαθώντας να μεταφερθεί όσο το δυνατόν πληρέστερη η πληροφορία στην ελληνική γλώσσα.

2.1 Βραχοκατάπτωση (rockfall)

Κατά τον Varnes (1978), ως κατάπτωση βράχων (rockfall), ορίζεται η αποκόλληση μάζας (κυρίως πετρώματος αλλά και πολύ συνεκτικού εδάφους), ποικίλων διαστάσεων και μεγέθους, από ένα απότομο εδαφικό ή βραχώδες πρηνές, κατά μήκος μιας επιφάνειας, χωρίς καθόλου ή με ελάχιστη διατμητική αντοχή και η πτώση πραγματοποιείται λόγω βαρύτητας υπό τη μορφή ελεύθερης πτώσης (free falling), αναπήδησης (bouncing) ή κύλισης (rolling) στην επιφάνεια του πρηνούς. Η μετακίνηση αυτή είναι εξαιρετικά γρήγορη και είναι δυνατόν τόσο να έχουν προηγηθεί αυτής μικρότερες μετακινήσεις που οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα όσο και να μην παρατηρήθηκαν πρόδρομες μετακινήσεις μικρότερης δυναμικής.

Η κινηματική πορεία του φαινομένου όπως αναλύθηκε και προηγουμένως διακρίνεται σε τρεις (3) κύριες φάσεις. Αρχικά, όταν ένα τέμαχος βράχου αποκολληθεί από το σύνολο της βραχώμαζας, η κίνηση του εξαρτάται ολοκληρωτικά από την βαρύτητα και με βάση την επιστήμη της φυσικής καλείται ως ελεύθερη πτώση. Η κίνηση αυτή χαρακτηρίζεται ως συνεχώς επιταχυνόμενη έως ότου το τέμαχος έρθει σε επαφή/προσκρούσει σε κάποιο σημείο με το πρηνές όπου αποσπάστηκε σε πρότερο χρόνο. Η κρούση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της κινητικής κατάστασης του τεμάχους. Η μεταβολή αυτή μπορεί να είναι είτε σε αναπήδηση, είτε σε κύλιση ή ακόμα και σε νέα ελεύθερη πτώση μετά από αναπήδηση.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η τροχιά που θα ακολουθήσει το αποκολλημένο τέμαχος από ένα πρηνές είναι συνδεδεμένη άρρητα με τη κλίση που έχει το αρχικό πρηνές από όπου και αποσπάστηκε. Ο πρώτος που επισήμανε αυτή τη συσχέτιση ήταν ο Ritchie (1963). Οι καταπτώσεις βράχων πραγματοποιούνται σε πρηνή των οποίων η κλίση (ύψος πρηνούς: βάση πρηνούς) κυμαίνεται από 4:1 έως 1:1. Σύμφωνα με τον Ritchie (1963), για κλίση $> 4:1$ πραγματοποιείται ελεύθερη πτώση (free falling) των τεμαχών ενώ με τη μείωση της κλίσης ($45^\circ - 60^\circ$), τα τεμάχια αναπηδούν (bouncing) και τέλος ($\leq 45^\circ$) αυτά κυλούν (rolling).

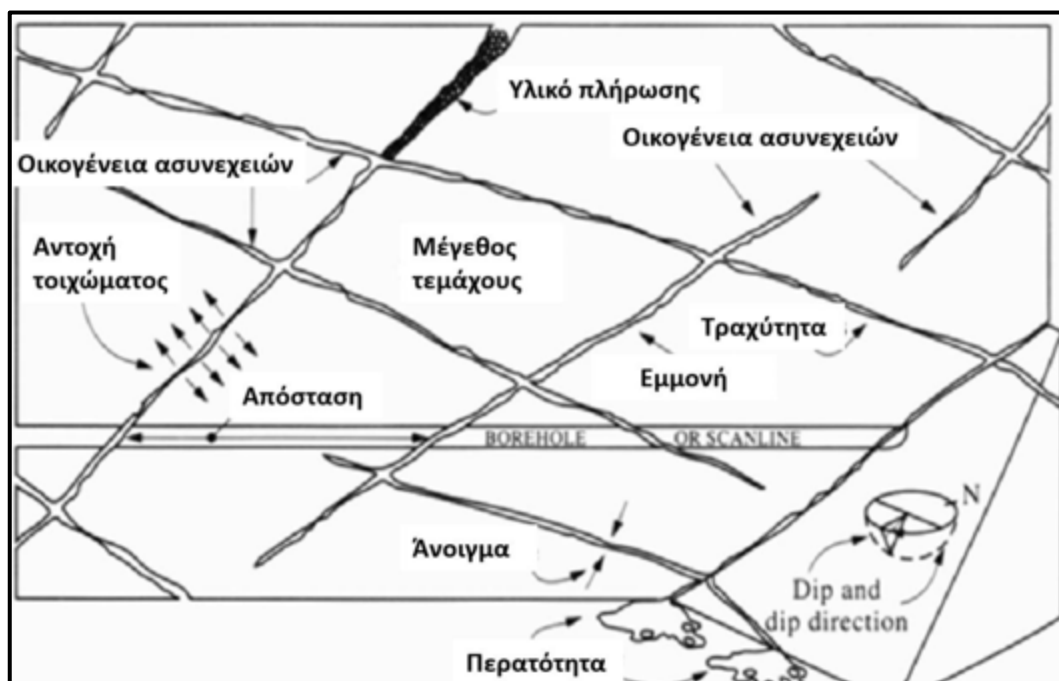


Σχήμα 2. Συσχετισμός της δυνητικής τροχιάς αποκολλημένου βραχοτεμάχους με τη κλίση του πρανούς (Ritchie, 1963).

Ο καθορισμός του τύπου της τροχιάς όμως δεν κρίνεται μόνο από το στοιχείο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πρανού, αλλά αποτελεί μία πολυπαραγοντική διαδικασία. Σύμφωνα με πιο πρόσφατες μελέτες, εκτός της γεωμετρίας του πρανού, πολύ σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της τροχιάς ενός τεμάχους κατέχουν τα φυσικά χαρακτηριστικά τόσο του ίδιου όσο και του υλικού στο οποίο προσκρούει. Σχετικά με το ίδιο το τέμαχος που αποκολλήθηκε, τα χαρακτηριστικά που ορίζουν τη μορφή της τροχιάς του είναι: η αντοχή, η τραχύτητα, η ελαστικότητα, η πυκνότητα, το μέγεθος και το σχήμα του. Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας που θα προσκρούσει το τέμαχος και καθορίζουν τη τροχιά του περιγράφονται μέσω δύο (2) συντελεστών καθώς επίσης και τα επίπεδα αποσάθρωσης και βλάστησης που παρατηρούνται στην υπό μελέτη πλαγιά. Οι συντελεστές αυτοί είναι ο συντελεστής αναπήδησης (Coefficient Of Restitution – COR) καθώς και ο συντελεστής κύλισης (μ_0). Όπως γίνεται κατανοητό οι συντελεστές αυτοί ποικίλουν ανάλογα το υλικό και ο προσδιορισμός τους (είτε βιβλιογραφικός είτε άμεσος) αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας γύρω από φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων.

Αφότου αναλύθηκε εκτενώς η κινητική κατάσταση του φαινομένου και οι μεταβολές σε αυτή που αναμένονται, κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί και ποια κριτήρια πρέπει να ικανοποιούνται για να προκληθεί το φαινόμενο των καταπτώσεων βράχων και ποιες καταστάσεις μπορούν να αποτελέσουν την αιτία πρόκλησης αυτού.

Αρχικά, η κύρια προϋπόθεση, που πρέπει να ικανοποιηθεί για την πραγμάτωση ενός γεγονότος κατάπτωσης βράχων, είναι η δυνατότητα μετακίνησής του, μετά την αποκόλλησή του, σε χαμηλότερες υψομετρικές θέσεις με τη δράση της βαρύτητας, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως. Άρα η δυνατότητα μετακίνησης του ελέγχεται εξολοκλήρου από το ανάγλυφο της εκάστοτε περιοχής. Αναφορικά με την ικανότητα ενός τεμάχους να αποσπαστεί από τη βραχώμαζα, αυτή ελέγχεται σχεδόν εξολοκλήρου από το καθεστώς και τις ιδιότητες των ασυνεχειών στη βραχώμαζα και δευτερευόντως από την ίδια τη "φύση" (μηχανικά χαρακτηριστικά) του άρρηκτου βράχου, όπως η αντοχή του και η επιδεκτικότητα του στην αποσάθρωση. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ίδιου του πρηνούς σε συνδυασμό με αυτά των κύριων οικογενειών ασυνεχειών που "διέπουν" την εκάστοτε βραχώμαζα είναι αυτά που ελέγχουν το φαινόμενο, καθιστώντας το έτσι ως αμιγώς ανισότροπο. Εκτός από την ίδια την γεωμετρία (διεύθυνση και γωνία κλίσης) των ασυνεχειών, σημαντικό ρόλο φέρουν και συγκεκριμένοι παράγοντες που αναλύουν και καθορίζουν τις συνθήκες που διέπουν τις ασυνέχειες της βραχώμαζας. Αυτοί οι παράγοντες, εκτός του προσανατολισμού τους είναι: η εμμονή (persistence), η τραχύτητα (roughness), η διατμητική αντοχή (shear strength) των τοιχωμάτων της, η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων της εκάστοτε οικογένειας (spacing), το άνοιγμα (aperture) και τέλος η παρουσία ή όχι υλικού πλήρωσης (filling material) (N. Barton and V. Choubey, 1977).



Σχήμα 3. Παρουσίαση των βασικών παραμέτρων – χαρακτηριστικών που καθορίζουν της ασυνέχειες σε μία βραχώμαζα (Hudson, 1989)

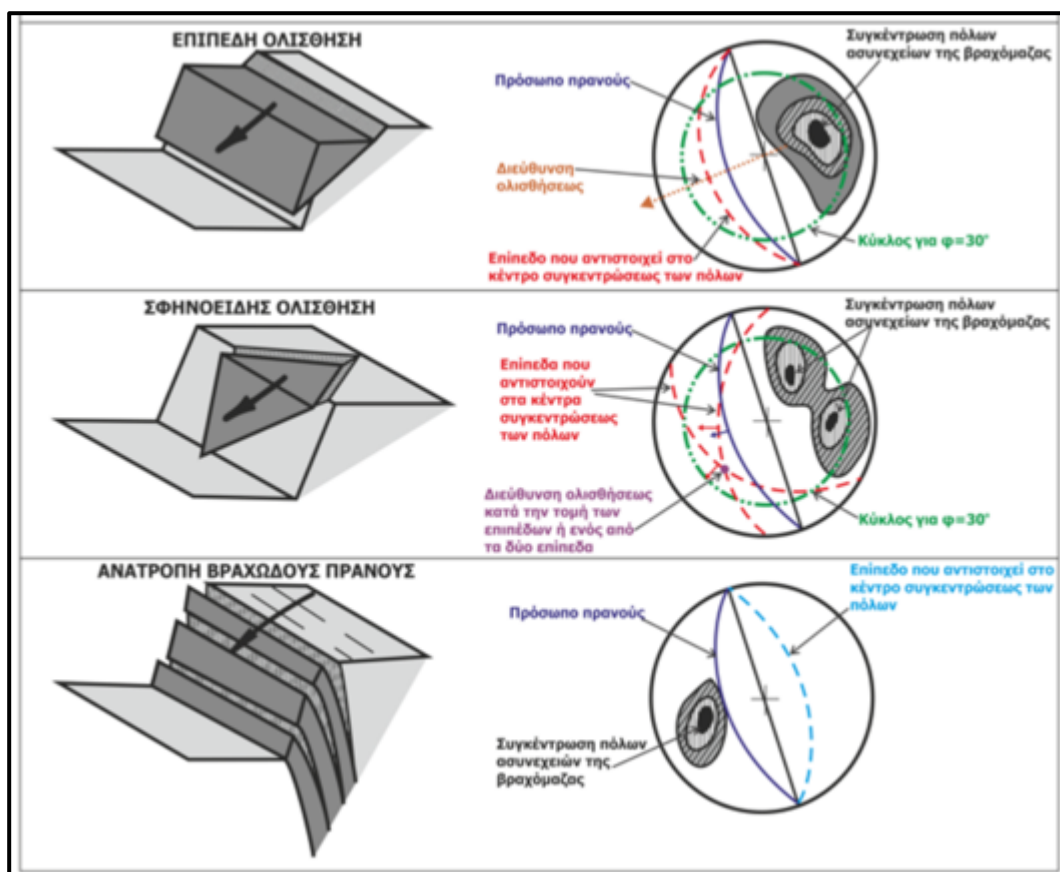
Για να πραγματοποιηθεί το φαινόμενο των καταπτώσεων βράχων, ως ανισότροπο γεγονός (ελέγχεται από τις ασυνέχειες), θα πρέπει να ικανοποιούνται κάποιοι συγκεκριμένοι γεωμετρικοί συνδυασμοί μεταξύ του πρηνούς και των επισφαλών ασυνεχειών. Οι πιθανοί συνδυασμοί αυτοί είναι τρεις (3) και δίνουν τα αντίστοιχα είδη αστοχίας: επίπεδη ολίσθηση (plane failure), σφηνοειδής ολίσθηση (wedge failure) και ανατροπή τεμάχους (toppling failure).

Για να θεωρηθεί μία αστοχία ως επίπεδη ολίσθηση (plane failure), τότε θα πρέπει η αστοχία να πραγματοποιείται κατά μήκος της επιφάνειας μίας μόνο ασυνέχειας. Η επιφάνεια αυτή πρέπει να έχει παρόμοια διεύθυνση κλίσης (dip direction) με αυτή του πρηνούς ($\pm 20^\circ$) και ταυτόχρονα η γωνία κλίσης της (dip) να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της, και μικρότερη από την αντίστοιχη γωνία κλίσης του πρηνούς.

Αντίθετα, ως σφηνοειδής ολίσθηση (wedge failure) περιγράφεται η αστοχία που προκύπτει από τη τομή δύο διαφορετικών ασυνεχειών. Η επιφάνεια τομής των δύο ασυνεχειών πρέπει να έχει παρόμοια διεύθυνση κλίσης (dip direction) με αυτή του πρηνούς ($\pm 20^\circ$) και ταυτόχρονα η γωνία κλίσης (dip) της

ακμής τομής των δύο ασυνεχειών να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της, και μικρότερη από την αντίστοιχη γωνία κλίσης του πρανούς. Η ολίσθηση στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο κατά μήκος της ακμής τομής των δύο συμμετεχόντων ασυνεχειών όσο και κατά μήκος μία εκ' των δύο.

Τέλος, ως ανατροπή τεμάχους (toppling failure) περιγράφεται η αστοχία που προκύπτει πάνω σε μία επιφάνεια ασυνέχειας. Η επιφάνεια αυτή πρέπει να έχει διεύθυνση κλίσης (dip direction) που να διαφέρει κατά 180° με την αντίστοιχη του πρανού ($\pm 20^\circ$) και ταυτόχρονα η γωνία κλίσης της (dip) να έχει πολύ μεγάλη, σχεδόν κατακόρυφη γωνία κλίσης ($\leq 70^\circ$). Η ανατροπή του τεμάχους μπορεί να είναι είτε άμεση (direct toppling) είτε εφελκυστική (flexural toppling).



Σχήμα 4. Οι κύριοι μηχανισμοί ανισότροπης αστοχίας ενός πρανού. (Μαρίνος, 2010)

Αφότου ικανοποιηθούν όλες οι παραπάνω προϋποθέσεις, το κριτήριο για το αν θα πραγματοποιηθεί ή όχι μία δυνητική βραχοκατάπτωση (όπως και κάθε είδους αστοχία) είναι η τιμή ενός πού σημαντικού συντελεστή, του συντελεστή ασφαλείας (Safety Factor – SF). Ο συντελεστής ασφαλείας εκφράζει το πηλίκο του αθροίσματος των δυνάμεων που ευνοούν – ωθούν το τέμαχος στην αστοχία, προς το άθροισμα αυτών που βοηθούν στη συγκράτηση του (φέρουν αντίθετο διάνυσμα προς τη φορά κίνησής του). Οι τιμές του συντελεστή είναι αυτές που καθορίζουν εάν τελικά μπορεί να επέλθει αστοχία και αποτελούν τον κύριο άξονα σχεδιασμού των κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης–αντιστήριξης για την εκάστοτε περιοχή μελέτης.

$$SF = \frac{\Sigma F_{Resisting}}{\Sigma F_{Driving}}$$

Αναφορικά με τα αίτια πρόκλησης (triggering factors) ενός βραχοκαταπτωτικού γεγονότος, σύμφωνα με τον Hoek (2006), είναι κάποιος παράγοντας (βιολογικός, κλιματικός, φυσικός, ανθρωπογενής) που επιφέρει μεταβολές στο εντατικό πεδίο της βραχώμαζας. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να σχετίζονται είτε με την απόπλυση συγκολλητικού υλικού από την επιφάνεια των ασυνεχειών λόγω δράσης του νερού, είτε λόγω αύξησης της πίεσης των πόρων μετά από αυξημένες ποσότητες κατακρημνισμάτων.

Επιπλέον, η ίδια η φύση του πετρώματος μπορεί να είναι επισφαλής σε τέτοιες μεταβολές, σε συνδυασμό με κλιματικούς παράγοντες, δημιουργώντας φαινόμενα αποσάθρωσης στη βραχώμαζα. Επίσης, η γλωρίδα που μία περιοχή μπορεί να επηρεάσει άμεσα το εντατικό πεδίο της βραχώμαζας με την ανάπτυξη τάσεων λόγω της δράσης του ριζικού συστήματος. Επιρροή στο εντατικό πεδίο επίσης μπορεί να φέρει κάποιο σεισμικό γεγονός που δημιουργήθηκε από τη δραστηριοποίηση κάποιου ρήγματος. Τέλος, σημαντική είναι και η συμβολή των ανθρώπων στη διατάραξη του εντατικού πεδίο σε μία βραχώμαζα. Συγκεκριμένα οι θέσεις όπου συντελείται κάποιο τεχνικό έργο, φέρουν πολύ μεγαλύτερες πιθανότητες για την εκδήλωση κάποιου γεγονότος καταπτώσεις βράχων, καθώς οι διαδικασίες που αναμένονται σε μία τέτοια θέση επιφέρουν σημαντικές διαταράξεις στο εντατικό πεδίο.

Σύμφωνα με τον Hoek (2000), μπορεί τα αποτελέσματα των φαινομένων βραχοκαταπτώσεων να έχουν σαφώς μικρότερο οικονομικό αντίκτυπο στους οικισμούς που επηρεάζουν, σε σχέση με μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις, αλλά λόγω των ραγδαίων ταχυτήτων που εκδηλώνονται οι καταπτώσεις, το μέγεθος θνησιμότητας που σχετίζεται με αυτές είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για άλλου είδους αστοχίες (της ίδιας τάξης μεγέθους). Επομένως καθίσταται σαφές πως οι βραχοκαταπτώσεις συνιστούν έναν από τους πιο ισχυρούς φυσικούς κινδύνους, ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές, και φέρουν την ικανότητα να μετατραπούν σε καταστροφικά γεγονότα σε περίπτωση που εκδηλωθούν κοντά στο ανθρωπογενές περιβάλλον.



Εικόνα 3. Τυπική εικόνα εκτεταμένης βραχοκατάπτωσης από θέση του αυτοκινητόδρομου Sea to Sky στο Καναδά (τύπος Καναδά).

2.2 Επιδεκτικότητα (susceptibility)

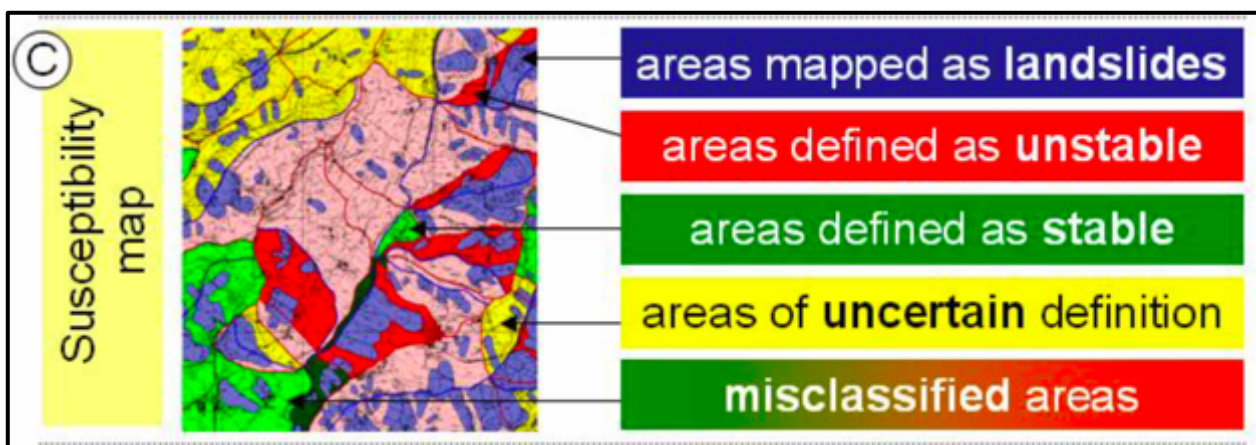
Με τον όρο επιδεκτικότητα (susceptibility) για κατολισθητικά φαινόμενα, σύμφωνα με τον Brabb (1984), περιγράφεται η χωρική πιθανότητα εκδήλωσης μίας αστοχία πρανούς σε δεδομένες τοπικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές προκύπτουν από τον συνδυασμό των γεωλογικών, μορφολογικών, τεχνικογεωλογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων που ελέγχουν την εμφάνιση του φαινομένου σε κάθε περιοχή. Μέσα από τον όρο της επιδεκτικότητας εκφράζεται ουσιαστικά η πιθανολογική πρόβλεψη της τοποθεσίας πραγματοποίησης ενός κατολισθητικού φαινομένου (π.χ. μία βραχοκατάπτωση) και υπολογίζεται η σπουδαιότητα αυτού (Guzzetti et al. 1999; Guzzetti 2005, 2006a, b; Rossi et al. 2010; Volkwein et al. 2011).

Γενικά μέσω του όρου της επιδεκτικότητας για κατολισθήσεις, δεν παρέχεται καμία πληροφορία τόσο σε σχέση με την χρονική πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου, όσο και με το μέγεθος της δυνητικής αστοχίας. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό όμως και με την επιδεκτικότητα, συντελούν την έννοια της επικινδυνότητας (hazard) που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι αξιολόγησης της επιδεκτικότητας για κατολισθητικά γεγονότα. Οι μέθοδοι αυτοί μπορεί να οδηγούν άμεσα ή έμμεσα, σε ποσοτικές ή ποιοτικές εκτιμήσεις της επιδεκτικότητας. Γενικά σχεδόν όλες όμως μπορούν να συνοψιστούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες ανάλογα με την ακολουθείσα μεθοδολογία της εκάστοτε προσέγγισης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αξιολόγηση της επιδεκτικότητας για κατολισθητικά φαινόμενα σε μία περιοχή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω μεθόδους:

- γεωμορφολογική αποτύπωση, με τη χρήση ποιοτικών και άμεσων μεθόδων (Reichenbach et al. 2005),
- εμπειρικά και ημί – εμπειρικά συστήματα αξιολόγησης (Pierson et al. 1990; Cancelli and Crosta 1993; Rouiller and Marro 1997; Crosta and Locatelli 1999; Mazzoccola and Sciesa 2000; Budetta 2004; Fernandez-Hernandez et al. 2012),
- στατιστικές ή πιθανολογικές αναλύσεις (Marquinez et al. 2003; Frattini et al. 2008),
- ντετερμινιστικές μέθοδοι ή αναλύσεις προσομοίωσης του μηχανισμού και της διαδικασίας (Jaboyedoff et al. 2004; Guenther et al. 2004; Derron et al. 2005),

Τα αποτελέσματα από τις παραπάνω μεθόδους εκφράζονται μέσω χαρτών επιδεκτικότητας έναντι κατολισθητικών φαινομένων, σε κλίμακα ανάλογη με τη μελέτη που πραγματοποιείται.



Σχήμα 5. Παράδειγμα επιπέδων πληροφορίας σε έναν τυπικό χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων (Guzzetti, 2005).

2.3 Επικινδυνότητα (hazard)

Στη σχετική με τις βραχοκαταπτώσεις ορολογία, η έννοια της επικινδυνότητας (hazard) αναφέρεται στη χωρική πιθανότητα εκδήλωσης ενός καταστροφικού φαινομένου (π.χ. βραχοκατάπτωσης) συγκεκριμένης έντασης (μέγεθος) ή σφοδρότητας (ενέργεια) σε μία ήδη προκαθορισμένη χρονική περίοδο σε μια ορισμένη θέση ενδιαφέροντος (Varnes 1984; Fell 1994; Fell and Hartford 1997; Guzzetti et al. 1999; Crosta et al. 2001). Όπως διαφαίνεται, στο παραπάνω ορισμό περιλαμβάνονται οι έννοιες του χώρου (τοποθεσία εκδήλωσης του φαινομένου βραχοκατάπτωσης), του χρόνου (συχνότητα ή περίοδος επανάληψης) και του μεγέθους ή της σφοδρότητας του. Επομένως, η απλούστερη σχηματική απεικόνιση (χάρτης) της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων θα πρέπει να περιγράφει την πιθανότητα εκδήλωσης ενός φαινομένου συγκεκριμένου μεγέθους σε μία ορισμένη περιοχή μελέτης (Crosta and Agliardi 2003).

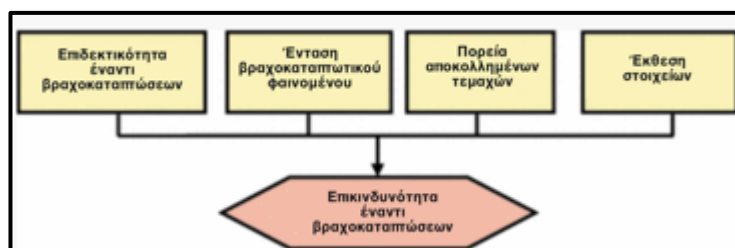
Σύμφωνα με τους Jaboyedoff et al. (2001), Crosta and Agliardi (2003), Jaboyedoff et al. (2005) και Volkwein et al. (2011), η επικινδυνότητα έναντι βραχοκαταπτώσεων τείνει να εξαρτάται από τρεις (3) κυρίως παράγοντες. Αυτοί είναι:

- η πιθανότητα αποκόλλησης τεμαχών από μία συγκεκριμένη βραχώμαζα: η πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκατάπτωσης ενός συγκεκριμένου μεγέθους (π.χ. μέγεθος τεμαχών) που προκύπτει από ένα συγκεκριμένο σημείο – πηγή, μέσα σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η συγκεκριμένη παράμετρος περιέχει τόσο τη χωρική πιθανότητα εκδήλωσης, που εκφράζεται μέσω της επιδεκτικότητας, όσο την χρονική πιθανότητα αστοχίας.
- Η εξάπλωση του φαινομένου κατά μήκος της πλαγιάς που πραγματοποιείται: ακολουθείσες τροχιές και μέγιστη απόσταση διαδρομής – διασποράς των αποκολλημένων βραχοτεμαχών.
- Η ένταση του βραχοκαταπτωτικού φαινομένου (π.χ. κινητική ενέργεια).

Επομένως, οποιαδήποτε μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων θα πρέπει να φέρει στοιχεία σχετικά με τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος και κατά μήκος κάθε πιθανής διαδρομής – τροχιάς μπορεί να διαγράψουν τα επισφαλή τεμάχια. Στη πραγματικότητα όμως κάτι τέτοιο θεωρείται πολύ δύσκολο και σε πολύ λίγες εκτιμήσεις επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων η μεθοδολογία που ακολουθείται ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια.

Γενικά η εκτίμηση της επικινδυνότητας εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων μπορεί και αυτή να υπολογιστεί όπως και η επιδεκτικότητα τόσο με ποσοτικές όσο και με ποιοτικές μεθόδους. Η διαφορά των δύο έγκειται πρωταρχικά στα διαθέσιμα προς εξέταση δεδομένα αλλά και στα αποτελέσματα. Μπορεί με μία πρώτη ανάγνωση η ποσοτική προσέγγιση να φαίνεται ως η βέλτιστη καθώς λογικά θα έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο άμεση εφαρμογή σε σχέση με την ποιοτική αλλά κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Αναλυτικότερα για τις διαφορές, τις εφαρμογές καθώς και τη σημασία της καθεμίας εξ' αυτών γίνεται παρουσίαση στο 7^ο Κεφάλαιο μαζί και με τις ποσοτικές και ποιοτικές μεθόδους εκτίμησης της διακινδύνευσης.

Όπως προαναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση τόσο της επικινδυνότητας όσο και της διακινδύνευσης στη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας είναι μια ποιοτική προσέγγιση με τη πρόταση ενός νέου συστήματος αξιολόγησης το οποίο προσπαθεί να αξιοποιήσει πρωτίστως ποσοτικά δεδομένα. Με αυτή τη προσέγγιση το συγκεκριμένο σύστημα θα μπορούσε δυνητικά να θεωρηθεί και ως ημί – ποσοτικό, αντί για εξολοκλήρου ποιοτικό.



Σχήμα 6. Διάγραμμα των παραγόντων που συντελούν στην επικινδυνότητα έναντι βραχοκαταπτώσεων (Biswajeet et al., 2017, τροποποιημένο)

2.4 Διακινδύνευση (risk)

Ο όρος διακινδύνευση (risk), σχετικά με τις βραχοκαταπτώσεις, αποτελεί τον πιο συνολικό όρο σε σχέση με την επιδεκτικότητα και την επικινδυνότητα καθώς του εμπεριέχει πλήρως στον ορισμό της συνδυάζοντάς τους με τον ανθρώπινο παράγοντα. Συγκεκριμένα, ως διακινδύνευση έναντι βραχοκαταπτώσεων σε μία περιοχή, καλείται το μέτρο της πιθανότητας εκδήλωσης ενός γεγονότος και το μέτρο των αρνητικών συνεπειών του (επιπτώσεις) στο ανθρωπογενές περιβάλλον, την υγεία και τη περιουσία των ανθρώπων (Hung et al. 1999; Zhang et al. 2004; Corominas et al. 2005; Fell et al. 2008). Με άλλα λόγια, σύμφωνα με τον Corominas (2014) η διακινδύνευση αποτελείται από τρία (3) κύρια δομικά στοιχεία:

- i. την επικινδυνότητα (hazard),
- ii. την έκθεση ενός στοιχείου σε κίνδυνο (exposure)
- iii. και την τρωτότητα (vulnerability) του.

Τα στοιχεία αυτά φέρουν τόσο χωρικές όσο και μη χωρικές πληροφορίες.

Η επικινδυνότητα (hazard) αναλύθηκε ενδελεχώς στις προηγούμενες παραγράφους και αναφέρεται στη χωρική πιθανότητα εκδήλωσης ενός καταστροφικού φαινομένου (π.χ. βραχοκατάπτωση) συγκεκριμένης έντασης (μέγεθος) ή σφοδρότητας (ενέργεια) σε μία ήδη προκαθορισμένη χρονική περίοδο σε μια ορισμένη θέση ενδιαφέροντος.

Η έκθεση ενός στοιχείου σε κίνδυνο (exposure) δίνεται από τις χωρικές και χρονικές πιθανότητες της τοποθέτησης ενός στοιχείου εντός της άμεσα επηρεαζόμενης περιοχής από το δυνητική απειλή (π.χ. μια βραχοκατάπτωση) κατά τη στιγμή πρόκλησής της. Η θέση του στοιχείου αυτού στο χώρο σε συνδυασμό με το καθορισμό της πορείας του αποκολλημένου τεμάχους προσδιορίζουν τη πιθανότητα να επηρεάσει όντως το συγκεκριμένο τεμάχος το συγκεκριμένο στοιχείο (probability of reach). Το ενδεχόμενο αυτό ποσοτικοποιεί ουσιαστικά τη σχετική συχνότητα των τεμαχών που δύναται να φτάσουν σε μία συγκεκριμένη θέση μετά τη πραγματοποίηση της αστοχίας.

Ως τρωτότητα (vulnerability) καλείται ο αναμενόμενος βαθμός απωλειών που αναμένονται μετά την πυροδότηση μίας φυσικής καταστροφής (π.χ. βραχοκατάπτωση). Η τρωτότητα βαθμονομείται μεταξύ 0 (καμία απώλεια) και 1 (ολική απώλεια). Ο όρος αυτός εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του στοιχείου που βρίσκεται σε κίνδυνο όσο και από τη σφοδρότητα του φυσικού καταστροφικού φαινομένου που αλληλοεπιδρά μαζί του. Σύμφωνα με την Ferrari (2016), η τρωτότητα μπορεί να διακριθεί σε τέσσερις (4) κύριους τύπους:

- φυσική τρωτότητα (physical vulnerability): αναφέρεται σε κατασκευές και υποδομές,
- κοινωνική τρωτότητα (social vulnerability): αναφέρεται στις πληθυσμιακές ομάδες του πλανήτη,
- περιβαλλοντική τρωτότητα (environmental vulnerability): αναφέρεται στο φυσικό περιβάλλον,
- οικονομική τρωτότητα (economic vulnerability): αναφέρεται στις οικονομικές δραστηριότητες

Για την εκτίμηση της διακινδύνευσης σχετικά με βραχοκαταπτωτικά φαινόμενα, σύμφωνα με την Mavrouli (2011), το βασικό πλαίσιο δράσης περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Εκτίμηση επικινδυνότητας, περιλαμβάνοντας την εκτίμηση της σφοδρότητας, της πιθανότητας αστοχίας και τη δυνητική πορεία των αστοχούντων τεμαχών, κατά τη διάρκεια ενός πιθανού γεγονότος κατάπτωσης βράχων.
2. Ταυτοποίηση και επισήμανση των στοιχείων που βρίσκονται σε κίνδυνο, περιλαμβάνοντας τον υπολογισμό του πλήθους τους, της αξίας τους καθώς και το βαθμό έκθεσής τους.
3. Εκτίμηση τρωτότητας.
4. Υπολογισμός/εκτίμηση της διακινδύνευσης.

Μόλις καθοριστεί η διακινδύνευση για μία περιοχή μελέτης πρέπει να μετριάσει αν είναι δυνατόν. Ο μετριάσμος αυτός της διακινδύνευσης επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής των κατάλληλων τεχνικών και μέτρων διαχείρισης, με στόχο τη μείωση ή τον περιορισμό των δυσμενών επιπτώσεων από το προς εξέταση φυσικό κίνδυνο καθώς και τα συνοδά γεγονότα αυτού (UNISDR, 2009).

Απλό μάτριξ διακινδύνευσης

Πιθανότητα	Συνέπειες		
	Αμελητέες	Μέτριες	Σημαντικές
Πολύ πιθανό			
Πιθανό			
Απίθανο			

Μεθοδολογία αντιμετώπισης

Μή ανεκτά επίπεδα διακινδύνευσης: Απαιτείται άμεση επέμβαση
Υψηλά επίπεδα διακινδύνευσης: Μείωση της διακινδύνευσης έως ότου αποδεκτή
Γενικά αποδεκτά επίπεδα διακινδύνευσης: Παρακολούθηση και εφαρμογή μέτρων μείωσης της διακινδύνευσης έως ότου αποδεκτή, όπου απαιτείται

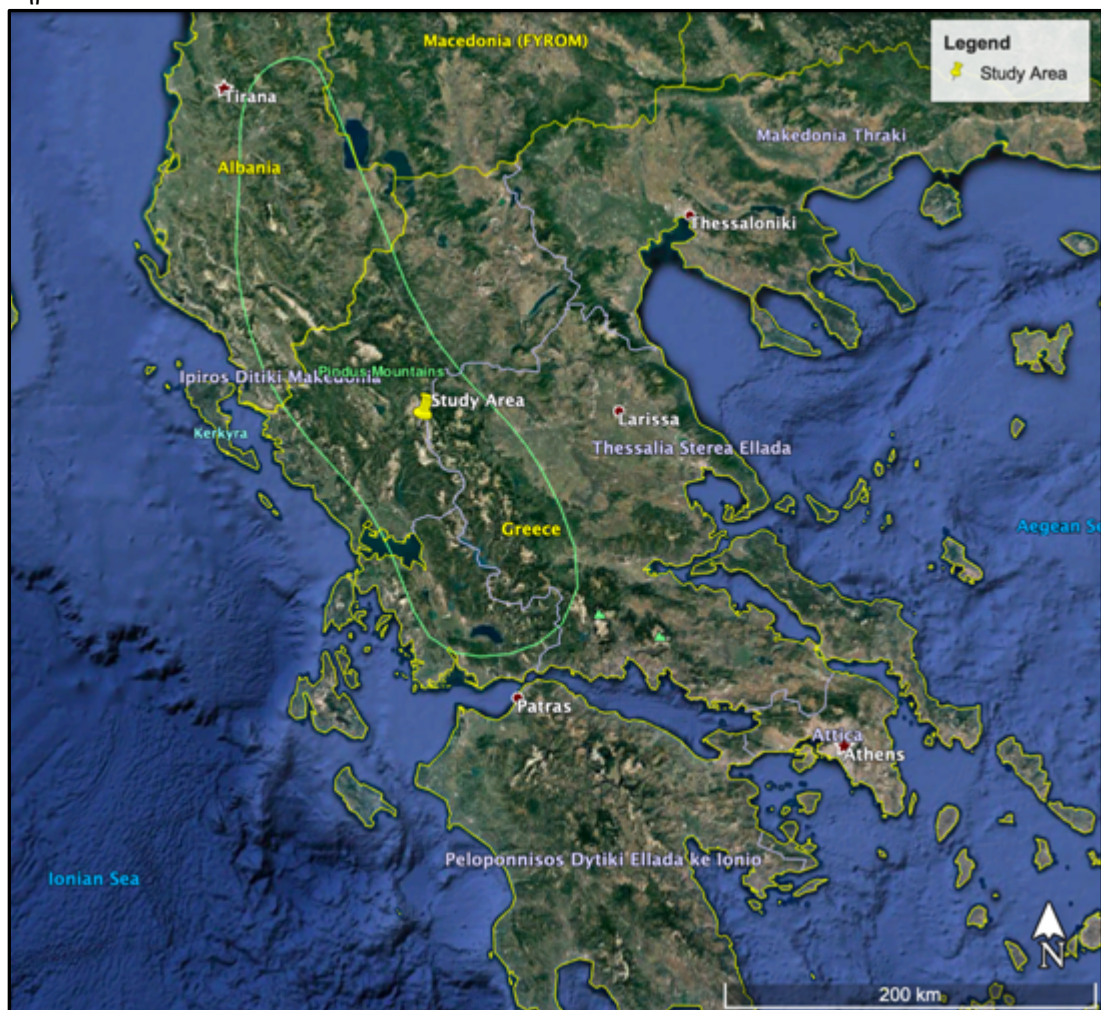
Σχήμα 7. Σχηματική απεικόνιση ενός απλού μάτριξ διακινδύνευσης (<https://r4risk.com.au/wp/our-services-2/qualitative-semi-quantitative-risk-assessment/>, τροποποιημένο).

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, η Ιερά Μονή Κηπίνας αποτελεί τη θέση μελέτης και έρευνας για τη παρούσα εργασία. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται νότια του χωριού Καλαρρύτες και γενικά εντάσσεται στην επικράτεια των Βόρειων Τζουμέρκα. Τα Τζουμέρκα (ή Αθαμανικά Όρη) αποτελούν τμήμα της οροσειράς της Πίνδου, η οποία εδράζεται στην περιοχή της Ηπείρου. Τα Τζουμέρκα βρίσκονται ανατολικά στο νότια τμήμα της οροσειράς της Πίνδου και υψώνονται μεταξύ των ποταμών Αχελώου και Αράχθου.

Η οροσειρά της Πίνδου αποτελεί τη μεγαλύτερη οροσειρά στον ελλαδικό χώρο, καθώς κυριαρχεί σχεδόν σε ολόκληρο το δυτικό τμήμα της χώρας και αποτελεί ουσιαστικά μία συνέχεια των Ιλλυρικών και Δαλματικών οροσειρών. Ως Πίνδος αναφέρεται το ορεινό τμήμα των νομών Γρεβενών, Ιωαννίνων και Τρικάλων και διακρίνεται σε δύο κύρια τμήματα, τη Βόρεια και τη Νότια Πίνδο. Ως βόρειο άκρο της μπορεί να θεωρηθεί το οροπέδιο της Κορυτσάς, στη νοτιοανατολική Αλβανία, ενώ το νότιό της θεωρείται ο Κορινθιακός κόλπος. Η οροσειρά της Πίνδου αποτελείται από μικρότερες οροσειρές και ορεινές μάζες οι οποίες χωρίζονται μεταξύ τους από βαθιές χαράδρες και κοιλάδες ποταμών. Τα σημαντικότερα βουνά που την αποτελούν είναι ο Σμόλικας, τα Τζουμέρκα (ή Αθαμανικά Όρη), ο Γράμμος, η Τύμφη (ή Όρος Γκαμήλα), τα Άγραφα και ο Λάκμος (ή Περιστέρι). Όλο αυτό το τεράστιο σύμπλεγμα βουνών, κορυφών, υψιπέδων, κοιλάδων και φαραγγιών, διασχίζει το ηπειρωτικό τμήμα της χώρας, με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και έχει μήκος που φτάνει έως και τα 230 km ενώ το μέγιστο πλάτος παρατηρείται στα 70 km.

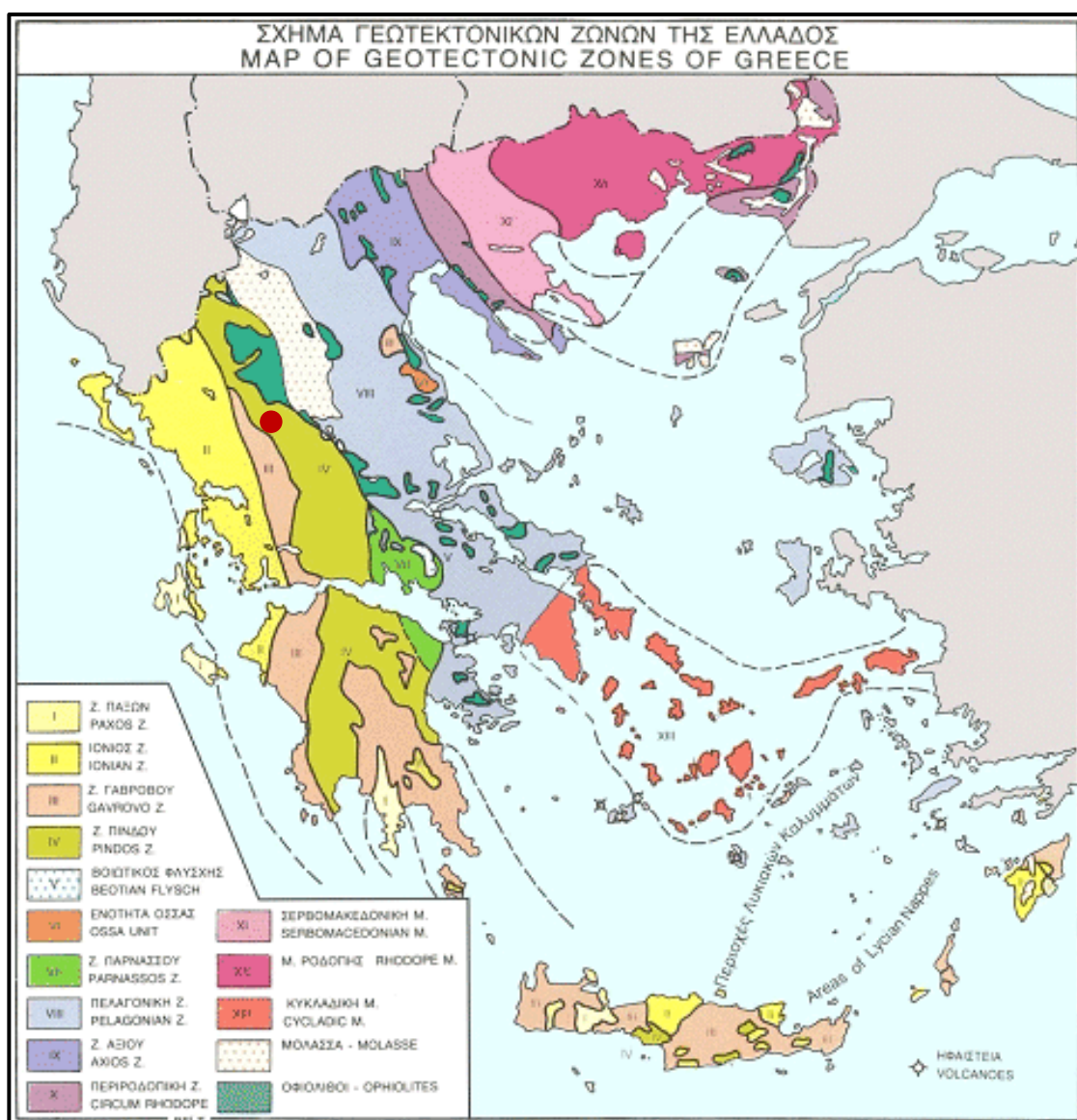


Σχήμα 8. Δορυφορική εικόνα όπου, επισημαίνεται η οροσειρά της Πίνδου και πως αυτή εκτείνεται τόσο στον ελλαδικό χώρο όσο και στην Αλβανία. Επίσης καθορίζεται και η θέση της περιοχής μελέτης. (Google Earth, 2021, τροποποιημένο).

Στη γεωλογική εικόνα της Ηπείρου συμμετέχουν κυρίως τέσσερις (4) διαφορετικές ζώνες, αυτές είναι:

- η Ιόνιος ζώνη
- η ζώνη Ωλονού – Πίνδου
- η Υποπελαγονική ζώνη (οφειολιθικό σύμπλεγμα)
- και η ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης.

Το μεγαλύτερο τμήμα της Ηπείρου καλύπτεται από την Ιόνιο ζώνη. Οι ανατολικές περιοχές της, όπου εντάσσεται η οροσειρά της Πίνδου και όπως είναι φυσικό και η ευρύτερη περιοχή μελέτης της παρούσα εργασίας, ανήκουν στη ζώνη Ωλονού – Πίνδου. Στους ορεινούς όγκους Γράμμου – Σμόλικα – Μετσόβου, παρατηρούνται τα οφειολιθικά πετρώματα της Υποπελαγονικής ζώνης. Τέλος η ζώνη Γαβρόβου παρατηρείται στο ομώνυμο όρος. Σύμφωνα με το Μουντράκη (2010), αν έπρεπε ένα χαρακτηριστικό της γεωλογική δομής της Ηπείρου να χαρακτηριστεί ως κύριο, αυτό θα ήταν η επαλληλία που παρουσιάζουν οι μεγάλες αντικλινικές και συγκλινικές δομές με γενική διεύθυνση των αξόνων ΒΔ – ΝΑ. Αυτή άλλωστε αποτελεί και τη τυπική διεύθυνση τόσο της Πίνδου, όπως προαναφέρθηκε, όσο και των Δειναρίδων.



Σχήμα 9. Σχηματική απεικόνιση των Ελληνίδων ζωνών, με κόκκινο κύκλο επισημαίνεται η περιοχή έρευνας (Μουντράκης, 2010).

Σύμφωνα με το Μουντράκη (2010), η τεκτοορογενετική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής μελέτης (της Πίνδου) ξεκίνησε με την ανάδυση των στρωμάτων της ζώνης Ωλονού – Πίνδου με την τελική ορογένεση και πτύχωση των στρωμάτων στο Ανώτερο Ηώκαινο – Κάτω Ολιγόκαινο. Η πτύχωση και γενικά η τελική ορογένεση έγινε λόγω της τελικής ηπειρωτικής σύγκρουσης της Απουλίας πλάκας με την αντίστοιχη της Ευρασίας. Από τη σύγκρουση αυτή προκλήθηκαν πολύ ισχυρές συμπιεστικές τάσεις.

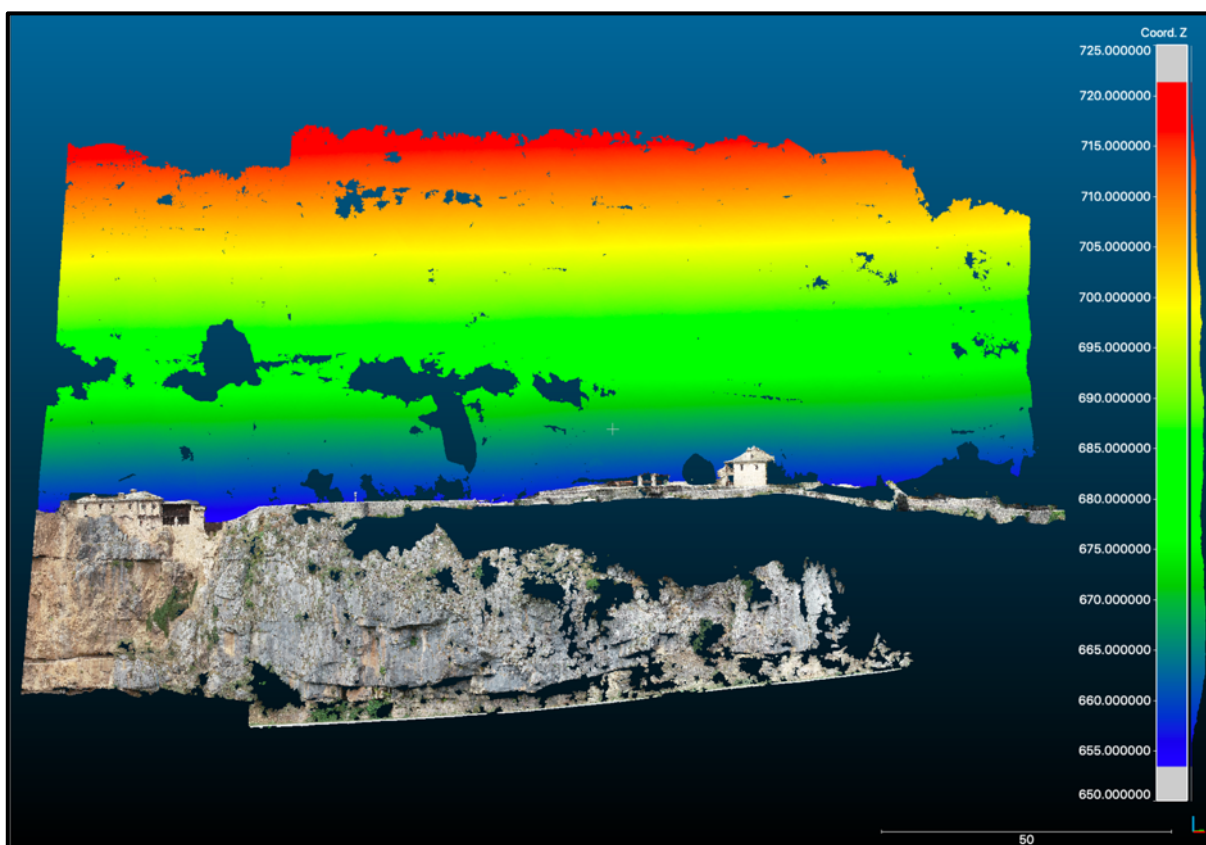
Μέσω της παραπάνω φάσης πτύχωσης, πραγματοποιήθηκε η εκ των δυτικών επώθηση της ζώνης Ωλονού – Πίνδου υπό τη μορφή τεκτονικού καλύμματος. Ταυτόχρονα συνέβη και η λεπίωση των στρωμάτων της. Τα τεκτονικά λείπια της ζώνης εμφανίζονται επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο με μία γενική διεύθυνση από ανατολικά προς δυτικά (με την ίδια διεύθυνση που πραγματοποιήθηκε η επώθηση της ζώνης), δημιουργώντας συνεχείς επαναλήψεις των στρωμάτων της ζώνης, και με την συσσώρευση τους οδηγούν σε ενός είδους διόγκωση του φλοιού. Η επώθηση αυτή του “Τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου” υλοποιήθηκε κυρίως πάνω στα πετρώματα της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης, και θεωρείται πως ανά θέσεις ξεπέρασε τα 100 km. Βέβαια σε ορισμένες περιοχές (π.χ. στη Βόρεια Πίνδο), όπως και στην ευρύτερη περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, τα Τζουμέρκα, το επωθημένο τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου υπερκάλυψε τη ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης και έτσι εμφανίζεται τοποθετημένο τεκτονικά απ’ ευθείας πάνω στην Ιόνιο ζώνη, ενώ παρατηρείται πλήρη απουσία ή σημαντικά περιορισμένη εμφάνιση (ως τεκτονικά παράθυρα) της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης.

Υπερκείμενα της ζώνης Ωλονού – Πίνδου βρίσκονται τεκτονικά τοποθετημένες οφειολιθικές μάζες. Η προέλευση και η διαδικασία τοποθέτησής τους αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα γεωλογικά προβλήματα και συνδέεται άμεσα με τη παλαιογεωγραφικής φύση και θέση του ωκεανού της Τηθύος. Τα δύο κυρίαρχα σενάρια σχετικά με τη προέλευση των οφειολίθων αυτών είναι: είτε ως υπολείμματα ενός κατεστραμμένου ωκεάνιου φλοιού που βρισκόταν στο χώρο Πίνδου και Υποπελαγονικής, είτε ως υπολείμματα ενός από τη ζώνη Αξιού. Το πιθανότερο και γενικά πιο αποδεκτό θεωρείται το πρώτο σενάριο, με τη προέλευσή τους να είναι από το δυτικό ωκεάνιο χώρο της Υποπελαγονικής ζώνης και η επώθησή τους, πάνω στο φλύσχη της Πίνδου, να πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της τελικής Τριτογενούς πτύχωσης, μετά την ολοκλήρωση της ιζηματογένεσης του φλύσχη.

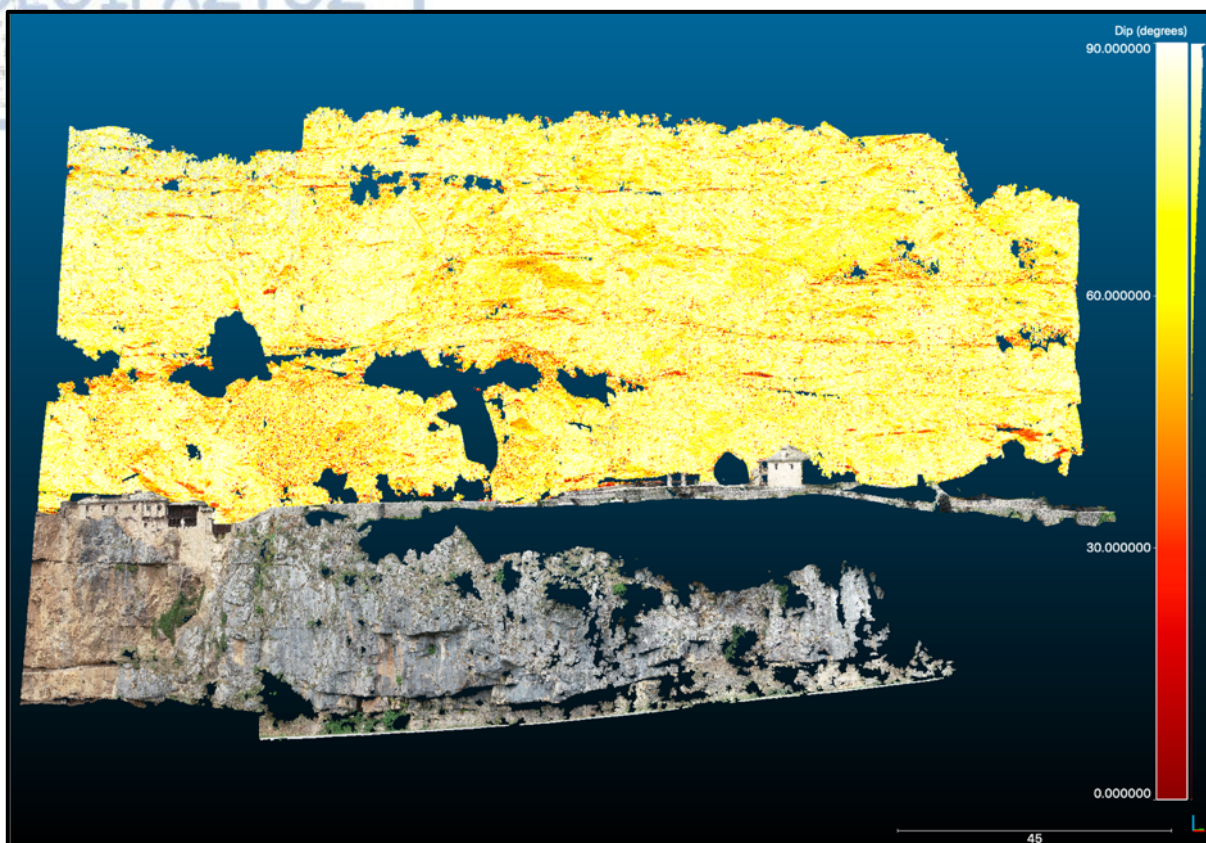
3.2 Γεωμορφολογία

Γενικά η ευρύτερη περιοχή μελέτης θεωρείται ως ορεινή. Μάλιστα, η Ήπειρος αποτελεί ένα από τα πλέον ορεινά διαμερίσματα του ελλαδικού χώρου, με ένα ποσοστό μεγαλύτερο του 70% της συνολικής επιφάνειας της να χαρακτηρίζονται ως καθαρά ορεινά. Οι μεγάλες κλίσεις των πρηνών καθώς και οι βαθιές χαράδρες των Βίκου, Καλαμά, Αράχθου, Αχέροντα κ.λπ. αποτελούν από τα κύρια φυσιογραφικά γνωρίσματα της περιοχής. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, τα όρη Τζουμέρκα προφανώς και γεωμορφολογικά χαρακτηρίζονται ως μια έντονα ορεινή περιοχή με αρκετά μεγάλα υψόμετρα. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη κορυφή τους είναι η κορυφή Κακαρδίτσα με υψόμετρο περί των 2.429 m και η επόμενη ψηλότερη είναι το Καταφίδι (ή Καταφύδι) με υψόμετρο περί των 2.393 m.

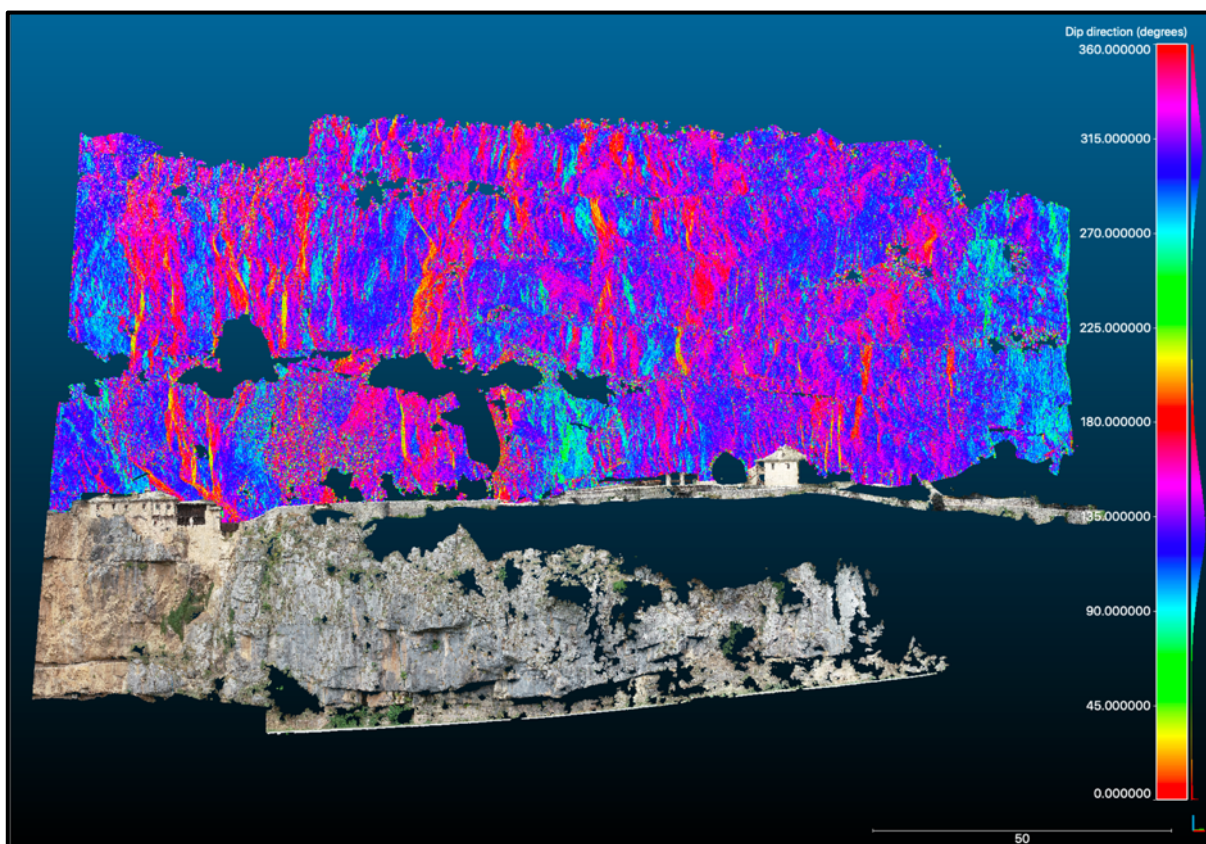
Η στενή περιοχή μελέτης και συγκεκριμένα η Ιερά Μονή Κηπίνας καθώς και ο δρόμος που οδηγεί προς αυτή, όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, βρίσκονται σε υψόμετρα που κυμαίνονται μεταξύ 580 m έως και 730 m. Γενικά, η μορφολογική εικόνα της θέσης χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη υψηλών (≥ 60 m), απότομων πρηνών. Οι κλίσεις των επιφανειών των υπό εξέταση πρηνών είναι πολύ μεγάλες ($\geq 80^\circ$), με τη πιθανότητα ύπαρξης ακόμα και αρνητικών κλίσεων σε ορισμένες, μεμονωμένες βέβαια, υπό – περιοχές. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραπάνω παρατηρήσεις, σχετικά με τη γεωμορφολογία της στενής περιοχής μελέτης, και πως αυτές έγινε δυνατό να εξαχθούν μέσω του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud) και της κατάλληλης επεξεργασίας του μέσω των κατάλληλων λογισμικών. Το παρακάτω μοντέλο, όπως θα αναλυθεί καλύτερα στα επόμενα κεφάλαια, δημιουργήθηκε από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω της πτήσης του UAV.



Σχήμα 10. Δεδομένα σχετικά με τη κατανομή των υψομέτρων στη περιοχή μελέτης, όπως αυτά εξάχθηκαν από το 3D point cloud.



Σχήμα 11. Δεδομένα σχετικά με τη κατανομή των κλίσεων των κλιτύων στη περιοχή μελέτης, όπως αυτά εξάχθηκαν από το 3D point cloud.



Σχήμα 12. Δεδομένα σχετικά με τη κατανομή της διεύθυνσης κλίσης των κλιτύων στη περιοχή μελέτης, όπως αυτά εξάχθηκαν από το 3D point cloud.

3.3 Λιθολογία

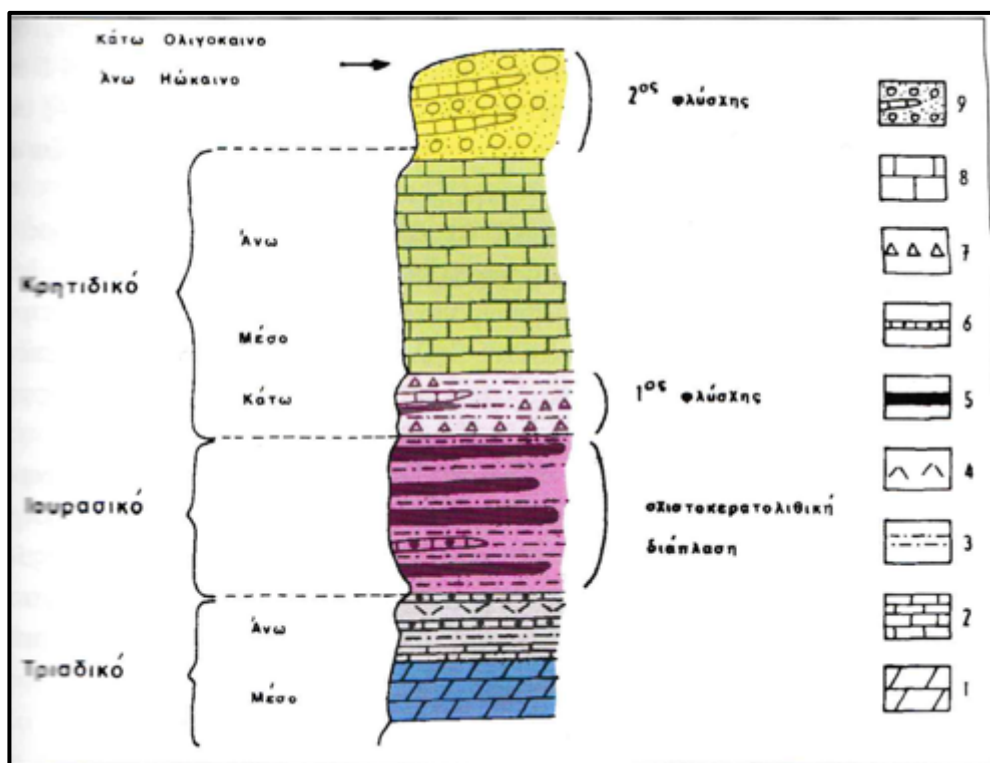
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι ελληνίδες ζώνες που απαρτίζουν κυρίως την ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι η Ιόνιος, η Γαβρόβου – Τρίπολης και η Ωλονού – Πίνδου όπως διακρίνονται από τα δυτικά προς τα ανατολικά (βλ. Σχήμα 9). Μπορεί να συναντώνται σχηματισμοί από μόνο μία από τις παραπάνω ζώνες (Ωλονού – Πίνδου) στη στενή περιοχή όπου εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας αλλά θεωρήθηκε ορθό, λόγω της ολιστικής φύσης της έρευνας που πραγματοποιήθηκε, η συνοπτική παρουσίαση της λιθοστρωματογραφικής δομής των παραπάνω ζωνών όπως αυτή ερευνήθηκε και προτάθηκε βιβλιογραφικά, σύμφωνα με τον Μουντράκης (2010).

Η Ιόνιος (ή Αδριατικοϊόνιος) ζώνη συγκροτείται αποκλειστικά από Αλπικά ιζηματογενή πετρώματα. Μέχρι στιγμής δεν έχει βρεθεί τεκμηριωθεί η ύπαρξη κάποιου Προαλπικού υποβάθρου στη συγκεκριμένη ζώνη, υπάρχει όμως σύμφωνα με τον Μουντράκης (2010) η άποψη πως τα ημιμεταμορφωμένα πετρώματα Πελοποννήσου – Κυθήρων – Κρήτης αποτελούν κοινό ανωπαλαιοζωικό υπόβαθρο τόσο για την Ιόνιο όσο και για τη ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, που θα αναλυθεί στη συνέχεια. Τα πρώτα ηλικιακά αλπικά ιζήματα της ζώνης θεωρούνται οι Περμοτριάδικοί εβαπορίτες (αποθέσεις άλατος και γύψου) με το συνολικό τους πάχος να υπολογίζεται περί το 1.5 km. Τα εβαποριτικά αυτά ιζήματα συνοδεύονται από ανθρακικά (δολομιτικά και ασβεστολιθικά) λατυποπαγή ηλικίας Κάτω και Μέσου Τριαδικού, που προέρχονται από τεκτονική λατυποίηση κατά τη διαδικασία της διαπειρικής διείδυσης των εβαποριτών. Υπερκείμενοι των εβαποριτών παρατηρούνται νηριτικοί μαύροι υπολιθογραφικοί ασβεστόλιθοι του Άνω Τριαδικού, πλούσιοι σε απολιθώματα γνωστοί ως “Ασβεστόλιθοι Φουσταπήδημα”. Στη συνέχεια, βρίσκονται αποτεθειμένοι οι νηριτικοί ασβεστόλιθοι “Παντοκράτορα” ηλικίας Κάτω – Μέσου Λιασίου (Κάτω Ιουρασικό), πάχους περί των 600 m. Στο Άνω Λιάσιο πυροδοτείται η βύθιση του χώρου απόθεσης με τη δράση κανονικών ρηγμάτων και επομένως ο σχηματισμός της ημιπελαγικής λεκάνης της Ιονίου. Η έναρξη της δημιουργία αυτής της λεκάνης σηματοδοτείται από την απόθεση δύο ισοδύναμων, συνομήλικων σειρών ανθρακικών ιζημάτων, των ασβεστολίθων “Λούρου” και των ασβεστολίθων “Σινιών” που πιθανώς συνδέονται με πλευρικές μεταβάσεις. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί χαρακτηρίζονται από τη παρουσία Αμμωνιτικών απολιθωμάτων και κερατολιθικών ενστρώσεων, στοιχεία χαρακτηριστικά ημιπελαγικής ιζηματογένεσης. Έπειτα, υπάρχει η πεποίθηση πως συνεχίστηκε ο επί μέρους τεμαχισμός της Ιονίου λεκάνης και υπήρξε μία διαφοροποίηση του χώρου σε λιγότερο και περισσότερο βαθιές υπολεκάνες με απόθεση ημιπελαγικών – πελαγικών ιζημάτων. Με βάση τα παραπάνω, συναντώνται ασβεστόλιθοι Ammonitico Rosso καθώς και αργιλικόι σχιστόλιθοι με απολιθώματα Posidonies, κυρίως πλευρικά στη αρχική κύρια λεκάνη, ηλικίας Άνω Λιασίου (Μέσο Ιουρασικό). Κατά το Ανώτερο Ιουρασικό (Άνω Μάλμιο), πραγματοποιήθηκε γενική βύθιση της λεκάνης της Ιονίου και έτσι προήλθε μία ομογενοποίηση των συνθηκών ιζηματογένεσης, με την απόθεση πελαγικών ασβεστολίθων με κερατολιθικές ενστρώσεις γνωστοί ως ασβεστόλιθοι “Βίγλας”. Οι πελαγικοί αυτοί ασβεστόλιθοι είναι πλακώδεις λευκοί έως τεφροί, με λεπτές αργιλικές ή κερατολιθικές μάνρες ενστρώσεις και η απόθεση τους ξεκίνησε κατά το Τιθόνιο και ολοκληρώθηκε στο τέλος του Ηώκαινου. Τέλος, υπήρξε η απόθεση του φλύσχη της Ιονίου μέχρι το Κάτω Μειόκαινο όπου και έλαβε χώρα η πτύχωση της ζώνης. Η σύσταση του φλύσχη της Ιονίου μεταβάλλεται από τα κατώτερα επίπεδα (ψαμμιτικά – μαργαϊκά) προς τα ανώτερα (ιλυολιθικά – μαργαϊκά – ασβεστολιθικά – ψαμμιτικά).

Η ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πλατφόρμας συνεχής νηριτικής ιζηματογένεσης κατά τους αλπικούς χρόνους, από το Τριαδικό έως και το Ολιγόκαινο. Το συνολικό πάχος των ανθρακικών αυτών πετρωμάτων κυμαίνεται περί το 1.8 km και πρόκειται για μία ιζηματογένεση που πραγματοποιήθηκε στο περιθώριο της Απουλίας πλάκας. Αναλυτικότερα, η ιζηματογένεση πυροδοτήθηκε κατά το Άνω Τριαδικό με την απόθεση δολομιτών και συνεχίστηκε αδιάκοπα καθ’ όλη τη διάρκεια του Μεσοζωικού και του Τριτογενούς μέχρι το Άνω Ηώκαινο, με την απόθεση αποκλειστικά νηριτικών μαύρων ή σκοτεινών ασβεστολίθων, σπανιότερα λευκούς, και μερικές φορές λατυποπαγείς, γενικά πολύ πλούσιους σε απολιθώματα. Σε όλη αυτή τη διαδικασία εικάζεται μόνο μία μικρής διάρκειας διακοπή κατά το Μέσο Ηώκαινο, με τη παρουσία μερικών μικρών βωξιτικών οριζόντων. Ακόμη μία πιθανή, μικρής διάρκειας, ανάδυση εκτιμάται πριν την έναρξη εναπόθεσης κατά το Ανώτερο Ηώκαινο του φλύσχη, λόγω της ύπαρξης ασυμφωνίας σε ορισμένες περιοχές μεταξύ των Ηώκαινικών ασβεστολίθων και του φλύσχη. Γενικά ο φλύσχη της ζώνης

Γαβρόβου – Τρίπολης θεωρείται μαργαϊκός – ψαμμιτικός αλλά με αρκετές, μεγάλου πάχους, ενστρώσεις κροκαλοπαγών.

Για τη ζώνη Ωλονού – Πίνδου η ιζηματογένεση θεωρείται πως ξεκίνησε κατά το Μέσο Τριαδικό με την απόθεση ψαμμιτών, πυριτιολίθων, μαργών και ασβεστολίθων που παροδικά εξελίσσεται προς το Άνω Τριαδικό σε απόθεση ασβεστιτικών τουρβιδιτικών Καρνίου, ασβεστολίθων με παρεμβολές κερατολίθων, ασβεστολίθων Ammonitico Rosso καθώς και ηφαιστειοϊζηματογενών υλικών με ανδεσίτες, τόφρους και βασάλτες σε ορισμένες θέσεις. Καθόλη τη διάρκεια του Ιουρασικού παρατηρείται μία συνεχής απόθεση ιζημάτων βαθιάς θάλασσας, με ραδιολαριτικούς κερατόλιθους, αργίλους, ψαμμίτες, πελαγικούς πυριτικούς ασβεστόλιθους και ιάσπιδες που συνιστούν τη βιβλιογραφικά γνωστή “σχιστοκερατολιθική διάπλαση”, με το πάχος της να εκτιμάται μεταξύ 150 m και 200 m. Η σχιστοκερατολιθική αυτή διάπλαση εξελίσσεται προς τα ανώτερα στρώματα σε μία ρυθμική εναλλαγή στρωμάτων, αποτελούμενη από πελίτες, ψαμμίτες, μάργες, ραδιολαρίτες, πελαγικούς και λατυποπαγείς ασβεστόλιθους. Η ρυθμική αυτή εναλλαγή είναι ηλικίας Κάτω Κρητιδικού και λόγω της φύσης της που θυμίζει φλύσχη, ονομάστηκε βιβλιογραφικά ως “ο πρώτος φλύσξης της Πίνδου”. Η ιζηματογένεση συνεχίστηκε αδιάκοπα (χωρίς την ύπαρξη κάποιας ασυμφωνίας) κατά το Άνω Κρητιδικό με την απόθεση πελαγικών πλακωδών ασβεστολίθων με πυριτικές και αργλικές ενστρώσεις ασβεστιτικών τουρβιδίτων και μαργών, με το πάχος τους να κυμαίνεται περί τα 500 m. Στη συνέχεια, από τα τέλη του Κρητιδικού, υπήρξε μία τροποποίηση στην υπάρχουσα ιζηματογένεση, με τη μετατροπή της περισσότερο ως ασβεστομαργαϊκή, μία κατάσταση μεταβατική για την τελική απόθεση του πραγματικού φλύσχη της Πίνδου (“δεύτερος φλύσξης της Πίνδου”) από το Δάνιο μέχρι το Άνω Ηώκαινο. Ο φλύσξης αυτός αποτελείται από ρυθμικές εναλλαγές ψαμμιτών και μαργών, ενώ ανά θέσεις παρουσιάζει μία πιο χαοτική δομή με την ύπαρξη ολισθολίθων και ζώνες έντονης τεκτονικής καταπόνησης. Η χαοτική αυτή δομή ονομάστηκε ως “άγριος φλύσξης” και αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα για θέσεις υποβύθισης (subduction). Τέλος, υπερκείμενα του φλύσχη, ασύμφωνα, τοποθετήθηκαν τα μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας, Ολιγοκαινικής ηλικίας.

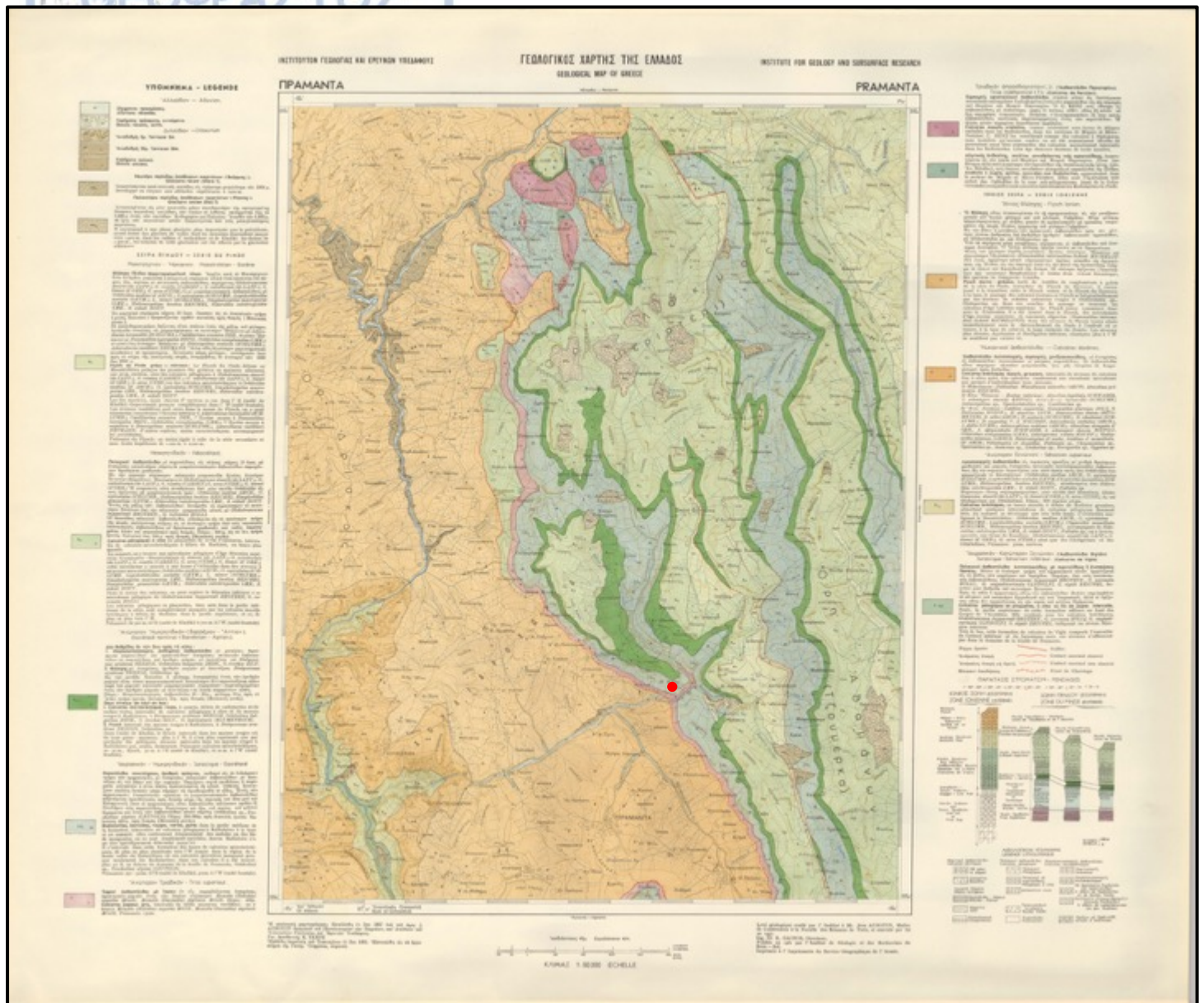


Σχήμα 13. Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη της ζώνης Ωλονού – Πίνδου. 1: δολομίτες, 2: πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 3: αργιλοψαμμίτες, 4: ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά, 5: κερατόλιθοι, 6: ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7: λατυποπαγή, 8: ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, 9: φλύσξης Τριτογενούς (Μουντράκης, 2010).

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενος στη περιοχή μελέτης, από τις παραπάνω, συναντάται μόνο η ζώνη Ωλονού – Πίνδου. Συγκεκριμένα τα πρανή όπου τοποθετείται η Ιερά Μονή Κηπίνας είναι ασβεστολιθικά και σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες της περιοχής, πρόκειται για Ιουρασικούς πελαγικούς ασβεστολίθους.



Εικόνα 4. Οι πελαγικοί ασβεστόλιθοι, μέσα στους οποίους εδράζεται η Ιερά Μονή Κηπίνας.



Σχήμα 14. Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης, από το Φύλλο Πράμαντα. Ως κόκκινη τελεία προσδιορίζεται η θέση έρευνας, της Ιεράς Μονής Κηπίνας (Ι.Γ.Μ.Ε., 1985, τροποποιημένο).



Εικόνα 5. Τα ασβεστολιθικά πρανή στην ευρύτερη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας.

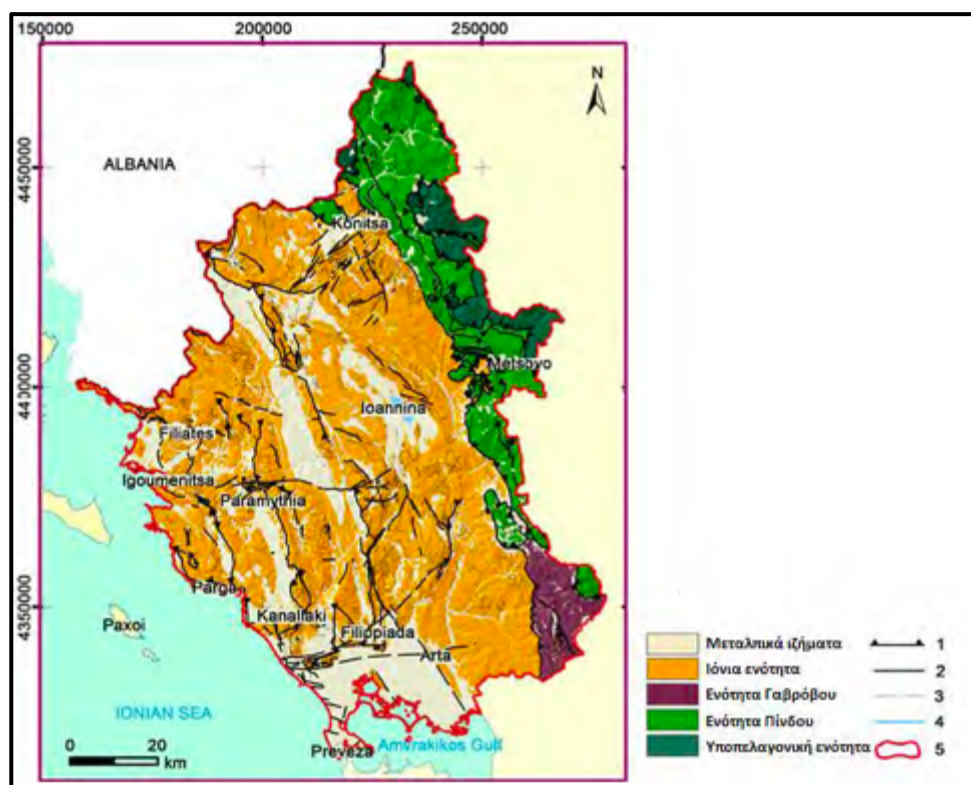


Εικόνα 6. Οι εμφανίσεις των πελαγικών ασβεστολίθων, της γύρω περιοχής από την Ιερά Μονή Κηπίνας.

Σύμφωνα με τους King et al. (1993) και Avramidis et al. (2000), τα περιβάλλοντα εναπόθεσης ιζημάτων και την εξέλιξη της λεκάνης Κλιματίας – Παραμυθιάς επηρεαστήκαν άμεσα από τη συνδυασμένη δράση των οριζόντιων ρηγμάτων Αγίας Κυριακής και Κούρεντων. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τους Avramidis et al. (2000), ο χαρακτήρας του ρήγματος της Αγίας Κυριακής είναι σύνθετος και κυμαίνεται μεταξύ εφελκυσμού και διάτμησης, δημιουργώντας έτσι κατάλληλες συνθήκες για της μεγάλης κλίμακας υποθαλάσσιες αποθέσεις ιζημάτων. Οι παραπάνω ερευνητές θεωρούν πως το συγκεκριμένο ρήγμα λειτούργησε ως αποσχιστικό, καθώς αναφέρουν ότι το ρήγμα της Αγίας Κυριακής εκτείνεται κάθετα προς τη διεύθυνση της κύριας επώθησης, αποτελώντας έτσι το ουσιαστικό όριο του τερματισμού της ιζηματογένεσης της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης και τον περιορισμό της προς το νότο. Το ρήγμα της Αγίας Παρασκευής μαζί με το αντίστοιχο των Κούρεντων, με διεύθυνση παράλληλη σε αυτή της κύριας επώθησης και με μία ενδιάμεση συμπεριφορά μεταξύ διάτμησης και συμπίεσης, καθόρισαν το λεκανοπέδιο της Κλιματίας – Παραμυθιάς.

Όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο της Λιθολογίας σχετικά με την Ιόνια ζώνη, στην ευρύτερη περιοχή παρατηρείται η παρουσία εβαποριτικών στρωμάτων με επιφανειακές εμφανίσεις. Οι Martakis (2003) και Tselentis et al. (2006) εντόπισαν τα στρώματα αυτά μέσω της καταγραφής της σεισμικότητας και τη πραγματοποίηση τομογραφικής διερεύνησης στην ευρύτερη περιοχή του λεκανοπεδίου των Ιωαννίνων. Σύμφωνα με τον Underhill (1985), κατά τη διάρκεια της “μετανάστευσης” των Εξωτερικών Ελληνίδων προς τα νοτιοδυτικά, οι εβαπορίτες αυτοί λειτούργησαν ως η επιφάνεια αποκόλλησης που διεισδύει προς τα ανατολικά μέσα στο υπόβαθρο της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης.

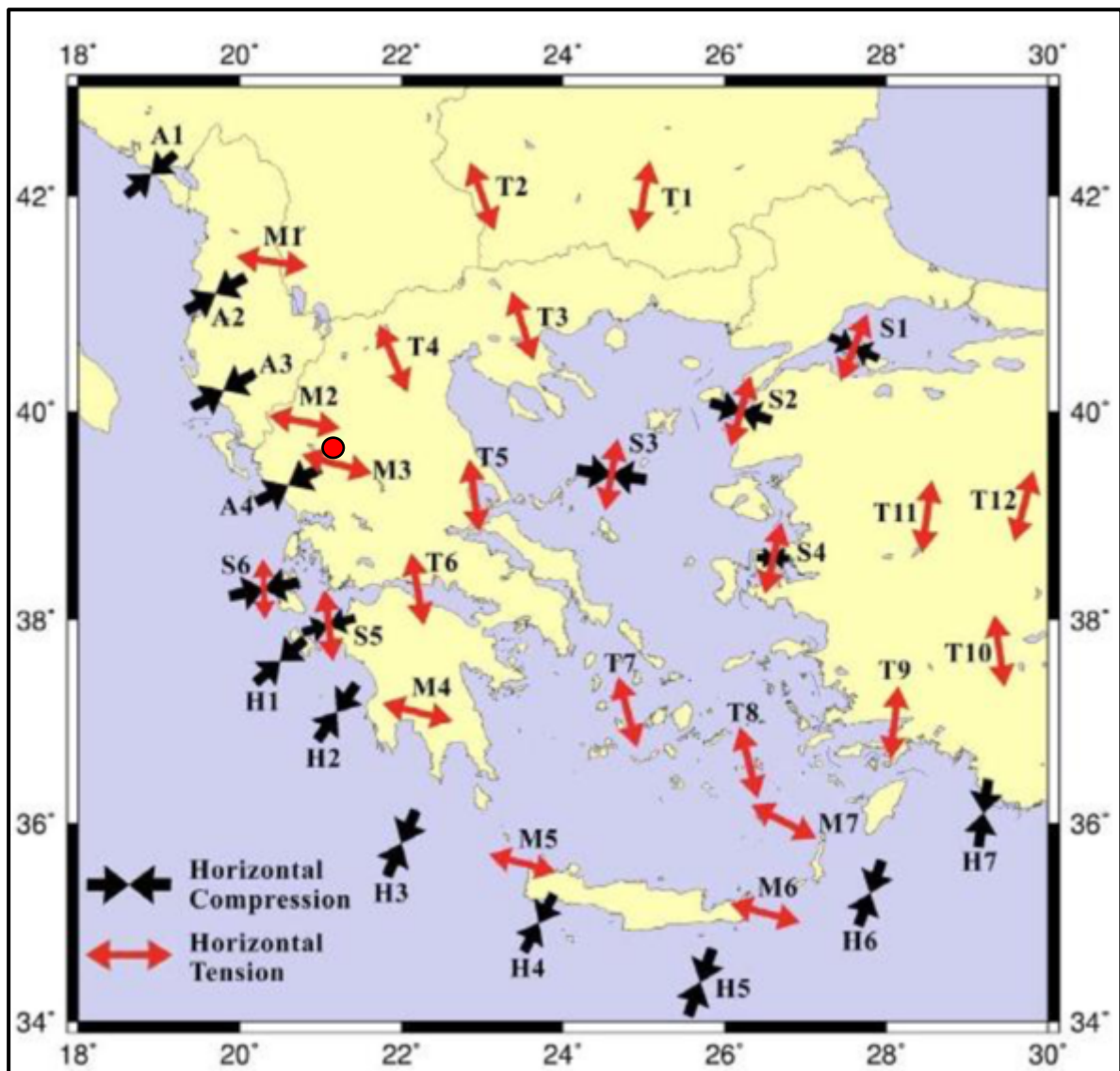
Οι Chatzipetros and Stergiou (2016), πραγματοποίησαν μελέτη με χρήση UAV στη χαράδρα του Βίκου, όπου η ερμηνεία που έδωσαν σχετικά με τη νεοτεκτονική της περιοχής, οι κύριες δομές είναι το ενεργό ρήγμα της Κόνιτσας, το οποίο πιθανώς συνδέεται με τη σεισμική ακολουθία του 1996, και το ρήγμα του Πάπιγκου. Και τα δύο ρήγματα έχουν παράταξη ΒΑ – ΝΔ και σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές, οι δύο αυτές ρηξιγενείς ζώνες (Κόνιτσας και Πάπιγκου), είναι υπεύθυνες για την ανύψωση του ορεινού όγκου της Τύμφης μετά το τελευταίο παγετώδες μέγιστο.



Σχήμα 16. Γενικός γεωλογικός χάρτης της Δυτικής Ελλάδας που απεικονίζει τις κύριες γεωτεκτονικές δομές. 1: Thrust and Overthrust, 2: Ρήγματα με επιφανειακή εμφάνιση, 3: Πιθανά ή καλυμμένα ρήγματα, 4: Ποτάμι (Ntokos, 2017, τροποποιημένο από Σταυροπούλου, 2020).

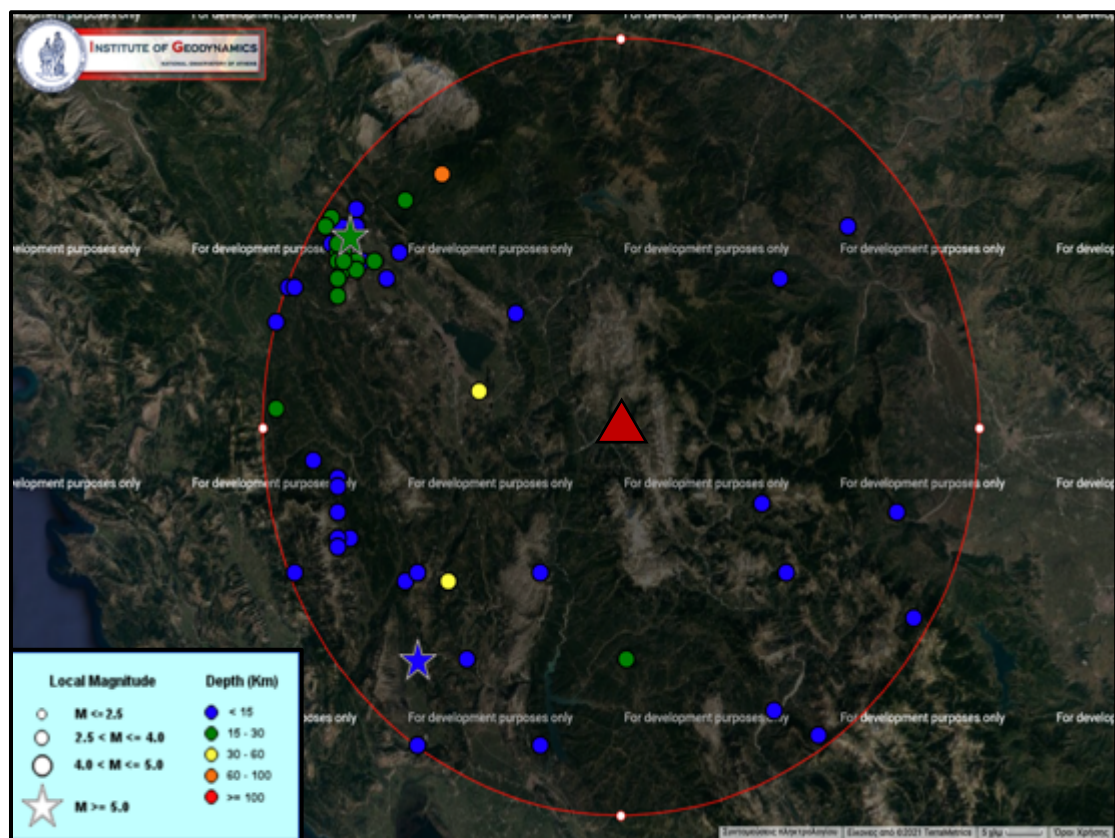
Σύμφωνα με τους Tselentis et al. (2006) η περιοχή της Ηπείρου έχει χαρακτηριστεί ως το ξεκάθαρο όριο ανάμεσα στο καθεστώς εφελκυσμού που επικρατεί στα ανατολικά και στο καθεστώς συμπίεσης που επικρατεί στα δυτικά. Κάτι τέτοιο φαίνεται και μέσω του Σχήματος 17. από τους Papazachos et al. (1999).

Σύμφωνα με της παραπάνω παρατηρήσεις των ερευνητών που μελέτησαν την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου, διαπιστώνεται ότι το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, με μηχανισμούς γένεσης που ποικίλουν από κανονικοί έως ανάστροφοι. Οι περιοχές με τη μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα θεωρείται πως είναι οι: περιοχή του ρήγματος του Σουλίου (ή ρήγμα της Αγίας Κυριακής), καθώς και αυτή ανατολικά και δυτικά των αντικλίνων Κούρεντων και Κασιδιάρη (Hatzfeld et al., 1995; King et al., 1983; Kiratzi et al., 1987; Haslinger et al., 1999). Ειδικά στην περιοχή ανατολικά και δυτικά του αντίκλινου του Κασιδιάρη, παρατηρήθηκε από τους Hatzfeld et al. (1995) απότομη μεταβολή των βαθών των υποκέντρων, από τα 5 – 8 km δυτικά του αντίκλινου σε 15 – 25 km ανατολικά αυτού.



Σχήμα 17. Το πεδίο τάσεων του Ελληνικού χώρου, όπου με τα συγκλίνοντα βέλη απεικονίζονται οι συμπιεστικές δυνάμεις ενώ με τα αποκλίνοντα βέλη παρουσιάζονται οι εφελκυστικές δυνάμεις. Με κόκκινο κύκλο επισημαίνεται η ευρύτερη περιοχή έρευνας (Papazachos et al., 1999, τροποποιημένο)

Σύμφωνα με δεδομένα που αντλήθηκαν από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και παρουσιάζονται στο Σχήμα 18. και το Πίνακα 1., σχετικά με τα σημαντικά ($M_w \geq 4$) σεισμικά γεγονότα που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (ακτίνα παρατήρησης είναι τα 50 km από τη θέση της Ιεράς Μονής Κηπίνας) μέσα στα τελευταία 51 χρόνια (1970 έως 2021) βλέπουμε πως δύο είναι τα πιο σημαντικά, τόσο λόγω θέσης όσο και λόγω μεγέθους. Το πρώτο πραγματοποιήθηκε 10/03/1981 περί τις τέσσερις η ώρα το απόγευμα με το επίκεντρο του να εντοπίζεται στα 22.3 km βορειοδυτικά της περιοχής της Άρτας και το εστιακό βάθος να εκτιμάται στα 10 km. Το μέγεθος του παραπάνω σεισμικού γεγονότος προσδιορίστηκε $M_w = 5.3$. Το δεύτερο σημαντικό σεισμικό γεγονός πραγματοποιήθηκε το βράδυ (20:15) της 15^{ης} Οκτωβρίου 2016 σε μία απόσταση περί των 19.5 km βορειοδυτικά των Ιωαννίνων και είχε και αυτό μέγεθος $M_w = 5.3$. Σύμφωνα με τους Pavlides et al. (2016), που μελέτησαν το παραπάνω γεγονός, ο σεισμός αποδόθηκε σε ανάστροφο ρήγμα ή ομάδα ρηγμάτων με διεύθυνση BBA-NNA και κλίση προς τα ανατολικά.



Σχήμα 18. Σχηματική απεικόνιση των κύριων σεισμικών γεγονότων ($M_w \geq 4$), για μια ακτίνα 50 km από τη περιοχή έρευνας (κόκκινο τρίγωνο) για τα τελευταία 51 χρόνια (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, 2021)

Πίνακας 1. Καταγραφή των κύριων στοιχείων των σεισμικών γεγονότων του Σχήματος 18.

#	Χρόνος εκδήλωσης (GMT)	Επίκεντρο	Γεωγρ. Πλάτος (°B)	Γεωγρ. Μήκος (°A)	Βάθος (km)	Μέγεθος
1	06/02/2020 9:24	40.6 km Α της Άρτας	39.2116	21.4522	10	4.7
2	31/08/2018 8:26	26.9 km ΝΝΔ των Τρικάλων	39.3477	21.6075	6	4.1
3	18/07/2018 6:50	20.8 km ΒΔ των Ιωαννίνων	39.7989	20.6772	7	4.1
4	19/10/2016 21:24	17.3 km ΔΒΔ των Ιωαννίνων	39.7500	20.6800	4	4.3
5	16/10/2016 19:01	15.8 km ΒΔ των Ιωαννίνων	39.7500	20.7000	14	4.3

6	16/10/2016 8:40	15.8 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7600	20.7100	4	4.1
7	16/10/2016 5:55	18.5 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7700	20.6800	22	4.0
8	16/10/2016 5:06	19.2 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7800	20.6800	5	4.0
9	16/10/2016 3:40	19.4 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7900	20.6900	20	4.9
10	16/10/2016 2:21	19.2 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7700	20.6700	16	4.8
11	16/10/2016 2:19	15.8 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7500	20.7000	15	4.0
12	16/10/2016 1:32	18.6 km Ιωαννίνων	ΔΒΔ των	39.7600	20.6700	18	4.4
13	16/10/2016 0:48	11.8 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7400	20.7500	10	4.6
14	16/10/2016 0:41	20.6 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7800	20.6600	14	4.8
15	16/10/2016 0:10	19.9 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7800	20.6700	16	4.4
16	15/10/2016 23:07	17.3 km Ιωαννίνων	ΔΒΔ των	39.7500	20.6800	15	4.2
17	15/10/2016 20:14	19.4 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7900	20.6900	17	5.3
18	08/08/2015 17:22	35.1 km Άρτας	ΑΒΑ της	39.2400	21.3800	11	4.2
19	30/06/2008 13:40	28.0 km Άρτας	ΒΒΔ της	39.3900	20.8500	55	4.1
20	28/10/2007 13:12	22.7 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.8100	20.6600	20	4.0
21	28/10/2007 10:14	16.5 km Ιωαννίνων	ΔΒΔ των	39.7200	20.6700	23	4.1
22	27/10/2007 17:30	16.5 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7600	20.7000	24	4.0
23	26/10/2007 22:41	14.6 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7600	20.7300	24	4.1
24	25/10/2007 11:38	15.8 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7500	20.7000	24	4.4
25	26/07/2007 9:04	17.4 km Ιωαννίνων	ΔΒΔ των	39.7400	20.6700	25	4.1
26	16/06/2007 6:49	17.9 km Ιωαννίνων	ΒΔ των	39.7600	20.6800	24	4.1
27	02/02/2007 13:09	23.4 km Ιωαννίνων	ΝΔ των	39.5100	20.6700	5	4.3
28	02/02/2007 12:06	24.2 km Ιωαννίνων	ΝΔ των	39.5000	20.6700	5	4.4
29	23/01/2007 4:13	28.8 km Ιωαννίνων	ΝΝΔ των	39.4400	20.6900	12	4.0
30	23/01/2007 3:11	29.7 km Ιωαννίνων	ΝΝΔ των	39.4400	20.6700	5	4.0
31	03/10/2006 15:58	24.3 km Ιωαννίνων	ΝΔ των	39.5300	20.6300	13	4.3
32	16/04/2006 9:18	26.9 km Ιωαννίνων	ΝΔ των	39.4700	20.6700	4	4.4

33	15/09/2005 3:30	10.0 km ABA των Ιωαννίνων	39.7000	20.9600	14	4.1
34	26/04/2005 23:14	20.4 km ABA της Άρτας	39.3000	21.1400	26	4.1
35	16/09/2004 1:24	22.6 km BΔ των Ιωαννίνων	39.8000	20.6500	24	4.3
36	07/12/2003 15:40	21.4 km B των Ιωαννίνων	39.8600	20.8400	63	4.2
37	24/11/1999 3:39	25.5 km ΔΝΔ των Ιωαννίνων	39.5900	20.5700	18	4.6
38	06/11/1999 0:51	30.6 km ΝΝΔ των Ιωαννίνων	39.4300	20.6700	13	4.1
39	31/03/1999 0:00	7.7 km ΝΝΑ των Ιωαννίνων	39.6100	20.9000	54	4.3
40	19/02/1999 0:19	18.0 km ΒΒΔ της Άρτας	39.3000	20.8800	7	4.0
41	19/12/1995 6:34	23.4 km ΔΒΔ των Ιωαννίνων	39.7300	20.5900	1	4.1
42	16/12/1995 17:17	19.1 km ΒΒΔ των Ιωαννίνων	39.8300	20.7800	22	4.0
43	21/09/1995 8:47	22.6 km ΔΒΔ των Ιωαννίνων	39.7300	20.6000	5	4.2
44	20/09/1995 12:52	24.2 km Α των Ιωαννίνων	39.6900	20.5700	5	4.0
45	19/09/1989 7:57	35.9 km ΔΝΔ των Τρικάλων	39.4800	21.3600	1	4.5
46	08/03/1987 17:38	31.0 km ΒΒΔ της Άρτας	39.3900	20.7800	1	4.1
47	16/04/1985 12:47	13.3 km ΒΒΔ των Ιωαννίνων	39.7700	20.7700	5	4.1
48	16/04/1985 0:40	21.3 km ΒΔ των Ιωαννίνων	39.8200	20.7000	9	4.3
49	26/06/1984 14:49	18.7 km ΔΝΔ των Τρικάλων	39.4700	21.5800	8	4.1
50	28/08/1983 3:31	38.2 km Ν των Γρεβενών	39.7400	21.3900	11	4.0
51	20/12/1981 12:40	30.1 km Ν των Ιωαννίνων	39.4000	20.8000	10	4.1
52	25/07/1981 3:21	31.0 km ΑΝΑ της Ηγουμενίτσας	39.4000	20.6000	10	4.7
53	10/03/1981 15:16	22.3 km ΔΒΔ της Άρτας	39.3000	20.8000	10	5.3
54	02/02/1978 11:12	32.3 km ΝΝΑ των Γρεβενών	39.8000	21.5000	10	4.1
55	08/04/1973 4:13	19.6 km ΒΔ των Ιωαννίνων	39.8000	20.7000	10	4.0
56	11/04/1972 11:12	36.0 km ΔΝΔ των Τρικάλων	39.4000	21.4000	10	4.0
57	29/12/1971 23:27	16.6 km ΔΒΔ της Άρτας	39.2000	20.8000	10	4.2
58	17/02/1970 0:16	4.6 km ΒΒΑ της Άρτας	39.2000	21.000	10	4.2
59	31/01/1970 1:27	26.7 km Β της Άρτας	39.4000	21.000	10	4.0

Σύμφωνα με το νέο Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας η ευρύτερη περιοχή μελέτης ανήκει στην Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II, με αναμενόμενη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού 0.24g για πιθανότητα υπέρβασης 10% για τα επόμενα 50 χρόνια. Ο νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας ενσωματώνεται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 2000, που τροποποιήθηκε με την απόφαση Δ 17α/115/9/ΦΝ 275/7.8.2003 του Υφυπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε και δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 1154Β/12.8.2003. Ο σχετικός χάρτης, με τις τρεις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (I, II και III) παρατίθεται στο Σχήμα 19.

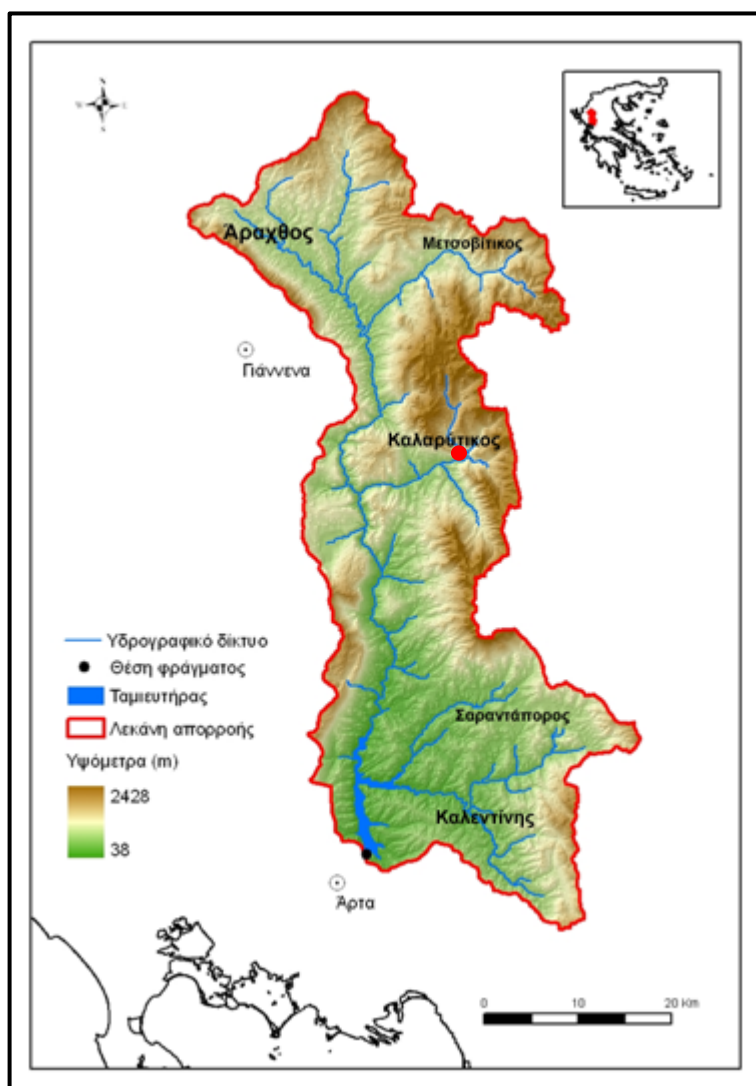


Σχήμα 19. Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, με κόκκινο κύκλο επισημαίνεται η θέση της ευρύτερης περιοχής έρευνας (Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας 2004).

3.5 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα

Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στον ευρύτερο χώρο των Αθαμανικών Όρων (Τζουμέρκα) τα οποία και αποτελούν το όριο μεταξύ δύο ποταμών: του Αραχθού και του Αχελώου. Γενικά η περιοχή εντάσσεται στη λεκάνη απορροή τους Αράχθου και συγκεκριμένα κοντά της θέσης έρευνας περνάει ένας σημαντικός παραπόταμος του Αράχθου, ο Καλαρρύτεκος Ποταμός.

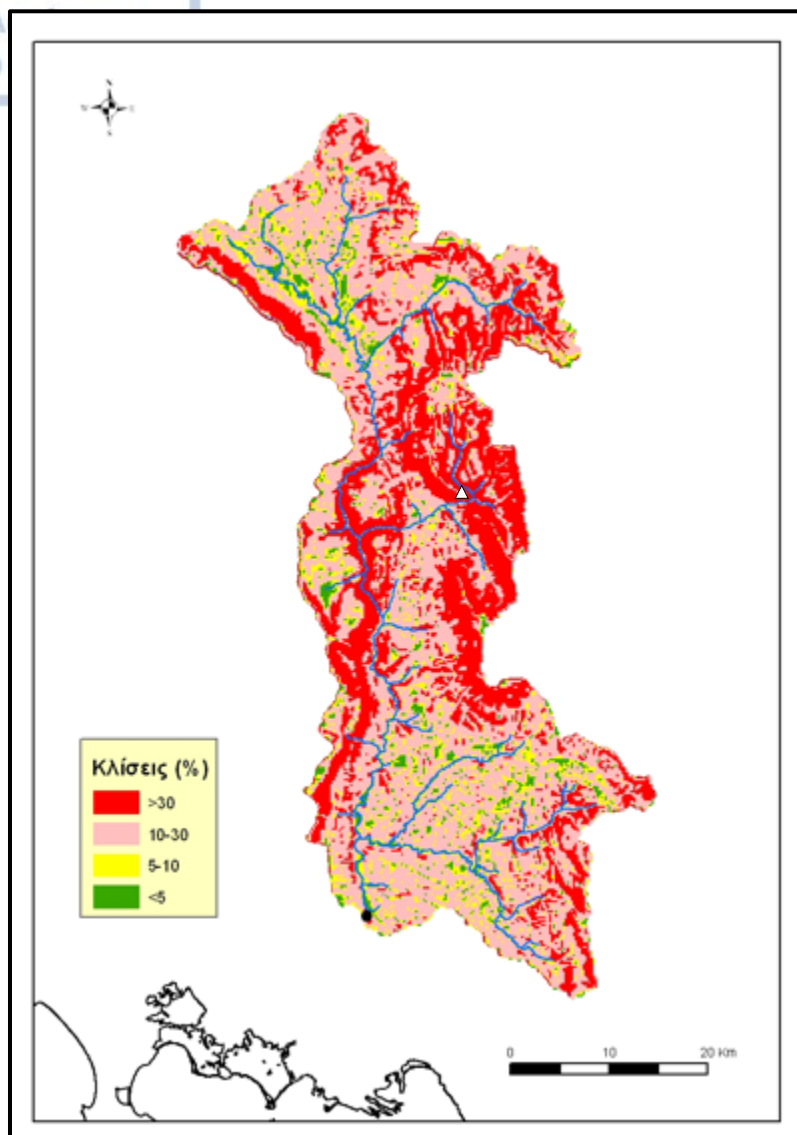
Η συνολική λεκάνη απορροής του Αράχθου έχει έκταση 1793.8 km² ανάντη του φράγματος Πουρναρίου (ή 1872.8 km² μέχρι τη Γέφυρα Άρτας). Οι σημαντικότεροι παραπόταμοι του Αράχθου είναι ο Βάρδας, ο Μετσοβίτικος, ο Καλαρρύτεκος, ο Σαραντάπορος και ο Καλεντίνης. Σύμφωνα με τους Κουτσογιάννης et al. (2010), το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής και το διάμεσο υψόμετρο προσδιορίστηκαν στα 854 m και 775 m αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης δίνονται στο Πίνακα 2.



Σχήμα 20. Η λεκάνη απορροής Αράχθου ανάντη Πουρναρίου, με κόκκινο κύκλο φαίνεται η περιοχή μελέτης (Κουτσογιάννης et al., 2010, τροποποιημένο).

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης απορροής (Κουτσογιάννης et al., 2010).

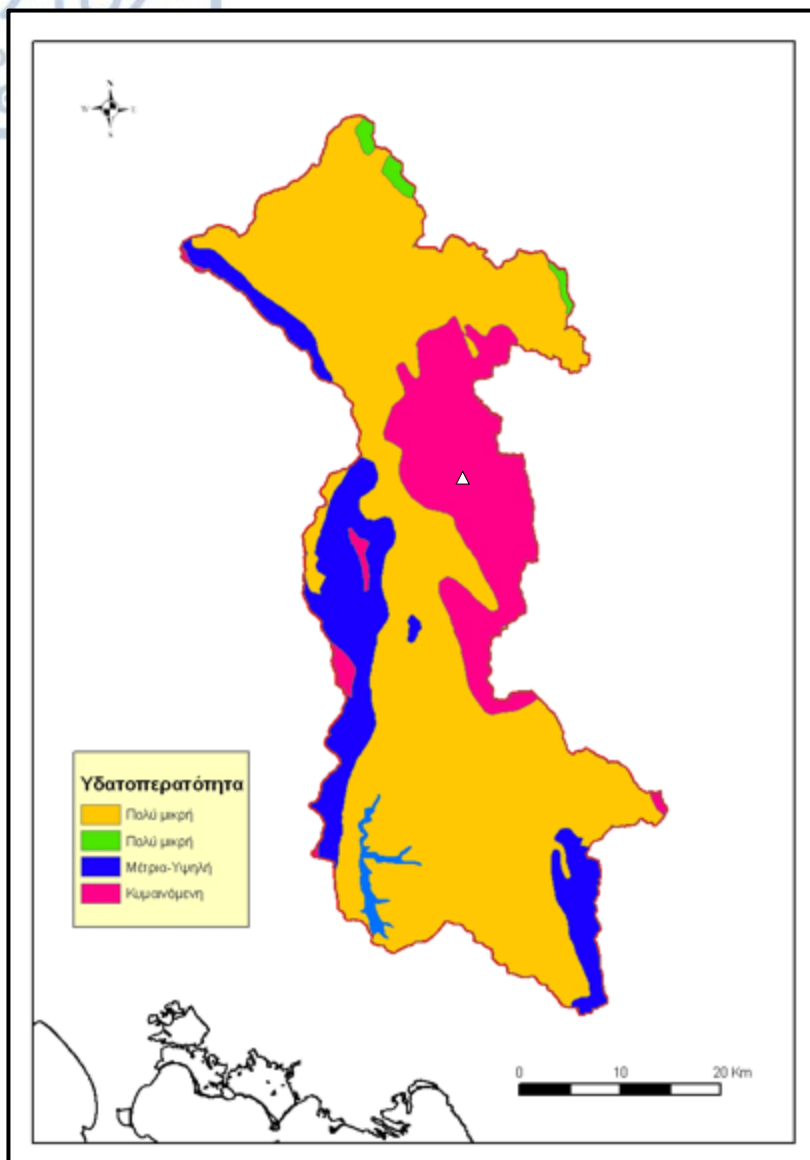
Έκταση (km ²)	1793.8
Μήκος μισγάγγειας (km)	103.3
Μέσο υψόμετρο (m)	854
Μέγιστο υψόμετρο (m)	2428
Ελάχιστο υψόμετρο (m)	38



Σχήμα 21. Χάρτης κλίσεων της λεκάνης απορροής, με λευκό τρίγωνο σημειώνεται η περιοχή έρευνας (Κουτσογιάννης et al., 2010, τροποποιημένο).

Πίνακας 3. Κλάσεις κλίσεων της λεκάνης απορροής (Κουτσογιάννης et al., 2010).

α/α	Κλάση κλίσεων (%)	Έκταση (km ²)	Αναλογία
1	> 30	534	0.30
2	10 – 30	990	0.55
3	5 – 10	181	0.10
4	< 5	89	0.05



Σχήμα 22. Χάρτης υδροπερατότητας της λεκάνης απορροής με λευκό τρίγωνο σημειώνεται η περιοχή έρευνας (Κουτσογιάννης *et al.*, 2010, τροποποιημένο).

Πίνακας 4. Τύποι σχηματισμών και υδροπερατότητας στη λεκάνη απορροής (Κουτσογιάννης *et al.*, 2010).

Τύπος σχηματισμών	Υδροπερατότητα	Έκταση (km ²)	Αναλογία
Φλύσσης	Πολύ μικρή	1247	0.69
Πλουτώνια και ηφαιστειακά	Πολύ μικρή	14	0.01
Ανθρακικά εκτεταμένης ανάπτυξης	Μέτρια – Υψηλή	235	0.13
Ανθρακικά περιορισμένης ανάπτυξης	Κυμαινόμενη	297	0.17

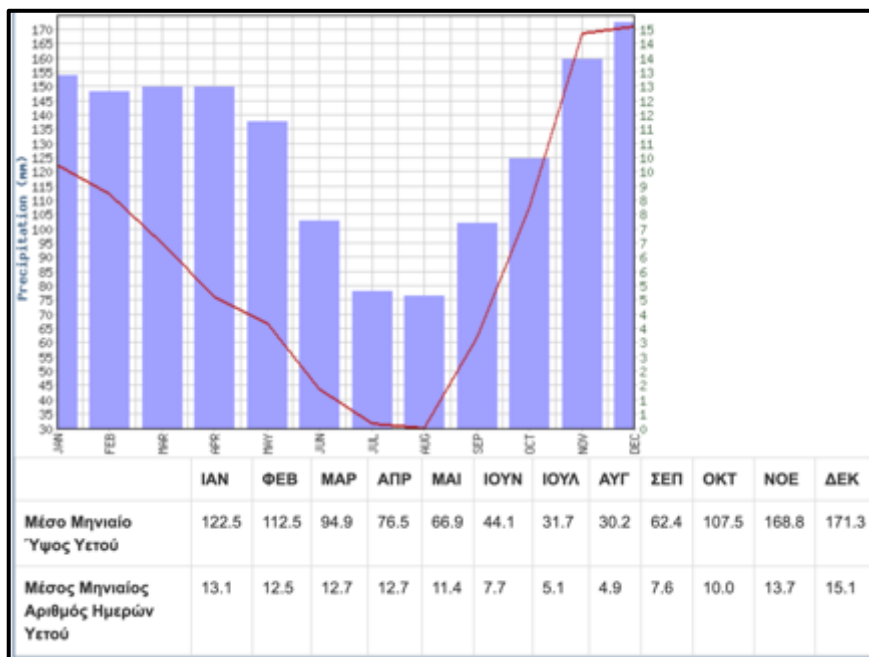
Σχετικά με τα κλιματολογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής της Ηπείρου, το κυριότερο στοιχείο αποτελούν οι ποικίλες κλιματικές καταστάσεις της περιοχής λόγω του μεταβαλλόμενου αναγλύφου που τη χαρακτηρίζει. Οι μεταβολές αυτές ασκούν σημαντική επιρροή στη κατανομή των μετεωρολογικών και κλιματικών στοιχείων. Εξαιτίας της ιδιαίτερης αυτής μορφολογίας, παρουσιάζεται ποικιλία θερμοκρασιών μεταξύ περιοχών με σημαντική διαφορά στο υψόμετρο καθώς και την απόσταση από τη θάλασσα. Ένα κοινό χαρακτηριστικό όμως της Περιφέρειας της Ηπείρου είναι οι γενικά πολλές βροχές και τα υψηλά επίπεδα υγρασίας που επικρατούν κατά τους χειμερινούς μήνες. Όπως είναι λογικό, το κλίμα είναι αισθητά ηπιότερο στις παραθαλάσσιες περιοχές έναντι των ημιορεινών και ορεινών, λόγω του πεδινού αναγλύφου και της άμεσης επαφής τόσο με το Ιόνιο Πέλαγος όσο και με τον Αμβρακικό κόλπο.

Το κλίμα της Ηπείρου, σύμφωνα με το Εργαστήριο Μεταλλευτικής Τεχνολογίας και Περιβαλλοντικής Μεταλλευτικής του Ε.Μ.Π. (2012), μπορεί να διακριθεί σε τρεις (3) κύριες κατηγορίες:

- η πρώτη περιλαμβάνει τα παράλια και μέχρι το "τείχος" που σχηματίζουν τα όρη Τζουμέρκα, Ξεροβούνι, Σούλιου, Κασιδιάρης και Μερόπη. Το κλίμα σε αυτή τη κατηγορία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεσογειακό με ήπιο χειμώνα και άφθονες βροχές, ενώ κατά του θερινούς μήνες παρουσιάζεται ζεστό και ξηρό. Οι παγετοί είναι σπάνιοι και η ηλιοφάνεια σχετικά υψηλή.
- Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα ενδότερα της Ηπείρου και περιοχές με υψόμετρα μέχρι περί των 1000 m. Το κλίμα χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικό με ψυχρούς χειμώνες με πολλές βροχές ενώ κατά τους θερινούς μήνες παρατηρούνται λίγες βροχές. Οι παγετοί είναι συχνοί των Απρίλιο ενώ η ηλιοφάνεια είναι σαφώς ελαττωμένη.
- Τέλος, η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τις περιοχές με υψηλό υψόμετρο (> 1000 m) όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται ως ορεινό με χαρακτηριστικό τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

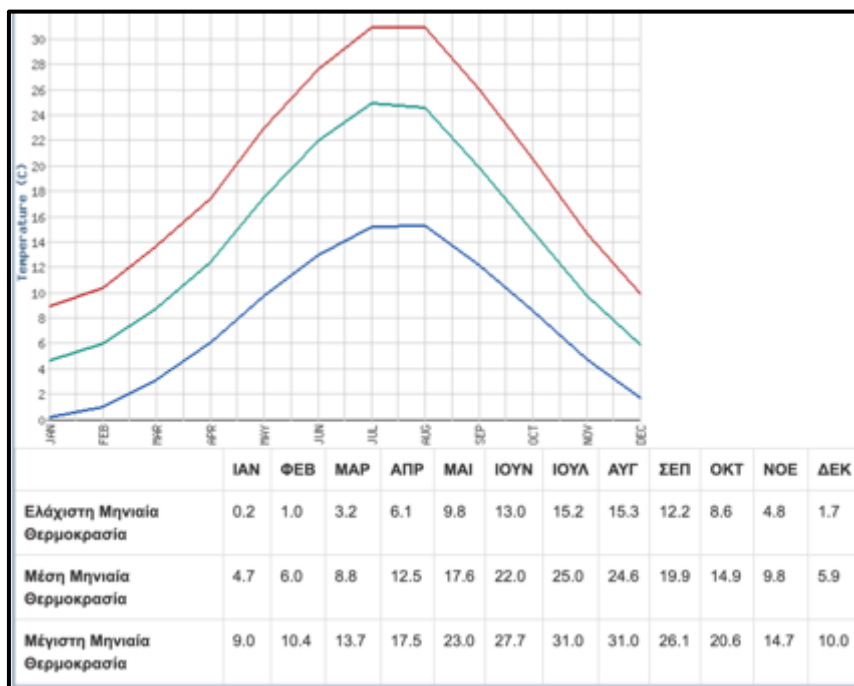
Όπως καθίσταται σαφές, η περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας εντάσσεται στη δεύτερη κλιματική κατηγορία λόγω της θέσης της.

Γενικά στη περιοχή της Ηπείρου παρατηρούνται τα μεγαλύτερα ύψη κατακρημνισμάτων σε σχέση με την υπόλοιπη Ελλάδα. Ενδεικτικά, το ετήσιο ύψος βροχής στα Ιωάννινα είναι 1089 mm ενώ στο Μέτσοβο 1490 mm (Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Ε.Μ.Υ.)

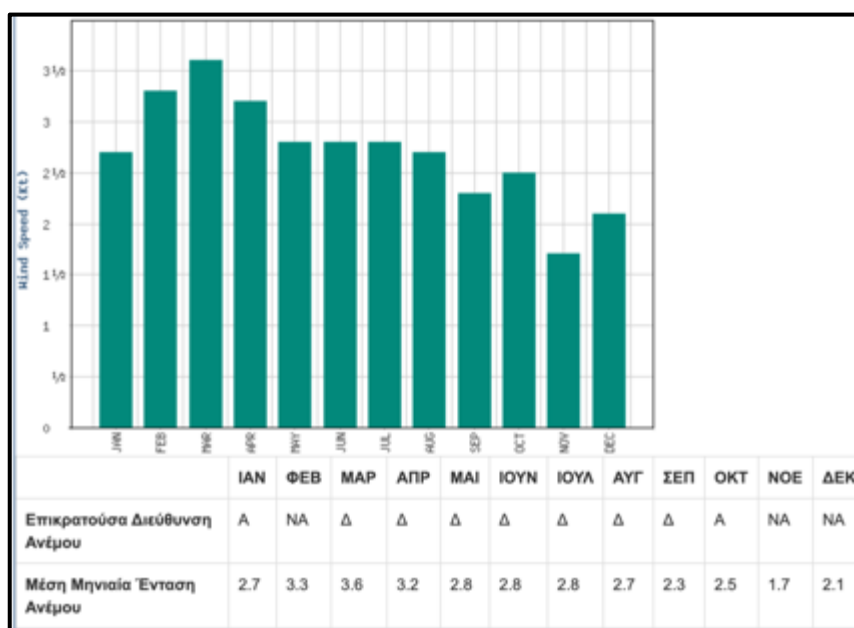


Σχήμα 23. Δεδομένα υετού για τη περιοχή της Ηπείρου (Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Ε.Μ.Υ., 2021).

Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιφέρειας Ηπείρου κυμαίνεται μεταξύ 15°C και 17°C. Ο πιο θερμός μήνα θεωρείται ο Αύγουστος ενώ οι Ιανουάριος και Φεβρουάριος αποτελούν τον ψυχρότερος. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 1000 mm και 1200 mm για τις πεδινές – παραλιακές περιοχές, ενώ στα ορεινά τμήμα μπορεί να φτάσει και στα 2000 mm. Ο αριθμός των ημερών βροχής ανά έτος κυμαίνονται από 70 έως 130, και είναι μεγαλύτερος στις παράκτιες περιοχές σε σχέση με την ενδοχώρα. Οι ημέρες χιονοπτώσεων, όπως είναι λογικό, αυξάνονται προς την ενδοχώρα και κυμαίνονται από 0.7 έως και 5.2. Τέλος η μέση ετήσια σχετική υγρασία μεταβάλλεται μεταξύ 70% και 75%.



Σχήμα 24. Δεδομένα μηνιαίας θερμοκρασίας για τη περιοχή της Ηπείρου (Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Ε.Μ.Υ., 2021).



Σχήμα 25. Δεδομένα έντασης ανέμου για τη περιοχή της Ηπείρου (Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Ε.Μ.Υ., 2021).

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ UAV – ΣΜηEA (Unmanned Aerial Vehicle – Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων)

4.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία συνεχής αύξηση των απαιτήσεων της τεχνικογεωλογικής κοινότητας στην παρακολούθηση ευαίσθητων περιοχών σε φαινόμενα κατολισθήσεων και βραχοκαταπτώσεων. Πλέον όμως οι παραδοσιακές μέθοδοι παρατήρησης και συλλογής δεδομένων συνδυάζονται με την τεχνολογία, προσθέτοντας έτσι ένα ακόμα πολύ ισχυρό εργαλείο στα χέρια του γεωλόγου. Με τη χρήση αυτών των καινοτόμων εργαλείων τηλεανίχνευσης (remote sensing technologies), είτε ενεργών (active) όπως είναι η τεχνολογία επίγειας σάρωσης με λέιζερ LiDaR είτε παθητικών (passive) όπως είναι η μέθοδος της φωτογραμμετρίας με τη χρήση UAV, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη για πολλαπλές ακριβείς και οικονομικές μετρήσεις με στόχο τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου εδαφικού μοντέλου υψηλής ποιότητας που αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τη πραγματική περιοχή μίας κατολίσθησης ή κατάπτωσης.

Τα UAV (μη επανδρωμένα αέρια οχήματα) αποτελούν ένα σύγχρονο εργαλείο λήψης αεροφωτογραφιών για τις περιοχές μελέτης, προσιτό οικονομικά και ιδιαίτερα ακριβές. Στη συνέχεια οι εικόνες αυτές αναλύονται με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας και προκύπτουν τρισδιάστατα μοντέλα νέφους σημείων (3D point clouds) και ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEMs) .

Οι νέες τεχνολογικές μέθοδοι και η εξέλιξη αυτών σε σχέση με τα μη επανδρωμένα αέρια οχήματα (UAV) παράγουν δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δισδιάστατων και τρισδιάστατων εικόνων υψηλής ανάλυσης εδάφους και επιφανειών. Τα μη επανδρωμένα αέρια συστήματα (UAS) έχουν λάβει πληθώρα διαφορετικών ονομάτων (π.χ. aerial robots) όμως πλέον η ευρύτερα γνωστή αυτών είναι UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ή απλούστερα drones (Colomina and Molina, 2014; Siebert and Teizer, 2014). Τέτοια συστήματα δημιουργήθηκαν και αναπτύχθηκαν για την ικανοποίηση στρατιωτικών κυρίως σκοπων, όμως στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ξεκίνησε η χρήση τους από τους ερευνητές όπου και ανακάλυψαν τις χαρτογραφικές δυνατότητες που τους παρείχαν (Colomina and Molina, 2014). Τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει γνωρίσει μία ιδιαίτερη αύξηση όπως επίσης και των απαραίτητων λογισμικών για την ανάλυση των δεδομένων τους.



Εικόνα 7. Το UAV που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα μελέτη DJI Phantom 4 pro v 2.0.

Το τελικό αποτέλεσμα διαμέσω της χρήσης αυτών των συστημάτων είναι η κατασκευή τρισδιάστατων (3D) μοντέλων όπου υπάρχει πληροφορία σχετικά με: τη τοποθεσία, τη λεπτομερή επιφανειακή γεωμετρία καθώς και το προσανατολισμό. Με αυτόν τον τρόπο δηλαδή είναι δυνατή η κατασκευή ενός τρισδιάστατου σύννεφου σημείων (3D point cloud) μέσω του οποίου θα εξαχθεί και το τελικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DSM) με στόχο τη δημιουργία του φωτομωσαϊκού της περιοχής ή της υψής της επιφάνειας (Vasuki et al., 2014). Η λεπτομερής αυτή οπτικοποίηση της γήινης επιφάνειας σε μεγάλη κλίμακα καθιστά δυνατή τη κατασκευή λεπτομερών τοπογραφικών χαρτών αεροφωτογραφιών με αλληλοεπικάλυψη (Bemis et al., 2014). Ο συνδυασμός τέτοιου είδους εικόνων με τους γεωλογικούς χάρτες οδηγεί στην κατασκευή οπτικών μοντέλων τόσο σχετικά με την κλασσική γεωλογία όσο και με την τεχνική γεωλογία. Τονίζεται ότι μέσω της εξέλιξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι πλέον δυνατή λήψη μεγάλων ποσοτήτων ψηφιακών δεδομένων ακρίβειας εκατοστού, σε χρονικό διάστημα μερικών μόλις λεπτών.

Γενικά τα μη επανδρωμένα αέρια οχήματα αποτελούνται από: διάφορους αισθητήρες όπως γυροσκόπια και μονάδες αδρανειακής κίνησης, οι οποίοι εντοπίζουν και διατηρούν την ευθυγράμμιση της θέσης του οχήματος καθώς και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές χαμηλού βάρους και σχετικά ικανοποιητικής ανάλυσης. Η ζωντανή αυτή απεικόνιση των λαμβανόμενων πληροφοριών σε μία απομακρυσμένη βάση σε συνδυασμό με την χρήση GPS από το μηχάνημα, παρέχει την δυνατότητα λήψης γεωαναφερωμένων δεδομένων υψηλής ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό αποτελεί ίσως και ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα τους στη χρήση τους στη γεωλογία, καθώς δίνουν πρόσβαση στον μελετητή σε μέχρι πρότινος "σκιερές ζώνες" για αυτόν, διευκολύνοντας έτσι κατά πολύ την υπαίθρια εργασία και αυξάνοντας την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα αυτής.

Σαφώς η ολοκληρωμένη γνώση ενός γεωεπιστήμονα σχετικά με τις δυνατότητες της φωτογραμμετρίας θα πρέπει να συνδυάζεται και με την γνώση του κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας των δεδομένων που παρέχονται από τη συγκεκριμένη τεχνολογία των συστημάτων UAV. Τέτοια λογισμικά βρίσκονται τόσο επί πληρωμή όσο και σε ελεύθερης πρόσβασης προγράμματα. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί η βασική μεθοδολογία που διέπει την χρήση των UAVs καθώς και τα τελικά αποτελέσματα που παράγουν.

4.2 Μέθοδος φωτογραμμετρίας (Structure from Motion – SfM)

Σύμφωνα με τους Vasuki et al. (2014), ως φωτογραμμετρία καλείται η μέθοδος κατά την οποία λαμβάνονται τρισδιάστατες (3D) πληροφορίες χαρακτηριστικών μέσω 2 ή περισσότερων φωτογραφιών του ίδιου αντικειμένου, λαμβανόμενες υπό διαφορετικές γωνίες. Κατά την Αμερικανική Εταιρεία Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης, η φωτογραμμετρία είναι η τέχνη – επιστήμη της λήψης αξιόπιστων πληροφοριών – δεδομένων για φυσικά αντικείμενα, μέσω της καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας εικόνων.

Η τεχνική Structure from Motion (SfM) αποτελεί μία διαδεδομένη τεχνική σχετικά με την απόληψη τρισδιάστατων γεωμετρικών προσομοιωμάτων μέσω τις φωτογραφικές απεικονίσεις αυτών. Η μεθοδολογία σύμφωνα με τον αλγόριθμο Multi View Stereo (MVS), συντελεί στη πύκνωση των προσομοιωμάτων (νεφών σημείων).

Αναλυτικότερα, ο στόχος – αντικείμενο φωτογραφίζεται μέσω ενός οπτικού αισθητήρα (φωτογραφική κάμερα) ο οποίος βρίσκεται σε σχετική κίνηση με το στόχο. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα τη λήψη διαδοχικών εικόνων που όπως είναι λογικό αλληλοεπικαλύπτονται. Με την ορθή χρήση της παραπάνω δυνατότητας, μπορούν να εντοπιστούν κοινά σημεία ανάμεσα σε ζεύγη διαδοχικών φωτογραφιών και η διαπίστωση της μεταβολής των σχετικών αποστάσεων των σημείων αυτών από ένα σταθερό στόχο. Πραγματοποιώντας τη παραπάνω διαδικασία για μία πληθώρα από αλληλάλληλα ζεύγη σημείων, που περιέχουν τον ίδιο ταυτοποιημένο "στόχο", γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της τελικής θέσης του μέσα στο τρισδιάστατο χώρο.



Σχήμα 26. Διάγραμμα ροής όπου παρουσιάζεται μία τυπική μεθοδολογία φωτογραμμετρίας (Bemis et al., 2014; τροποποιημένο από Κωνσταντίνιδη, 2019) .

4.3 Τρισδιάστατα μοντέλα νέφους σημείων (3D Point Cloud)

Τα τρισδιάστατα μοντέλα νέφους σημείων (3D point clouds) αποτελούν το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας της φωτογραμμετρίας και αποτελούν ένα από τα πλέον σύγχρονα εργαλεία απεικόνισης τρισδιάστατων αντικειμένων, με τη δυνατότητα επεξεργασίας μέσω του περιβάλλοντος των κατάλληλων λογισμικών για ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται από ένα σύνολο γεωναφερμένων σημείων στο χώρο. Ουσιαστικά αποτελούν ένα αρχείο με χωρικές πληροφορίες (XYZ) για κάθε μη κενό σημείο στο χώρο. Τις χωρικές αυτές πληροφορίες, τις περισσότερες φορές τις πλαισιώνουν και άλλα επίπεδα πληροφορίας. Οι πληροφορίες αυτές συνήθως αποτελούνται από το χρώμα του (RGB), την ένταση ανάκλασης (εάν το μοντέλο λήφθηκε μέσω LiDaR) και την κατηγοριοποίησή του (classification).

Κατά τη διαδικασία επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων, συνήθως, η περιεχόμενη πληροφορία εμπλουτίζεται από το χρήστη με την εφαρμογή αριθμητικών πεδίων (Scalar Fields – SF). Τα αριθμητικά αυτά πεδία μπορούν να περιέχουν μία πληθώρα πληροφοριών, ανάλογα με τις ανάγκες της επί μέρους έρευνας που χρησιμοποιούνται. Γενικά όμως αποτελούν την απόδοση τιμών σε διάφορες μεταβλητές ενδιαφέροντος για κάθε σημείο και συνοδεύονται από την σχηματική απεικόνιση αυτών.

Συχνά, όπως γίνεται και στη παρούσα μελέτη, είναι σημαντικός και ο προσδιορισμός ενός ακόμα μεγέθους από το χρήστη στα νέφη σημείων. Αυτός ο παράγοντας είναι το κάθετο προς τη γειτονία διάνυσμα ενός τυχαίου σημείου n . Μέσω της παραπάνω διαδικασίας δημιουργείται ένα καινούργιο επίπεδο πληροφορίας όπου φέρει στοιχεία σχετικά με τις τρεις (3) συνιστώσες και τις συντεταγμένες του κάθετου αυτού διανύσματος για το τυχαίο σημείο n (X_n , Y_n , Z_n και N_x , N_y , N_z).



Σχήμα 27. Παράδειγμα ενός ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων, από τη περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, της Ιεράς Μονής Κηπίνας.

5. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Υπαίθρια επίσκεψη

Η υπαίθρια επίσκεψη στη θέση μελέτης πραγματοποιήθηκε το Σεπτέμβριο του 2020 και χωρίστηκε ουσιαστικά σε δύο βασικούς άξονες εργασίας. Αυτοί ήταν η ολοκληρωμένη τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής καθώς και ο σχεδιασμός και η πτήση του UAV για την όσο το δυνατόν ορθότερη εικονοληψία των προς εξέταση πρανών.

Σε αυτό σημείο κρίνεται σκόπιμο να διατυπωθεί το σκεπτικό πίσω από της επιλογή του UAV, για την αποτύπωση της εξεταζόμενης περιοχής, έναντι κάποιου επίγειου σαρωτή LiDaR, όπου διαθέτει επίσης το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και υπάρχει το απαραίτητο επιστημονικό υπόβαθρο (θεωρητικό και πρακτικό) πίσω από την ορθή και ακριβή χρήση και αυτής της τεχνολογίας τηλεανίχνευσης. Βασικό κριτήριο στην επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας για την αποτύπωση της περιοχής υπήρξε η ίδια η μορφολογία της ευρύτερη περιοχής. Στη συγκεκριμένη θέση, όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες που συνοδεύουν τη παρούσα εργασία, το μοναστήρι βρίσκεται χτισμένο μέσα σε απότομα πρανή και ο περιβάλλον χώρος είναι αρκετά περιορισμένος. Γενικά, η τεχνολογία LiDaR δύναται να παράγει τρισδιάστατα μοντέλα φυσικών δομών, βασιζόμενη στην εμβέλεια της εικόνας. Βασικός παράγοντας στη διαδικασία αυτή είναι η απόσταση που χωρίζει τον σαρωτή από τον στόχο. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται από τον χρόνο που απαιτείται ώστε ένας συγκεκριμένος παλμός της ακτίνας laser να επιστρέψει πίσω στην πηγή. Τα ύψη των υπό εξέταση πρανών σε συνδυασμό με την έλλειψη χώρου περιμετρικά της Μονής, κατέστησαν αδύνατη την εφαρμογή επίγειου σαρωτή LiDaR καθώς το τελικό αποτέλεσμα θεωρήθηκε πως δεν θα είναι αντιπροσωπευτικό της περιοχής. Επίσης, λόγω της φύσης της βραχώμαζας (ασβεστόλιθος), η επιφάνεια των υπό εξέταση πρανών ήταν σχετικά “καθαρή” από βλάστηση ενώ αυτή περιοριζόταν στις πιο εδαφοποιημένες περιοχές. Αυτό έδωσε την ικανότητα λήψης ικανοποιητικών δεδομένων μέσω του UAV, χωρίς να γίνει αισθητή η απουσία του LiDaR για την συγκεκριμένη μελέτη.

5.1.1. Τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση

Το πρώτο και κυριότερο βήμα σε κάθε είδους εκτίμηση επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων είναι η εις βάθος τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση της υπό μελέτη περιοχής. Η ανάγκη για εκτεταμένη και λεπτομερή υπαίθρια εργασία γεννιέται από την άμεση απαίτηση για κατανόηση των μηχανισμών δράσης και τον σαφή καθορισμό του τεχνικογεωλογικού μοντέλου της εκάστοτε περιοχής έρευνας. Μέσω των παραπάνω είναι δυνατή η ταυτοποίηση του βέλτιστου μοντέλου αστοχίας της περιοχής καθώς και ένας πρώιμος προσδιορισμός των πιθανών επιπτώσεων των αστοχιών στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Με τον ορθό και ακριβή καθορισμό του τεχνικογεωλογικού μοντέλου της περιοχής, γίνεται δυνατός ο έλεγχος και/ή διόρθωση των βασισμένων σε υπολογιστικά συστήματα μετρήσεων πάνω στο μοντέλου που συντάχθηκε από τα δεδομένα του UAV. Επιπρόσθετα, μέσω της έρευνας πεδίου ήταν δυνατή η παραμετροποίηση σημαντικών στοιχείων για την εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων. Οι παραπάνω μετρήσεις δεν θα μπορούσαν να εξαχθούν μέσω των δεδομένων του UAV, διότι προκύπτουν από κάποιες επί τόπου δοκιμές και αποτελούν απαραίτητα στοιχεία του επίσης του προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων (Rockfall Hazard and Risk Rating System) που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Γενικά, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το γεωλογικό περιβάλλον της περιοχής όπου εδράζεται η Ιερά Μονή Κηπίνας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ομογενές, καθώς αποτελείται μόνο από έναν σχηματισμό, τους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους της ζώνης Ωλονού – Πίνδου. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί είναι πελαγικοί, τεφρού χρώματος και γενικά εμφανίζονται ως παχυστρωματώδεις έως και μεσοστρωματώδεις ανά θέσεις. Διάσπαρτα, μπορούν να παρατηρηθούν στο επίπεδο της στρώσης κάποιες ζώνες αδυναμίας, όπου το υλικό εμφανίζει μία λεπτοστρωματώδη – σχιστοποιημένη εικόνα. Αυτές οι ζώνες πιθανότατα να είναι αποτέλεσμα τοπικού τεκτονισμού καθώς αυτές οι εικόνες είναι περιορισμένες σε έκταση και δεν αποτελούν το κανόνα για τη βραχώμαζα στη συγκεκριμένη θέση.

Επιπλέον, ένα πολύ σημαντικό στοιχείο του συγκεκριμένου σχηματισμού είναι έντονη καρστικοποίηση του. Λόγω της θέσης του Μοναστηριού, που ουσιαστικά φέρει τη βραχώμαζα ως τελικό του τοίχο στη πίσω του μεριά, είναι δυνατή η μελέτη της βραχώμαζας και σε ένα βάθος και όχι μόνο επιφανειακά. Μάλιστα η εικόνα της βραχώμαζας, που μας προσφέρεται από τον εσωτερικό χώρο της μονής είναι εντυπωσιακή καθώς υπάρχει μία αρκετά ξεκάθαρη είσοδος ενός καρστικού σπηλαίου.



Εικόνα 8. Η θέση της Ιεράς Μονής Κηπίνας, μέσα στην ασβεστολιθική βραχώμαζα.



Εικόνα 9. Ο μόνος δρόμος πρόσβασης προς τη Μονή, με τα επιβλητικά πρανή να υψώνονται σχεδόν κάθετα από πάνω του.



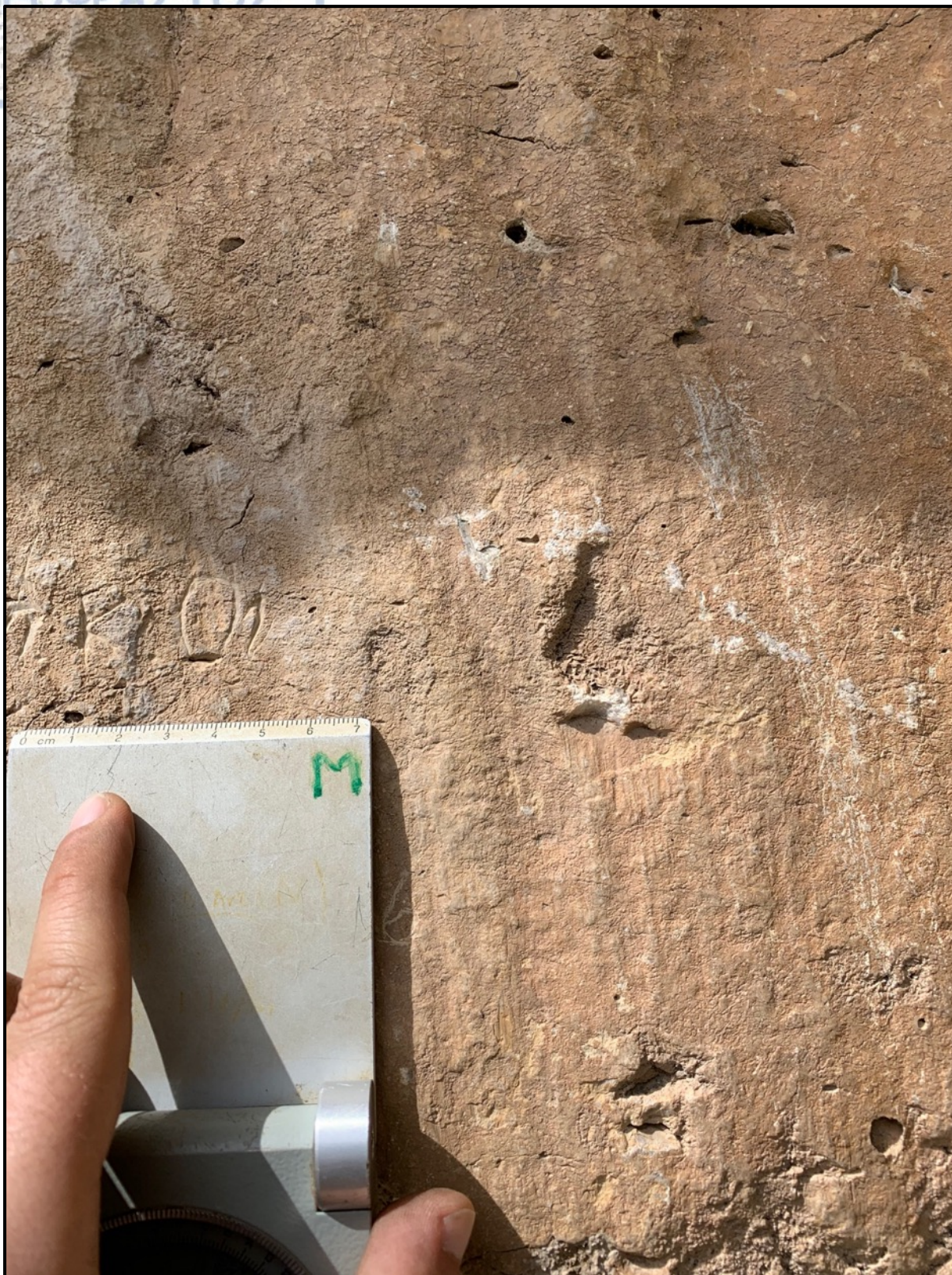
Εικόνα 10. Εμφάνιση ζώνης αδυναμίας, στο επίπεδο της στρώσης, όπου το υλικό εμφανίζει σχιστοποιημένη εικόνα.



Εικόνα 11. Εμφάνιση ζώνης αδυναμίας, στο επίπεδο της στρώσης, όπου το υλικό εμφανίζει λεπτοστρωματώδη εικόνα λόγω τεκτονικής καταπόνησης.



Εικόνα 12. Κοντινή λεπτομερής φωτογραφία της σχεδόν φυλλοποιημένης ζώνης του σχηματισμού.



Εικόνα 13. Χαρακτηριστική εικόνα γράμμωσης ολίσθησης στον υπό εξέταση ασβεστόλιθο που επισημαίνει την ύπαρξη μετακίνησης.



Εικόνα 14. Η είσοδος του καρστικού σπηλαίου στο εσωτερικό της Μονής

Από τεχνικογεωλογικής άποψης, η ασβεστολιθική αυτή βραχώμαζα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μέτρια τεμαχισμένη (3 – 4 κύριες οικογένειες ασυνεχειών) με τη παρουσία αρκετών κάθετων ασυνεχειών – ρωγμών όπου κατασκευάζουν τοπικά την εικόνα του “προσώπου” των υπό μελέτη πρανών. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η παρουσία κάποιων μικρών ρηγμάτων στα πρανή. Μάλιστα, σύμφωνα με τις υπαίθριες μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους (διεύθυνση κλίσης και γωνία κλίσης), αυτά εμφανίζουν μικρή διαφοροποίηση σε σχέση με μία εκ των κυρίων οικογενειών ασυνεχειών. Με βάση το παραπάνω, υποπτεύεται πως τα μέλη της ίδιας οικογένειας σε άλλες θέσεις εμφανίζεται ως ασυνέχειες (δεν παρατηρείται μετακίνηση) ενώ σε άλλες ως μικρά ρήγματα (παρατηρείται μετακίνηση). Επίσης, όπως αναφέρθηκε λόγω της καρστικοποιημένης εικόνας που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος ασβεστόλιθος, θεωρείται δεδομένη η παρουσία καρστικών εγκοίλων σχετικά μεγάλων διαστάσεων μέσα στη βραχώμαζα, υποσκάπτοντάς την.



Εικόνα 15. Μέρτια τεμαχισμένη εικόνα της ασβεστολιθικής βραχώμαζας.

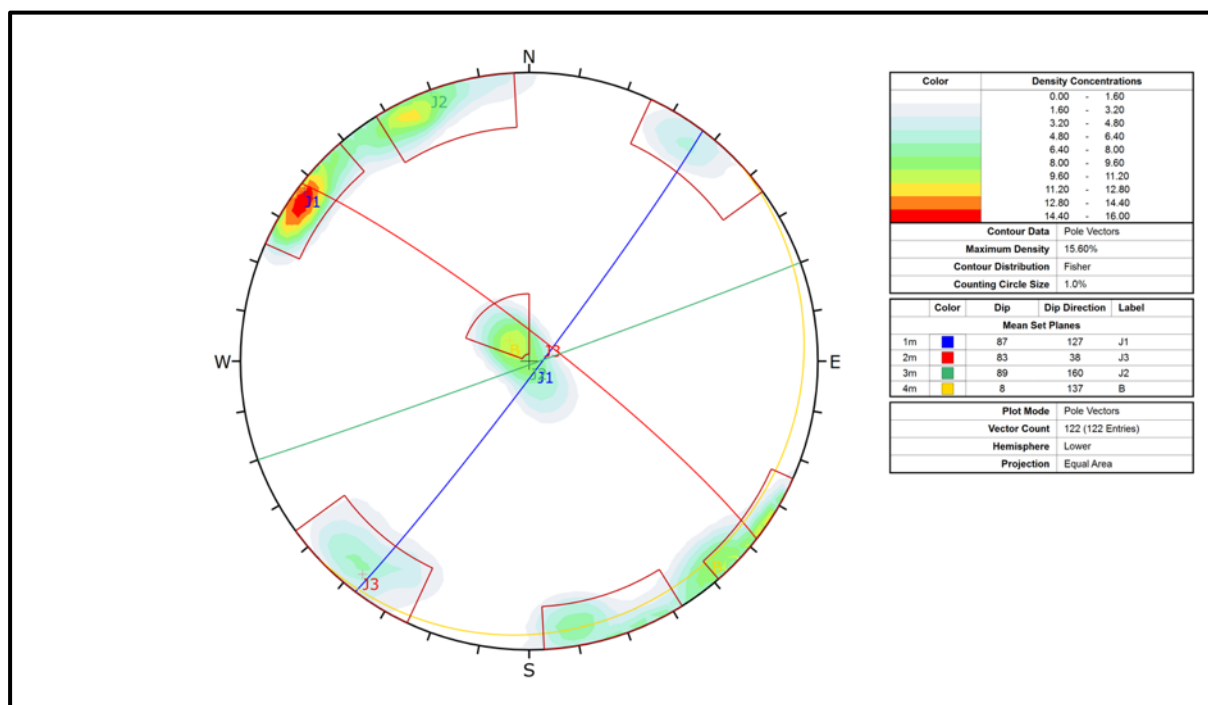


Εικόνα 16. Μέτρια τεμαχισμένη εικόνα της ασβεστολιθικής βραχώμαζας.



Εικόνα 17. Χαρακτηριστική εικόνα ενός μικρούς κανονικού ρήγματος στην ασβεστολιθική βραχώμαζα. Φαίνονται χαρακτηριστικά η επιφάνεια του ρήγματος, τα δύο τεμάχια και η σχετική κίνηση μεταξύ τους (καθοδική κίνηση του άνω τεμαχίου που βρίσκεται εκ των δεξιών της επιφάνειας του ρήγματος).

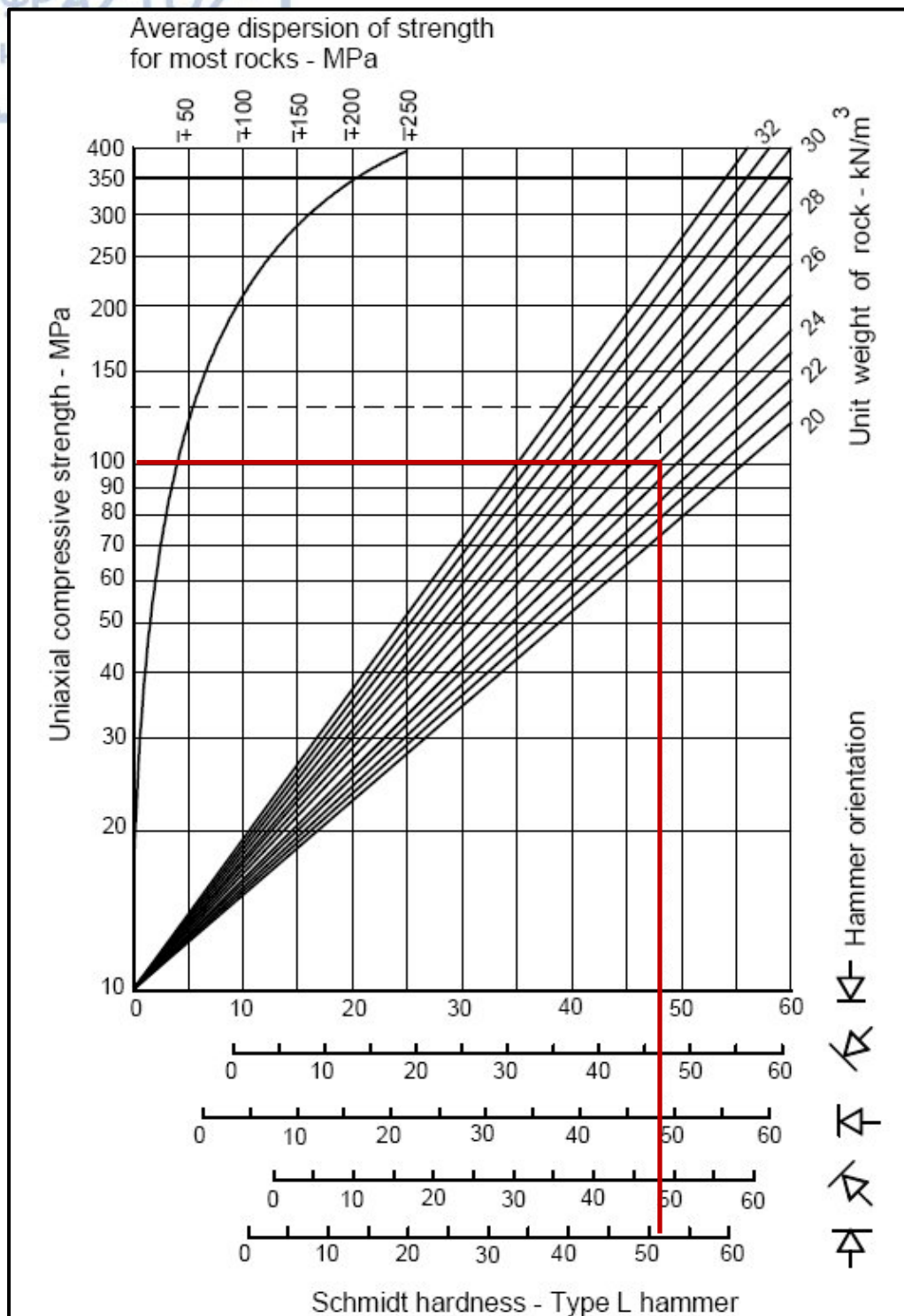
Σύμφωνα με τα ευρήματα της τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης, η ασβεστολιθική βραχώμαζα τέμνεται κυρίως από τρεις (3) κύριες οικογένειες ασυνεχειών και τη στρώση. Συγκεντρωτικά, παρουσιάζεται στο Σχήμα 28, το τεκτονικό διάγραμμα που κατασκευάστηκε για τα πρανά της υπό μελέτης περιοχής, με τη λήψη 122 μετρήσεων σχετικά με τα γεωμετρικά στοιχεία των τεκτονικών δομών. Και οι τρεις αυτές κύριες οικογένειες ασυνεχειών, χαρακτηρίζονται ως πολύ απότομες (γωνία κλίσης $\geq 80^\circ$), ενώ δύο από αυτές είναι σχεδόν παράλληλες με το πρανές, με αποτέλεσμα σε αρκετές θέσεις να καθορίζουν αυτές το “πρόσωπο” του πρανούς. Αντίθετα, η στρώση παρουσιάζεται με πολύ ήπιες έως και οριζόντιες επιφάνειες σε ορισμένες θέσεις (γωνία κλίσης $\leq 15^\circ$).



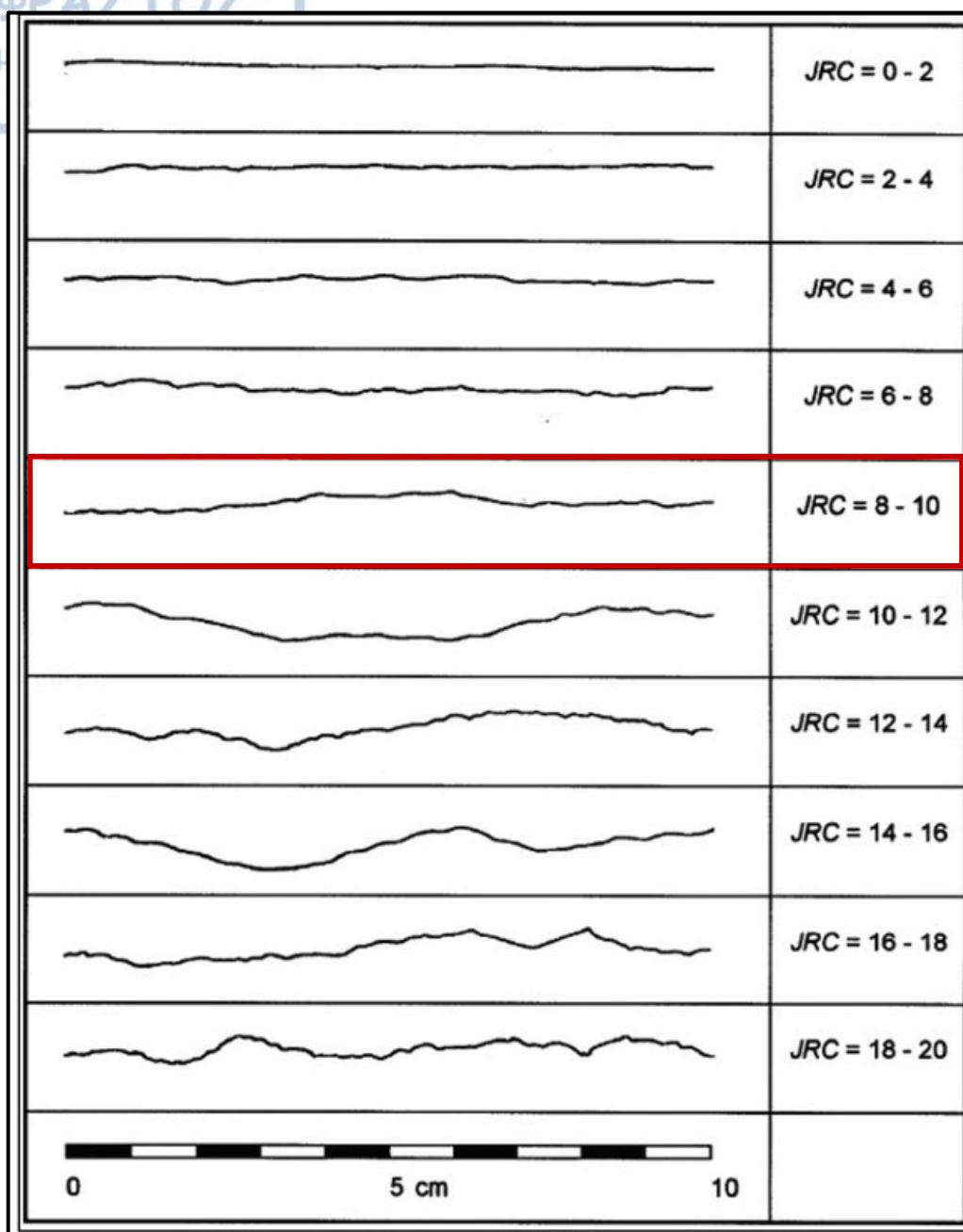
Σχήμα 28. Τεκτονικό διάγραμμα Schmidt των 122 υπαίθριων επί τόπου μετρήσεων των τεκτονικών στοιχείων στα πρανά της περιοχής της Ιεράς Μονής Κηπίνας. Επισημαίνονται οι συγκεντρώσεις πόλων καθώς και οι χαρακτηριστικές επιφάνειες που προκύπτουν από αυτούς και για τις τέσσερις (4) οικογένειες ασυνεχειών.

Με τη χρήση της σφύρας Schmidt ήταν δυνατός ο επί τόπου προσδιορισμός της αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών (Joint Compressive Strength – JCS) περί τα 24 MPa, ενώ η τραχύτητά τους (Joint Roughness Coefficient – JRC) προσδιορίστηκε σύμφωνα με την εμπειρική σχέση των Barton and Choubey (1977) μεταξύ των τιμών 8 και 10. Γενικά δεν παρατηρείται η ιδιαίτερη ύπαρξη υλικού πλήρωσης στις επιφάνειες των ασυνεχειών ενώ η βασική γωνία τριβής για της ασυνέχειες προσδιορίστηκε περί των 30° . Η απόσταση των ασυνεχειών (spacing) εντοπίστηκε ως σχετικά μεγάλη, με τη τιμή της να ξεπερνάει ακόμα και τα 5 m ανά θέσεις με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό του δυνητικού μεγέθους των επισφαλών τεμαχίων να ποικίλει μεταξύ μέτριων έως και πολύ μεγάλων τεμαχίων. Σε ορισμένες θέσεις, κυρίως λόγω αποτόνωσης των τάσεων, το μέγεθος των επισφαλών τεμαχίων παρατηρείται μικρότερο. Τέτοια φαινόμενα εμφανίζονται κυρίως στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης.

Η βασική γωνία τριβής (ή εσωτερική γωνία τριβής ϕ_i) εκτιμήθηκε βιβλιογραφικά με βάση τον Coulson (1972) με τιμές μεταξύ των 20° και 25° . Μέσω της επίλυσης του κριτηρίου Barton – Bandis, για τις δύο αυτές ακραίες τιμές, έγινε δυνατός ο προσδιορισμός της γωνίας τριβής των ασυνεχειών. Η τιμή της γωνίας τριβής των ασυνεχειών που τελικά επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις είναι η πιο συντηρητική που προέκυψε από την επίλυση του κριτηρίου αστοχίας και αυτή είναι των 30° .



Σχήμα 29. Διάγραμμα υπολογισμού του JRC σύμφωνα με τις μετρήσεις της σφύρας Schmidt. Με κόκκινο φαίνονται τα αποτελέσματα για τις υπό εξέταση ασυνέχειες (Deere and Miller, 1966, τροποποιημένο).



Σχήμα 30. Διάγραμμα εμπειρικού προσδιορισμού του JRC (Barton and Choubey, 1977)

Πίνακας 5. Τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις για τα πρανή της θέσης μελέτης.

ϕ_b (°)	ϕ (°)	JCS (MPa)	JRC
20	30	24	9

Μελετώντας τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες που ελέγχουν τα υπό εξέταση πρανή, καταλήγουμε πως γενικά το "πρόσωπο" του πρανούς χαρακτηρίζεται από μία τοπική χαλάρωση της βραχώμαζας, λόγω των πολύ μεγάλων κλίσεων των κλιτύων. Σε συνδυασμό με την απόσταση των ασυνεχειών, σχηματίζονται μετρίων έως μεγάλων διαστάσεων δυνητικά επισφαλή τεμάχια. Ο κύριος λόγος όπου η περιοχή δεν χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες τέτοιου είδους αστοχίες είναι η ίδια η "φύση" του βράχου. Ο όρος αυτός αναφέρεται στις πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες του ασβεστολίθου σε επίπεδο άρρηκτου βράχου. Οι ιδιότητες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη συγκράτηση των επισφαλών τεμαχίων, συνθέτοντας κατά αυτό το τρόπο συνθήκες προσωρινής ισορροπίας στη περιοχή μελέτης. Προφανώς όμως αυτές οι συνθήκες προσωρινής ισορροπίας δεν καλύπτουν τις ανάγκες για μία περιοχή όπου στεγάζεται ένα δημοφιλές ιστορικό μνημείο.

5.1.2. Πρόγραμμα εικονοληψίας από πτήση UAV

Λαμβάνοντας υπόψιν τη μοναδικότητα της τοποθεσίας στέγασης της Ιεράς Μονής Κηπίνας και την απόκρημνη μορφολογία, αποφασίστηκε η σύνταξη φωτογραμμετρικής έρευνας με τη πραγματοποίηση πτήσης UAV.

Ο UAV εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για συλλογή των εικόνων της περιοχής μελέτης ήταν το DJI Phantom 4 Pro V2.0 εξοπλισμένο με αισθητήρα 1 – ίντσα, 20 – megapixel και κάμερα FC6310 με 8.8 mm εστιακή απόσταση και χειροκίνητα προσαρμόσιμο διάφραγμα από F2.8 έως και F11. Επίσης μέσω του παραπάνω μηχανήματος δίνεται η δυνατότητα καταγραφής βίντεο με ζωντανή μετάδοση στον χειριστή (μέσω κινητού τηλεφώνου ή tablet) με ανάλυση έως και 4K/60 fps. Η αυτονομία της μπαταρίας του σε κανονικές συνθήκες (π.χ. ασθενής άνεμος ή/και αραιή λήψη φωτογραφιών) είναι έως και 30 λεπτά ενώ αυτή μειώνεται στα 18 λεπτά με πλήρη χρήση των δυνατοτήτων (π.χ. εντονότερος άνεμος ή/και πυκνή λήψη φωτογραφιών). Τέλος αξίζει να επισημανθεί πως φέρει τη δυνατότητα ελέγχου κίνησης σε μία ακτίνα 7 km, ενώ μπορεί να τα πραγματοποιήσει και πτήσης με ενεργή τη λειτουργία αυτόματου πιλότου μέσω του προκαθορισμού συγκεκριμένων σημείων.

Χειριστής του μηχανήματος για την έρευνα στην περιοχή μελέτης ήταν ο Γεώργιος Παπαθανασίου (Επίκουρος Καθηγητής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης). Η διαδικασία χειρισμού και πτήσης του συγκεκριμένου εργαλείου απαιτεί τόσο την γνώση όσο και την εμπειρία από τον χειριστή με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη και πληρέστερη λήψη δεδομένων. Σύμφωνα και με τις αρχές της φωτογραμμετρίας που αναλύθηκαν παραπάνω, όσο με πιο ορθό τρόπο ληφθούν οι αεροφωτογραφίες τόσο η αλληλοεπικάλυψή αυτών θα είναι πιο ολοκληρωμένη και συνεπώς τα τελικά προϊόντα που θα εξαχθούν θα είναι πιο λεπτομερή και πιο ακριβή σε σχέση με την πραγματική εικόνα της περιοχής.

Για την παρούσα μελέτη λήφθηκαν συνολικά 362 γεωαναφερμένες φωτογραφίες των υπό εξέταση πρανών, όλες με τη μέγιστη δυνατή ανάλυση των 20 megapixel.



Εικόνα 18. Το UAV που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα μελέτη DJI Phantom 4 Pro v 2.0.

5.2 Ανάπτυξη τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων

Οι εικόνες που λήφθηκαν από το UAV επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού Pix4Dmapper software v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland) με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πυκνού τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων αποτελούμενο από περίπου 104 εκατομμύρια σημεία, με μία εδαφική ανάλυση (ground resolution) της τάξης των 1.27 cm/pixel και με ένα σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error) στα 0.157 pixels. Η περαιτέρω επεξεργασία του οδήγησε στη κατασκευή ενός λεπτομερούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (Digital Elevation Model – DEM) με ίδια ανάλυση pixel όπως και το μοντέλο νέφους σημείων.

Το παραγόμενο τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων, γεωαναφέρθηκε τόσο μέσω του αισθητήρα GPS που υπάρχει στο χρησιμοποιούμενο UAV, όσο και μέσω πέντε (5) διαφορετικών τεχνητών εδαφικών σημείων (Ground Control Point – GCP) με καθορισμένες συντεταγμένες. Τα GCPs αποτελούν σημεία που καθορίζει ο χρήστης και φέρουν γνωστές συντεταγμένες. Στόχος τους είναι η μείωση του σφάλματος κατά τη διαδικασία της γεωαναφοράς του μοντέλου. Για τη συγκεκριμένη θέση, και λόγω της απόκρημνης μορφολογίας της, για αποφυγή ατυχημάτων ως GCPs επιλέχθηκαν κάποιες χαρακτηριστικές εύκολες προσβάσιμες περιοχές στις κατώτερες περιοχές τόσο κοντά στο δρόμο που οδηγεί στη Μονή όσο και στην ίδια την Ιερή Μονής Κηπίνας. Στις περιοχές λήφθηκαν οι συντεταγμένες μέσω μηχανήματος GPS, κατά την υπαίθρια επίσκεψη, και ενσωματώθηκαν οι συντεταγμένες αυτές μέσω του λογισμικού κατά τη δημιουργία του μοντέλου.



Σχήμα 31. Το αρχικά παραγόμενο τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων για τη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας.

5.3 Επεξεργασία τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων

Για την εξαγωγή δεδομένων από ένα μοντέλο νέφους σημείων είναι απαραίτητη μια αρχική επεξεργασία αυτού. Η επεξεργασία αυτή εκφράζεται μέσω του σταδίου του καθαρισμού (filtering). Μέσω της παραπάνω διαδικασίας απομακρύνονται τυχόν “θόρυβοι” που καταγράφηκαν κατά τη διαδικασία της σάρωσης με το UAV. Οι “θόρυβοι” αυτοί μπορεί να σχετίζονται με σκόνη στην ατμόσφαιρα, την υγρασία, την ανθρώπινη δραστηριότητα, με κατοικίες κλπ. Επιπλέον μέσω της παραπάνω διαδικασίας γίνεται εφικτή και η απομάκρυνση της βλάστησης στη περιοχή έτσι ώστε να υπάρχει μία “καθαρή” εικόνα της βραχώμαζας.

Στη παρούσα μελέτη, οι διαδικασίες καθαρισμού πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα μέσω των κατάλληλων εργαλείων που παρείχε το λογισμικό CloudCompare™ με πολύ μεγάλη προσοχή και επιμέλεια έτσι ώστε να μην υπάρξει κάποια απώλεια σημαντικής πληροφορίας από το μοντέλο.

Η σημασία του καθαρισμού ενός τέτοιου είδους μοντέλου αποτελεί ένα πολύ σημαντικό βήμα προετοιμασίας των αναλύσεων καθώς μπορεί ο χρήστης να έχει την ικανότητα να ξεχωρίσει για παράδειγμα τη βλάστηση ή κάποιου είδους “θόρυβο” από τη πραγματική επιφάνεια του πρανούς, αλλά κάτι τέτοιο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με αυτοματοποιημένες μεθόδους μέσω των λογισμικών επεξεργασίας. Για αυτά τα λογισμικά όλο το μοντέλο αποτελείται από σημεία με χωρικές συντεταγμένες. Επομένως καθίσταται σαφές πως ο σωστός καθαρισμός τους μοντέλου, τόσο ώστε να αφαιρεθεί η άχρηστη πληροφορία στο σύνολο της όσο και στο να μην αφαιρεθεί τμήμα του πρανούς που θα εξεταστεί, είναι μείζονος σημασίας σε τέτοιου είδους μελέτες.



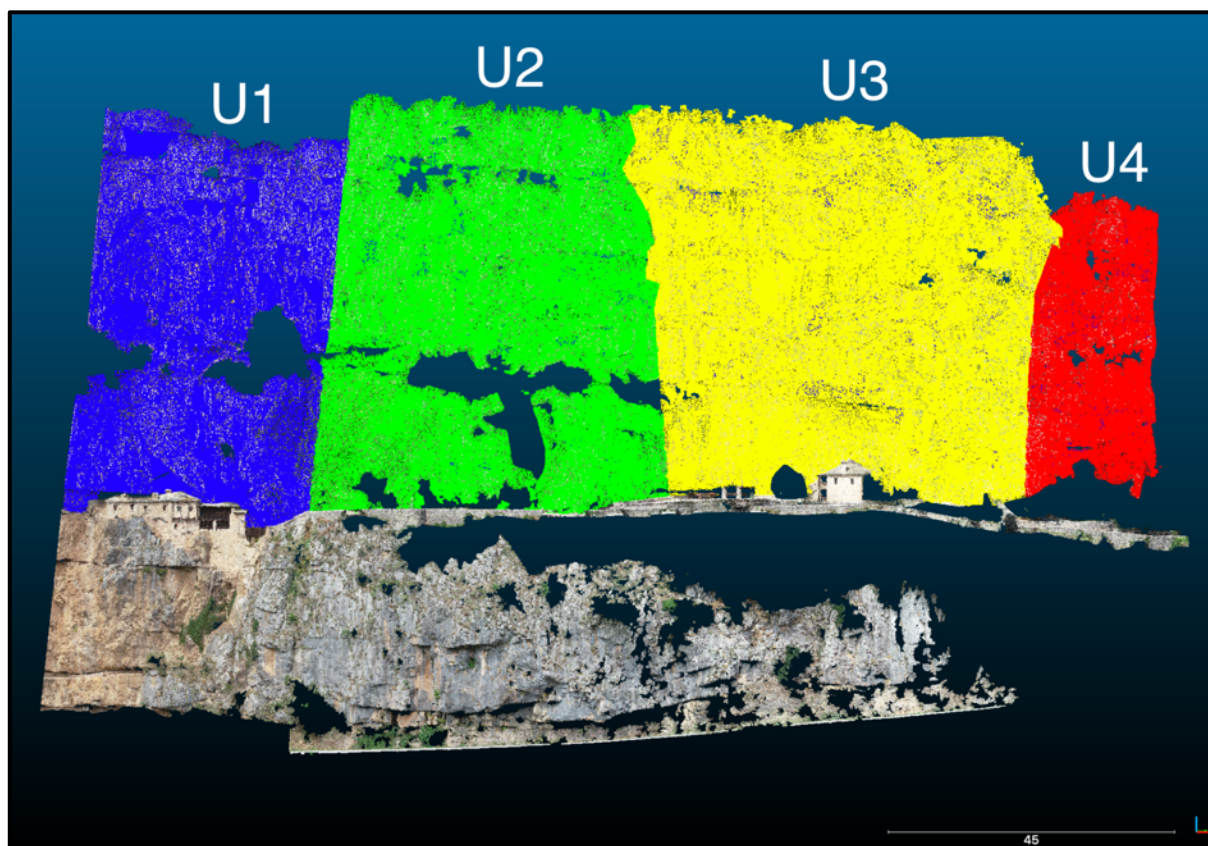
Σχήμα 32. Εικόνα του επεξεργασμένου τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων της περιοχής μελέτης, αφού του έχει αφαιρεθεί θόρυβος και βλάστηση. Με κίτρινες τελείες διακρίνονται οι θέσεις των πέντε (5) διαφορετικών GCPs.

Έπειτα από τον καθαρισμό του, το αρχικό μοντέλο διαχωρίστηκε σε τέσσερις (4) διαφορετικές υπό – περιοχές έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις σε αυτά. Ο διαχωρισμός αυτός βασίστηκε σε δύο βασικά κριτήρια. Το πρώτο ήταν τα μεταβαλλόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς και διαχωρισμός έγινε έτσι ώστε τα επιμέρους πρανή που θα προκύψουν να διατηρούν σταθερή διεύθυνση κλίσης για το “πρόσωπο” τους. Το δεύτερο κριτήριο ήταν σχετικά με τη διαφορά ανάμεσα στις επιπτώσεις που θα είχε ένα δυνητικό φαινόμενο βραχοκαταπτώσεων σε κάθε μία από τις υπό – περιοχές και τα στοιχεία (δρόμοι, οικίες, κτίσματα κλπ.) που

υπόκεινται αυτών. Τα στοιχεία της κάθε υπό – περιοχής αναλυτικά αναγράφονται στο Πίνακα 6. ενώ στο Σχήμα 33. φαίνεται οπτικά αυτός ο διαχωρισμός. Αξίζει να επισημανθεί πως όλες οι μετρήσεις που περιλαμβάνονται στο Πίνακα 6. πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού CloudCompare™.

Πίνακας 6. Τα κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων (4) υπό – περιοχών που προέκυψαν από το αρχικό point cloud.

Υπό – περιοχή	Διαστάσεις (m ²)	Γωνία κλίσης /Διεύθυνση κλίσης
U1	2427	87/157
U2	3152	85/130
U3	3594	87/315
U4	909	87/120



Σχήμα 33. Σχηματική απεικόνιση των τεσσάρων (4) υπό – περιοχών που χωρίστηκε το αρχικό μοντέλο νέφους σημείων (point cloud).

5.4 Ανάλυση προσανατολισμού και απόστασης επιφανειών

5.4.1. Ανάλυση προσανατολισμού επιφανειών

Επειτα από τον διαχωρισμό του αρχικού τρισδιάστατου μοντέλου σε τέσσερα (4) επιμέρους νέφη σημείων, όπου αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε σε κάθε μία αυτές μία ημί – αυτοματοποιημένη ανάλυση μέσω του λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor) όπου αναπτύχθηκε από τον Riquelme (2014), με στόχο τον προσδιορισμό των κύριων οικογενειών ασυνεχειών που διέπουν τη βραχύμαζα στη περιοχή μελέτης. Επομένως, για κάθε ξεχωριστό νέφος σημείων υπολογίστηκε ο προσανατολισμός διαφορετικών επιφανειών – επιπέδων με απώτερο σκοπό την ομαδοποίηση αυτών που εντάσσονται σε κοινή ομάδα, άρα στην ίδια οικογένεια ασυνεχειών.

Για την εκτίμηση των κύριων οικογενειών των ασυνεχειών και τον υπολογισμό του προσανατολισμού τους ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από τους Riquelme et al. (2014). Αναλυτικότερα, για κάθε σημείο του νέφους εντοπίζονται τα “k” κοντινότερα γειτονικά του σημεία (knn nearest neighbors) για μία καθορισμένη τιμή από το χρήστη αναζητούμενων σημείων. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η δημιουργία συνόλων “k” κοντινότερων γειτονικών σημείων για κάθε ένα από τα σημεία του νέφους.

Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού πραγματοποιείται ο έλεγχος συνεπιπεδότητας (coplanarity test) για κάθε ένα από τα ήδη καθορισμένα σύνολα ως προς το αρχικό σημείο όπου προέκυψαν. Ο έλεγχος αυτός υλοποιείται με βάση τις αρχές τον αλγόριθμο PCA (Principal Component Analysis) όπου υπολογίζετε το κανονικό διάνυσμα (normal vector) κάθε δυνητικού επιπέδου και καθορίζεται ο συντελεστής ανεκτικότητας “n”, όπου ουσιαστικά καθορίζει τα ανεκτά επίπεδα απόκλισης έτσι ώστε ένα σημείο να θεωρηθεί υποψήφιο για την ένταξη του σε ένα επίπεδο ή μη. Όσα σημεία θεωρηθούν υποψήφια κρατώνται, ενώ απομακρύνονται όσα δε πληρούν τις προϋποθέσεις. Συνεπώς, μέσω της παραπάνω διαδικασίας εντοπίστηκαν εκείνα τα σημεία που είναι συνεπίεδα με τα “k” γειτονικά τους.

Μετά το καθορισμό των επιπέδων, το λογισμικό χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία KDE (Kernel Density Estimation) όπως αυτή προτάθηκε από τους Botev et al. (2010) με στόχο τον προσδιορισμό των κύριων οικογενειών ασυνεχειών. Η παραπάνω μεθοδολογία αναφέρεται στον υπολογισμό της πυκνότητας των πόλων των ήδη προκαθορισμένων επιπέδων, μέσω της προβολής τους σε ένα στερεοδιάγραμμα. Ουσιαστικά η παραπάνω διαδικασία είναι ανάλογη της λήψης μετρήσεων υπαίθρια με γεωλογική πυξίδα από ένα πρανές, αλλά σε μία τελείως διαφορετική κλίμακα μεγέθους πληροφοριών. Επομένως, μέσω του αυτόματου υπολογισμού των πυκνοτήτων πόλων από το λογισμικό και τη χειροκίνητη εύρεση των μέγιστων – αντιπροσωπευτικών προσανατολισμών, γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός του αριθμού και του προσανατολισμού των κύριων οικογενειών ασυνεχειών.

Τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας που αναλύθηκε παραπάνω, είναι η ανάθεση μία οικογένειας ασυνεχειών σε κάθε σημείου που εισάχθηκε στο πρόγραμμα από το αρχικό νέφος σημείων, επιτρέποντας έτσι την κατηγοριοποίηση όλων των σημείων που συνυπάρχουν σε μία οικογένεια. Η διάκριση αυτή εκφράζεται μέσω ενός νέου τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων με επιπρόσθετο χαρακτηριστικό για κάθε σημείο το δείκτη της οικογένειας ασυνεχειών (J_s) στην οποία ανήκει, μετατρέποντας τα δεδομένα σε μία μορφή XYZRGBJ_s.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε τέσσερις (4) επιμέρους φορές, μία για κάθε προκαθορισμένη υπό – περιοχή του αρχικού μοντέλου.

5.4.2. Ανάλυση απόστασης (spacing) επιφανειών

Σε συνέχεια του καθορισμού των κύριων οικογενειών ασυνεχειών υπολογίστηκε η απόσταση (spacing) μεταξύ των ασυνεχειών που συνθέτουν την ίδια οικογένεια. Όπως γίνεται σαφές, για τον υπολογισμό της απόστασης των ασυνεχειών είναι απαραίτητος ο εντοπισμός των επιφανειών που αποτελούν την εκάστοτε οικογένεια. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω υπολογισμών έγινε διεξαγωγή ανάλυσης κατά συστάδες (Cluster Analysis) στα σημεία που συνθέτουν κάθε οικογένεια ασυνεχειών (χαρακτηριστικό J_s που προστέθηκε στο προηγούμενο βήμα της ανάλυσης), επίσης μέσω του λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor) που αναπτύχθηκε από τον Riquelme (2014).

Η ανάλυση κατά συστάδες (Cluster Analysis) πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή του αλγορίθμου DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) και σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Riquelme et al. (2015). Η απόσταση που υπολογίζεται μέσω της παραπάνω μεθοδολογία αντιπροσωπεύει τη μέση κάθετη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας, κάνοντας τη παραδοχή πως όλες οι επιφάνειες της ίδιας οικογένειας είναι πλήρως παράλληλες μεταξύ τους και το μόνο που μεταβάλλεται είναι η κάθετη απόστασή τους. Το παραπάνω γίνεται καλύτερα αντιληπτό μέσω της μαθηματικής έκφρασης των επιφανειών. Συγκεκριμένα, κάθε επίπεδο – επιφάνεια εκφράζεται μέσω μίας εξίσωσης του τύπου:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

Κατά την εξίσωση (1), οι συστάδες της ίδιας οικογένειας ασυνεχειών παίρνουν κοινές τιμές για τους συντελεστές A, B και C και κάθε μία από αυτές φέρει ένα διαφορετικό συντελεστή D. Επομένως γίνεται αντιληπτό πως ο συντελεστής D είναι αυτός που διαφοροποιεί τις επιφάνειες της ίδιας οικογένειας και ουσιαστικά αποτελεί αυτόν που εκφράζει τη κάθετη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας.

Κάθε σημείο που εντάσσεται σε μία συγκεκριμένη συστάδα παίρνει τον κατάλληλο δείκτη J_c που αντιστοιχεί σε αυτή και δημιουργείται με αυτό το τρόπο ένα νέο νέφος σημείων το οποίο αποτελείται από όλα τα σημεία που αντιστοιχούν σε μία συστάδα και περιέχει πληροφορία της μορφής XYZRGB J_sJ_c .

Πλέον κάθε κύρια οικογένεια ασυνεχειών αποτελείται από παράλληλες επιφάνειες με διαφορετική τιμή συντελεστή D, όπου ουσιαστικά εκφράζει την απόσταση κάθε επιπέδου από την αρχή των αξόνων. Οι συντελεστές D, ανάμεσα στην ίδια κύρια οικογένεια ασυνεχειών, ταξινομούνται με αύξουσα σειρά και υπολογίζεται η απόλυτη διαφορά τους μεταξύ διαδοχικών σημείων. Οι απόλυτες αυτές διαφορές αποτελούν την έκφραση της κανονικής κατανομής της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας.

Η παρούσα διαδικασία πραγματοποιήθηκε και στις τέσσερις (4) υπό – περιοχές, για κάθε κύρια οικογένεια ασυνεχειών σε αυτές με ή χωρίς τη παραδοχή της εμμονής τους στο χώρο καθώς τελικώς δίνονται δύο τιμές απόστασης για κάθε οικογένεια (με εμμονή/ χωρίς εμμονή).

Τελικώς αξίζει να επισημανθεί πως για την υλοποίηση της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι απαραίτητος από το χρήστη ο καθορισμός του ελάχιστου αριθμού σημείων για τον οποίο θα γίνεται αποδεκτή μια συστάδα, λόγω της πιθανότητας που υπάρχει μέσω του αλγορίθμου να εντοπίσει και συστάδες που αντιστοιχούν σε πολύ μικρές επιφάνειες και επομένως απαρτίζονται από ένα πολύ μικρότερο πλήθος σημείων συγκριτικά με τις υπόλοιπες συστάδες του νέφους σημείων.

5.5 Κινηματική Ανάλυση

Μετά το προσδιορισμό των κύριων οικογενειών ασυνεχειών καθώς και προσανατολισμού αυτών (διεύθυνση κλίσης/γωνία κλίσης) έγινε δυνατή η υλοποίηση κινηματικής ανάλυσης για κάθε υπό – περιοχή με βάση τα γεωμετρικά στοιχεία αυτών.

Οι κινηματικές αναλύσεις για κάθε υπό – περιοχή πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού Dips της εταιρίας RocScience. Τα δεδομένα που εισάχθηκαν στο παραπάνω λογισμικό ήταν τα γεωμετρικά στοιχεία του υπό εξέταση πρσανούς (διεύθυνση κλίσης/γωνία κλίσης), τα στοιχεία προσανατολισμού των διαφορετικών κύριων οικογενειών ασυνεχειών (διεύθυνση κλίσης/γωνία κλίσης) καθώς και η βασική γωνία τριβής. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα εισαγωγής πραγματοποιείται ανάλυση σε στερεοδιάγραμμα Schmidt για κάθε πρανές.

Το λογισμικό Dips στη συνέχεια παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης του και προσδιορίζει την ή τις ασυνέχειες που δυνητικά θα μπορούσαν να συνεισφέρουν σε κάποιου είδους αστοχία. Τα είδη των ολισθήσεων είναι αυτά που αναλύθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο ενώ συνοπτικά τα κριτήρια αστοχίας που εξετάζονται από το λογισμικό για κάθε είδος ολίσθησης είναι :

- Επίπεδη ολίσθηση : παρόμοια διεύθυνση κλίσης (dip direction) της επιφάνειας με αυτή του πρσανούς ($\pm 20^\circ$) και ταυτόχρονα η γωνία κλίσης της (dip) να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της, και μικρότερη από την αντίστοιχη γωνία κλίσης του πρσανούς.
- Σφηνοειδής ολίσθηση : η επιφάνεια τομής των δύο ασυνεχειών πρέπει να έχει παρόμοια διεύθυνση κλίσης (dip direction) με αυτή του πρσανούς ($\pm 20^\circ$) και ταυτόχρονα η γωνία κλίσης (dip) της ακμής τομής των δύο ασυνεχειών να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της, και μικρότερη από την αντίστοιχη γωνία κλίσης του πρσανούς.
- Ανατροπή τεμάχους : η επιφάνεια αυτή πρέπει να έχει διεύθυνση κλίσης (dip direction) που να διαφέρει κατά 180° με την αντίστοιχη του πρσανούς ($\pm 20^\circ$) και ταυτόχρονα η γωνία κλίσης της (dip) να έχει πολύ μεγάλη, σχεδόν κατακόρυφη γωνία κλίσης ($\leq 70^\circ$). Η ανατροπή του τεμάχους μπορεί να είναι είτε άμεση (direct toppling) είτε εφελκυστική (flexural toppling).

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας έγινε δυνατός ο καθορισμός του βέλτιστου μοντέλου αστοχίας για κάθε υπό – περιοχή όπου απαρτίζουν τη συνολική θέση έρευνας στη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας.

5.6 Ανάλυση επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων

5.6.1. Προσδιορισμός μεγεθών υπαρχόντων και δυνητικών αστοχιών

Λόγω της έλλειψης κάποιου ιστορικού καταγραφής των φαινομένων βραχοκαταπτώσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στη περιοχής μελέτης, θεωρήθηκε απαραίτητος ένας έμμεσος τρόπος προσδιορισμού αυτών καθώς και των μεγεθών τους. Για την επίτευξη αυτού στόχου, εκμεταλλεύτηκαν τα αποτελέσματα των κινηματικών αναλύσεων, σχετικά με το βέλτιστο μοντέλο αστοχίας για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή, καθώς και η δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης της περιοχής μελέτης μέσω των μοντέλων νέφους σημείων.

Γνωρίζοντας το βέλτιστο μοντέλο αστοχίας για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των τρισδιάστατων μοντέλων με στόχο την εύρεση θέσεων όπου πληρούνται οι προκαθορισμένες αυτές συνθήκες αστοχίας και οπτικά ο χρήστης μπορεί να καταλήξει με τεχνικογεωλογικά και γεωμετρικά κριτήρια πως υπήρξε κάποια κατάπτωση. Οι θέσεις αυτές σε κάθε πρανές επισημάνθηκαν και μέσω των κατάλληλων εργαλείων που προσφέρονται από το λογισμικό CloudCompare™ έγινε δυνατή η μέτρηση των όγκων των αποκολλημένων τεμαχίων. Οι παραπάνω όγκοι μετρήθηκαν με την αξιοποίηση του εργαλείου Volume 2.5D του λογισμικού.

Μία παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε στις τέσσερις (4) υπό – περιοχές και για τον προσδιορισμό των επισφαλών βραχοτεμαχών για μελλοντική κατάπτωση. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν οι θέσεις όπου ικανοποιούνταν οι συνθήκες αστοχίες οριοθετώντας κάποια συγκεκριμένα τεμάχια. Η θέση και ο όγκος των παραπάνω τεμαχών προσδιορίστηκε με τα ίδια εργαλεία όπως και για τα τεμάχια που έχουν ήδη αστοχήσει κατά το παρελθόν.

Προκειμένου να εξεταστεί η ακρίβεια των αυτοματοποιημένων υπολογισμών σχετικά με τους επί μέρους όγκους, πραγματοποιήθηκε μια τυχαία επιλεκτική ογκομέτρηση χειροκίνητα από το χρήστη, της τάξεως του 20% των υπό εξέταση τεμαχών ανά πρηνές. Τα αποτελέσματα έδειξαν μία πολύ αξιόπιστη εικόνα των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν αυτόματα από το εργαλείο Volume 2.5D του λογισμικού.

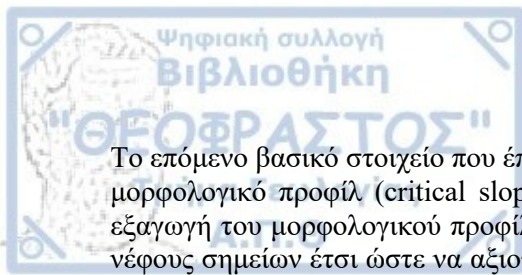
Μέσω στατιστικής ανάλυσης των παραπάνω αποτελεσμάτων, εκτιμήθηκε η χωρική κατανομή των διαφόρων μεγεθών, τα κυρίαρχα μεγέθη τεμαχών, η πυκνότητα καθώς και η συχνότητα εμφάνισης ανά υπό – περιοχή τόσο των προϋπαρχόντων όσο των επισφαλών τεμαχών για βραχοκατάπτωση.

5.6.2. Τροχιακή προσομοίωση επισφαλών τεμαχών

Μετά το προσδιορισμό του πληθυσμού, του μεγέθους και της χωρικής κατανομής των επισφαλών βραχοτεμαχών έναντι κατάπτωσης, πραγματοποιήθηκαν τροχιακές προσομοιώσεις αυτών με στόχο των υπολογισμό σημαντικών παραμέτρων αναφορικά με τη εκτίμηση της επικινδυνότητας.

Συγκεκριμένα οι τροχιακές αυτές αναλύσεις υλοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού RocFall της εταιρίας RocScience. Το παραπάνω λογισμικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα 2D εργαλείο στατιστικών αναλύσεων με βοηθητικό χαρακτήρα ως προς τις εκτιμήσεις επικινδυνότητας σε πρηνή έναντι βραχοκαταπτώσεων. Μέσω του λογισμικού RocFall ήταν δυνατός ο προσδιορισμός της ενέργειας, της ταχύτητας καθώς και του ύψους αναπήδησης των επισφαλών τεμαχών για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή. Οι κατανομές και η ολοκληρωμένη στατιστική των παραπάνω παραμέτρων υπολογίστηκαν αυτόματα μέσω του λογισμικού κατά μήκος του προφίλ του εξεταζόμενου πρηνούς και παρουσιάζονται με τη μορφή γραφημάτων στο χρήστη. Επιπλέον, το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να παρέχει σημαντική βοήθεια στο καθορισμό και τη παραμετροποίηση των μέτρων αντιμετώπισης – αντιστήριξης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Stevens (1998), πληροφορίες σχετικά με τη συνολική κινητική ενέργεια και τη θέση πρόσκρουσης αυτών το τεμαχών με το εφαρμοσμένο μέτρο συγκράτησης (τόσο καθοριζόμενο από το χρήστη όσο και από τη βιβλιοθήκη του ίδιου του προγράμματος) μπορούν να καθορίσουν την αποτελεσματικότητα (μέγεθος, χωρητικότητα και θέση εφαρμογής) του. Όπως γίνεται κατανοητό οι πληροφορίες που εξάγονται από τη παραπάνω ανάλυση είναι πολύ σημαντικές σε οποιοδήποτε είδους εκτίμηση επικινδυνότητας, αλλά και συγκεκριμένα αποτελούν απαραίτητους παράγοντες στο προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης της παρούσας εργασίας που παρουσιάζεται εκτενώς στο 7^ο Κεφάλαιο.

Γενικά όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, τα αποκολλημένα τεμάχια βράχων κινούνται με πολύ μεγάλες ταχύτητες και η κίνηση του αποτελείται από τρεις κύριες φάσεις: ελεύθερη πτώση, αναπήδηση και κύλιση. Η τροχιά που θα διαγράψουν εξαρτάται κυρίως από τη μορφολογία τους πρηνούς αποκόλλησής τους καθώς και των φυσικών ιδιοτήτων τους. Επομένως, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η τροχιακή προσομοίωση των επισφαλών τεμαχών από το συγκεκριμένο λογισμικό για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή πρέπει να εισαχθούν κάποια συγκεκριμένα δεδομένα. Αρχικά, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός δύο (2) σημαντικών συντελεστών, του κάθετου (R_n) και του εφαπτομενικού (R_t) συντελεστή αναπήδησης της βραχώμαζας. Για τη παρούσα εργασία, οι παραπάνω συντελεστές καθορίστηκαν βιβλιογραφικά, σύμφωνα με την έρευνα του Αστερίου (2016), όπου μελετήθηκαν ασβεστολιθικά υλικά με παρόμοια γεωλογική ιστορία με τα υπό μελέτη και δόθηκε η τιμή 0.5 και στους δύο όπως προτείνεται από τον παραπάνω μελετητή.



Το επόμενο βασικό στοιχείο που έπρεπε να δοθεί στο λογισμικό ως δεδομένο ήταν το χαρακτηριστικό μορφολογικό προφίλ (critical slope profile) για κάθε ένα από τα τέσσερα υπό εξέταση πρανή. Η εξαγωγή του μορφολογικού προφίλ για κάθε υπό – περιοχή έγινε μέσω του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων έτσι ώστε να αξιοποιηθεί στο έπακρο η λεπτομέρεια και η γεωμετρική του ακρίβεια. Συγκεκριμένα, μέσω του λογισμικού CloudCompare™ κατασκευάστηκε μία γραμμή (polyline) στη θέση του χαρακτηριστικού προφίλ για κάθε υπό – περιοχή και εξάχθηκαν τα γεωαναφερμένα σημεία (verticles) που την αποτελούσαν. Αυτό έγινε καθώς η πληροφορία των μοντέλων είναι τρισδιάστατη ενώ το λογισμικό RocFall λειτουργεί με δυσδιάστατα δεδομένα. Μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας ήταν δυνατή η μετατροπή δηλαδή δεδομένων XYZ σε δεδομένα XY.

Τέλος, απαραίτητος για τη συγκεκριμένη ανάλυση ήταν ο καθορισμός της θέσης των επισφαλών τεμαχών πάνω στο μορφολογικό προφίλ του εκάστοτε πρανούς καθώς και η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών των τεμαχών αυτών. Και οι δύο αυτές προϋποθέσεις ικανοποιήθηκαν μέσω της πληροφορίας που εξάχθηκε κατά το προηγούμενο βήμα της ανάλυσης όπου παρουσιάστηκε στη παράγραφο 5.6.1. Τα δεδομένα για τη θέση των επισφαλών τεμαχών ήταν ήδη έτοιμα και σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού πραγματοποιήθηκε μετατροπή του όγκου σε μάζα με χρήση της πυκνότητας του ασβεστολίθου.

Αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης ήταν τελικώς ο προσδιορισμός της ενέργειας, της ταχύτητας καθώς και του ύψους αναπήδησης των επισφαλών τεμαχών για κάθε μία από τις τέσσερις (4) εξεταζόμενη υπό – περιοχή.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Κύριες οικογένειες ασυνεχειών

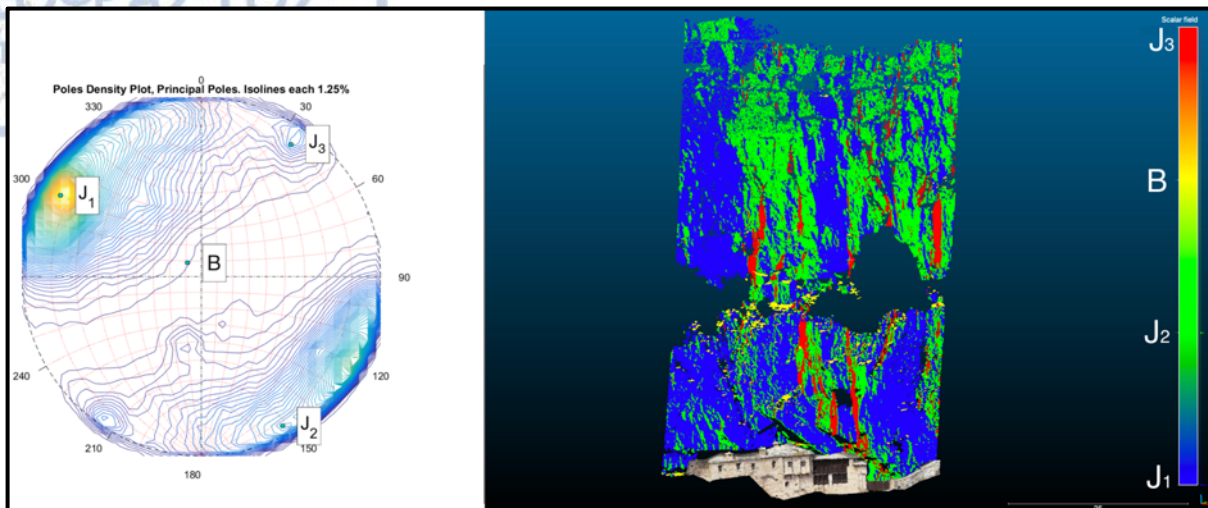
Για τον καθορισμό των κύριων οικογενειών ασυνεχειών και για της τέσσερις (4) υπό – περιοχές, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που αναλύθηκε στη παράγραφο 5.4.1. με τη χρήση του λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor) που αναπτύχθηκε από τον Riquelme (2014). Για τη πραγματοποίηση αυτής της μεθοδολογίας ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός κάποιων σημαντικών για το λογισμικό παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί ήταν κοινοί για κάθε υπό – περιοχή και αποτελούσαν από :

1. για τον υπολογισμό των κανονικών διανυσμάτων (normal vectors) για κάθε υπό μελέτη σημείο:
 - a. αριθμός κοντινότερων γειτονικών σημείων (knn) = 30
 - b. συντελεστής ανεκτικότητας για τον έλεγχο συνεπιπεδότητας (n) = 0.2
2. για τον υπολογισμό της πυκνότητας των πόλων:
 - a. αριθμός κλάσεων για την ανάλυση με τη μέθοδο KDE (nbins) = 64
 - b. ελάχιστη γωνία μεταξύ των κανονικών διανυσμάτων της ίδιας οικογένειας ασυνεχειών (ϕ) = 20°
3. για την ανάθεση μίας κύριας οικογένειας ασυνεχειών σε κάθε σημείο:
 - a. ελάχιστη γωνία μεταξύ του κανονικού διανύσματος του σημείου και του κανονικού διανύσματος της κύριας οικογένειας ασυνεχειών (cone) = 30°

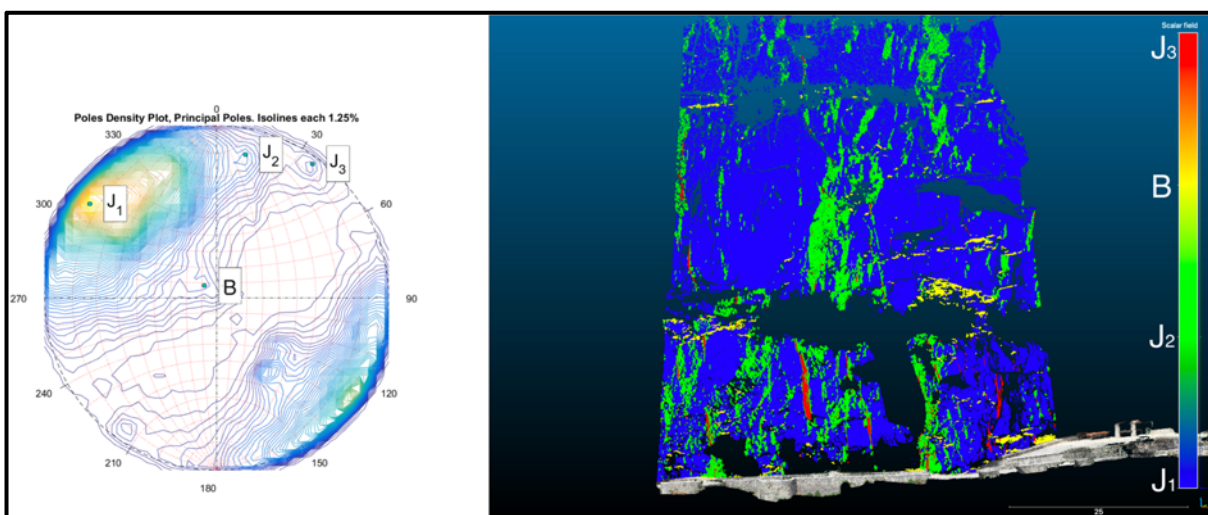
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη παραπάνω ανάλυση ήταν ο προσδιορισμός τεσσάρων (4) κύριων sets ασυνεχειών, από τα οποία τα τρία (3) αποτελούν ασυνέχειες (J_1 , J_2 και J_3) και το τέταρτο αναφέρεται στη στρώση (B). Τα κύρια στοιχεία αυτών, όπως εξάχθηκαν από το λογισμικό DSE παρουσιάζονται στο Πίνακα 7., ενώ στο Σχήμα 34. έως Σχήμα 38. υπάρχει η κατανομή αυτών στο χώρο των τεσσάρων (4) διαφορετικών υπό – περιοχών.

Πίνακας 7. Βασικά χαρακτηριστικά των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για κάθε υπό – περιοχή, όπως αυτά εξάχθηκαν από το λογισμικό DSE.

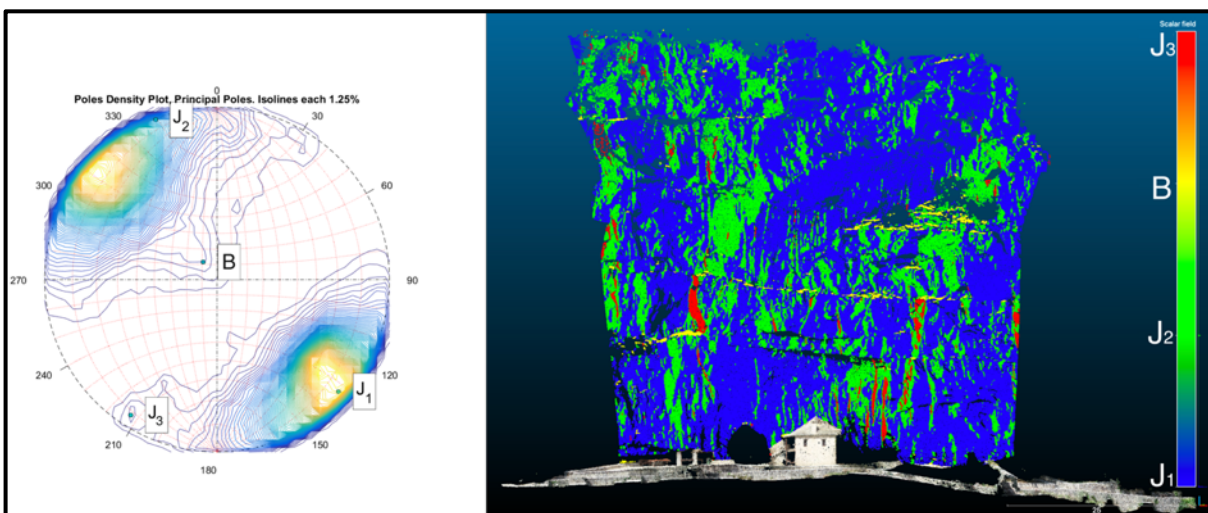
Υπό – περιοχή	Οικογένεια ασυνεχειών	Γωνία κλίσης/Διεύθ. κλίσης	Πυκνότητα	%
U1	J_1	85/120	2.76	48.44
	J_2	86/331	0.76	27.17
	B	11/135	0.09	1.78
	J_3	84/214	0.40	8.26
U2	J_1	82/126	2.12	57.88
	J_2	80/190	0.33	12.13
	B	10/134	0.18	2.39
	J_3	87/215	0.15	2.19
U3	J_1	85/317	2.15	62.57
	J_2	89/158	0.73	23.98
	B	14/142	0.11	1.37
	J_3	86/032	0.09	1.13
U4	J_1	85/103	2.65	67.63
	J_2	89/152	0.12	15.38
	B	13/145	0.09	2.01
	J_3	83/045	0.15	4.23



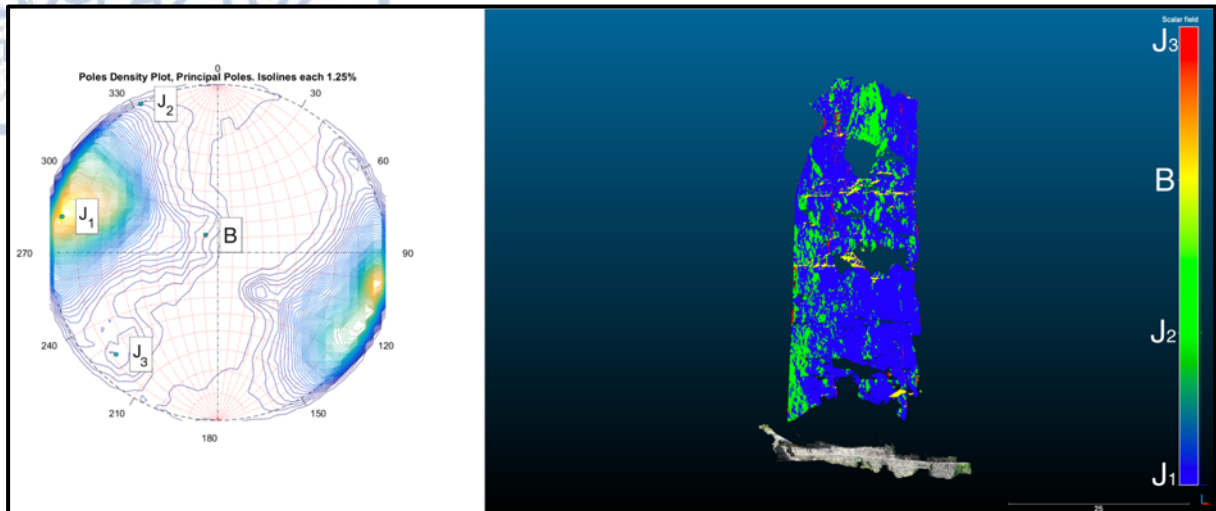
Σχήμα 34. Αριστερά: στερεογραφική προβολή της συγκέντρωσης των πόλων των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U1 όπως εξάχθηκε από το λογισμικό DSE. Δεξιά: τοποθέτηση των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U1 πάνω στο πρανές.



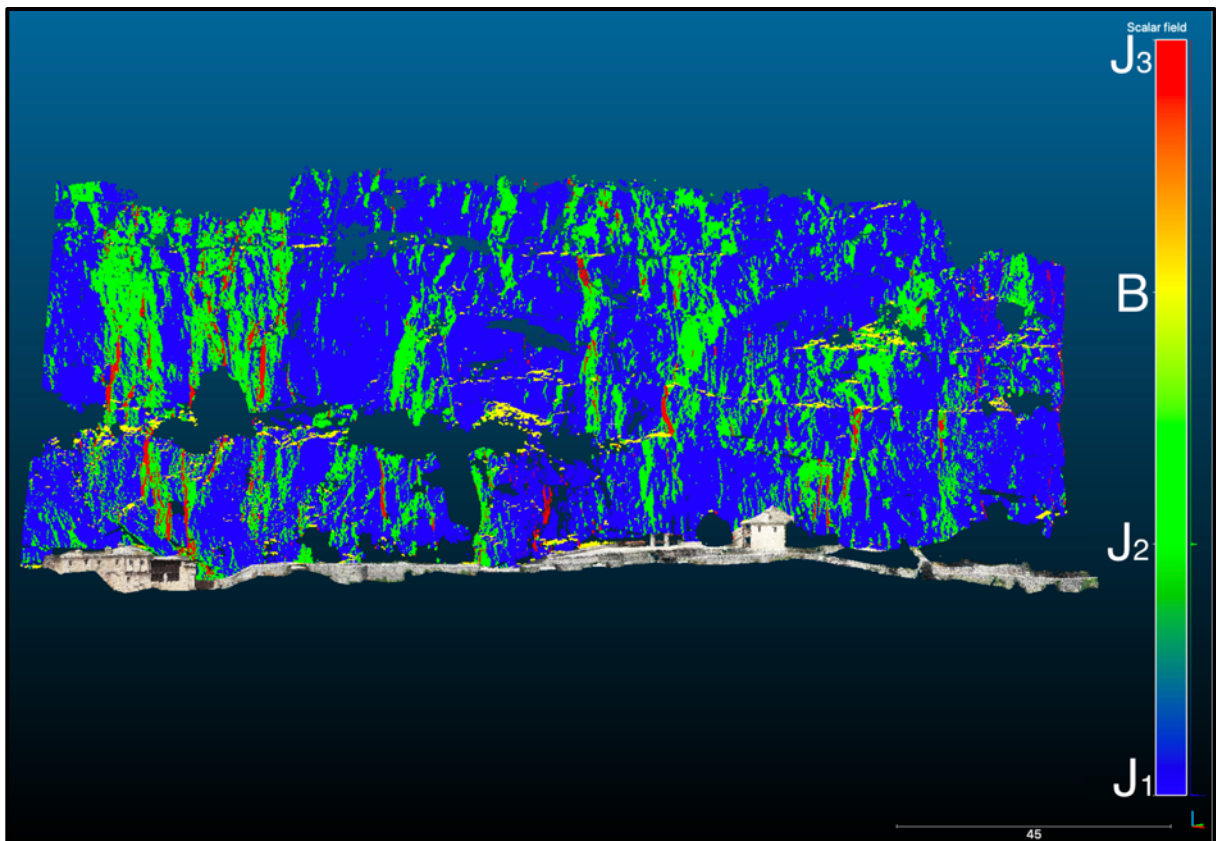
Σχήμα 35. Αριστερά: στερεογραφική προβολή της συγκέντρωσης των πόλων των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U2 όπως εξάχθηκε από το λογισμικό DSE. Δεξιά: τοποθέτηση των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U2 πάνω στο πρανές.



Σχήμα 36. Αριστερά: στερεογραφική προβολή της συγκέντρωσης των πόλων των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U3 όπως εξάχθηκε από το λογισμικό DSE. Δεξιά: τοποθέτηση των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U3 πάνω στο πρανές.



Σχήμα 37. Αριστερά: στερεογραφική προβολή της συγκέντρωσης των πόλων των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U4 όπως εξάχθηκε από το λογισμικό DSE. Δεξιά: τοποθέτηση των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για την υπό – περιοχή U4 πάνω στο πρανές.



Σχήμα 38. Συνολική εικόνα όλης την περιοχής μελέτης και τη χωρική κατανομή των κύριων οικογενειών ασυνεχειών σε αυτή, με βάση τα δεδομένα που εξάχθηκαν από το λογισμικό DSE.

6.2 Αποστάσεις ασυνεχειών

Για τον καθορισμό της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών της ίδιας κύριας οικογένειας και για της τέσσερις (4) υπό – περιοχές, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που αναλύθηκε στη παράγραφο 5.4.2. με την εφαρμογή της ανάλυσης κατά συστάδες (Cluster Analysis) μέσω του λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor) που αναπτύχθηκε από τον Riquelme (2014). Για τη πραγματοποίηση αυτής της μεθοδολογίας ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός κάποιων σημαντικών για το λογισμικό παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί ήταν κοινοί για κάθε υπό – περιοχή και αποτελούσαν από :

1. για τον υπολογισμό της ανάλυσης κατά συστάδες (cluster analysis):
 - a. κοινό κανονικό διάνυσμα για όλα τα μέλη συστάδας της ίδιας κύριας οικογένειας ασυνεχειών
 - b. παράγοντας ελέγχου αν δύο διαφορετικές συστάδες πρέπει να συνενωθούν (ksigma) = 1.5

Πίνακας 8. Αναλυτικά αποτελέσματα της μέσης απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών της ίδιας κύριας οικογένειας για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή.

Υπό – περιοχή	Οικογένεια ασυνεχειών	Γωνία κλίσης/Διεύθ. κλίσης	Μέση απόσταση (με εμμόνη) (m)	Μέση απόσταση (χωρίς εμμόνη) (m)
U1	J_1	85/120	0.4	0.9
	J_2	86/331	0.3	0.7
	B	11/135	2.2	3.8
	J_3	84/214	0.5	1.9
U2	J_1	82/126	0.3	0.8
	J_2	80/190	0.3	0.8
	B	10/134	2.0	3.2
	J_3	87/215	0.3	1.5
U3	J_1	85/317	0.5	1.0
	J_2	89/158	0.2	0.5
	B	14/142	3.9	5.2
	J_3	86/032	0.3	1.1
U4	J_1	85/103	0.7	1.2
	J_2	89/152	0.3	0.9
	B	13/145	2.5	3.9
	J_3	83/045	0.7	1.6

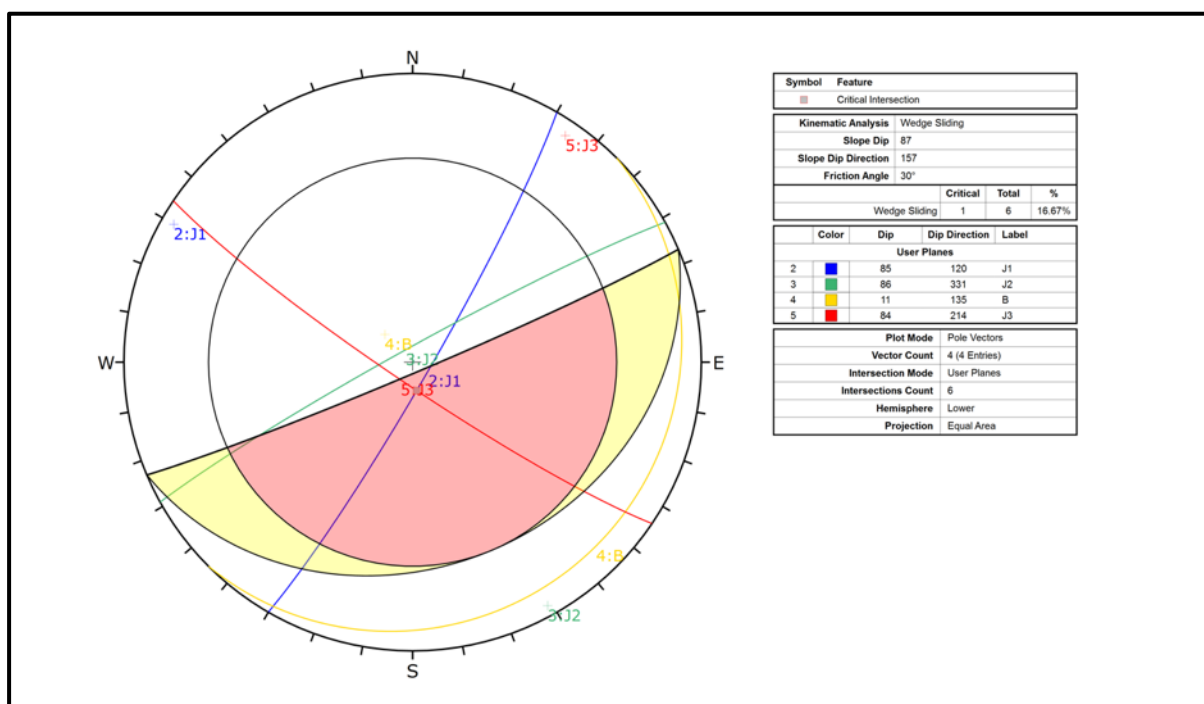
6.3 Βέλτιστα μοντέλα αστοχιών

Ο προσδιορισμός τού βέλτιστου μοντέλου αστοχιών για κάθε υπό – περιοχή υλοποιήθηκε μέσω κινηματικών αναλύσεων έτσι ώστε να καθοριστούν οι δυνητικές αστοχίες για αυτές, με βάση τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στη παράγραφο 5.5. Για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή εισάχθηκε, στο λογισμικό Dips της εταιρίας RocScience, η γεωμετρία των πρανών και τα γεωμετρικά στοιχεία των ασυνεχειών όπως αυτά εξάχθηκαν από το λογισμικό DSE και παρουσιάστηκαν στο Πίνακα 8.

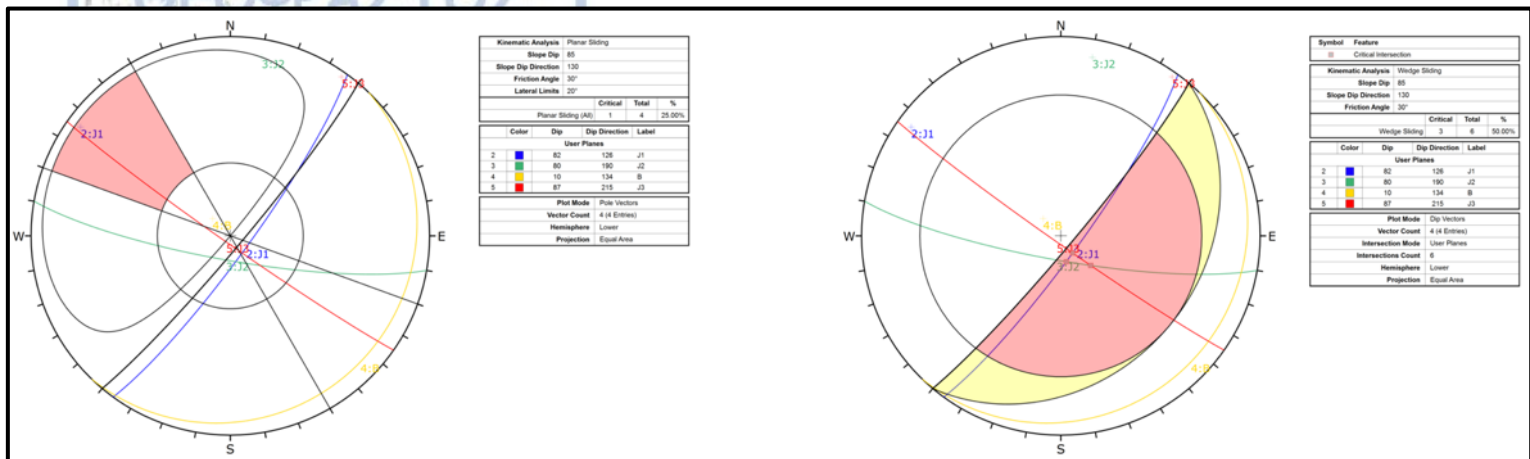
Το βέλτιστο μοντέλο για κάθε υπό – περιοχή παρουσιάζεται στο Πίνακα 9., ενώ από το Σχήμα 39. έως το Σχήμα 42. παρατίθενται τα εξαγόμενα στερεοδιαγράμματα όπως αυτά δόθηκαν από το λογισμικό Dips.

Πίνακας 9. Αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των κινηματικών αναλύσεων για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή.

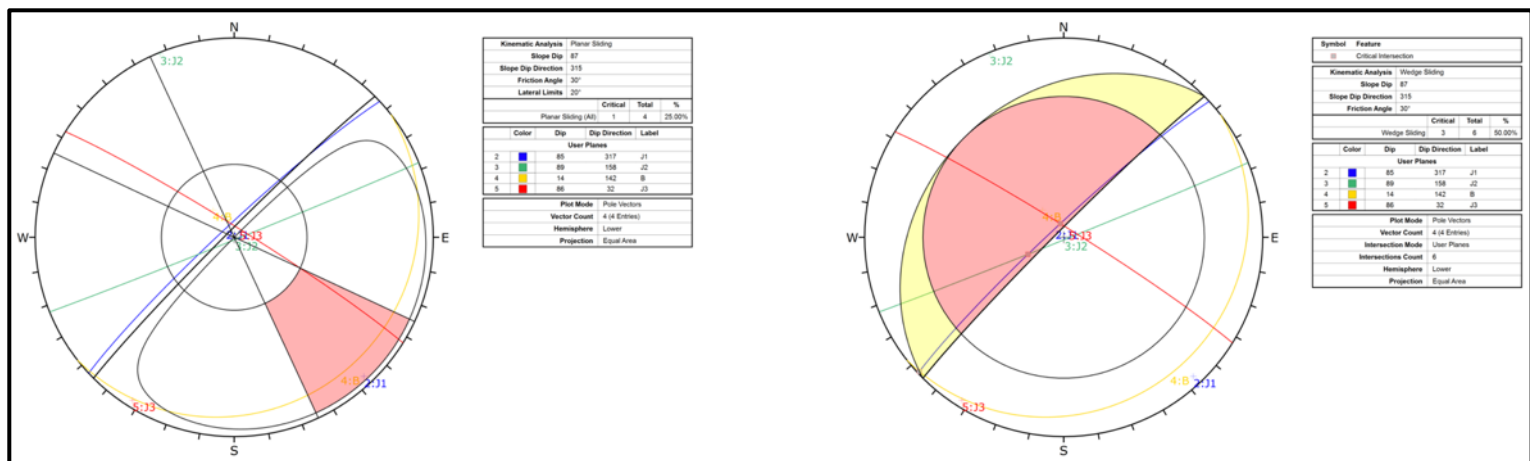
Υπό – περιοχή	Τύπος αστοχίας	Συμμετέχουσες οικογένειες ασυνεχειών
U1	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & J_3
U2	Επίπεδη ολίσθηση	J_1
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & J_2
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & J_3
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_2 & J_3
U3	Επίπεδη ολίσθηση	J_1
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & J_2
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & B
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & J_3
U4	Επίπεδη ολίσθηση	J_1
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & J_2
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_1 & J_3
	Σφηνοειδής ολίσθηση	J_2 & J_3



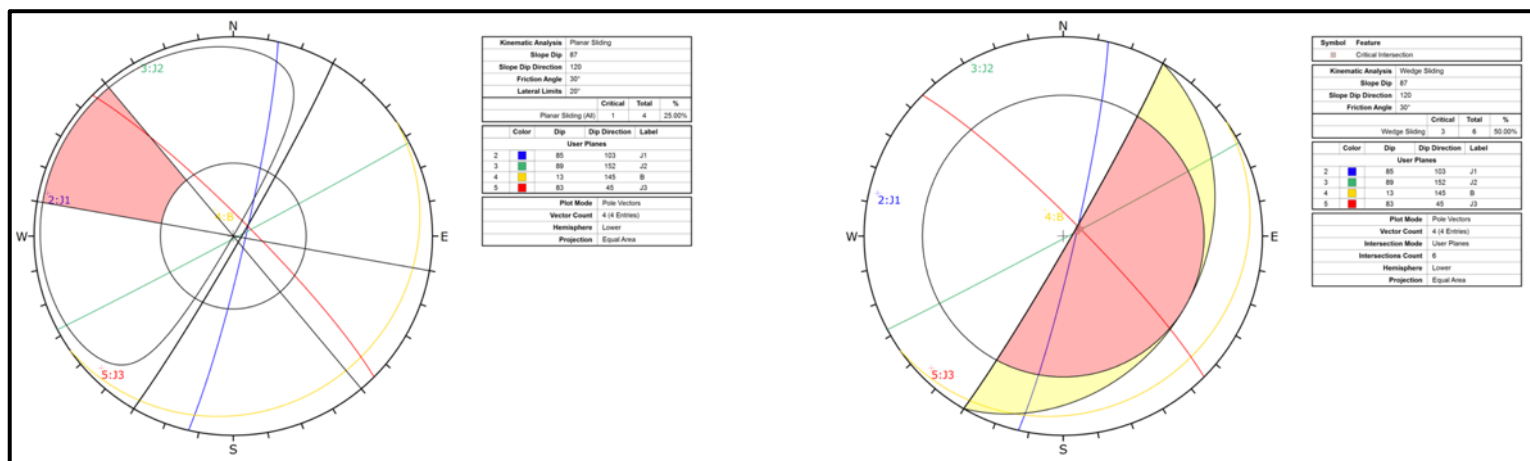
Σχήμα 39. Κινηματική ανάλυση έναντι αστοχίας με τη μορφή σφηνοειδών ολισθήσεων για την υπό – περιοχή U1.



Σχήμα 40. Κινηματική ανάλυση έναντι αστοχιών για την υπό – περιοχή U2. Αριστερά : ανάλυση έναντι επίπεδων ολισθήσεων. Δεξιά: ανάλυση έναντι σφηνοειδών ολισθήσεων.



Σχήμα 41. Κινηματική ανάλυση έναντι αστοχιών για την υπό – περιοχή U3. Αριστερά : ανάλυση έναντι επίπεδων ολισθήσεων. Δεξιά: ανάλυση έναντι σφηνοειδών ολισθήσεων.



Σχήμα 42. Κινηματική ανάλυση έναντι αστοχιών για την υπό – περιοχή U4. Αριστερά : ανάλυση έναντι επίπεδων ολισθήσεων. Δεξιά: ανάλυση έναντι σφηνοειδών ολισθήσεων.

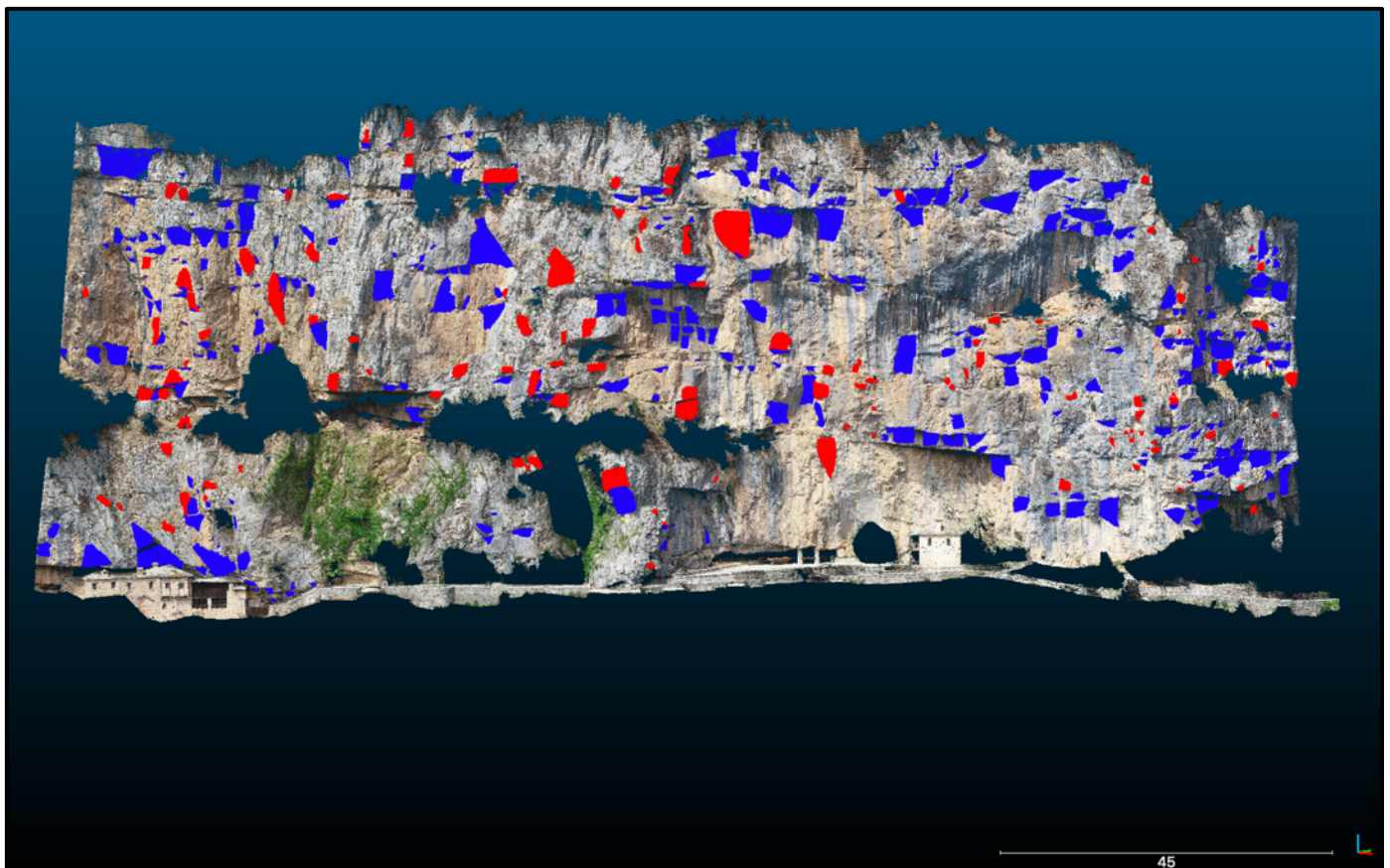
6.4 Επιδεκτικότητα έναντι βραχοκαταπτώσεων

6.4.1 Κατανομή όγκου υπάρχοντων και δυνητικών αστοχούντων τεμαχών

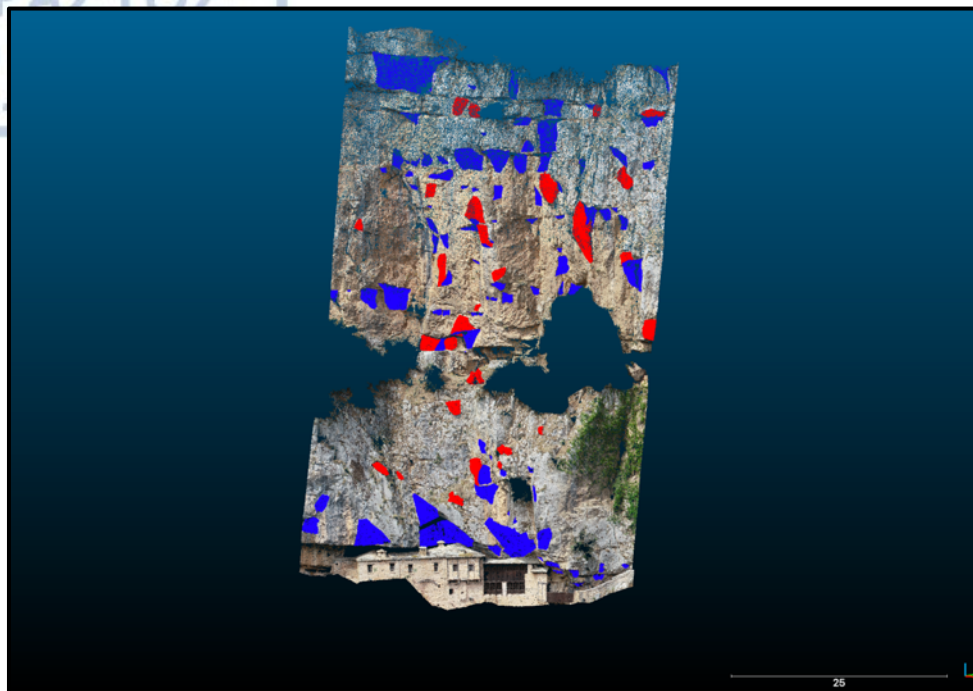
Μέσω της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στη παράγραφο 5.6.1. ήταν δυνατός ο προσδιορισμός και η παραμετροποίηση των βραχοτεμαχών που έχουν αστοχήσει κατά το παρελθόν αλλά και τον επισφαλών για μελλοντική κατάπτωση. Συγκεκριμένα ταυτοποιήθηκαν συνολικά 455 βραχοτεμάχη και στις τέσσερις (4) υπό – περιοχές, από τα οποία τα 326 αποτελούν τεμάχη που έχουν αστοχήσει κατά το παρελθόν ενώ τα υπόλοιπα 129 χαρακτηρίζονται ως επισφαλή για δυνητική αστοχία. Αναλυτικά τα στοιχεία τους παρουσιάζονται στο Πίνακα 10., ενώ από το Σχήμα 43. έως και το Σχήμα 48. φαίνεται η χωρική κατανομή των τεμαχών αυτών ανά εξεταζόμενη υπό – περιοχή αλλά και η κατανομή των όγκων τους.

Πίνακας 10. Στοιχεία των εντοπισμένων τεμαχών ανά υπό – περιοχή μελέτης.

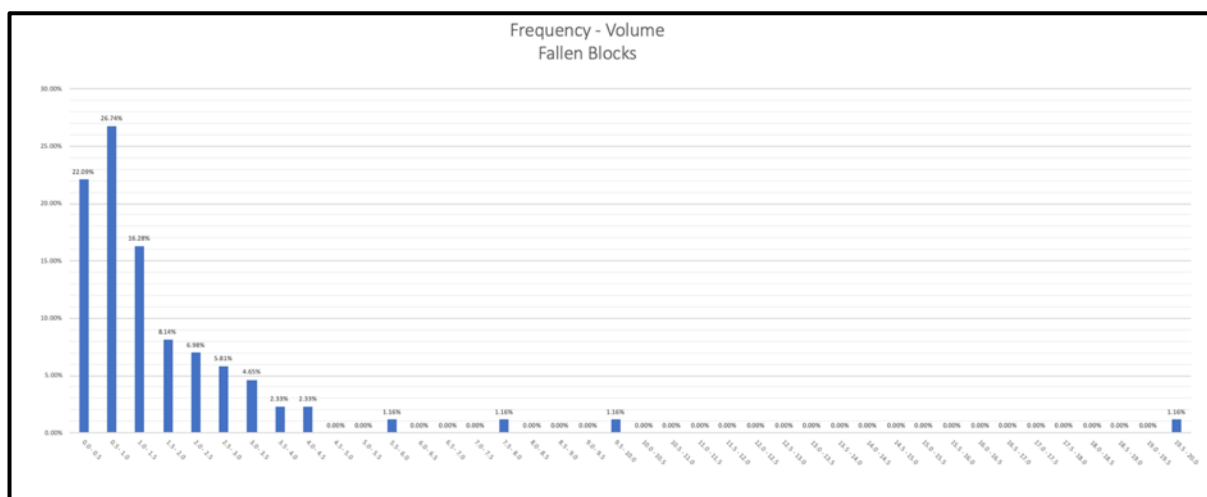
Υπό – περιοχή	Αστοχούντα τεμάχη	Επισφαλή τεμάχη
U1	86	32
U2	69	38
U3	99	45
U4	72	14
SUM	326	129



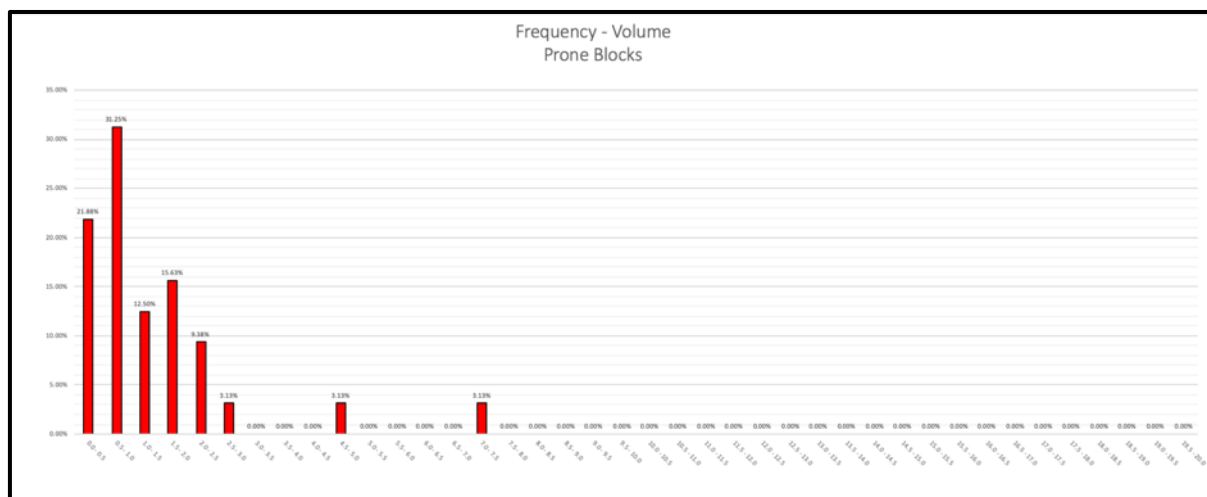
Σχήμα 43. Εποπτική εικόνα της χωρικής κατανομής των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) και των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για το σύνολο της υπό μελέτης περιοχής.



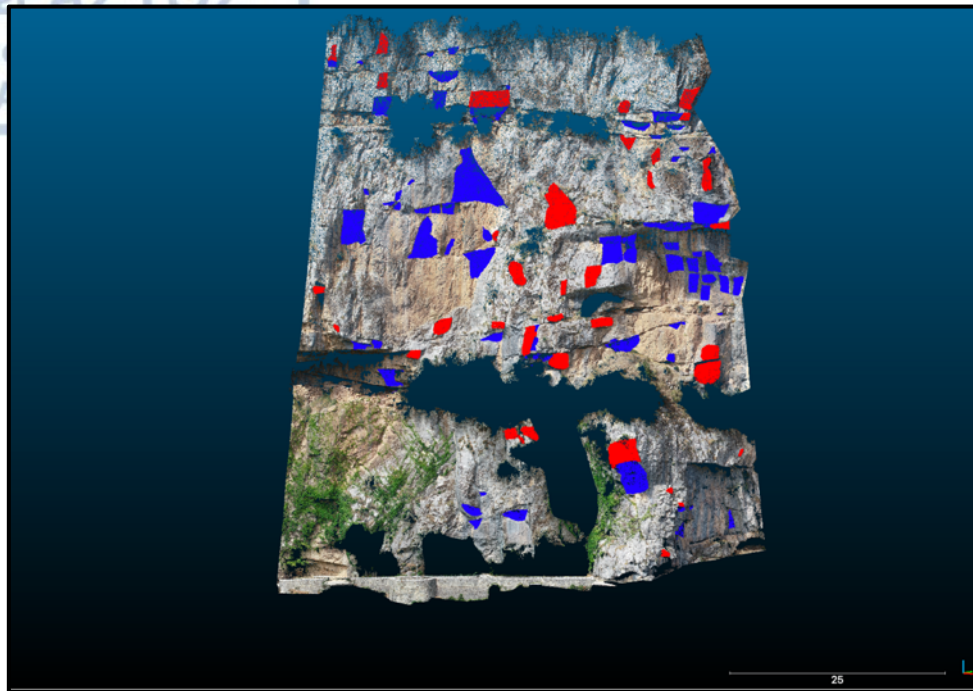
Σχήμα 44α. Χωρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) και των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U1.



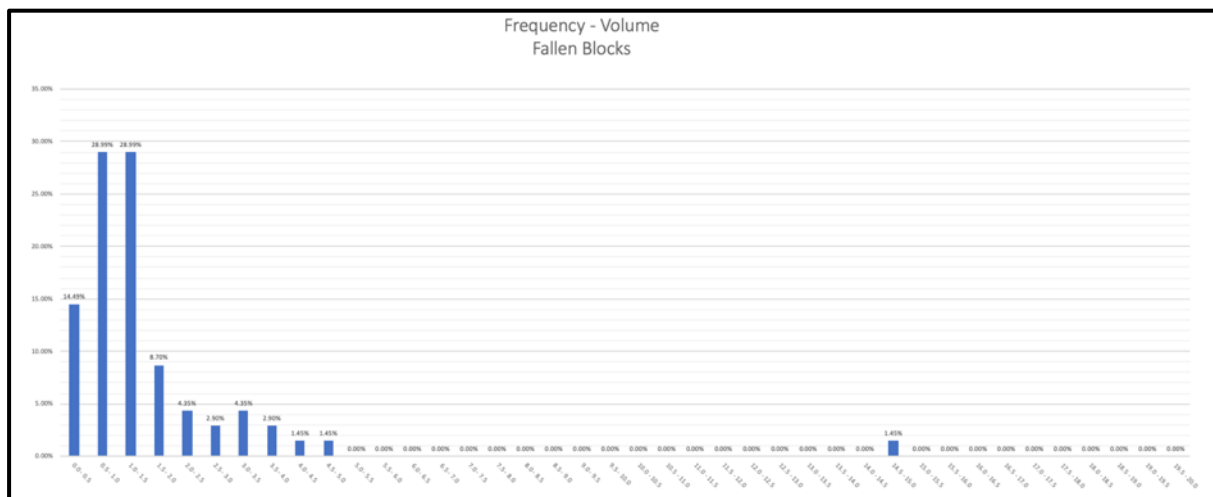
Σχήμα 44β. Ογκομετρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) για την υπό – περιοχή U1.



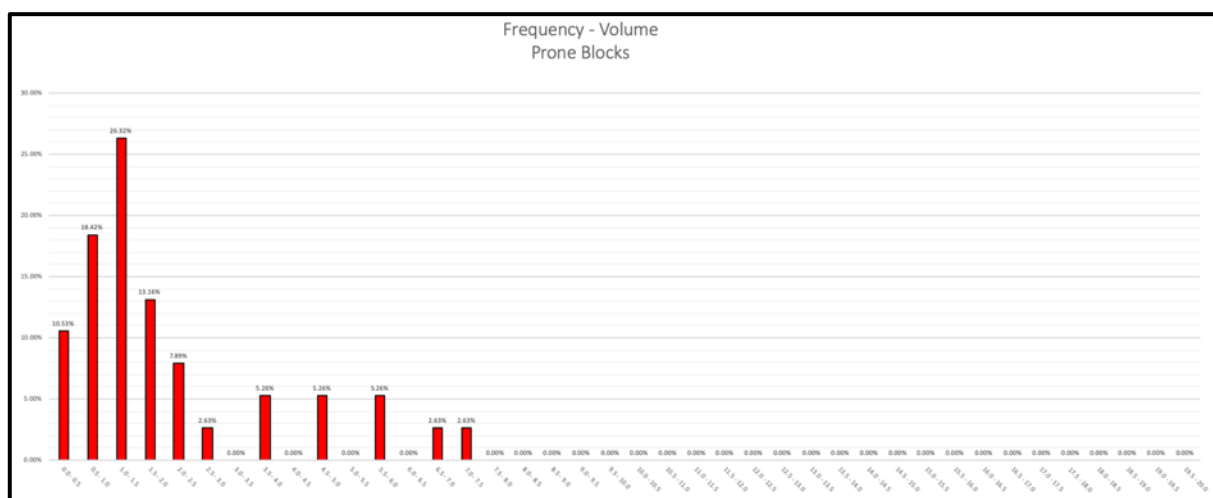
Σχήμα 44γ. Ογκομετρική κατανομή των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U1.



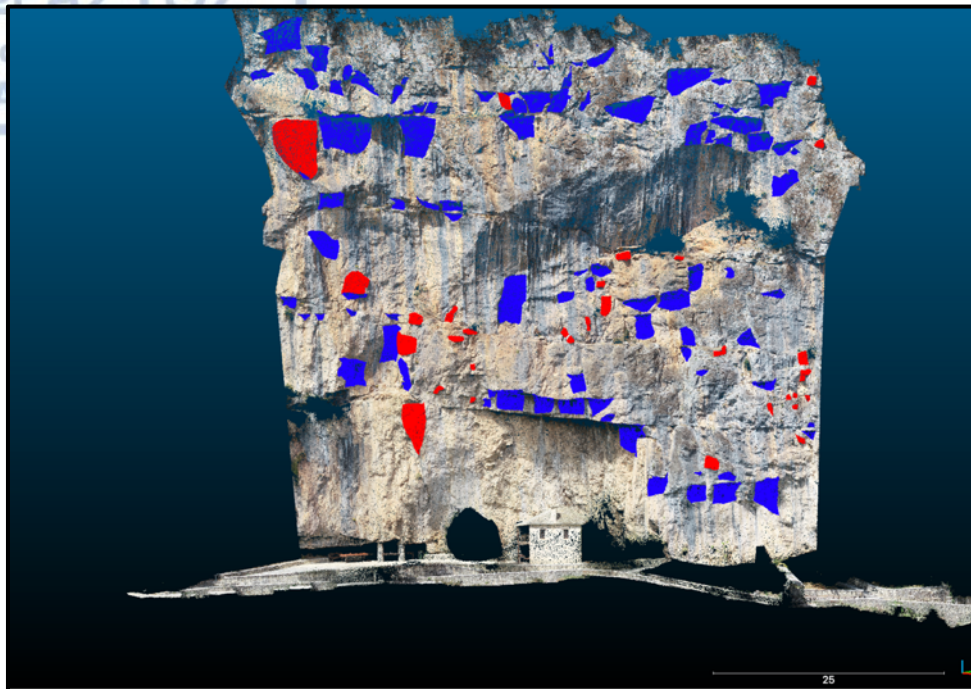
Σχήμα 45α. Χωρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) και των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U2.



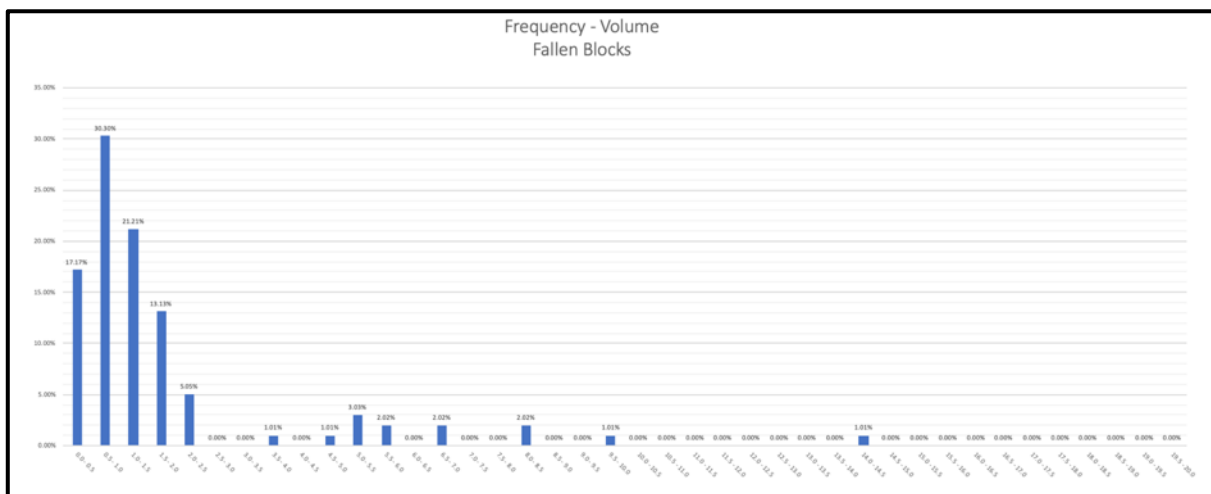
Σχήμα 45β. Ογκομετρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) για την υπό – περιοχή U2.



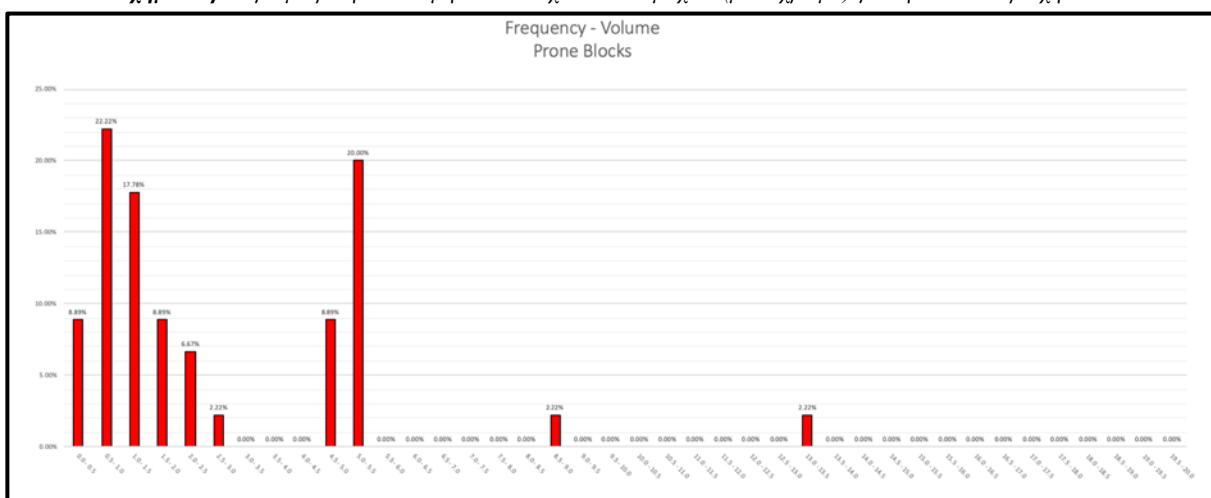
Σχήμα 45γ. Ογκομετρική κατανομή των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U2.



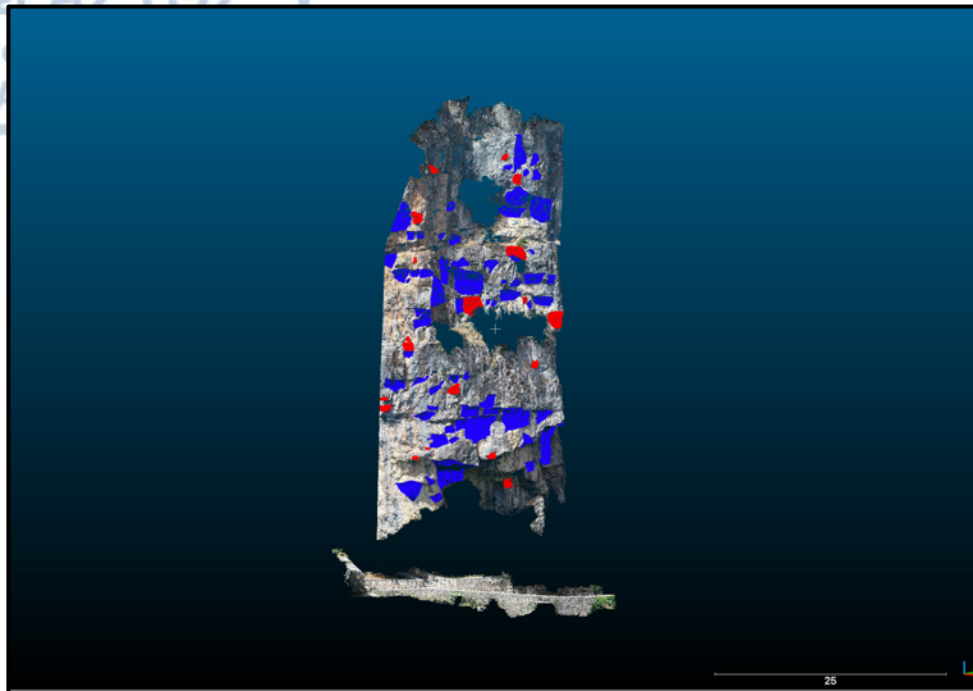
Σχήμα 46α. Χωρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) και των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U3.



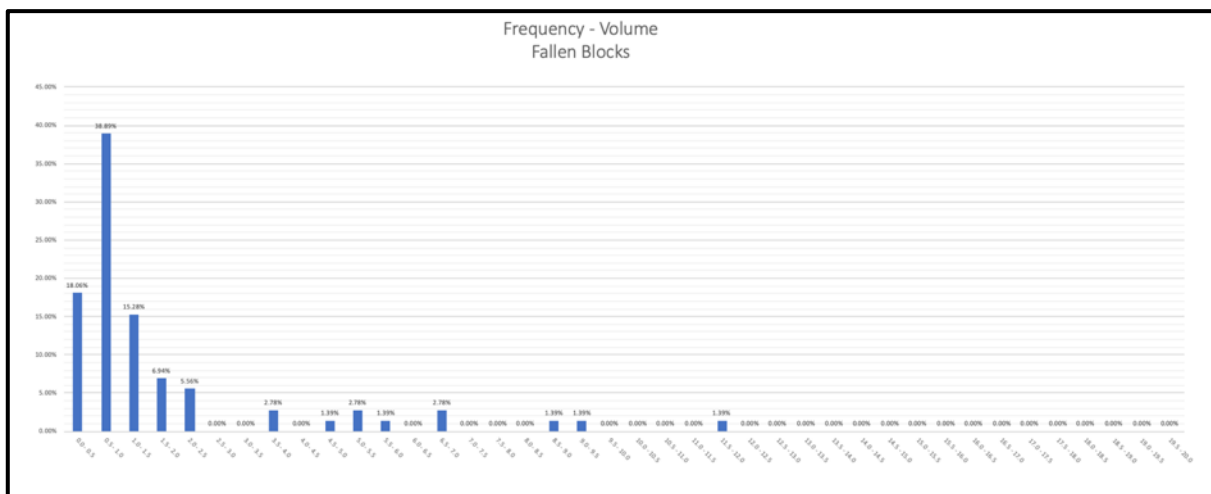
Σχήμα 46β. Ογκομετρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) για την υπό – περιοχή U3.



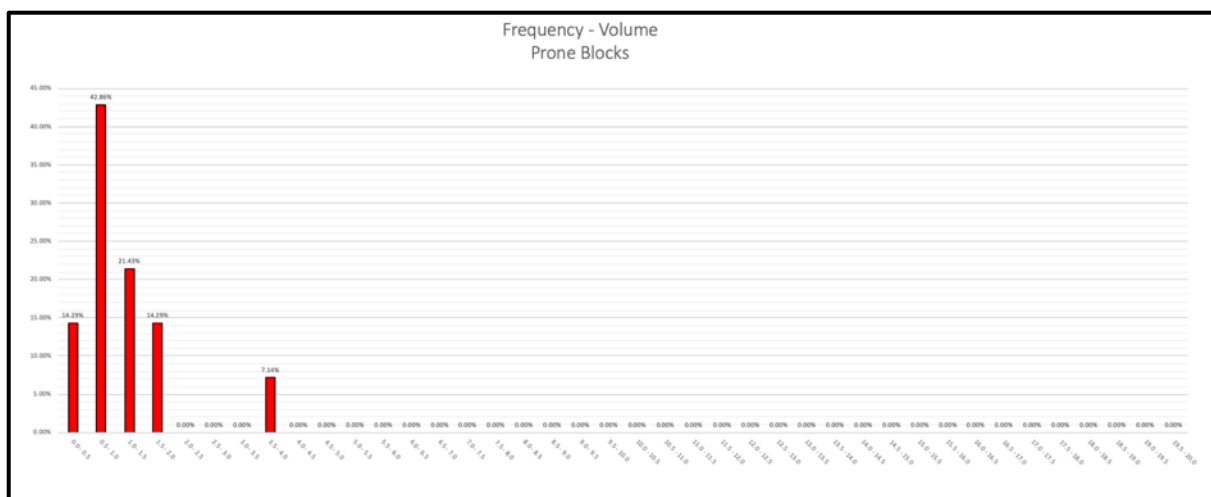
Σχήμα 46γ. Ογκομετρική κατανομή των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U3.



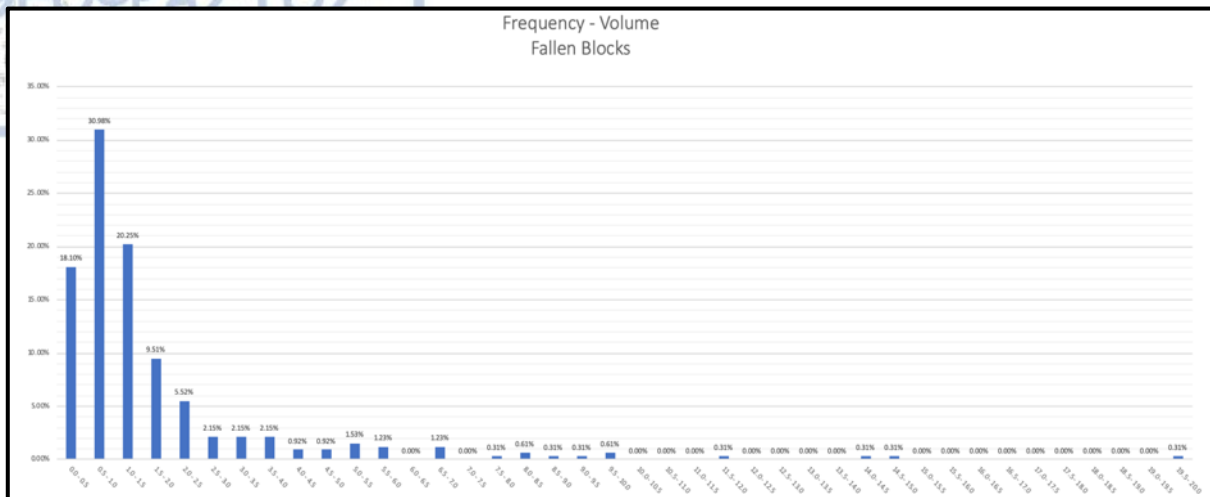
Σχήμα 47α. Χωρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) και των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U4.



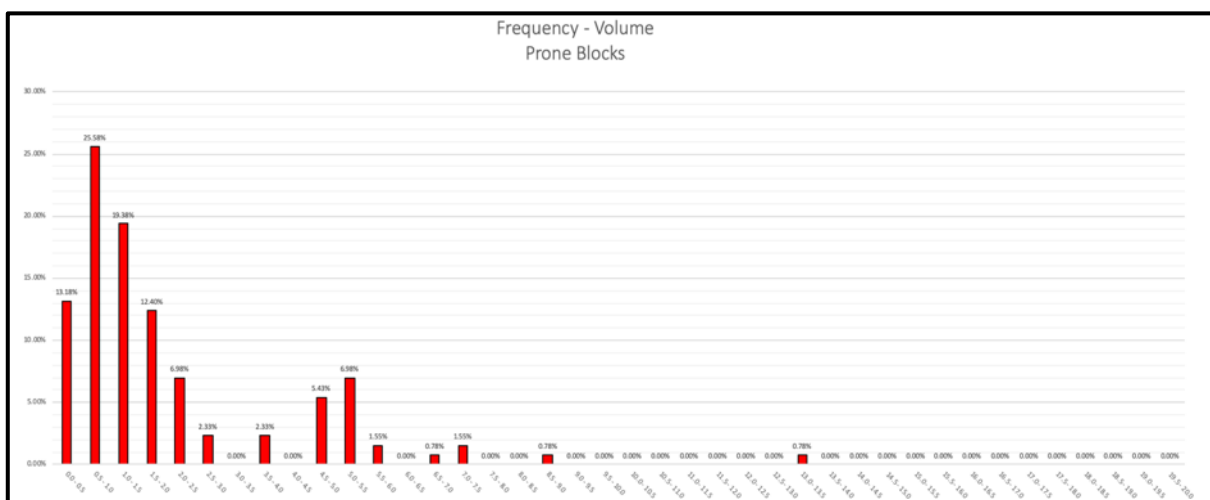
Σχήμα 47β. Ογκομετρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) για την υπό – περιοχή U4.



Σχήμα 47γ. Ογκομετρική κατανομή των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα), για την υπό – περιοχή U4.



Σχήμα 48α. Συνολική ογκομετρική κατανομή των αστοχούντων τεμαχών (μπλέ χρώμα) για όλη τη περιοχή έρευνας.



Σχήμα 48β. Συνολική ογκομετρική κατανομή των επισφαλών τεμαχών (κόκκινο χρώμα) για όλη τη περιοχή έρευνας.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, τα μεγέθη, τόσο των τεμαχών που αστόχησαν κατά το παρελθόν όσο και των επισφαλών για κατάπτωση, ποικίλουν. Γενικά διατηρούν λογικά μεγέθη ($< 4 \text{ m}^3$), με την επισημάνση όμως κάποιων που υπερβαίνουν αυτές τις τιμές. Βέβαια τέτοια περιστατικά είναι απομονωμένα και δεν αναμένονται εκτεταμένα στις εξεταζόμενες υπό – περιοχές. Συγκεκριμένα οι περισσότερες υπερβάσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στην υπό – περιοχή U3, όπου αρκετά επισφαλή τεμάχια εντοπίζονται με σημαντικά μεγάλους όγκους.

Αντίθετα η χωρική τους κατανομή, στις περισσότερες περιπτώσεις, ακολουθεί συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό με βάση τα βέλτιστα μοντέλα αστοχίας που προτάθηκαν για κάθε υπό – περιοχή, καθώς η κατανομή των τεμαχών ακολουθεί τους προσανατολισμούς των ευνοϊκών για αστοχία ασυνεχειών

Συνολικά παρατηρείται μία πολύ καλή ταύτιση τόσο της χωρικής κατανομή όσο και των όγκων μεταξύ των τεμαχών που αστόχησαν κατά το παρελθόν και των επισφαλών. Επομένως, διαφαίνεται σωστή η ερμηνεία και η παραμετροποίηση των επισφαλών βραχοτεμαχών, διότι ο προσδιορισμός αυτών ήταν δυσκολότερος και με μεγαλύτερο περιθώριο σφάλματος.

6.4.2 Δυνητικές τροχιές και ενεργειακό καθεστώς επισφαλών τεμαχών

Οι δυνητικές τροχιές των επισφαλών τεμαχών προσδιορίστηκαν μέσω του λογισμικού RocFall της εταιρίας RocScience, ακολουθώντας της μεθοδολογία που αναλύθηκε στη παράγραφο 5.6.2. Με αυτή την ανάλυση έγινε δυνατή η εκτίμηση των ενεργειακών συνθηκών κατά τη στιγμή της πρόσκρουσης των επισφαλών τεμαχών που ταυτοποιήθηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο της μελέτης, για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή. Αναλυτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο Πίνακα 11. και στο Σχήμα 49. και Σχήμα 50.

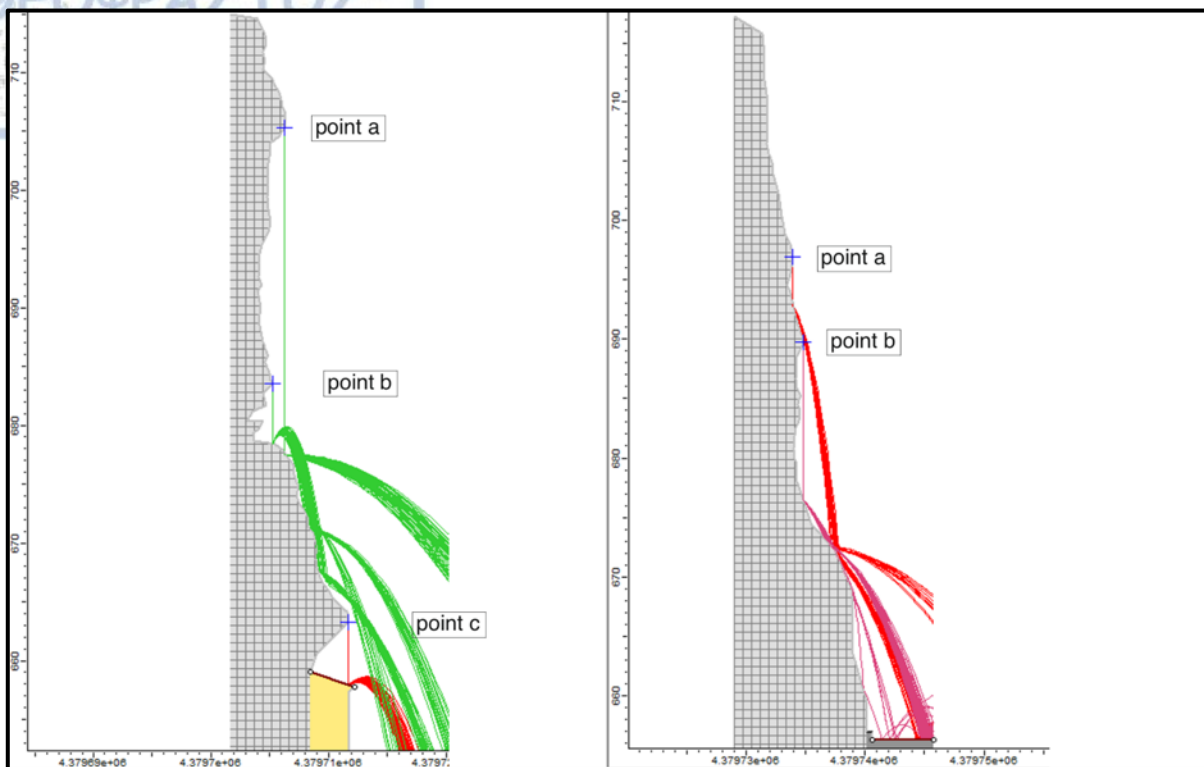
Πίνακας 11. Παρουσίαση αποτελεσμάτων των τροχιακών προσομοιώσεων μέσω του λογισμικού RocFall και για τις τέσσερις (4) εξεταζόμενες υπό – περιοχές.

Υπό – περιοχή	Εξεταζόμενο τέμαχος (αφετηρία κατάρπτωσης)	Ύψος αποκόλλησης (m)	Όγκος βραχοτεμαχών (m ³)	Συνολική κινητική ενέργεια βραχοκατάπτωσης (kJ)
U1	point a	46	0.9	–
	point b	24	1.1	–
	point c	11	0.5	69
U2	point a	41	0.7	429
	point b	34	1.2	747
U3	point a	47	5.1	4653
	point b	38	1.4	1386
	point c	30	1.8	–
U4	point a	41	0.4	290
	point b	13	1.0	102

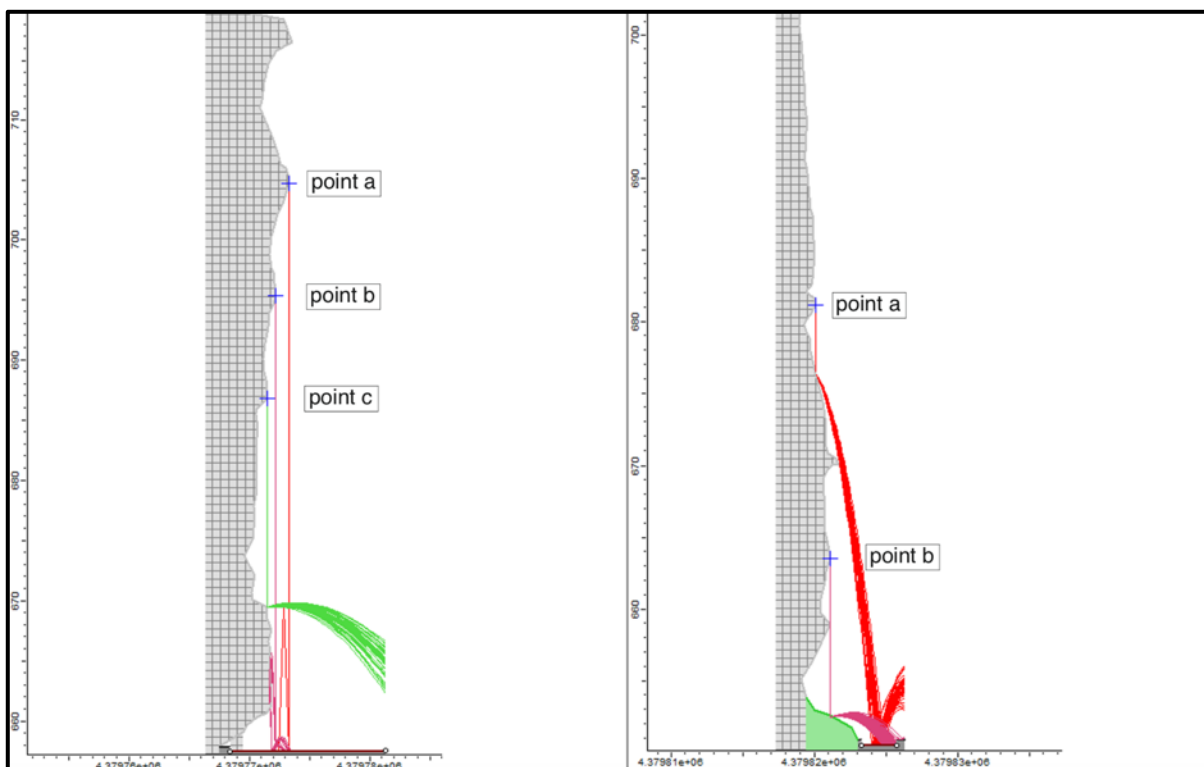
Η επιλογή τόσο ύψους αποκόλλησης όσο και των όγκων που εξετάστηκαν από το λογισμικό βασίστηκε στις κατανομές που αναλύθηκαν στη παράγραφο 6.4.1. Συγκεκριμένα εντοπίστηκαν τα ύψη με τις κύριες συγκεντρώσεις των επισφαλών βραχοτεμαχών ανά εξεταζόμενη υπό – περιοχή και σε αυτές πραγματοποιήθηκε μία εκ νέου στατιστική ανάλυση μεταξύ των όγκων αυτών των τεμαχών και προέκυψε έτσι ο επικρατέστερος αυτών ανά ύψος αποκόλλησης για κάθε υπό – περιοχή. Επίσης λήφθηκαν υπόψη και οι όγκοι των τεμαχών που έχουν αποκολληθεί κατά το παρελθόν έτσι ώστε να γίνει μία προσπάθεια απομείωσης του σφάλματος.

Αξίζει να επισημανθεί πως στον προσδιορισμό του επικρατέστερου όγκου ίσως να έχουν παρθεί κάποιες ελαφρά μεγαλύτερες τιμές από αυτές που δυνητικά μπορεί να προκύψουν στη περιοχή καθώς θεωρήθηκε ορθότερο να ακολουθηθεί μία πιο συντηρητική προσέγγιση για λόγους ασφαλείας, λόγω της έλλειψης παραπάνω δεδομένων. Σαφώς και οι τιμές που επιλέχθηκαν έχουν ως στόχο επίσης και να μην οδηγούν σε υπερδιαστασιολόγηση των φαινομένων βραχοκατάπτωσης για τις εξεταζόμενες υπό – περιοχές.

Η παραπάνω παραδοχή έγινε με γνώμονα την αποφυγή φαινομένων υποεκτίμησης της υπάρχουσας κατάστασης, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη διαστασιολόγηση των δυνητικών βραχοκαταπτωτικών φαινομένων στη περιοχή έρευνας.



Σχήμα 49. Σχηματική απεικόνιση των τροχιακών προσομοιώσεων για τις υπό – περιοχές : Αριστερά: U1, Δεξιά: U2.



Σχήμα 50. Σχηματική απεικόνιση των τροχιακών προσομοιώσεων για τις υπό – περιοχές : Αριστερά: U3, Δεξιά: U4.

Στην υπό – περιοχή U1 εντοπίστηκαν και προσδιορίστηκαν τρία (3) κύρια σημεία αποκόλλησης επισφαλών τεμάχων πάνω στο προφίλ του πρανούς σε διαφορετικές υψομετρικές θέσεις. Μέσω της παρούσας τροχιακής προσομοίωσης, εκτιμήθηκε πως οι δύο (2) εξ αυτών (point a και point b) δεν μπορούν να απειλήσουν τη περιοχή στέγασης της Ιεράς Μονής Κηπίνας, επομένως από αυτές δεν υφίσταται κίνδυνος βραχοκατάπτωσης με συνέπειες στη Μονή. Το τρίτο καθορισμένο σημείο αποκόλλησης βραχοτεμαχίων προσδιορίστηκε ως δυνητικά επισφαλές για τη Μονή και η μέγιστη συνολική κινητική του ενέργεια στο σημείο πρόσκρουσης με τη Μονή εκτιμήθηκε στα 69 kJ.

Για την υπό – περιοχή U2 ταυτοποιήθηκαν δύο (2) κύρια σημεία αποκόλλησης επισφαλών τεμάχων, πάνω στο προφίλ του πρανούς σε διαφορετικές υψομετρικές θέσεις, οι τροχιές των οποίων μπορούν να αποβούν επικίνδυνες για τον υποκείμενο του πρανούς δρόμο. Η μέγιστη συνολική κινητική τους ενέργεια στο σημείο πρόσκρουσης με τον υποκείμενο δρόμο εκτιμήθηκε στα 429 kJ από τη πρώτη θέση (point a) και στα 747 kJ από τη δεύτερη θέση (point b).

Στην υπό – περιοχή U3 προσδιορίστηκαν δύο (2) κύρια σημεία αποκόλλησης επισφαλών τεμάχων που θα μπορούσαν δυνητικά να απειλήσουν τον υποκείμενο δρόμο (point a και point b), ενώ ένα (1) ακόμα που τροχιακά ταυτοποιήθηκε ως ακίνδυνο (point c). Η μέγιστη συνολική κινητική τους ενέργεια στο σημείο πρόσκρουσης με τον υποκείμενο δρόμο εκτιμήθηκε στα 4653 kJ από τη πρώτη θέση (point a) και στα 1386 kJ από τη δεύτερη θέση (point b). Οι παραπάνω τιμές ήταν και οι μεγαλύτερες που παρατηρήθηκαν στο σύνολο της περιοχής μελέτης.

Τελος, για την υπό – περιοχή U4 ταυτοποιήθηκαν δύο (2) κύρια σημεία αποκόλλησης επισφαλών τεμάχων, πάνω στο προφίλ του πρανούς σε διαφορετικές υψομετρικές θέσεις, οι τροχιές των οποίων μπορούν να αποβούν επικίνδυνες για τον υποκείμενο του πρανούς δρόμο. Η μέγιστη συνολική κινητική τους ενέργεια στο σημείο πρόσκρουσης με τον υποκείμενο δρόμο εκτιμήθηκε στα 290 kJ από τη πρώτη θέση (point a) και στα 102 kJ από τη δεύτερη θέση (point b).

7. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ (Rockfall Hazard and Risk Rating System)

7.1 Γενικά

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας καθώς και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων σε πρανή κατά μήκος οδικών δικτύων καθώς και σε περιοχές όπου υπάρχει ανθρώπινη δραστηριότητα αποτελεί έρευνα εξαιρετικά μεγάλης σημασίας στο χώρο των γεωεπιστημών (Budetta, 2004). Για τον προσδιορισμό και την εκτίμηση των παραπάνω όρων, μία πληθώρα συστημάτων αξιολόγησης έχουν αναπτυχθεί βασισμένη τόσο σε ποιοτικά όσο και σε ποσοτικά κριτήρια. Η προσέγγιση που ακολουθηθεί, αν είναι ποιοτική ή ποσοτική, διαφοροποιεί σε τεράστιο βαθμό αυτά τα συστήματα καθώς μεταβάλλει τη φύση των εισαχθέντων δεδομένων, τη διαδικασία ανάλυσης αυτών και φυσικά τα τελικά αποτελέσματα.

Οι ποιοτικές μέθοδοι (Qualitative – based methods) καθορίζουν την επικινδυνότητα, τα στοιχεία που βρίσκονται σε κίνδυνο και τη τρωτότητα αυτών μέσω της χρήσης ποιοτικών παραμέτρων, όπως βαθμονομημένες ιδιότητες, πίνακες με συντελεστές βαρύτητας, συστήματα αξιολόγησης καθώς και κατατάξεις βασισμένες σε συνολική βαθμολόγηση (Cruden and Fell, 1997). Αυτές οι μέθοδοι αξιολόγησης μπορούν να έχουν τη μορφή αντικειμενικών (στατιστικών ή αριθμητικών) εκτιμήσεων, υποκειμενικών (κρίση μελετητή ή/και υποθέσεις) ή ακόμα και το συνδυασμό των δύο. Γενικά τέτοιου είδους λεπτομερή συστήματα αξιολόγησης φέρουν πολλαπλές παραμέτρους με βάση τις οποίες πραγματοποιείται η εκτίμηση της επικινδυνότητας και/ή της διακινδύνευσης. Οι παράμετροι αυτοί συνήθως φέρουν συντελεστές βαρύτητας ανάλογα με τη σημασία τους στο υπό εξέταση φαινόμενο. Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων συνήθως εκφράζονται μέσω σχετικών ποιοτικών βαθμονομήσεων όπως για παράδειγμα υψηλή επικινδυνότητα, μέτρια επικινδυνότητα, χαμηλή επικινδυνότητα κλπ. Σύμφωνα με τους Fell et al. (2005), οι ποιοτικές αυτές προσεγγίσεις έναντι φαινομένων βραχοκαταπτώσεων προσφέρουν πολύ σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την επικινδυνότητα, τη διακινδύνευση και συνολικά στη διαχείριση του κινδύνου ενός τέτοιου φαινομένου, την σχετική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών θέσεων μελέτης και τέλος σχετικά με το σχεδιασμό και τη επιλογής των βέλτιστων θέσεων για την εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης – αντιστήριξης.

Στον αντίποδα, οι ποσοτικές μέθοδοι (Quantitative – based methods) βασίζονται στη χρήση απόλυτων τιμών ή σε ένα καθορισμένο φάσμα τιμών για την αξιολόγησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης, έναντι ποιοτικών χαρακτηρισμών. Γενικά, οι ποιοτικές μέθοδοι αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης προσεγγίζουν τη πρώτη με τη μορφή αριθμητικών πιθανοτήτων, με στόχο την εκτίμηση της συχνότητας εκδήλωσης αστοχιών, συμπεριλαμβάνοντας την ένταση του φαινομένου με τη χωρική κατανομή του, και τη δεύτερη μέσω της ποσοτικοποίησης της με οικονομική έκφραση των αποτελεσμάτων – καταστροφών ενός πιθανού φαινομένου βραχοκατάπτωσης. Ενώ στις ποιοτικά βασιζόμενες αναλύσεις η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα, τη ποσότητα, τη ποιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων εισαγωγής, στις ποσοτικές αναλύσεις δεν ισχύει το ίδιο. Σύμφωνα με την Mavrouli (2011), τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές απόπειρες καθορισμού σταθερών οδηγιών σχετικά με ποσοτικού τύπου αναλύσεις στην εκτίμηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων, βασιζόμενοι σε εθνικές προδιαγραφές και κατευθυντήριες οδηγίες. Στις περισσότερες ποιοτικές αναλύσεις εκτίμησης διακινδύνευσης, οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη, έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθεί η πιθανότητα δυνητικών απωλειών από το φαινόμενο, είναι ο αριθμός των κατεστραμμένων κτηρίων, ο αριθμός των τραυματισμένων ανθρώπων καθώς και ο αριθμός των αποθανόντων. Η παραπάνω διαδικασία όμως δεν αποτελεί μία κοινή προσέγγιση για κάθε ανάλυση διακινδύνευσης, καθώς σε μεγάλο βαθμό η μεθοδολογία εξαρτάται από τη προσέγγιση των υπεύθυνων μελετητών. Τέλος αξίζει να επισημανθεί πως η σημασία των αποτελεσμάτων τέτοιου είδους αναλύσεων ποικίλει, ανάλογα με τα αποδεκτά όρια που έχουν τεθεί από τους διάφορους υπεύθυνους φορείς και τις νομοθεσίες της εκάστοτε χώρας.

Γενικά, οι ποιοτικές προσεγγίσεις είναι πιο συχνά επιλεγόμενες από τους γεωεπιστήμονες λόγω της ευκολίας εφαρμογής τους και των άμεσων αποτελεσμάτων τους (Pantelidis, 2009). Για τον παραπάνω λόγο, οι περισσότερες εκτιμήσεις επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων φαινομένων ξεκινούν με μία ποιοτική προσέγγιση της υπό μελέτης περιοχής στο σύνολό της, και στη συνέχεια υιοθετούν μια λεπτομερή ποσοτική μεθοδολογία, με την εφαρμογή αξιολογήσεων με αριθμητικές παραμέτρους έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επικινδυνότητα και η διακινδύνευση αντίστοιχα σε κάποια συγκεκριμένη προκαθορισμένη κρίσιμη υπό – περιοχή. Επομένως γίνεται αντιληπτό, πως οι ποιοτικές μεθοδολογίες αντιπροσωπεύουν συνήθως ένα αρχικό βήμα στις αναλύσεις σημαντικών φυσικών κινδύνων σε μία περιοχή μελέτης, καθορίζοντας τις υπό – περιοχές που φέρουν τη μεγαλύτερη ανάγκη για περαιτέρω ανάλυση, η οποία πραγματοποιείται με ποσοτικές μεθόδους. Εκτός των παραπάνω, οι ποσοτικές προσεγγίσεις εκτίμησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης για βραχοκαταπτώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο σε περιπτώσεις που υπάρχει λεπτομερές ιστορικό καταγραφών παλαιότερων καταπτώσεων στη περιοχή μελέτης (Hantz et al., 2003). Κάτι τέτοιο όμως στις περισσότερες θέσεις δεν μπορεί να συμβεί καθώς τα ιστορικά καταγραφών βραχοκαταπτώσεων είναι είτε ελλιπή είτε απουσιάζει ολοκληρωτικά οποιαδήποτε καταγραφή. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Budetta and Nappi (2013), συνήθως τα ιστορικά καταγραφών φέρουν πολύ μειωμένη πληροφορία και μικρά έως μέτρια βραχοκαταπτωτικά φαινόμενα που δεν οδήγησαν σε ιδιαίτερες καταστροφές στο ανθρωπογενές περιβάλλον.

Λόγω της μειωμένης διαθέσιμης πληροφορίας (γεωμηχανική, στατιστική και ιστορική) παλαιότερων βραχοκαταπτώσεων σε μία περιοχή μελέτης, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μία ποσοτικής προσέγγισης, για την εκτίμηση τόσο της επικινδυνότητας όσο και της διακινδύνευσης, μπορεί να ποικίλει. Μπορεί γενικά να υπάρχει η αντίληψη πως οι ποσοτικές μέθοδοι είναι πιο ολοκληρωμένες και πιο ακριβείς σε σχέση με τις ποιοτικές, αλλά κάτι τέτοιο δεν υφίσταται στις γεωεπιστήμες. Η ποιότητα και η ακρίβεια οποιασδήποτε εκτίμησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι καταπτώσεων βράχων για μία περιοχή μελέτης, δεν σχετίζεται με τη χρήση αριθμητικών έναντι ποιοτικών παραμέτρων, αλλά αντίθετα εξαρτάται από τη ποιότητα των δομικών στοιχείων που συντελούν την ανάλυση, είτε τα δεδομένα είναι ποσοτικά είτε ποιοτικά. Επομένως, μία ποσοτική προσέγγιση δεν είναι απαραίτητο πως θα είναι πιο ακριβής από μία αντίστοιχη ποιοτική (Gerath et al., 2006).

Όπως γίνεται αντιληπτό ο καθορισμός του βέλτιστου τύπου μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί σε μία συγκεκριμένη περιοχή μελέτης αποτελεί μία ιδιαίτερα δύσκολη και επίπονη διαδικασία. Στη παρούσα μελέτη, μία ποιοτική (με τη παρουσία και κάποιων ποσοτικών παραμέτρων) προσέγγιση επιλέχθηκε και ένα νέο σύστημα αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης προτάθηκε για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας.

7.2 Θεωρητικό υπόβαθρο συστημάτων αξιολόγησης

Η πρώτη μεθοδολογία αξιολόγησης επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων αναπτύχθηκε και προτάθηκε από τους Brawner and Wyllie το 1976 και αφορούσε τα σιδηροδρομικά δίκτυα. Οι παραπάνω υιοθέτησαν μια ποιοτική προσέγγιση στη προσπάθεια προσδιορισμού της επικινδυνότητας και ιεράρχησαν την αναγκαιότητα αντιμετώπισης των φαινομένων με τη χρήση αλφαριθμητικών συντελεστών, από "Α" όπου χαρακτηρίζεται η περιοχή με το υψηλότερο επίπεδο επικινδυνότητας και χρειάζεται άμεση παρέμβαση για αντιμετώπιση έως και "F" όπου χαρακτηρίζεται η πιο σταθερή περιοχή όπου δεν απαιτείται κανενός είδους ανθρώπινη παρέμβαση. Η πρώτη αυτή απόπειρα κατασκευής ενός συστήματος αξιολόγησης, εφαρμόστηκε πρώτα κατά μήκος σιδηροδρομικού δικτύου Canadian Pacific, και αποτέλεσε από τότε τον ακρογωνιαίο λίθο κάθε προτεινόμενης μεθοδολογίας που βασίζεται σε κάποιου είδους σύστημα αξιολόγησης, για την εκτίμηση επικινδυνότητας και διακινδύνευσης για φαινόμενα καταπτώσεων βράχων.

Ένα από τα πρώτα και μέχρι σήμερα από τα πιο γνωστά συστήματα αξιολόγησης επικινδυνότητας είναι το Rockfall Hazard Rating System (RHRS) όπου αναπτύχθηκε από τους Pierson et al. (1990) στο Oregon (USA) για το τοπικό τμήμα συγκοινωνιών, έτσι ώστε να υπάρχει μία σταθερή μεθοδολογία που

θα μπορεί να επαναλαμβάνεται για τη μελέτη επιφανών θέσεων κατά μήκος του σιδηροδρομικού δικτύου (Pierson, 1992). Το παραπάνω σύστημα θεωρείται πως αποτελεί τη βάση των περισσότερων σύγχρονων συστημάτων αξιολόγησης, ενώ υιοθετήθηκε και από διάφορα άλλα τμήματα συγκοινωνιών και τροποποιήθηκε έτσι ώστε να πληροί της εκάστοτε ανάγκες και προδιαγραφές τους. Κάποιες από τις πιο ευρεία διαδεδομένες τροποποιημένες εκδόσεις τους RHRS είναι:

- Rock Slope Rating Procedure for New York (USA) (Wyllie, 1987; New York State DOT, 1996; 2007; Hadjin, 2002)
- mRHRS for Italy (Budetta, 2004)
- MORFH RS for Missouri (USA) (Maerz, et al., 2004, 2005; Youssef and Maerz, 2012)
- TRHRS for Tennessee (USA) (Bateman, 2003; Rose, 2005; Vandewater et al., 2005; Mauldon et al., 2007)
- CRHRS for Colorado (USA) (Stover, 1992; Andrew, 1994; Santi et al., 2009)
- RHRO for Ontario (Canada) (Franklin and Senior, 1997; Senior, 2003; Franklin et al., 2013)

Ένα άλλο σημαντικό σύστημα αξιολόγησης αποτελεί το Rock Slope Hazard Index (RSHI) όπου αναπτύχθηκε για τη μελέτη βραχωδών πρανών για το οδικό δίκτυο της Σκωτίας από τους McMillan and Matheson (1997). Οι Hungr and Evans (1999) ανέπτυξαν και εφάρμοσαν μία ποσοτική μέθοδο εκτίμησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης για το οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο της περιοχής British Columbia, το οποίο βασίστηκε στη χωρική και χρονική κατανομή των βραχοκαταπτώσεων φαινομένων. Ο Hungr, επίσης πρότεινε το 2003, ένα νέο σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας κατά μήκος των σιδηροδρομικών δικτύων το οποίο καλείται Quantitative Risk Assessment (QRA). Το παραπάνω σύστημα αναπτύχθηκε με στόχο τη ποσοτικοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης δυνητικών απωλειών σχετιζόμενες με φυσικές καταστροφές, με τα αποτελέσματά του να αποτελούν απόλυτες τιμές έτσι ώστε να μπορεί να επέλθει σύγκριση μεταξύ διαφορετικών εξεταζόμενων περιοχών, παρέχοντας έτσι ένα επίπεδο αναφοράς ανάμεσα στις περιοχές αυτές σχετικά με τη σειρά προτεραιότητας τους για την εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης – αντιστήριξης (Hungr, 2003). Το σύστημα QRA αποτελεί μέχρι και σήμερα μία από τις διαδεδομένες ποσοτικές μεθοδολογίες στη περίπτωση μελέτης βραχοκαταπτώσεων.

Όπως γίνεται αντιληπτό μέσω της σύντομης παρουσίασης των παραπάνω συστημάτων, όλα από τα παραπάνω αναπτύχθηκαν και προτάθηκαν σε περιοχές οδικών ή σιδηροδρομικών δικτύων όπου τα εξεταζόμενα πρανή διαμορφώνονται από τους ανθρώπους και δεν εξετάζουν φυσικά διαμορφωμένα πρανή. Τα τελευταία είκοσι (20) χρόνια υπήρξαν ερευνητές όπου ανέπτυξαν συστήματα αξιολόγησης για φυσικά πρανή, αλλά τα περισσότερα από αυτά είναι σχεδιασμένα για τις συγκεκριμένες περιοχές μελέτης όπου και εφαρμόστηκαν. Οι Guzzetti and Reichenbach (2004), πρότειναν μία μεθοδολογία εκτίμησης επικινδυνότητας συγκεκριμένα για μία περιοχή μελέτης σε ένα τμήμα της Κεντρικής Ιταλίας, με την εφαρμογή στη συνέχεια τρισδιάστατων τροχιακών προσομοιώσεων έτσι ώστε μέσω του καθορισμού της χωρικής κατανομή των καταπτώσεων να εκτιμηθεί και η διακινδύνευση. Με παρόμοιο τρόπο εργάστηκαν και οι Corominas et al. (2005) προτείνοντας ακόμα μία νέα ποσοτική προσέγγιση με την εφαρμογή τρισδιάστατων τροχιακών προσομοιώσεων για την εκτίμηση της διακινδύνευσης στα πρανή της περιοχής Sola d'Andorra slope πριν και μετά την εφαρμογή μέτρων αντιστήριξης – αντιμετώπισης. Τέλος, οι Saroglou et al. (2012) πρότειναν ένα ποιοτικό σύστημα αξιολόγησης διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων τόσο για ανθρωπογενή όσο και για φυσικά πρανή, όπου αναπτύχθηκε για το ιστορικό κέντρο της Μονεμβασίας.

7.3 Rockfall Hazard & Risk Rating System

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την Ιερά Μονή Κηπίνας, αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται ένα νέο ποιοτικό σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων (Rockfall Hazard and Risk Rating System). Το παρόν σύστημα βασίστηκε στις μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν κατά τη προηγούμενη παράγραφο και σχεδιάστηκε για περιοχές αποτελούμενες από φυσικά πρηνή, επισφαλή σε καταπτώσεις βραχοτεμαχών, με άμεσες συνέπειες σε ανθρώπινες δραστηριότητες και οικοδομήματα. Περιοχές δηλαδή όπως αυτή της Ιεράς Μονής Κηπίνας στους Καλαρρύτες Ηπείρου.

Το προτεινόμενο αυτό σύστημα προσδίδει τιμές σε τέσσερις (4) ευρείες κατηγορίες παραμέτρων όπου αποτελούνται επιμέρους από εικοσιτέσσερις (24) διαφορετικές παραμέτρους, έτσι ώστε να εκτιμηθεί τελικώς το συνολικό επίπεδο διακινδύνευσης για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή. Τρεις (3) από αυτές τις κατηγορίες σχετίζονται με την εκτίμηση της επικινδυνότητας ενώ η εναπομένουσα μία (1) σχετίζεται με τη σφοδρότητα των συνεπειών ενός βραχοκαταπτωτικού φαινομένου στο ανθρωπογενές περιβάλλον της κάθε υπό – περιοχής. Για την παρούσα αξιολόγηση, κάθε μία τιμή από τις εικοσιτέσσερις (24) αυτές παραμέτρους, φέρει έναν μοναδικό συντελεστή βαρύτητας ο οποίος βασίζεται στη σημασία της κάθε παραμέτρου και στην συνεισφορά της στη διαμόρφωση της συνολικής διακινδύνευσης για κάθε εξεταζόμενη περιοχή.

Πίνακας 12. Οι βασικές κατηγορίες παραμέτρων του προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης.

Ευρύτερη κατηγορία παραμέτρων	Βαρύτητα στη συνολική διακινδύνευση (%)
A. Γεωμετρικοί Παράγοντες	30
B. Τεχνικογεωλογικοί Παράγοντες	30
C. Παράγοντες Πρόκλησης	10
D. Παράγοντες σφοδρότητας συνεπειών	30

Αναλυτικότερα, στη πρώτη κατηγορία (A) του παρόντος συστήματος αξιολόγησης, εντάσσονται παράμετροι που σχετίζονται με τη γεωμετρία και τη μορφολογία γενικότερα του εξεταζόμενου πρηνούς. Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται σε αυτή τη κατηγορία καθώς και η σημασία τους για τη διαμόρφωση του συστήματος είναι:

- A.1. το ύψος του πρηνούς,
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς επηρεάζει τη τροχιά και τη ταχύτητα των αποκολλημένων τεμαχών.
- A.2. η γωνία κλίσης του πρηνούς,
 - ο παράγοντας διαμόρφωσης της ευστάθειας των επισφαλών τεμαχών και της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς επηρεάζει τη τροχιά των αποκολλημένων τεμαχών και τη μεταβολή της φύσης της κίνησής τους.
- A.3. η τραχύτητα του πρηνούς,
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς επηρεάζει τη τροχιά και τη μεταβολή της φύσης της κίνησής των αποκολλημένων τεμαχών μέχρι να φτάσουν στο τελικό σημείο πρόσκρουσης.
- A.4. η βλάστηση του πρηνούς,
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς μεταβάλλει τη ταχύτητα και τη τροχιά των αποκολλημένων τεμαχών κατά τη κίνηση τους.

- A.5. το ύψος της θέσης αποκόλλησης των επισφαλών τεμαχών
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική κινητική ενέργεια.
- A.6. η διαθεσιμότητα και η ποσότητα εμποδίων και βλάστησης στη ζώνη απόθεσης των καταπτώσεων.
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό και τη συνολική κινητική ενέργεια των τεμαχών που τελικώς θα προσκρούσουν στη θέση ενδιαφέροντος.

Η δεύτερη κατηγορία (B) περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικά με τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πρानούς. Οι παράμετροι αυτοί αναφέρονται σε ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, των ασυνεχειών καθώς και του συνόλου των δύο παραπάνω της βραχόμαζας. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που περιλαμβάνονται σε αυτή τη κατηγορία καθώς και η σημασία τους για τη διαμόρφωση του συστήματος είναι:

- B.7. ο προσανατολισμός των ασυνεχειών
 - ο παράγοντας διαμόρφωσης των δυνητικά επισφαλών τεμαχών (μέγεθος) καθώς και βασικό στέλεχος του καθορισμού του γενικού μοντέλου αστοχίας ανά εξεταζόμενο πρानές.
- B.8. η αντοχή των τοιχωμάτων των ασυνεχειών
 - ο παράγοντας καθορισμού της ευστάθειας των επισφαλών τεμαχών.
- B.9. η εμμονή των ασυνεχειών
 - ο παράγοντας διαμόρφωσης των δυνητικά επισφαλών τεμαχών (μέγεθος).
- B.10. η αντοχή του άρρηκτου βράχου
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς επηρεάζει τη συνολική κινητική ενέργεια και τη διαμόρφωση του τελικού πλήθους και μεγέθους των αποκολλημένων τεμαχών που θα προσκρούσουν στη θέση ενδιαφέροντος.
- B.11. η δομή της βραχόμαζας
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς διαμορφώνει το αρχικό μέγεθος των επισφαλών τεμαχών.
- B.12. ο βαθμός αποσάθρωσης της βραχόμαζας,
 - ο παράγοντας καθορισμού της ευστάθειας των επισφαλών τεμαχών.
- B.13. και B.14. η χωρική κατανομή των ήδη προκαθορισμένων βραχοτεμαχών (προϋπαρχόντων και επισφαλών) ανά πρανές
 - ο παράγοντας καθορισμού της επιδεκτικότητας της περιοχής καθώς εκτιμάται η πυκνότητα των προκαθορισμένων βραχοτεμαχών, που είτε αστόχησαν κατά το παρελθόν είτε δύναται να αστοχήσουν στο μέλλον, ανά εξεταζόμενη υπό – περιοχή.
- B.15. και B.16. το μέγεθος των επικρατέστερων βραχοτεμαχών (προϋπαρχόντων και επισφαλών) ανά πρανές
 - ο παράγοντας καθορισμού της επιδεκτικότητας της περιοχής καθώς εκτιμάται το πιο διαδεδομένο μέγεθος βραχοτεμαχών που είτε αστόχησαν κατά το παρελθόν είτε δύναται να αστοχήσουν στο μέλλον.
- B.17. η συνολική μέγιστη κινητική ενέργεια ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης στο σημείο πρόσκρουσης
 - ο παράγοντας καθορισμού της σφοδρότητας ενός δυνητικού φαινομένου βραχοκατάπτωσης καθώς επηρεάζει το μέγεθος του.
- B.18. ο βαθμός καρστικοποίησης της βραχόμαζας,
 - ο παράγοντας καθορισμού της ευστάθειας των επισφαλών τεμαχών.

Στη τρίτη κύρια κατηγορία (C) οι παράμετροι σχετίζονται με τα αίτια πρόκλησης του βραχοκαταπτωτικού φαινομένου. Αναλυτικότερα, οι παράμετροι που περιλαμβάνονται σε αυτή τη κατηγορία είναι:

- C.19. η συχνότητα των βροχοπτώσεων,
- C.20. η ένταση των βροχοπτώσεων,
- C.21. οι συνθήκες αποστράγγισης της βραχόμαζας
- C.22. η σεισμικότητα της περιοχής έδρασης του εξεταζόμενου πρανούς.

Τέλος, η τελευταία κατηγορία (D) αποτελείται από παραμέτρους σχετικά με τη σφοδρότητα των συνεπειών ενός βραχοκαταπτωτικού φαινομένου στην εξεταζόμενη περιοχή. Συγκεκριμένα, εντάσσονται παράμετροι σχετικά με:

- D.23. το μέγεθος της ανθρώπινης παρουσίας
- D.24. την αξία των υπαρχόντων οικοδομημάτων στη περιοχή επιρροής ενός δυνητικού βραχοκαταπτωτικού γεγονότος.

Οι συντελεστές βαρύτητας στις παραπάνω ευρύτερες κατηγορίες είναι 30% για τις κατηγορίες A, B και D ενώ 10% για τη κατηγορία C στο συνολική βαθμονόμηση της διακινδύνευσης για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή.

Κάθε ένας από τους παραμέτρους που αναλύθηκαν προηγουμένως, και απαρτίζουν το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης, μπορεί να βαθμολογηθεί από 10 έως 100 ανάλογα με τις συνθήκες που περιγράφει, από τις ευνοϊκότερες έως και τις πιο δυσμενείς αντίστοιχα. Στη συνέχεια ο αριθμός που εκφράζει τη κάθε παράμετρο, για την εξεταζόμενη υπό – περιοχή, πολλαπλασιάζεται με τον προκαθορισμένο συντελεστή βαρύτητάς της. Η συνολική επικινδυνότητα της εκάστοτε περιοχής προκύπτει από το άθροισμα των σταθμισμένων αυτών τιμών για κάθε παράμετρο από τις πρώτες τρεις (3) ευρύτερες κατηγορίες (A, B και C). Η συνολική διακινδύνευση υπολογίζεται με το άθροισμα της συνολικής επικινδυνότητας με τις σταθμισμένες τιμές των παραμέτρων της κατηγορίας D. Επομένως, η μέγιστη επικινδυνότητα εκφράζεται μέσω της σταθμισμένης τιμής 70 ενώ η μέγιστη διακινδύνευση με τη σταθμισμένη τιμή 100. Το τελικό αποτέλεσμα της παρούσας προσέγγισης εκφράζεται μέσω της παραγωγής δύο (2) ξεχωριστών κατατάξεων για όλες τις εξεταζόμενες υπό – περιοχές, μία για τη συνολική επικινδυνότητα και μία για τη συνολική διακινδύνευση με συνολικά πέντε (5) κλάσεις στη κάθε μία (από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή). Τέλος, με βάση αυτές τις κατηγοριοποιήσεις, πραγματοποιήθηκε η ζωνοποίηση της συνολικής περιοχής μελέτης τόσο ως προς την επικινδυνότητα όσο και προς τη διακινδύνευση.

Μετά από την ανάλυση του προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης, κρίνεται απαραίτητο να καθοριστεί πως αυτό αναπτύχθηκε πάνω σε μία εμπειρική βάση με την επιλογή των εξεταζόμενων παραμέτρων, τη βαθμονόμηση αυτών καθώς και τη διακύμανση των συντελεστών βαρύτητας να προέρχονται από το είδος των διαθέσιμων δεδομένων, τη τεχνικογεωλογική κριτική ικανότητα του μελετητή καθώς και ευρέως γνωστά στοιχεία γεωμετρίας, γεωλογίας και μηχανικής.

Πίνακας 13. Οι εμπλεκόμενες παράμετροι και η βαθμολόγηση αυτών για το προτεινόμενο Rockfall Hazard and Risk Rating System.

Κατηγορία	Παράμετρος	Βαρύτητα	Βαθμολόγηση			
Α.	1. Ύψος πρσανούς H (m) Βαθμολόγηση	5%	< 10 10	10 – 30 30	30 – 60 60	> 60 100
	2. Γωνία κλίσης πρσανούς (°) Βαθμολόγηση	7%	20 έως 45 10	45 έως 55 30	55 έως 70 60	> 70 100
	3. Τραχύτητα πρσανούς Βαθμολόγηση	2%	Επίπεδη τραχιά 10	Επίπεδη λεία 30	Κεκλιμένη λεία 60	Κεκλιμένη τραχιά 100
	4. Ύψος κύριας θέσης αποκόλλησης τεμαχών (m) Βαθμολόγηση	8%	< H/4 10	H/4 έως H/2 30	H/2 έως 2H/3 60	2H/3 έως H 100
	5. Βλάστηση πρσανούς Βαθμολόγηση	3%	Πυκνή (ψηλά δέντρα) 10	Πυκνή (χαμηλοί θάμνοι) 30	Αραιή (γρασίδι) 60	Καμία 100
	6. Εμπόδια ζώνης απόθεσης Βαθμολόγηση	5%	Πυκνά (δέντρα και μεγάλοι βράχοι) 10	Μέτρια (χαμηλοί θάμνοι) 30	Αραιά (γρασίδι) 60	Κανένα 100
Β.	7. Προσανατολισμός ασυνεχειών Βαθμολόγηση	4%	Ευνοϊκός για ευστάθεια 10	Μέτριος 30	Δυσμενής 60	Πολύ δυσμενής 100
	8. Αντοχή τοιχωμάτων ασυνεχειών (MPa) Βαθμολόγηση	1%	> 30 10	15 έως 30 30	5 έως 15 60	< 5 100
	9. Εμμονή ασυνεχειών (m) Βαθμολόγηση	2%	< 2 10	2 έως 4 30	4 έως 8 60	> 8 100
	10. Αντοχή άρρηκτου βράχου (MPa) Βαθμολόγηση	1%	< 25 10	25 έως 50 30	50 έως 100 60	> 100 100
	11. Δομή βραχώμαζας Βαθμολόγηση	3%	Άρρηκτη 10	Σχιστοποιημένη – αποδιοργανωμένη 30	Πολύ τεμαχώδης 60	Τεμαχώδης 100
	12. Βαθμός αποσάθρωσης βραχώμαζας Βαθμολόγηση	2%	Κανένας 10	Ελαφρύς (περιορίζεται μόνο στις ασυνέχειες) 30	Μέτριος (περιορίζεται μόνο στις ασυνέχειες) 60	Υψηλός (και στις ασυνέχειες και στο βράχο) 100
	13. Αστοχούντα τεμάχια ανά m ² Βαθμολόγηση	3%	< 0.010 10	0.010 έως 0.030 30	0.030 έως 0.060 60	> 0.060 100
	14. Επισφαλή τεμάχια ανά m ² Βαθμολόγηση	2%	< 0.005 10	0.005 έως 0.010 30	0.010 έως 0.030 60	> 0.030 100
	15. Επικρατέστερος όγκος αστοχούντων τεμαχών (m ³) Βαθμολόγηση	2.5%	< 1 10	1 έως 3 30	3 έως 5 60	> 5 100
	16. Επικρατέστερος όγκος επισφαλών τεμαχών (m ³) Βαθμολόγηση	2.5%	< 1 10	1 έως 3 30	3 έως 5 60	> 5 100
	17. Συνολική μέγιστη κινητική ενέργεια (kJ) Βαθμολόγηση	5%	< 100 10	100 έως 400 30	400 έως 1000 60	> 1000 100
	18. Καρστικά φαινόμενα Βαθμολόγηση	2%	Κανένα 10	Διάσπαρτα 30	Μέτρια 60	Συχνά 100

C.	19. Συχνότητα βροχοπτώσεων Βαθμολόγηση	1.5%	Σπάνια 10	Εποχιακή 30	Συχνή 60	Πολύ συχνή 100
	20. Ένταση βροχοπτώσεων Βαθμολόγηση	1.5%	Χαμηλή 10	Μέτρια 30	Υψηλή 60	Πολύ υψηλή 100
	21. Περαιτότητα βραχόμαζας Βαθμολόγηση	3%	Πολύ υψηλή 10	Υψηλή 30	Μέτρια 60	Χαμηλή 100
	22. Συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης (m/s^2) Βαθμολόγηση	4%	< 0.16 10	0.16 έως 0.24 30	0.24 έως 0.36 60	> 0.36 100
D.	23. Ανθρώπινη δραστηριότητα Βαθμολόγηση	15%	Αμελητέα 10	Χαμηλή 30	Μέτρια 60	Υψηλή 100
	24. Αξία κτισμάτων Βαθμολόγηση	15%	Αμελητέα (π.χ.; χωματόδρομοι) 10	Χαμηλή (π.χ.; δρόμοι από άσφαλτο) 30	Μέτρια (π.χ.; κατοικίες) 60	Υψηλή (π.χ.; μνημεία) 100

Πίνακας 14. Βαθμονόμηση επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων, σύμφωνα με το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης.

Κλάση επικινδυνότητας	Βαθμολόγηση	Βαθμός Επικινδυνότητας	Απεικόνιση
I	0 – 14	Πολύ χαμηλή	Μπλε χρώμα
II	15 – 28	Χαμηλή	Πράσινο χρώμα
III	29 – 42	Μέτρια	Κίτρινο χρώμα
IV	43 – 56	Υψηλή	Πορτοκαλί χρώμα
V	57 – 70	Πολύ υψηλή	Κόκκινο χρώμα

Πίνακας 15. Βαθμονόμηση διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων, σύμφωνα με το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης.

Κλάση διακινδύνευσης	Βαθμολόγηση	Βαθμός διακινδύνευσης	Απεικόνιση
I	0 – 20	Πολύ χαμηλή	Μπλε χρώμα
II	21 – 40	Χαμηλή	Πράσινο χρώμα
III	41 – 60	Μέτρια	Κίτρινο χρώμα
IV	61 – 80	Υψηλή	Πορτοκαλί χρώμα
V	81 – 100	Πολύ υψηλή	Κόκκινο χρώμα

7.4 Αποτελέσματα

Το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης Rockfall Hazard & Risk Rating System εφαρμόστηκε και στις τέσσερις (4) εξεταζόμενες υπό περιοχές κατά μήκος των κλιτύων του ευρύτερου χώρου της Ιεράς Μονής Κηπίνας. Από τη στιγμή όπου αυτές οι υπό – περιοχές εδράζονται στην ίδια ευρύτερη περιοχή, πολλές από τις παραμέτρους (κυρίως αυτές που σχετίζονται με γενικά χαρακτηριστικά) του συστήματος είναι κοινές και για τις τέσσερις (4). Συγκεκριμένα δώδεκα (12) από τις εικοσιτέσσερις (24) παραμέτρους είναι κοινές. Στο Πίνακα 16. φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συστήματος.

Πίνακας 16. Εφαρμογή του συστήματος αξιολόγησης Rockfall Hazard & Risk Rating System για τις τέσσερις (4) υπό – περιοχές του ευρύτερου χώρου της Ιεράς Μονής Κηπίνας.

Κατηγορία	Παράμετρος	Βαρύτητα	Βαθμολόγηση (πραγματική τιμή)			
Υπό – περιοχή			U1	U2	U3	U4
Α.	1. Ύψος πρανούς (m)	5%	100 (63.7)	100 (65.4)	100 (60.1)	60 (50.4)
	2. Γωνία κλίσης πρανούς (°)	7%	100 (87)	100 (85)	100 (87)	100 (87)
	3. Τραχύτητα πρανούς	2%	100 (Κεκλιμένη τραχια	100 (Κεκλιμένη τραχιά)	100 (Κεκλιμένη τραχιά)	100 (Κεκλιμένη τραχιά)
	4. Ύψος κύριας θέσης αποκόλλησης τεμαχών (m)	8%	10 (11)	60 (34)	100 (47)	60 (31)
	5. Βλάστηση πρανούς	3%	60 (Αραιή)	60 (Αραιή)	60 (Αραιή)	60 (Αραιή)
	6. Εμπόδια ζώνης απόθεσης	5%	100 (Κανένα)	100 (Κανένα)	100 (Κανένα)	60 (Αραιά)
Β.	7. Προσανατολισμός ασυνεχειών	4%	60 (Δυσμενής)	60 (Δυσμενής)	60 (Δυσμενής)	30 (Μέτριος)
	8. Αντοχή τοιχωμάτων ασυνεχειών (MPa)	1%	30 (24)	30 (24)	30 (24)	30 (24)
	9. Εμμονή ασυνεχειών (m)	2%	60 (5)	60 (5)	60 (5)	60 (5)
	10. Αντοχή άρρηκτου βράχου (MPa)	1%	100 (110)	100 (110)	100 (110)	100 (110)
	11. Δομή βραχώμαζας	3%	60 (Πολύ τεμαχώδης)	60 (Πολύ τεμαχώδης)	60 (Πολύ τεμαχώδης)	60 (Πολύ τεμαχώδης)
	12. Βαθμός αποσάθρωσης βραχώμαζας	2%	30 (Ελαφριά)	30 (Ελαφριά)	30 (Ελαφριά)	30 (Ελαφριά)
	13. Αστοχούντα τεμάχια ανά m ²	3%	60 (0.035)	30 (0.022)	60 (0.028)	100 (0.078)
	14. Επισφαλή τεμάχια ανά m ²	2%	60 (0.013)	30 (0.009)	60 (0.013)	60 (0.015)
	15. Επικρατέστερος όγκος αστοχούντων τεμαχών (m ³)	2.5%	10 (0.8)	30 (1.4)	30 (1.3)	10 (0.6)
	16. Επικρατέστερος όγκος επισφαλών τεμαχών (m ³)	2.5%	10 (0.5)	30 (1.2)	60 (3.9)	10 (0.5)
	17. Συνολική μέγιστη κινητική ενέργεια (kJ)	5%	10 (69)	60 (747)	100 (4653)	30 (290)
	18. Καρστικά φαινόμενα	2%	100 (Συχνά)	100 (Συχνά)	100 (Συχνά)	100 (Συχνά)

C.	19. Συχνότητα βροχοπτώσεων	1.5%	60 (Συχνή)	60 (Συχνή)	60 (Συχνή)	60 (Συχνή)
	20. Ένταση βροχοπτώσεων	1.5%	60 (Υψηλή)	60 (Υψηλή)	60 (Υψηλή)	60 (Υψηλή)
	21. Περαιτότητα βραχόμαζας	3%	30 (Υψηλή)	30 (Υψηλή)	30 (Υψηλή)	30 (Υψηλή)
	22. Συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης (m/s ²)	4%	60 (0.24)	60 (0.24)	60 (0.24)	60 (0.24)
D.	23. Ανθρώπινη δραστηριότητα	15%	100 (Υψηλή)	60 (Μέτρια)	100 (Υψηλή)	30 (Χαμηλή)
	24. Αξία κτισμάτων	15%	100 (Μνημείο)	30 (Δρόμος)	60 (Κατοικίες)	30 (Δρόμος)
Συνολική Βαθμολογία Επικινδυνότητας			40	46	53.54	41
Συνολική Βαθμολογία Διακινδύνευσης			70	59.5	77.45	50

Η εκτίμηση της συνολικής βαθμολογίας της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έγινε σύμφωνα με την Εξίσωση 2.:

$$\begin{aligned} \text{Συνολική Βαθμολογία Επικινδυνότητας} = & [(A.1) \times 0.05] + [(A.2) \times 0.07] + [(A.3) \times 0.02] + [(A.4) \times 0.08] + \\ & [(A.5) \times 0.03] + [(A.6) \times 0.05] + [(B.7) \times 0.04] + [(B.8) \times 0.01] + [(B.9) \times 0.02] + [(B.10) \times 0.01] + [(B.11) \times 0.03] + \\ & [(B.12) \times 0.02] + [(B.13) \times 0.03] + [(B.14) \times 0.02] + [(B.15) \times 0.025] + [(B.16) \times 0.025] + [(B.17) \times 0.05] + [(B.18) \times \\ & 0.02] + [(C.19) \times 0.0015] + [(C.20) \times 0.0015] + [(C.21) \times 0.03] + [(C.22) \times 0.04] \end{aligned} \quad (2)$$

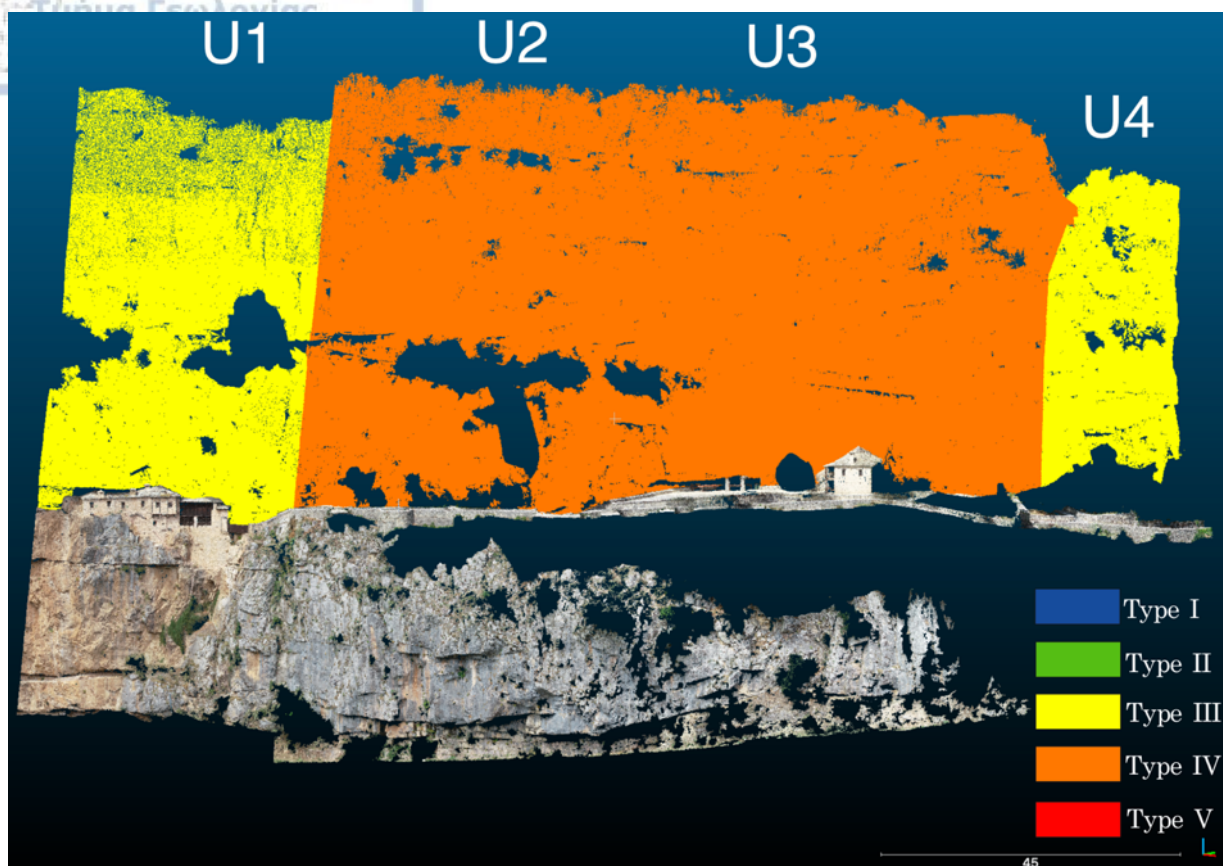
και την Εξίσωση 3.:

$$\begin{aligned} \text{Συνολική Βαθμολογία Διακινδύνευσης} = & \text{Συνολική Βαθμολογία} \\ & \text{Επικινδυνότητας} + [(D.23) \times 0.15] + [(D.24) \times 0.15] \end{aligned} \quad (3)$$

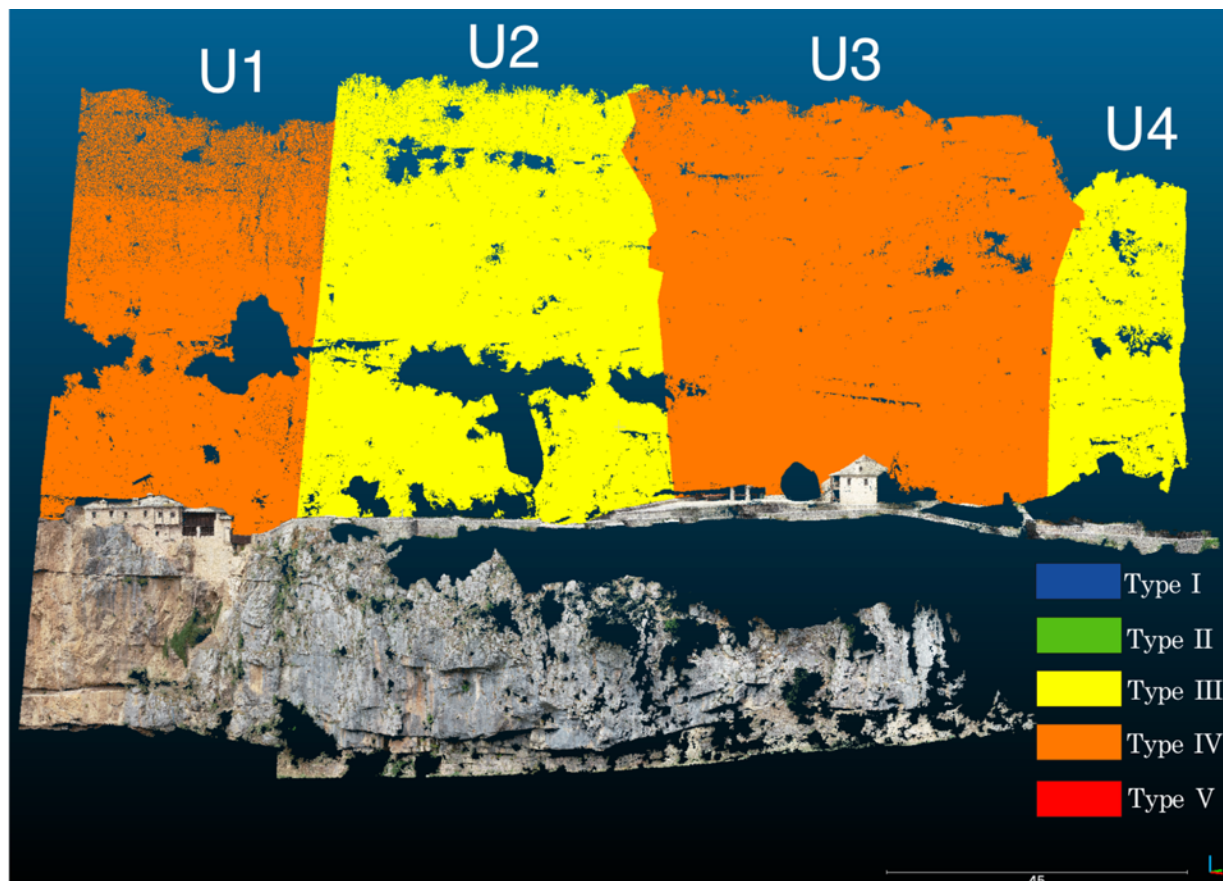
Στη συνέχεια, οι συνολικές αυτές τιμές βαθμονομήθηκαν σύμφωνα με το Πίνακα 14. για την εκτίμηση της επικινδυνότητας και το Πίνακα 15. για την εκτίμηση της διακινδύνευσης. Τέλος, με βάση αυτές τις κατηγοριοποιήσεις, πραγματοποιήθηκε η ζωνοποίηση της συνολικής περιοχής μελέτης τόσο ως προς την επικινδυνότητα όσο και προς τη διακινδύνευση. Οι ζωνοποιήσεις αυτές εμφανίζονται στο Σχήμα 51. και Σχήμα 52.

Πίνακας 17. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων για τη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας.

Υπό – περιοχή	Βαθμολογία επικινδυνότητας	Κλάση επικινδυνότητας	Βαθμολογία διακινδύνευσης	Κλάση διακινδύνευσης
U1	40	III (Μέτρια)	70	IV (Υψηλή)
U2	46	IV (Υψηλή)	59.5	III (Μέτρια)
U3	53.54	IV (Υψηλή)	77.45	IV (Υψηλή)
U4	41	III (Μέτρια)	50	III (Μέτρια)



Σχήμα 51. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης της επικινδυνότητας για τη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας.



Σχήμα 52. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης της διακινδύνευσης για τη περιοχή της Ιεράς Μονής Κηπίνας.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με το καθεστώς της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων ανά υπό – περιοχή για την εξεταζόμενη θέση έρευνας. Συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα αυτά είναι:

- Η υπό – περιοχή U1 κατηγοριοποιείται ως ζώνη μέτριας επικινδυνότητας, κυρίως λόγω της χαμηλής υψομετρικής θέσεις των κύριων σημείων αποκόλλησης τεμαχών που μπορούν να επηρεάσουν την υποκείμενη του πρανούς Μονή, καθώς και το μικρό μέγεθος των παραπάνω επισφαλών βραχοτεμαχών. Αντίθετα, λόγω της αυξημένης ανθρώπινης παρουσίας στη βάση της συγκεκριμένης υπό – περιοχής (θέση έδρασης της Ιεράς Μονής Κηπίνας) καθώς και της μεγάλης αξίας του ιστορικού αυτού κτίσματος, το συνολικό επίπεδο διακινδύνευσης της προσδιορίστηκε ως υψηλό, μέσω του προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης.
- Τα επίπεδα επικινδυνότητας στην υπό – περιοχή U2 εκτιμήθηκαν ως υψηλά, με την ύπαρξη μέτριων έως μεγάλων επισφαλών τεμαχών όπου συντελούν σε σημαντικές τιμές συνολικής μέγιστης κινητικής ενέργειας στο σημείο πρόσκρουσης τους με τον υποκείμενο δρόμο. Στον αντίποδα όμως, τα επίπεδα διακινδύνευσης της προσδιορίστηκαν ως μέτρια λόγω της μειωμένης αξίας των υποκείμενων του πρανούς κτισμάτων (ύπαρξη μόνο ενός πλακόστρωτου δρόμου), καθώς και τη σχετικά μειωμένη ανθρώπινη παρουσία όπου περιορίζεται με την ύπαρξη μίας μικρής περιοχής στάσης για τους επισκέπτες.
- Η υπό – περιοχή U3 αποτελεί τη μοναδική θέση όπου τόσο η επικινδυνότητα όσο η διακινδύνευση εκτιμήθηκε ως υψηλή. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της ύπαρξης μεγάλων επισφαλών τεμαχών όπου βρίσκονται σε ένα πολύ σημαντικό ύψος (47 m), όπου είναι μεγαλύτερο των 2/3 του συνολικού ύψους του εξεταζόμενου πρανούς. Επίσης στην υπό – περιοχή U3 παρατηρούνται και κάποιες μεμονωμένες οικίες μοναχών, οπότε όπως γίνεται αντιληπτό οι συνέπειες ενός βραχοκαταπτωτικού φαινομένου θα ήταν πολύ ισχυρές σε μία τέτοια θέση.
- Στη τελευταία εξεταζόμενη θέση (υπό – περιοχή U4), τόσο το επίπεδο της επικινδυνότητας όσο και της διακινδύνευσης προσδιορίστηκε ως μέτριο. Το μέγεθος των επισφαλών τεμαχών δεν είναι ιδιαίτερο μεγάλο, αντίθετα με τη πολύ πυκνή εικόνα τους που δίνεται λόγω της μικρής έκτασης της περιοχής. Επίσης η περιοχή χαρακτηρίζεται και από την ύπαρξη μία πρώιμης ζώνης συγκράτησης περιμετρικά του δρόμου, που ακόμα και με το μικρό μέγεθος της, προσφέρει στην ασφάλεια της περιοχής. Τέλος, η αξία των υποκείμενων του πρανούς κτισμάτων εμφανίζεται μειωμένη (ύπαρξη μόνο ενός πλακόστρωτου δρόμου) ενώ η ανθρώπινη παρουσία δεν είναι ιδιαίτερη.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εκτιμήσεις επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων, αποτελούν κάποιες από τις πιο δύσκολες και απαιτητικές έρευνες στο χώρο των γεω – επιστημών. Η συνθετότητα της φύσης του ίδιου του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων σε συνδυασμό με τη σημασία των στοιχείων που τίθενται υπό κίνδυνο καθιστούν τέτοιου είδους αναλύσεις ως πρώτης προτεραιότητας. Με την εισαγωγή των σύγχρονων μεθόδων τηλεανίχνευσης (remote sensing technology), όπως τα UAVs, κάποιοι από τους παράγοντες θέτανε δύσκολη έως και αδύνατη την εκτίμηση της επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων, μετριάστηκαν ή και ξεπεράστηκαν πλήρως. Η σύνταξη ποιοτικών και ποσοτικών αναλύσεων για γεγονότα βραχοκαταπτώσεων έγινε πιο ακριβής και τα αποτελέσματα αυτών πλέον παρουσιάζονται πιο πλήρη από ποτέ, προσφέροντας μία όσο το δυνατό κοντινή εικόνα στη πραγματικότητα.

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρονται από τα UAVs έτσι ώστε να εκτιμηθεί η επικινδυνότητα και η διακινδύνευση έναντι βραχοκαταπτώσεων μέσω μίας ποιοτικής προσέγγισης με τη σύνταξη και πρόταση ενός νέου συστήματος αξιολόγησης. Η περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης εντοπίζεται στη θέση έδρασης της Ιεράς Μονής Κηπίνας, πλησίον του χωριού Καλαρρύτες στην ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η προσέγγιση με μία ποιοτικά – βασισμένη μεθοδολογία επιλέχθηκε έναντι μίας ποσοτικής λόγω της ολοκληρωτική έλλειψης δεδομένων από τα παλαιότερα βραχοκαταπτωτικά γεγονότα στη περιοχή μελέτης, τη χωρική κατανομή τους στα πρηνή, τη περίοδο επανάληψής τους καθώς και τη σφοδρότητα τους. Επομένως, η προτεινόμενη ποιοτικά – βασισμένη μεθοδολογία λεπτομερούς έρευνας καθορισμού της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης, αποτελεί μια από τις πλέον κατάλληλες προσεγγίσεις σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν πρότερα δεδομένα σχετικά με βραχοκαταπτωτικά φαινόμενα.

Το ερευνητικό πρόγραμμα της παρούσας εργασίας ξεκίνησε με τη πραγματοποίηση υπαίθριας επίσκεψης στη θέση ενδιαφέροντος κατά την οποία υλοποιήθηκε λεπτομερής τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση των εξεταζόμενων πρηνών και πραγματοποιήθηκε και η πτήση του UAV με στόχο φωτογραμμετρική έρευνα αυτής. Συνολικά 362 φωτογραφίες των εξεταζόμενων πρηνών λήφθηκαν μέσω του UAV καλύπτοντας έτσι το σύνολο της περιοχής. Έπειτα, με χρήση της μεθοδολογίας Structure from Motion (SfM) στο φωτογραφικό υλικό, που είχε αποκτηθεί κατά την υπαίθρια επίσκεψη, κατασκευάστηκε το τρισδιάστατο νέφος σημείων (3D point cloud) της περιοχής. Το συγκεκριμένο μοντέλο όπου αποτελούνταν συνολικά από 104 εκατομμύρια σημεία, με μία εδαφική ανάλυση της τάξεως των 1.27 cm/pixel, γεωαναφέρθηκε με βάση τόσο τις μετρήσεις του ενσωματωμένου αισθητήρα GPS στο UAV, όσο και με τη χρήση πέντε (5) διαφορετικών καθορισμένων γεωαναφερμένων σημείων (Ground Control Points – GCPs) κατά μήκος των πρηνών. Το γεωαναφερμένο αυτό μοντέλο της περιοχής μελέτης τμηματοποιήθηκε σε τέσσερις (4) επιμέρους υπό – περιοχές έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν σε κάθε μία από αυτές λεπτομερή επίπεδα διαφόρων αναλύσεων.

Οι αναλύσεις αυτές ξεκίνησαν μέσω του ημί – αυτοματοποιημένου εντοπισμού των κύριων οικογενειών ασυνεχειών, το προσανατολισμό τους, καθώς και την απόστασή τους, μέσω του λογισμικού ανοικτού κώδικα DSE (Riquelme, 2014). Με βάση το καθορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών από τη παραπάνω μεθοδολογία, έγινε δυνατή η πραγματοποίηση κινηματική ανάλυσης για κάθε υπό – περιοχή έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι πιθανές αστοχίες σε κάθε πρηνές και να προταθεί το βέλτιστο μοντέλο αστοχίας τους. Στη συνέχεια, τα εξαγόμενα βέλτιστα μοντέλα αστοχίας για κάθε υπό – περιοχή χρησιμοποιήθηκαν πάνω στα τρισδιάστατα νέφη σημείων, για την υλοποίηση ημί – αυτοματοποιημένης έρευνας εντοπισμού και ογκομέτρησης τεμαχών που αποκολλήθηκαν και αστόχησαν κατά το παρελθόν καθώς και επισφαλών τεμαχών για μελλοντική κατάπτωσης. Τελευταίο στάδιο ανάλυσης, πριν από την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης, ήταν πραγματοποίηση ανάλυσης της δυναμικής ενός πιθανού βραχοκαταπτωτικού γεγονότος για κάθε εξεταζόμενη υπό – περιοχή, μέσω τροχιακών προσομοιώσεων. Η πιθανολογική αυτή ανάλυση, για κάθε υπό – περιοχή πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού RocFall (RocScience Inc., Ontario, Canada) και τα τελικά αποτελέσματα της ήταν ο καθορισμός της συνολικής μέγιστης

κινητικής ενέργειας των τεμαχών κατά τη στιγμή πρόσκρουσης με το σημείο ενδιαφέροντος, η ταχύτητα των βραχοτεμαχών καθώς και το ύψος αναπήδησης αυτών μετά την αρχική τους πρόσκρουση.

Μέσω του παραπάνω ολοκληρωμένου ερευνητικού προγράμματος κατέστη εφικτός υπολογισμός όλων απαραίτητων παραμέτρων του νέου προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων όπου εφαρμόστηκε στις τέσσερις (4) εξεταζόμενες υπό – περιοχές. Συγκεκριμένα, το σύστημα αξιολόγησης Rockfall Hazard and Risk Rating System αποτελείται από εικοσιτέσσερις (24) διαφορετικές παραμέτρους όπου ομαδοποιούνται σε τέσσερις (4) γενικές κατηγορίες ανάλογα με το σε τι αναφέρονται. Παράμετροι από τις πρώτες τρεις (3) γενικές κατηγορίες (A, B και C) συντελούν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας, ενώ μία (1) γενική κατηγορία (D) αναφέρεται στη σφοδρότητα των συνεπειών ενός βραχοκαταπτωτικού φαινομένου στην εξεταζόμενη περιοχή. Κάθε μία από αυτές τις εικοσιτέσσερις (24) παραμέτρους φέρει ένα μοναδικό συντελεστή βαρύτητας ο οποίος εξαρτάται από τη σημασία της κάθε παραμέτρου και την συνεισφορά της στη διαμόρφωση της συνολικής επικινδυνότητας και/ή διακινδύνευσης για κάθε εξεταζόμενη περιοχή. Κάθε ένας από τους παραμέτρους που απαρτίζουν το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης, μπορεί να βαθμολογηθεί από 10 έως 100 ανάλογα με τις συνθήκες που περιγράφει, από τις ευνοϊκότερες έως και τις πιο δυσμενείς αντίστοιχα. Στη συνέχεια ο αριθμός που εκφράζει τη κάθε παράμετρο, για την εξεταζόμενη υπό – περιοχή, πολλαπλασιάζεται με τον προκαθορισμένο συντελεστή βαρύτητάς της. Η συνολική επικινδυνότητα της εκάστοτε περιοχής προκύπτει από το άθροισμα των σταθμισμένων αυτών τιμών για κάθε παράμετρο από τις πρώτες τρεις (3) ευρύτερες κατηγορίες (A, B και C). Η συνολική διακινδύνευση υπολογίζεται με το άθροισμα της συνολικής επικινδυνότητας με τις σταθμισμένες τιμές των παραμέτρων της κατηγορίας D. Επομένως, η μέγιστη επικινδυνότητα εκφράζεται μέσω της σταθμισμένης τιμής 70 ενώ η μέγιστη διακινδύνευση με τη σταθμισμένη τιμή 100. Το τελικό αποτέλεσμα της παρούσας προσέγγισης εκφράζεται μέσω της παραγωγής δύο (2) ξεχωριστών κατατάξεων για όλες τις εξεταζόμενες υπό – περιοχές, μία για τη συνολική επικινδυνότητα και μία για τη συνολική διακινδύνευση με συνολικά πέντε (5) κλάσεις στη κάθε μία (από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή).

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί πολλά νέα συστήματα αξιολόγησης για τη μελέτη βραχοκαταπτωτικών φαινομένων, αλλά ο βασικός άξονας που τα διαχωρίζει με το παρόν σύστημα αξιολόγησης είναι ο τύπος των δεδομένων εισαγωγής μέσω των εξεταζόμενων παραμέτρων. Γενικά, τα συστήματα αξιολόγησης αποτελούν μία ποιοτικά προσανατολισμένη μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης, αλλά αυτό δεν σημαίνει πως πρέπει και οι τιμές των παραμέτρων που τα απαρτίζουν να είναι ποιοτικές. Το μεγαλύτερο άλλωστε μειονέκτημα των ποιοτικών μεθοδολογιών είναι υποκειμενικότητα των δεδομένων και αποτελεσμάτων τους. Αυτό σημαίνει πως για την ίδια εξεταζόμενη περιοχή και με τα ίδια διαθέσιμα δεδομένα, τα αποτελέσματα μπορεί να ποικίλουν σε μία ποιοτική αξιολόγηση λόγω διαφορετικής αντίληψης διαφορετικών ερευνητών.

Στη παρούσα εργασία, μπορεί η προσέγγιση να είναι ποιοτική αλλά οι τιμές των παραμέτρων του προτεινόμενου συστήματος αξιολόγησης είναι ποσοτικά προσανατολισμένες και επομένως δεν εξαρτώνται από την εξήγηση που επιθυμεί να τους δώσει ο μελετητής. Τα εξαχθέντα δεδομένα από το UAV σε συνδυασμό με την απαραίτητη επεξεργασία τους μέσω των κατάλληλων λογισμικών, προσφέρουν τη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού σημαντικών συντελεστών και παραμέτρων έτσι να γίνουν κατανοητές και να εκφραστούν με απόλυτες αριθμητικές τιμές οι ιδιότητες ενός σύνθετου φαινομένου όπως είναι οι βραχοκαταπτώσεις. Τα παραπάνω δεδομένα δείχνουν πως ίσως δυνητικά θα ήταν ορθότερο το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης να χαρακτηριστεί ως μία ημί – ποσοτική μεθοδολογία, και όχι ως μία αυστηρά ποιοτική.

Φυσικά το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης βρίσκεται ακόμα στα πρώτα στάδια του και χρειάζεται περαιτέρω ανάπτυξη και ανάδραση με βάση τη πραγματοποίηση back – analyses, έτσι ώστε να υλοποιηθεί η βέλτιστη βαθμονόμηση των συντελεστών βαρύτητας για τις διάφορες εξεταζόμενες παραμέτρους. Συγκεκριμένα, η πιθανή του εφαρμογή σε διαφορετικές εξεταζόμενες περιοχές και βραχώμαζες, όπου οι περιεχόμενοι παράμετροί του μπορεί να παρουσιάζουν μεγαλύτερο φάσμα, μπορεί



να βοηθήσει σημαντικά στην αξιολόγηση της “ευαισθησίας” και της σημαντικότητας κάθε παραμέτρου στη τελική εκτίμηση του βαθμού επικινδυνότητας και διακινδύνευσης αντίστοιχα.

Για την εξεταζόμενη περιοχή μελέτης της Ιεράς Μονής Κηπίνας, η έρευνα προτείνεται να συνεχιστεί μελλοντικά έτσι ώστε να εξεταστεί τόσο το αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης όσο και για να υπάρξει μία ολοκληρωμένη βάση αξιολόγησης του προτεινόμενου συστήματος Rockfall Hazard and Risk Rating System. Συγκεκριμένα, προτείνεται η περιοδική παρακολούθηση της περιοχής, ιδανικά ανά έξι (6) μήνες ή ετησίως, με πτήσεις UAV, έτσι ώστε να γίνει δυνατή η σύγκριση των ληφθέντων δεδομένων. Οι πολύ – εποχικές αυτές συγκρίσεις μορφολογικών αλλαγών θα οδηγήσουν στη καλύτερη και ακριβέστερη απεικόνιση της δυναμικής του φαινομένου. Μέσω των παραπάνω αποτελεσμάτων, θα μπορέσουν να προταθούν και να παραμετροποιηθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης – αντιστήριξης, με βάση τις μοναδικές ανάγκες της κάθε εξεταζόμενης υπό – περιοχής. Επιπρόσθετα, μέσω αυτών, θα μπορέσει να υλοποιηθεί μία άμεση αξιολόγηση και διόρθωση, αν θεωρηθεί απαραίτητο, στο προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης έτσι ώστε να παρουσιαστεί όσο πιο ολοκληρωμένο και ακριβές γίνεται.

Η συνεχής αυτή αξιολόγηση του συστήματος θεωρείται απαραίτητη, διότι ο κύριος στόχος, κατά τη διαδικασία ανάπτυξης του, ήταν η αποδοχή του από τη επιστημονική κοινότητα ως μία μεταβατική μεθοδολογία μεταξύ των ποιοτικών και ποσοτικών προσεγγίσεων εκτίμησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και από τις δύο αυτές προσεγγίσεις αλλά ξεπερνώντας, μέσω της ημί – ποσοτικής του φύσης, αρκετούς από τους περιορισμούς τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Avramidis, P., Zelilidis, A. and Kontopoulos, N., 2000. Thrust dissection control of deep-water clastic dispersal patterns in the Klematia - Paramythia foreland basin, western Greece. *Geol. Mag.* 137, no. 6, pp. 667–685.
- Barton, N., & Bandis, S., 1982. Effects of Block Size on The Shear Behavior of Jointed Rock. *The 23rd U.S Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. Berkeley, California: American Rock Mechanics Association, pp. 739–760.
- Barton, N. and Choubey, V., 1977. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 10, pp. 1–54.
- Bemis, S., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M., Akcize, S., Thiele, S., & Bangash, H., 2014. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multiscale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69(A), pp. 163–178.
- Brawner, C. and Wyllie, D., 1976. Rock Slope Stability on Railway Projects. *Area Bulletin*, 77. pp. 449–474.
- Budetta, P., 2004. Assessment of Rockfall Risk Along Roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4. pp. 71–81.
- Budetta, P. and Nappi, M., 2013. Comparison between qualitative rockfall risk rating systems for a road affected by high traffic intensity. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(6). pp. 1643–1653.
- Cancelli, A. and Crosta, G., 1993. Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. In: Telford T (ed) *Risk reliability in ground engineering*. pp. 177–190.
- Colomina, I. and Molina, P., 2014. Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92. pp. 79–97.
- Corominas, J. and Mavrouli, O., 2011. Rockfall quantitative risk assessment. In: Lambert S, Nicot F (eds) *Rockfall engineering*. John Wiley & Sons, Hoboken. pp 255–296.
- Corominas, J. and Moya, J., 2008. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology* 102(3). pp. 193–213.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, JM., Altimir., J. and Amigo', J., 2003. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra. *Natural Hazards* 30(3). pp. 421–435.
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, JP., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, MG., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. and Smith, JT., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 73. pp. 209–263.
- Crosta, GB. and Agliardi, F., 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3. pp. 407–422.
- Crosta, GB. and Agliardi, F., 2004. Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4(4). pp. 583–598.

Cruden, DM. and Fell, R., 1997. *Landslide risk assessment*. Balkema, Rotterdam.

Fell, R., 1994. *Landslide risk assessment and acceptable risk*. *Canadian Geotechnical Journal* 31(2). pp. 261–272.

Fell, R., Ho, K., Lacasse, S. and Leroi, E., 2005. *A framework for landslide risk assessment and management*. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) *Landslide risk management*. Taylor and Francis Group, London.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. and Savage, WZ., 2008. *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning*. *Engineering Geology* 102(3). pp. 99–111.

Fernandez-Hernandez, M., Paredes, C., Castedo, R., Llorente, M. and de la Vega-Panizo, R., 2012. *Rockfall detachment susceptibility map in El Hierro Island, Canary Islands, Spain*. *Natural Hazards* 64. pp. 1247–1271.

Ferrari, F., Giacomini, A. and Thoeni, K., 2016. *Qualitative Rockfall Hazard Assessment: A Comprehensive Review of Current Practices*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7). pp. 2865–2922.

Gerath, R., Jakob, M., Mitchell, P., VanDine, D., Finn, L., Gillespie, D., Kuan, S., Naesgaard, E., Patrick, B., Skermer, N. and Wallis, D., 2006. *Guidelines for legislated landslide assessments for proposed residential development in British Columbia*. Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia, Vancouver, BC.

Giordan, D., Manconi, A., Facello, A., Baldo, M., dell’Anese, F., Allasia, P. and Dutto, F., 2014. *Brief Communication “The use of UAV in rockfall emergency scenario”*. *Natural Hazards Earth System Sciences Discussions*, 2. pp. 4011–4029.

Guzzetti, F., 2005. *Review and selection of optimal geological models related to spatial information available*. *Risk advanced weather forecast system to advise on risk events and management action 1.14*. IRPI CNR, Perugia, Italy.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1999. *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy*. *Geomorphology* 31. pp. 181–216.

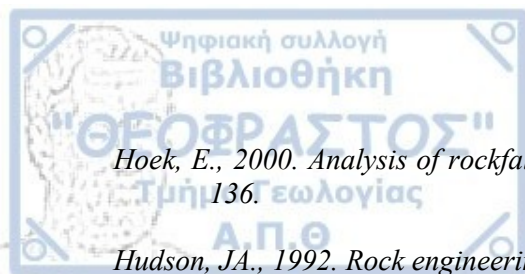
Guzzetti, F., Reichenbach, P. and Wieczorek, GF., 2003. *Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA*. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 3. pp. 491–503.

Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F. and Cardinali, M., 2006a. *Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy*. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 6. pp. 115–131.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. and Galli, M., 2006b. *Estimating the quality of landslide susceptibility models*. *Geomorphology*, 81. pp. 166–184.

Hantz, D., Vengeon, JM. and Dussauge-Peisser, C., 2003. *An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment*. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 3(6). pp. 693–701.

Hoek, E., 1999 *Putting numbers to geology—an engineer’s viewpoint*. *the Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32(1). pp. 1–19.



Hoek, E., 2000. Analysis of rockfall hazards. In: Hoek, E., (ed) Practical rock engineering, pp. 117–136.

Hudson, J.A., 1992. Rock engineering systems: theory & practice. Ellis Horwood, Chichester.

Hungr, O., Evans, S. and Hazzard, J., 1999. Magnitude and frequency of rockfalls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia. Canadian Geotechnical Journal, 36. pp. 224–238.

Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E., 2005. Landslide risk management. Taylor and Francis Group, London.

Jaboyedoff, M. and Labiouse, V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. In: 10th international congress on rock mechanics, ISRM, Johannesburg. pp. 575–578.

Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philipposian, F. and Rouiller, J.D., 2004. Assessing fracture occurrence using ‘‘weighted fracturing density’’: a step towards estimating rock instability hazard. Natural Hazards Earth System Sciences, 4. pp. 83–93.

Jaboyedoff, M., Dudt, J.P. and Labiouse, V., 2005. An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. Natural Hazards Earth System Sciences, 5. pp. 621–632.

Lucieer, A., de Jong, S.M. and Turner, D., 2014. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. Progress in Physical Geography, 38(1). pp 97–116.

Mavrouli, O.C., 2011. Quantitative evaluation of the rockfall risk. Application to the Sola` d’Andorra. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

National Highway Institute, 1993. Rockfall hazard rating system participant’s manual. NHI course no. 130220, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, publication no. FHWA SA-93-057.

Palmström, A., 2000. BLOCK SIZE AND BLOCK SIZE DISTRIBUTION. Melbourne: GeoEng2000.

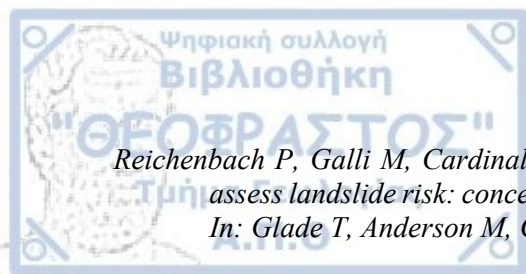
Palmstrom, A., 2001. Measurement and characterization of rock mass jointing. In: V. M. Sharma (Ed.), In-situ characterization of rocks. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema.

Palmström, A., and Singh, R., 2001. THE DEFORMATION MODULUS OF ROCK MASSES - COMPARISONS BETWEEN IN SITU TESTS AND INDIRECT ESTIMATES. Tunnelling and Underground Space Technology, 16(3). pp. 115-131.

Pantelidis, L., 2009. System of quantitative and qualitative assessment of highway geotechnical assets failure hazard and relevant consequences. PhD thesis, Aristotle University of Thessaloniki.

Pavlidis, Sp., Ganas, Ath., Papathanasiou, G., Valkaniotis, S., Thomaidou, E., Georgiadis, G., Sboras, S., and Chatzipetros Al., 2016. Geological - Seismotectonic study of the wider area of Ioannina (seismic region of the earthquake October 15, 2016). Tectonics & Structural Geology Committee of the G.S.G. 1st meeting. Athens, 6 December 2016.

Pierson, L.A., Davis, S.A. and Van Vickle, R., 1990. Rockfall hazard rating system implementation manual, federal highway administration (FHWA), report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA. US Department of Transportation, Oregon.



Reichenbach P, Galli M, Cardinali M, Guzzetti F, Ardizzone F (2005) *Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy*. In: Glade T, Anderson M, Crozier MG (eds) *Landslide risk assessment*. Wiley, Chichester.

Riquelme, AJ., Abellán, A., and Tomás, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195. pp. 185–195.

Riquelme, AJ., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers and Geosciences*, 68. pp. 38–52.

Ritchie AM (1963) *Evaluation of rockfall and its control*. Highway research board record, 17, Washington.

Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P. and Tsiambaos, G., 2012. Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 12. pp. 1823–1836.

Valkaniotis, S., Papathanassiou, G. and Ganas, A., 2018. Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery; case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece. *Engineering Geology*, 245. pp. 141–152.

Varnes, DJ., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslide analysis and control*. Transportation Research Board, Special report 176. National Academy Sciences, Washington, DC, pp. 11–33.

Varnes, DJ., IAEG—International Association Engineering Geology, Commission on Landslides and other Mass-Movements Landslide, 1984. *Hazard zonation: a review of principles and practice*, the UNESCO Press, Paris.

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier. F., Dorren, LKA., Gerber, W. and Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection—a review. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 11. pp.2617–2651.

Zieher, T., Toschi, I., Remodino, F., Rutzinger, M., Kofler, Ch., Mejia-Aguilar, A. and Schlögel, R., 2018. Sensor- and Scene Guided Integration of TLS and Photogrammetric Point Clouds for Landsliding Monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII.

Αστερίου, Π., 2016. Διερεύνηση των Γεωτεχνικών Παραμέτρων που Ελέγχουν τις Καταπτώσεις Βράχων, Διδακτορική Διατριβή.

Εργαστήριο Μεταλλευτικής Τεχνολογίας και Περιβαλλοντικής Μεταλλευτικής Ε.Μ.Π., 2012. Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για την έρευνα και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων στη χερσαία περιοχή των Ιωαννινών της Περιφέρειας Ηπείρου.

Μουντράκης, Δ., 2010, Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας.

Παπαζάχος, Β. και Παπαζάχος, Κ., 1989. Οι σεισμοί της Ελλάδας.

Σταυροπούλου, Ο., 2020. ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΗΠΕΙΡΟΥ. Διδακτορική Διατριβή.