



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΕΠΤΑΧΩΡΙΟΥ, ΗΠΕΙΡΟΥ

ΠΕΛΑΓΙΑ ΑΥΓΕΡΙΝΟΥ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ
ΓΕΩΛΟΓΙΑ',
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ'

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2018





ΠΕΛΑΓΙΑ ΑΥΓΕΡΙΝΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΡΩΝ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΕΠΤΑΧΩΡΙΟΥ, ΗΠΕΙΡΟΥ

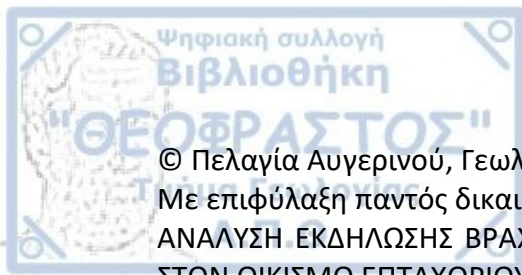
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία', Κατεύθυνση 'Τεχνική
Γεωλογία'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 12/12/2018

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Βασίλειος Μαρίνος, Αν. Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
(Επιβλέπων)

Βασίλειος Χρηστάρας, Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Γεώργιος Παπαθανασίου, Επ. Καθηγητής, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης



© Πελαγία Αυγερινού, Γεωλόγος, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΕΠΤΑΧΩΡΙΟΥ, ΗΠΕΙΡΟΥ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Pelagia Avgerinou, Geologist, 2018

All rights reserved.

ROCKFALL ANALYSIS AND DESIGN OF PROTECTION MEASURES AT EPTAHORI VILLAGE,
EPIRUS – *Master Thesis*

Citation:

Αυγερινού Π., 2018. – Ανάλυση Εκδήλωσης Βραχοκαταπτώσεων και Προτάσεις Μέτρων Προστασίας στον Οικισμό Επταχωρίου, Ηπείρου. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., σελ.

Avgerinou P., 2018. – Rockfall Analysis and Design of Protection Measures at Eptahori Village, Epirus. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 85 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.





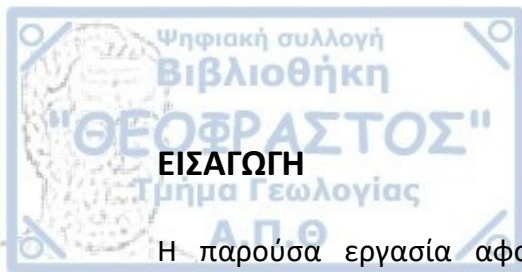
Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Μαρίνο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Χρηστάρα, Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, καθώς και τον κ. Γεώργιο Παπαθανασίου, Επίκουρο Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη βοήθεια και τις επισημάνσεις τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Τριαντάφυλλο Κακλή, Δρ. Γεωλόγο, ΕΔΙΠ του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, καθώς και τον κ. Ευστράτιο Καραντανέλλη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης τόσο για τη βοήθειά τους κατά τις μετρήσεις πεδίου όσο και για τις συμβουλές και τις επισημάνσεις τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ένα θερμό ευχαριστώ στους κατοίκους του οικισμού του Επταχωρίου και ιδιαιτέρως στην κα. Ιωάννα Λουλάκη και στον κ. Μιχάλη Κεραμάρη για τις ξεναγήσεις τους και την πολύτιμη βοήθειά τους με την παροχή πλούσιου υλικού.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένειά μου και ιδίως στη μητέρα μου, για όλη την υποστήριξη που μου προσέφεραν.



Η παρούσα εργασία αφορά την ανάλυση των βραχοκαταπτώσεων και τον προσδιορισμό των παραμέτρων της κίνησης του βόρειου απότομου πρηνούς ανάντη του οικισμού του Επταχωρίου, Ηπείρου, όπου σημειώνονται εκτεταμένες δομές αστάθειας κατά μήκος του μετώπου του πρηνούς, θέτοντας σε υψηλό κίνδυνο τον οικισμό κατάντη. Κατά μήκος του μετώπου του εξεταζόμενου πρηνούς παρατηρούνται πολυάριθμες δομές παλαιότερων αστοχιών, οι οποίες αφορούν κυρίως υποσκαφές λόγω διάβρωσης ιλυολιθικών στρωμάτων υποκείμενων ψαμμιτικών πάγκων δημιουργώντας ασταθή επικρεμάμενα τεμάχια. Η περιοχή μελέτης αποτελείται γεωλογικά από μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας και, συγκεκριμένα από εναλλαγές ψαμμιτών με λεπτούς ιλυολιθικούς ορίζοντες, οι οποίοι καλύπτουν της βάση του εξεταζόμενου πρηνούς. Οι σχηματισμοί της περιοχής παρουσιάζουν τεμαχώδη δομή, η οποία ελέγχεται από την επιφάνεια της στρώσης με γενική διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, η οποία αποτελεί την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχώμαζας, καθώς και από παρακατακόρυφες διακλάσεις διεύθυνσης ΒΒΔ – ΝΝΑ εντός των ψαμμιτικών πάγκων. Οι διακλάσεις αυτές δρουν ως εφελκυστικές ρωγμές κατά μήκος του μετώπου του εξεταζόμενου πρηνούς, καθώς το υψηλό ποσοστό ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που χαρακτηρίζει την περιοχή εισέρχεται στις ανοιχτές ασυνέχειες της βραχώμαζας διευρύνοντάς τις τοπικά και δημιουργώντας σημαντικές ζώνες αστάθειας, καθώς το νερό δρα ως παράγοντας αποτόνωσης και απομείωσης της συνοχής και, κατ' επέκταση, της αντοχής της βραχώμαζας δημιουργώντας οριακά ασταθείς συνθήκες.

Σκοπό της παρούσας εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη τεχνικογεωλογικού μοντέλου για την ερμηνεία του μηχανισμού αστοχίας των βραχοκαταπτώσεων, η εκτίμηση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας του εξεταζόμενου πρηνούς έναντι αστοχίας και, τέλος, η πρόταση και ο σχεδιασμός μέτρων προστασίας της οικιστικής ζώνης κατάντη του πρηνούς. Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε λεπτομερής γεωλογική και τεχνικογεωλογική έρευνα στην περιοχή μελέτης κατά το διάστημα Ιουλίου – Αυγούστου 2018, καθώς και μετρήσεις πεδίου. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις του πρηνούς με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR (Light Detection And Ranging) και με πτήσεις με μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle) για την τρισδιάστατη λεπτομερή αποτύπωση του εξεταζόμενου πρηνούς. Από τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών προσδιορίστηκαν με ακρίβεια οι δομές του πρηνούς, εντοπίστηκαν ασταθείς ζώνες κατά μήκος του πρηνούς και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις όγκου επισφαλών τεμαχίων, ώστε να αναπτυχθεί το σύνθετο τεχνικογεωλογικό μοντέλο του εξεταζόμενου πρηνούς και να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των σχηματισμών κατά τις καταπτώσεις.

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση των βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρानού στην περιοχή μελέτης με την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης τροχιών βραχοτεμαχών με την χρήση του προγράμματος RAMMS:: Rockfall, το οποίο συνιστά ένα πλήρες και ειδικευμένο πρόγραμμα προσομοίωσης τροχιών σε τρεις διαστάσεις. Σύμφωνα με τα παραπάνω μοντέλα, εξετάστηκαν όλες οι δυνητικές τροχιές των βραχοτεμαχών κατά μήκος του πρानού και αναλύθηκαν οι δυσμενέστερες τροχιές όπου επιδείκνυαν το μέγιστο κίνδυνο, εκτιμώντας το χειρότερο σενάριο βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρानού. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι της κίνησης από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και οι προκύπτουσες παράμετροι του μοντέλου αξιολογήθηκαν σύμφωνα με εμπειρικούς συντελεστές αναπήδησης, ώστε να αποδοθεί προσεγγιστικά μία ρεαλιστική προσομοίωση της αστοχίας. Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε λεπτομερές και ακριβές μοντέλο εδάφους από τα δεδομένα της επίγειας σάρωσης του πρानού με LiDAR, με ανάλυση 0.5 m. Τα δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου σχετικά με τον τύπο του εδάφους και τη βλάστηση στη βάση του πρανού, καθώς και η καλύτερη δυνατή διαστασιολόγηση των βραχοτεμαχών καθορίστηκαν σύμφωνα με λεπτομερή δεδομένα της έρευνας πεδίου.

Σύμφωνα με τα μοντέλα προσομοίωσης στο RAMMS:: Rockfall, τα βραχοτεμάχια αναπτύσσονται μέσο ύψος αναπήδησης 3 – 4 m με μέγιστο τοπικά έως 8 m κατά την αναπήδησή τους στους ψαμμιτικούς πάγκους, όπου η ταχύτητες των βραχοτεμαχών κυμαίνονται από 5 m/s έως 8 m/s φθάνοντας σε μέγιστη ταχύτητα 15 m/s. Κατά τη διάρκεια της κίνησής τους, τα τεμάχια αναπτύσσονται υψηλά ποσοστά κινητικής ενέργειας (8.000 – 12.000 kJ), τα οποία μειώνονται, όπως υποδεικνύουν οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης, κατά την ολίσθησή τους επί του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης του πρανού. Κατά την κίνησή τους αυτή αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής, οι οποίες προκαλούν την απορρόφηση υψηλού ποσοστού ενέργειας με αποτέλεσμα την ανακοπή της τροχιάς των βραχοτεμαχών ή την κύλισή τους έως τον πόδα του πρανού, απειλώντας την οικιστική ζώνη.

Σύμφωνα με την εκτίμηση των παραμέτρων της κίνησης από το RAMMS και συνεκτιμώντας τις δυσμενέστερες τροχιές τεμαχών κατά μήκος του πρανού και εύλογες παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εκτιμήθηκαν ζώνες υψηλής επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας του πρανού έναντι βραχοκαταπτώσεων. Επιπλέον, προτάθηκαν σειρές μέτρων προστασίας για τον περιορισμό της επικινδυνότητας σε όσο το δυνατό χαμηλότερο επίπεδο, όπως αποστράγγιση του πρανού με κατασκευή αποστραγγιστικών τάφρων αλλά και κατασκευή δυναμικών φραχτών ανάσχεσης και τάφρων περισυλλογής βραχοτεμαχών για τη συγκράτηση ολισθαίνοντων τεμαχών.

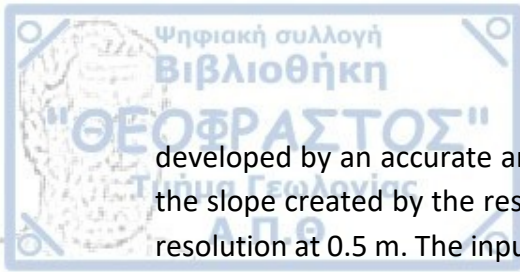


ABSTRACT

This thesis is concerned with rockfall analysis and modelling rockfall parameters associated with the northern steep slope at Eptahori Village, Epirus, Greece, exhibits extended rockfall instabilities along its face, placing the village downstream at high risk. Along the face log of the examined slope numerous rockfall events were observed, mainly weathering of shale undercuts beds of sandstone forming unstable overhangs. The geological setting of the study area consists of molassic units, sandstone interbedded with thin layers of shale of the Mesohellenic Trench, which exceeds at the base of the slope. The formations of the area present blocky structure developed by the bedding with orientation NW – SE, which consists the main joint set of the rock mass as well by sub-vertical joints with orientation NNW – SSE within the thick sandstone layers. These joints act as tension cracks along the slope, since the high rate of atmospheric precipitation enters these open discontinuities of the rock mass widening them locally and creating significant zones of instability along the slope, as water acts as the main factor of instability and a factor for the degradation and impairment of cohesion and consequently the strength of the rock mass creating unstable conditions.

The objective of this thesis is to develop engineering geological interpretation of rockfall events to evaluate the degree of rockfall hazard along the face of the slope and finally propose and design protection structures of the residential zone downstream the slope. A detailed field survey of the geological and engineering geological conditions were conducted during July – August 2018 along with field measurements. Moreover, thorough scanning of the face log of the slope carried out using terrestrial laser scanning (Light Detection And Ranging – LiDAR) as well flights above the study area using Unmanned Aerial Vehicle (UAV). According to the resulting products the slope structures were precisely determined, unstable zones were detected and volume measurements of hanging blocks were carried out so as to develop the complex engineering geological model of the slope and evaluate the behavior of the formations prior to rockfall.

Rockfall analysis along the slope on the study area were conducted by developing rockfall trajectory simulation models using RAMMS:: Rockfall, which stands out to be a complete and advanced modelling software in simulation of rockfall trajectories in three dimensions. According to these models all the potential rockfall trajectories along the face of the slope were examined and the trajectories evaluated with high risk were analyzed, estimating the worst-case scenario of rockfall along the slope. Moreover, the parameters of motions of rocks were determined by the simulation results and the resulting model parameters were calibrated according to restitution coefficients in order to improve simulation results. The simulation model was



developed by an accurate and detailed Digital Surface Model (DEM) of the terrain of the slope created by the resulting point cloud data set of LiDAR scanning with a high resolution at 0.5 m. The input parameters of the model concerning the type of terrain and vegetation at the slope as well the best-fit simulation of rock bodies were determined in accordance with detailed field observation data.

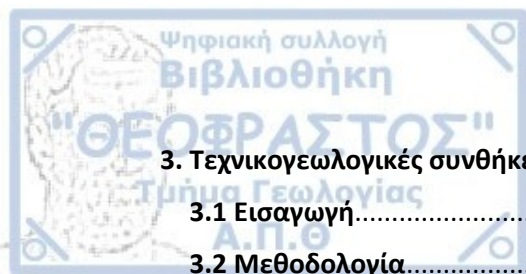
Counter to the RAMMS:: Rockfall simulation model, the blocks develop an average jump height of 3 to 4 m with a local maximum of 8 m during bouncing at the sandstone benches, where the velocity of the rocks range from 5 to 8 m/s reaching a maximum of 15 m/s. During their motion the rocks develop high kinetic energy rates (8.000 – 12.000 kJ), which are reducing, as indicated by the values of the restitution coefficients, when sliding on the shale layers of the base of the slope. During this contact, friction forces develop which provoke the absorption of high amount of kinetic energy where either stopping the trajectories at the base of the slope or rolling with reduced velocity towards the toe of the slope, placing the residential zone at high risk.

According to the RAMMS:: Rockfall simulation model and taking into account the worst-case scenario of rockfall trajectories along the slope, zones of high hazard against rockfall were assessed. In addition, a series of protection measures were proposed to reduce the hazard to the lowest possible level, which aim to the decrease the probability of failure by drainage of the slope by construction of drainage ditches. Moreover, protection structures were proposed in order to retain falling blocks by constructing flexible catch fences combined with wide and deep ditches in front of them.

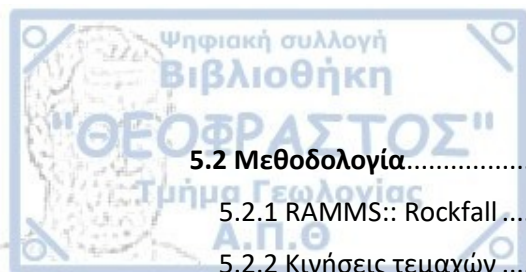


Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	II
ABSTRACT	IV
Πίνακας Περιεχομένων	VI
Λίστα Σχημάτων	IX
Λίστα Πινάκων	XVI
1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά στοιχεία περιοχής μελέτης	1
1.2 Φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς	2
1.2.1 Γενικά	2
1.2.2 Δομές και αίτια βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς	2
1.2.3 Εξελικτική πορεία του ανάγλυφου του πρανούς	4
1.3 Σκοπός μελέτης	5
1.4 Μεθοδολογία εκπόνησης εργασίας	6
1.4 Διάρθρωση εργασίας	6
2. Γεωλογικές συνθήκες	8
2.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής	8
2.1.1 Γεωτεκτονική και παλαιογεωγραφική θέση	8
2.1.2 Λιθοστρωματογραφία	10
2.1.3 Τεκτονική	12
2.2 Γεωλογία περιοχής μελέτης	13
2.2.1 Εισαγωγή	13
2.2.2 Στρωματογραφία	13
2.2.2.1 Μάργες Επταχωρίου/ Ιλυόλιθοι με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις	16
2.2.2.2 Τοπικά πολύμεικτα κροκαλοπαγή	16
2.2.2.3 Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων	17
2.2.2.4 Εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών	18
2.2.3 Τεκτονική	18
2.3 Υδρογεωλογικές συνθήκες	20
2.3.1 Γενικά	20
2.3.2 Κλιματικά στοιχεία περιοχής	22
2.3.3 Υδρολιθολογικά στοιχεία σχηματισμών	24
2.4 Στοιχεία σεισμικότητας	27



3. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες	31
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Μεθοδολογία	31
3.3 Ταξινόμηση βραχώμαζας	32
3.4 Τεχνικογεωλογικές ενότητες (ΤΕ)	33
3.4.1 Τομέας 1	35
3.4.1.1 Ποιότητα βραχώμαζας.....	35
3.4.1.2 ΤΕ1. Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις.....	35
3.4.1.3 ΤΕ2. Εναλλαγές μεσοστρωματώδους ψαμμίτη και ιλυολίθων σε περίπου ίσες αναλογίες	37
3.4.1.4 ΤΕ3. Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με τοπικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων	37
3.4.1.5 ΤΕ5. Μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων	38
3.4.2 Τομέας 2	38
3.4.2.1 Ποιότητα βραχώμαζας.....	38
3.4.2.2 ΤΕ1. Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις.....	40
3.4.2.3 ΤΕ3. Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με τοπικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων	40
3.4.2.4 ΤΕ4. Αποσαθρωμένοι ψαμμίτες με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων	40
3.4.2.5 ΤΕ5. Μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων	40
3.4.3 Τομέας 3	41
3.4.3.1 Ποιότητα βραχώμαζας.....	41
3.4.3.2 ΤΕ1. Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις.....	41
3.4.3.3 ΤΕ5. Μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων	41
4. Ανάλυση μηχανισμού αστοχίας καταπτώσεων	43
4.1 Εισαγωγή	43
4.2 Μεθοδολογία	43
4.2.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση πρανούς με επίγεια σάρωση LiDAR.....	44
4.2.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση πρανούς με πτήση UAV	46
4.3 Μετρήσεις πεδίου	50
4.3.1 Μετρήσεις στοιχείων ασυνεχειών με γεωλογική πυξίδα	50
4.3.2 Συσχέτιση στοιχείων ασυνεχειών από μετρήσεις πεδίου και από δεδομένα επίγεια σάρωσης LiDAR.....	53
4.3.3 Δοκιμές κρουσιμέτρησης με σφύρα Schmidt	55
4.4 Μηχανισμός κατάπτωσης βραχοτεμαχών	57
5. Ανάλυση και προσομοίωση βραχοκαταπτώσεων	61
5.1 Εισαγωγή	61



5.2 Μεθοδολογία	61
5.2.1 RAMMS:: Rockfall	61
5.2.2 Κινήσεις τεμαχών	62
5.3 Δεδομένα εισαγωγής	63
5.3.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM).....	63
5.3.2 Στοιχεία τεμαχών.....	65
5.3.3 Τύπος υλικού εδάφους	65
5.3.4 Δασικές περιοχές.....	66
5.3.5 Ζώνες τροφοδοσίας.....	67
5.4 Αποτελέσματα ανάλυσης βραχοκαταπτώσεων	68
5.4.1 Τομέας 1	68
5.4.2 Τομέας 2	73
5.4.3 Τομέας 3	76
5.4.4 Ανάλυση δυσμενέστερων καταπτώσεων.....	80
5.4.4.1 Εκτίμηση συντελεστών αναπήδησης με τη σκληρότητα σφύρας Schmidt	80
5.4.4.2 Ανάλυση τροχιάς	81
6. Εκτίμηση επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων οικισμού	89
6.1 Εισαγωγή.....	89
6.2 Μεθοδολογία.....	90
6.3 Εκτίμηση επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας κατά μήκος του πρανούς	91
6.3.1 Ζώνη Ι.....	93
6.3.2 Ζώνη ΙΙ.....	93
6.3.3 Ζώνη ΙΙΙ	94
6.3.4 Ζώνη ΙV	94
6.3.4 Ζώνη V	95
7. Προτεινόμενα μέτρα προστασίας	96
7.1 Εισαγωγή.....	96
7.2 Παλαιότερα μέτρα προστασίας.....	96
7.3 Ενεργητικά μέτρα προστασίας	97
7.4 Παθητικά μέτρα προστασίας.....	99
8. Συμπεράσματα	104
Βιβλιογραφία	107

Λίστα Σχημάτων

- Σχήμα 1.1** Γεωγραφική θέση ευρύτερης περιοχής και περιοχής μελέτης (κίτρινο πλαίσιο) (Google Earth)1
- Σχήμα 1.2** Πανοραμική εικόνα του εξεταζόμενου πρανούς ανάντη του οικισμού του Επταχωρίου. (<http://www.tonoion.com/>).....2
- Σχήμα 1.3** Αποτύπωση χαρακτηριστικών δομών υποσκαφής κατά μήκος της επιφάνειας στρώσης στο μέτωπο του πρανούς (αριστερά) και σχηματική απόδοση του μηχανισμού δημιουργίας των δομών (δεξιά, (Wyllie, 2015))3
- Σχήμα 1.4** Χαρακτηριστικές δομές μαργών Επταχωρίου λόγω αποσάθρωσης. Λήψη επί της του ανατολικού τμήματος του πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 23/08/2018).....3
- Σχήμα 1.5** χαρακτηριστικές εικόνες του μετώπου του εξεταζόμενου πρανούς, όπου παρουσιάζεται η εξελικτική πορεία του ανάγλυφου κατά τα χρονικά έτη 1953 (επάνω αριστερά), 1954 (επάνω δεξιά) και 1964 (κάτω) (<http://www.eptahori.gr/>).....4
- Σχήμα 1.6** Αποκολλημένο τέμαχος μεγάλων διαστάσεων, το οποίο προκάλεσε καταστροφή οικίας κατά το Δεκέμβριο 1992 – Ιανουάριο 1993 (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνίες λήψης 09/07/2018, αριστερά και 18/07/2018, δεξιά).....5
- Σχήμα 2.1** Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Μεσοελληνικής Αύλακας και των γειτονικών της περιοχών (η περιοχή μελέτης σημειώνεται με κίτρινο πλαίσιο) με ταξινόμηση σύμφωνα με την παλαιογεωδυναμική τους θέση στα πλαίσια του εξελισσόμενου ορογενετικά τόξου των Ελληνίδων. 1. Ενιαίος φλύσχος Γαβρόβου – Ιονίου 2. Ανθρακικοί σχηματισμοί Ιονίου 3. Ανθρακικοί σχηματισμοί Γαβρόβου 4. Σχηματισμοί Πίνδου 5. Ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας 6. Οφιόλιθοι Β. Πίνδου, Οφιόλιθοι Όθρυς 7. Σχηματισμός Κρανιάς 8. Σχηματισμός Επταχωρίου 9. Σχηματισμός Πενταλόφου 10. Σχηματισμός Τσοτυλίου 11. Σχηματισμός Όντρια 12. Οφιόλιθοι Βούρινου 13. Κρυσταλλικό υπόβαθρο Πελαγονικής s.l. 14. Πλειο-τεταρτογενές 15. Οριζόντια στρώματα 16. Κλίση στρωμάτων ως 15° 17. Κλίση στρωμάτων μεγαλύτερη από 15° 18. Ανάστροφα στρώματα 19. Εφιππεύσεις 20. Επωθήσεις (τροποποιημένο από Παπανικολάου και συν., 1988)9
- Σχήμα 2.2** Πέντε εγκάρσιες τομές (όπως σημειώνονται οι θέσεις τους στο Σχήμα 2.1) κατά μήκος της Μεσοελληνικής Αύλακας, της οροσειράς της Πίνδου και της περιοχής μελέτης (κίτρινα βέλη) που δείχνουν τη συνολική δομή και τη γενικευμένη σχηματική με βάση την παλαιογεωδυναμική ερμηνεία (τροποποιημένο από Παπανικολάου και συν., 1988)10
- Σχήμα 2.3** Χάρτης εξάπλωσης μολασσικών σχηματισμών της Μεσοελληνικής αύλακας και της περιοχής μελέτης (κίτρινο πλαίσιο) 1: Ανώτερο Ηώκαινο (σειρά

Κρανιάς), 2: Ολιγόκαινο (σειρά Επταχωρίου), 3: Ακουϊτάνιο (σειρά Πενταλόφου – Μετεώρων), 4: Βουρδιγάλιο (σειρά Τσοτυλίου), 5: Ελβέτιο (σειρά Όντρια) (Μουντράκης, 2010)11

Σχήμα 2.4 Σχηματισμοί Επταχωρίου και Πενταλόφου, όπου με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η πιθανή ανάπτυξη της λεκάνης και η περιοχή απόθεσης κατά το Ολιγόκαινο – Κατώτερο Μειόκαινο, με κίτρινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης και με έντονη μαύρη γραμμή και βέλη σημειώνονται οι τεκτονικές επαφές και οι σχετικές κινήσεις. 1: Ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, 2: Ανάστροφα ρήγματα/ Επωθήσεις, 3: Κανονικά ρήγματα. Με γκρι χρώμα σημειώνεται ο σχηματισμός Κρανιάς (Βαμβακά, 2009)13

Σχήμα 2.5 Γενική όψη του πρανούς προς ΝΔ μέσα από τον οικισμό με κατακόρυφη κλίμακα ύψους για τη διαστασιολόγηση του πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 18/07/2018)14

Σχήμα 2.6 Απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη των σχηματισμών στην περιοχή μελέτης από τους ανώτερους προς τους κατώτερους με τα αντίστοιχα πάχη τους. .15

Σχήμα 2.7 Όψη του πρανούς προς ΔΝΔ, όπου διακρίνεται η στρωματογραφική ακολουθία των σχηματισμών της περιοχής. Λήψη επί της Εθνικής Οδού ΕΟ Κοζάνης Ιωαννίνων, ανάντη του Επταχωρίου (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 12/07/2018)15

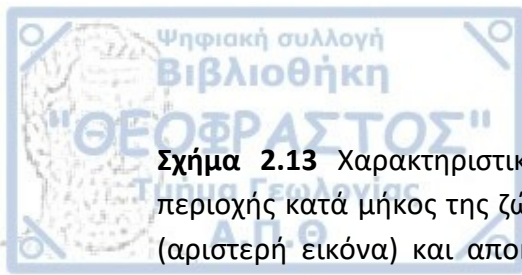
Σχήμα 2.8 Μάργες Επταχωρίου με το χαρακτηριστικό τεφροκύανό τους χρώμα στη βάση του πρανούς με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις, όπου στα ανώτερα τμήματα διακρίνονται ψαμμιτικοί πάγκοι με αυξανόμενο πάχος. Διακρίνεται η αποσάθρωση των ιλυολίθων (σχάση) και οι χαρακτηριστικές δομές λόγω επιφανειακής απορροής υδάτων (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 09/07/2018)16

Σχήμα 2.9 Πολύμεικτα κροκαλοπαγή καλά συγκολλημένα. Λήψη πεσμένου τεμάχους παλαιάς κατολίσθησης από αγροτικό δρόμο ανατολικά του πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 18/07/2018)17

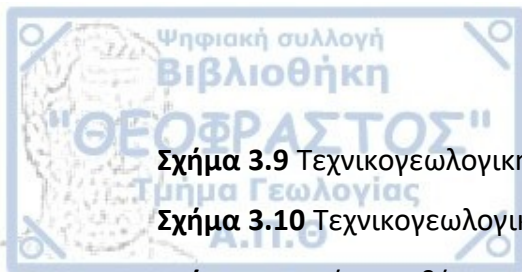
Σχήμα 2.10 Όψη του πρανούς προς ΝΔ όπου διακρίνονται οι γεωλογικές ενότητες της περιοχής και η διακύμανση του πάχους των ψαμμιτών κατά μήκος του πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 12/07/2018)19

Σχήμα 2.11 Όψη του πρανούς προς ΑΒΑ όπου διακρίνονται οι γεωλογικές ενότητες της περιοχής και η στρώση των ιλυολιθικών και ψαμμιτικών οριζόντων (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 12/07/2018)19

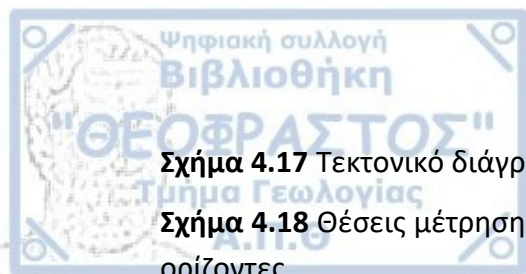
Σχήμα 2.12 Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Επταχωρίου, όπου διακρίνονται οι ορεινοί όγκοι που οριοθετούν την περιοχή μελέτης και το υδρογραφικό δίκτυο με τους κύριους ποταμούς.20



Σχήμα 2.13 Χαρακτηριστικές εικόνες εκτεταμένης αποψίλωσης της ευρύτερης περιοχής κατά μήκος της ζώνης Πίνδου και της κοίτης του Σαραντάπορου ποταμού (αριστερή εικόνα) και αποκάλυψης των μαργών Επταχωρίου με χαρακτηριστικές δομές (δεξιά εικόνα) (Google Earth)	21
Σχήμα 2.14 Χαρακτηριστικές δομές μαργών Επταχωρίου λόγω αποσάθρωσης. Λήψη επί της Εθνικής Οδού ΕΟ Κοζάνης Ιωαννίνων, εντός του Επταχωρίου (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 09/07/2018)	21
Σχήμα 2.15 Ετήσια κατανομή βροχόπτωσης στην περιοχή Καστοριάς και Κόνιτσας για τα υδρολογικά έτη 2013 – 2014 έως 2016 – 2017 και στην περιοχή του Επταχωρίου για τα υδρολογικά έτη 1984 – 1985 έως 1991 – 1992	23
Σχήμα 2.16 Μέσες μηνιαίες τιμές ύψους βροχόπτωσης (mm) για διαφορετικά υδρολογικά έτη των σταθμών Καστοριάς, Κόνιτσας και Επταχωρίου	24
Σχήμα 2.17 Πηγή υπερχειλίσης επί της Εθνικής Οδού ΕΟ Κοζάνης Ιωαννίνων (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 09/07/2018).....	25
Σχήμα 2.18 Υδρογεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης	26
Σχήμα 2.19 Χάρτης σεισμικότητας ευρύτερης περιοχής μελέτης για την περίοδο των ετών 1993 – 2018.....	28
Σχήμα 2.20 Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος, φύλλο «Γρεβενά» κλίμακα 1: 100.000 (τροποποιημένο, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Λέκκας Ε. , και συν., 1995-1996)).....	29
Σχήμα 2.21 Νέος Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, όπου σημειώνεται η περιοχή μελέτης (κίτρινο πλαίσιο) (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, (2001)).....	30
Σχήμα 3.1 Τρεις τομείς κατά μήκος του πρηνούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 18/07/2018).....	31
Σχήμα 3.2 Διάγραμμα Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (Geological Strength Index – GSI) για μολασσικούς σχηματισμούς στην επιφάνεια (Μαρίνος, 2007).....	32
Σχήμα 3.3 Διάκριση πέντε (5) Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων (ΤΕ) και θέσεις διατομών κατά μήκος του εξεταζόμενου πρηνούς	34
Σχήμα 3.4 Τεχνικογεωλογική διατομή 1-1 διεύθυνσης ΑΒΑ – ΔΝΔ Τομέα 1	36
Σχήμα 3.5 Τεχνικογεωλογική τομή Τομέα 1.....	36
Σχήμα 3.6 Ιλυόλιθος με το χαρακτηριστικό τεφρακύανο χρώμα στη βάση του πρηνούς έντονα αποσθρωμένος με αποδιοργανωμένη δομή	37
Σχήμα 3.7 Τεχνικογεωλογική διατομή 2-2 διεύθυνσης ΑΒΑ – ΔΝΔ Τομέα 2	39
Σχήμα 3.8 Τεχνικογεωλογική τομή Τομέα 2.....	39

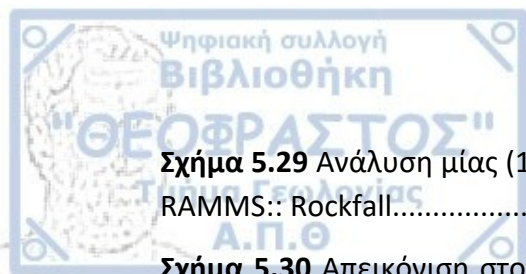


Σχήμα 3.9 Τεχνικογεωλογική διατομή 3-3 διεύθυνσης ABA – ΔΝΔ Τομέα 3	42
Σχήμα 3.10 Τεχνικογεωλογική τομή Τομέα 3.....	42
Σχήμα 4.1 Χάρτης θέσεων, εύρους σάρωσης (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και επιφάνειες σάρωσης (μπλε επιφάνειες) με τη χρήση LiDAR και UAV (Google Earth)	43
Σχήμα 4.2 Απεικόνιση λειτουργίας επίγειου συστήματος LiDAR (Light Detection And Ranging) (Jaboyedoff, et al., 2012)	44
Σχήμα 4.3 Θέσεις επίγειας σάρωσης LiDAR πρανούς, χάρτης θέσεων (επάνω), Θέση 1 (κάτω αριστερά), Θέση 2 (κάτω δεξιά).....	45
Σχήμα 4.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση πρανούς με επίγεια σάρωση LiDAR	45
Σχήμα 4.5 Σύγκριση εικόνας πεδίου (αριστερά) και εικόνας σάρωσης με LiDAR (δεξιά) δυτικού τμήματος πρανούς, όπου με βέλη εντοπίζονται όγκοι τεμαχών επιδεκτικών προς κατάπτωση	46
Σχήμα 4.6 Σύγκριση εικόνας πεδίου (αριστερά) και εικόνας σάρωσης με LiDAR (δεξιά) ανατολικού τμήματος πρανούς, όπου με βέλη εντοπίζονται όγκοι τεμαχών επιδεκτικών προς κατάπτωση	46
Σχήμα 4.7 Εναέρια εικόνα πεδίου ανατολικού τμήματος πρανούς (επάνω) – Τμήμα τρισδιάστατου μοντέλου πρανούς (κάτω αριστερά) και αντίστοιχο point cloud (κάτω δεξιά) με σάρωση UAV	47
Σχήμα 4.8 Υπολογισμός όγκων βραχοτεμαχών με σάρωση UAV	48
Σχήμα 4.9 Παρουσίαση επικρεμάμενων τεμαχών, τεμαχών επιδεκτικών σε κατάπτωση, δομών παλαιότερων καταπτώσεων και δομών υποσκαφής, επάνω: όψη πρανούς προς ΝΔ, κάτω: όψη πρανούς προς ανατολικά.	49
Σχήμα 4.10 Ιστόγραμμα όγκων τεμαχών παλαιών καταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς	49
Σχήμα 4.11 Ιστόγραμμα όγκων επικρεμάμενων τεμαχών κατά μήκος του πρανούς	50
Σχήμα 4.12 Κύριες ασυνέχειες βραχώμαζας, όπως εντοπίστηκαν στη θέση μέτρησης στοιχείων προσανατολισμού ασυνεχειών	50
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών τεκτονικών μετρήσεων πεδίου	52
Σχήμα 4.14 Τεκτονικό διάγραμμα μετρήσεων πεδίου	52
Σχήμα 4.15 Επιφάνειες κύριων ασυνεχειών αντιπροσωπευτικού τμήματος της βραχώμαζας, με τη χρήση του εργαλείου Compass του λογισμικού Cloud Compare	53
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών τεκτονικών μετρήσεων δεδομένων LiDAR.....	54



Σχήμα 4.17 Τεκτονικό διάγραμμα μετρήσεων δεδομένων LiDAR.....	54
Σχήμα 4.18 Θέσεις μέτρησης με τη σφύρα Schmidt σε ιλυολιθικούς και ψαμμιτικούς ορίζοντες.....	56
Σχήμα 4.19 Συσχέτιση τιμών αναπήδησης σφύρας Schmidt και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS (MPa) σύμφωνα με το ειδικό βάρος του πετρώματος (kN/m ³) (Deere & Miller, 1966)	56
Σχήμα 4.20 Τυπικές δομές αποκολλημένων ψαμμιτικών όγκων	57
Σχήμα 4.21 Κινηματική ανάλυση έναντι ανατροπής στο εξεταζόμενο πρανές.....	58
Σχήμα 4.22 Μοντέλο προσομοίωσης των συνθηκών αστοχίας της περιοχής μελέτης (conceptual model).....	60
Σχήμα 5.1. Τύποι κίνησης τεμαχών κατά τις καταπτώσεις (Αστερίου, 2016)	62
Σχήμα 5.2 Συσχέτιση τιμών υψομέτρου όπως υπολογίστηκε από τη σάρωση LiDAR και των πραγματικών υψομέτρων μεταξύ 26 σημείων κατά μήκος του μετώπου του πρανούς	64
Σχήμα 5.3 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) περιοχής μελέτης από δεδομένα LiDAR	64
Σχήμα 5.4 Διαστασιολόγηση αντιπροσωπευτικών βραχοτεμαχών μέσω της βιβλιοθήκης Rock Builder στο RAMMS:: Rockfall	65
Σχήμα 5.5 Κατανομή αποκολλημένων τεμαχών του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall.....	69
Σχήμα 5.6 Ύψος αναπήδησης (m) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall.....	70
Σχήμα 5.7 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall.....	71
Σχήμα 5.8 Κλίσεις του μετώπου του πρανούς στο RAMMS:: Rockfall	71
Σχήμα 5.9 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall.....	72
Σχήμα 5.10 Ιστογράμματα κατανομής ύψους αναπήδησης (m), ταχύτητας (m/s) και κινητικής ενέργειας (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall.....	72
Σχήμα 5.11 Κατανομή αποκολλημένων τεμαχών του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall	73
Σχήμα 5.12 Ύψος αναπήδησης (m) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall.....	74
Σχήμα 5.13 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall.....	75

Σχήμα 5.14 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall	75
Σχήμα 5.15 Ιστογράμματα κατανομής ύψους αναπήδησης (m), ταχύτητας (m/s) και κινητικής ενέργειας (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall.....	76
Σχήμα 5.16 Κατανομή αποκολλημένων τεμαχών του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall	77
Σχήμα 5.17 Ύψος αναπήδησης (m) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall.....	78
Σχήμα 5.18 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall.....	78
Σχήμα 5.19 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall	79
Σχήμα 5.20 Ιστογράμματα κατανομής ύψους αναπήδησης (m), ταχύτητας (m/s) και κινητικής ενέργειας (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall.....	79
Σχήμα 5.21 Ανάλυση δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών τεμαχών του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall.....	82
Σχήμα 5.22 Απεικόνιση στο πεδίο των δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών (Τροχιά 1 και 2) τεμαχών του Τομέα 1	82
Σχήμα 5.23 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμαχών κατά την τροχιά 1 του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall	83
Σχήμα 5.24 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμαχών κατά την τροχιά 2 του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall	84
Σχήμα 5.25 Ανάλυση δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών (Τροχιά 3 και 4) τεμαχών του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall.....	85
Σχήμα 5.26 Απεικόνιση στο πεδίο των δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών (Τροχιά 3, πάνω και 4, κάτω) τεμαχών του Τομέα 2	85
Σχήμα 5.27 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμαχών κατά την τροχιά 3 του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall	86
Σχήμα 5.28 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμαχών κατά την τροχιά 4 του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall	86



Σχήμα 5.29 Ανάλυση μίας (1) δυσμενούς τροχιάς (Τροχιά 5) τεμάχους του Τομέα στο RAMMS:: Rockfall.....	87
Σχήμα 5.30 Απεικόνιση στο πεδίο μίας (1) δυσμενούς τροχιάς (Τροχιά 5) τεμάχους του Τομέα 3.....	87
Σχήμα 5.31 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμάχους κατά την τροχιά 5 του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall	88
Σχήμα 6.1 Απεικόνιση διακινδύνευσης του κτιρίου στη βάση του πρανούς έναντι βραχοκατάπτωσης (Van Westen et al., 2006).....	90
Σχήμα 6.2 Απεικόνιση διακινδύνευσης του κτιρίου στη βάση του πρανούς έναντι βραχοκατάπτωσης (Wyllie, 2015)	90
Σχήμα 6.3 Ανάλυση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας ανά ζώνη κατά μήκος του πρανούς.....	92
Σχήμα 7.1 Τοίχοι ανάσχεσης οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευασμένα κατά το 1970 – 1990 πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, λήψη επί της οδού προσπέλασης, ημερομηνία λήψης 18/07/2018)	97
Σχήμα 7.2 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του συνόλου του πρανούς κατά μήκος τομής (κόκκινη γραμμή) στη μέση της βάσης του πρανούς στο RAMMS:: Rockfall.....	99
Σχήμα 7.3 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του συνόλου του πρανούς κατά μήκος τομής (κόκκινη γραμμή) στη μέση της βάσης του πρανούς στο RAMMS:: Rockfall.....	100
Σχήμα 7.4 Διαγράμματα κινητικής ενέργειας (kJ) (αριστερά) και ταχύτητας (m/s) (δεξιά) τεμαχών κατά μήκος τομής στη βάση του πρανούς.....	100
Σχήμα 7.5 Διάγραμμα ύψους αναπήδησης (m) βραχοτεμαχών κατά μήκος των δυσμενέστερων τροχιών στη βάση του πρανούς	101
Σχήμα 7.6 Προτεινόμενες θέσεις κατασκευής δυναμικών φραχτών ανάσχεσης βραχοτεμαχών (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) στη βάση του πρανούς	101
Σχήμα 7.8 Διάγραμμα μήκους ολίσθησης (m) και κινητικής ενέργειας (kJ) βραχοτεμαχών κατά μήκος των δυσμενέστερων τροχιών στη βάση του πρανούς .	103
Σχήμα 7.9 Προτεινόμενη θέση κατασκευής τάφρου περισυλλογής βραχοτεμαχών (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) στη βάση του πρανούς.....	103



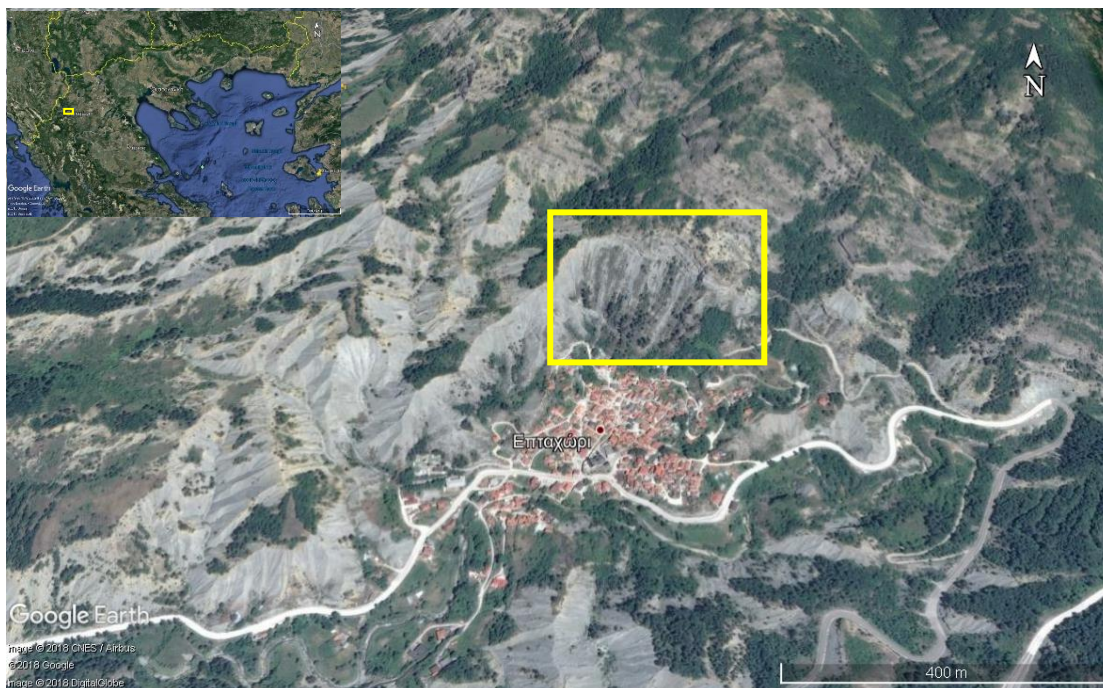
Πίνακας 3.1 Τεχνικογεωλογικές Ενότητες (ΤΕ) κατά μήκος του πρσανούς και χαρακτηρισμός βραχώμαζας.....	33
Πίνακας 4.1 Τεκτονικά στοιχεία μετρήσεων πεδίου	51
Πίνακας 4.2 Τεκτονικά στοιχεία ασυνεχειών μετρήσεων δεδομένων LiDAR και μετρήσεων πεδίου.....	55
Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα δοκιμών κρουσιμέτρησης στου σχηματισμούς της περιοχής μελέτης.....	57
Πίνακας 5.1 Τύποι εδάφους και τιμές φυσικών παραμέτρων στο RAMMS:: Rockfall (RAMMS::ROCKFALL User Manual).....	63
Πίνακας 5.2 Τύποι εδαφών στο RAMMS:: Rockfall (RAMMS::ROCKFALL User Manual)	66
Πίνακας 5.3 Τύποι δασικών περιοχών στο RAMMS:: Rockfall ανάλογα με την έκτασή τους (RAMMS::ROCKFALL User Manual)	66
Πίνακας 5.4 Δεδομένα εισαγωγής στο RAMMS:: Rockfall για την ανάλυση βραχοκαταπτώσεων	67
Πίνακας 5.5 Δεδομένα εισαγωγής στο RAMMS:: Rockfall για την ανάλυση βραχοκαταπτώσεων σε κάθε Τομέα του εξεταζόμενου πρσανούς.....	68
Πίνακας 5.6 Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης σύμφωνα με τη σκληρότητα της σφύρας Schmidt	81
Πίνακας 6.1 Παράμετροι εκτίμησης επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας.....	91
Πίνακας 6.2 Ανάλυση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας ανά ζώνη κατά μήκος του πρσανούς.....	91

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά στοιχεία περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης ανήκει στον οικισμό του Επταχωρίου, ο οποίος εκτείνεται στο νότιο τμήμα του νομού Καστοριάς, επί της Εθνικής Οδού Κοζάνης – Ιωαννίνων. Η περιοχή περιβάλλεται περιμετρικά από το Βόιο όρος, ενώ η ευρύτερη περιοχή οριοθετείται βορειοδυτικά από το Γράμμο και νοτιοδυτικά από το Σμόλικά, οι οποίοι συνιστούν το τέταρτο και το δεύτερο υψηλότερο βουνό της Ελλάδας, αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, τη στενή περιοχή μελέτης συνιστά το απότομο πρανές με γενική διεύθυνση μετώπου ΒΔ – ΝΑ, το οποίο αναπτύσσεται ανάντη του οικισμού του Επταχωρίου στο βόρειο τμήμα του (Σχήματα 1.1 και 1.2). Το εξεταζόμενο πρανές (γνωστό ως «μπιστεριά», ονομασία που αποδόθηκε από τους ντόπιους) αποτελείται γεωλογικά από το χαρακτηριστικό σχηματισμό της περιοχής, τη μάργα Επταχωρίου και εμφανίζει κλίσεις 55° – 70° στα ανώτερα τμήματα, οι οποίες μειώνονται στη βάση του πρανούς, όπου εμφανίζει μέση κλίση 30° – 34° . Το μέτωπο του εξεταζόμενου πρανούς αποτελεί ζώνη τροφοδοσίας καταπτώσεων βραχοτεμαχών απειλώντας την οικιστική ζώνη.



Σχήμα 1.1 Γεωγραφική θέση ευρύτερης περιοχής και περιοχής μελέτης (κίτρινο πλαίσιο) (Google Earth)



Σχήμα 1.2 Πανοραμική εικόνα του εξεταζόμενου πρανούς ανάντη του οικισμού του Επταχωρίου. (<http://www.tovoion.com/>)

1.2 Φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς

1.2.1 Γενικά

Οι καταπτώσεις βράχων αποτελούν ένα σημαντικό γεωλογικό κίνδυνο, ο οποίος εκδηλώνεται κυρίως σε ορεινές περιοχές με έντονο μορφολογικό ανάγλυφο, προκαλώντας καταστροφές και απειλώντας οικιστικές ζώνες, συγκοινωνιακά έργα έως και ανθρώπινες ζωές. Τα καταγεγραμμένα γεγονότα βραχοκαταπτώσεων στον ελληνικό χώρο είναι πολυάριθμα, καθώς η εμφάνισή τους ευνοείται από την τεκτονική κατάσταση των σχηματισμών, το έντονο και υψηλό ανάγλυφο, τα κλιματικά στοιχεία αλλά και τη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής (Αστερίου, 2016). Τα βραχοτεμάχια αποκολλούνται κατά μήκος ασυνεχειών της βραχώμαζας κυρίως ανοιχτών, έπειτα από φαινόμενα έντονης βροχόπτωσης ή σεισμικής δραστηριότητας.

Η κίνηση των τεμαχίων μετά από την αποκόλλησή τους από το πρανές συνιστά μια πολύπλοκη διαδικασία, της οποίας ο μηχανισμός δε δύναται να κατανοηθεί εις βάθος. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί προσεγγιστικά μοντέλα και η μέθοδος ανάλυσης της κίνησης των τεμαχίων έχει απλουστευθεί. Μετά την αποκόλλησή τους από το πρανές και κατά την κίνησή τους τα τεμάχια βράχων ακολουθούν μια τροχιά κίνησης κατά μήκος του πρανούς, η οποία ορίζεται σύμφωνα με τη Νευτώνεια μηχανική (Wyllie, 2014) και κατά την ολίσθηση, κύλιση ή πρόσκρουσή τους επί της επιφάνειας του πρανούς υφίστανται απώλεια ενέργειας.

1.2.2 Δομές και αίτια βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς

Κατά μήκος του μετώπου του εξεταζόμενου πρανούς παρατηρούνται πολυάριθμες δομές παλαιότερων αστοχιών. Οι κυριότερες δομές αφορούν δομές υποσκαφής του

πρανούς κατά μήκος της επιφάνειας της στρώσης των σχηματισμών, η οποία συνιστά την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχόμαζας (Σχήμα 1.3). Οι δομές των καταπτώσεων παρατηρείται πως ελέγχονται από δύο συστήματα διακλάσεων, τα οποία χαρακτηρίζουν την τεκτονική κατάσταση της βραχόμαζας και αποτελούν επιφάνειες αποκόλλησης των βραχοτεμαχών, όπως αναλύεται στη συνέχεια λεπτομερώς ο μηχανισμός αστοχίας.



Σχήμα 1.3 Αποτύπωση χαρακτηριστικών δομών υποσκαφής κατά μήκος της επιφάνειας στρώσης στο μέτωπο του πρανού (αριστερά) και σχηματική απόδοση του μηχανισμού δημιουργίας των δομών (δεξιά, (Wyllie, 2015))

Κύριο παράγοντα αστάθειας αποτελεί το υψηλό ποσοστό ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, το οποίο χαρακτηρίζει την περιοχή μελέτης, κυρίως λόγω του υψομέτρου της. Το νερό της βροχόπτωσης εισέρχεται στις ανοιχτές ασυνέχειες της βραχόμαζας διευρύνοντάς τες τοπικά και δημιουργώντας σημαντικές ζώνες αστάθειας με υψηλή επιδεκτικότητα σε καταπτώσεις τεμαχών. Συνεπώς, το νερό δρα ως παράγοντας αποτόνωσης και απομείωσης της συνοχής και, κατ' επέκταση, της αντοχής της βραχόμαζας δημιουργώντας οριακά ασταθείς συνθήκες. Η διαβρωτική δράση του νερού ευνοείται από την απουσία βλάστησης στην περιοχή, η οποία προκαλεί επιφανειακή αποκάλυψη των σχηματισμών σχηματίζοντας τις χαρακτηριστικές δομές της μάργας, οι οποίες χαρακτηρίζουν την περιοχή του Επταχωρίου (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4 Χαρακτηριστικές δομές μαργών Επταχωρίου λόγω αποσάθρωσης. Λήψη επί της του ανατολικού τμήματος του πρανού (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 23/08/2018)

1.2.3 Εξελικτική πορεία του ανάγλυφου του πρανούς

Κατά τις προηγούμενες δεκαετίες σημειώθηκαν αρκετά φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων στον οικισμό του Επταχωρίου διαμορφώνοντας συνεχώς το ανάγλυφο του μετώπου του πρανούς. Η καταγραφή των συνολικών φαινομένων των καταπτώσεων δεν κατέστη δυνατή λόγω έλλειψης αρχείου καταγραφών, όμως σύμφωνα με την παλαιότερη μελέτη της περιοχής των *Χρηστάρας και συν., 1997* σημειώνονται τα πιο έντονα φαινόμενα τα οποία εκδηλώθηκαν κατά τα χρονικά έτη 1935, 1951, 1968, 1970, 1987, 1993, 1994. Αρκετές πληροφορίες για παλαιότερες καταπτώσεις αντλήθηκαν από πλούσιο φωτογραφικό υλικό το οποίο βρίσκεται συγκεντρωμένο σε μουσείο του οικισμού, καθώς και στον ιστότοπο αυτού (<http://www.eptahori.gr/>). Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζονται εικόνες του εξεταζόμενου πρανούς για τα χρονικά έτη 1953 –1963, σύμφωνα με τις οποίες παρατηρείται απότομη αλλαγή του αναγλύφου του πρανούς μεταξύ των ετών 1953 – 1954, καθώς παρατηρούνται πολυάριθμες δομές υποσκαφής διαμορφώνοντας τη σημερινή εικόνα του μετώπου. Επιπλέον παρατηρείται σημαντικός όγκος αποκόλλησης στο ανατολικό τμήμα του πρανούς καθ' όλη τη διάρκεια των ετών, όπου κατά μήκος της επιφάνειας αυτής εκδηλώθηκαν σημαντικές καταπτώσεις, οι δομές των οποίων χαρακτηρίζουν το σημερινό ανάγλυφο του πρανούς.



Σχήμα 1.5 χαρακτηριστικές εικόνες του μετώπου του εξεταζόμενου πρανούς, όπου παρουσιάζεται η εξελικτική πορεία του ανάγλυφου κατά τα χρονικά έτη 1953 (επάνω αριστερά), 1954 (επάνω δεξιά) και 1964 (κάτω) (<http://www.eptahori.gr/>)

Το μεγαλύτερο καταγεγραμμένο φαινόμενο κατάπτωσης βράχου σημειώθηκε το Δεκέμβριο 1992 – Ιανουάριο 1993, σύμφωνα με πληροφορίες των κατοίκων της

περιοχής, το οποίο προκάλεσε την ολική καταστροφή οικίας κοντά στον πόδα του πρανού, χωρίς απώλεια ανθρώπινης ζωής. Το τέμαχος βρίσκεται έως σήμερα στη θέση αυτή, καθώς δε δύναται η μετακίνησή του λόγω των μεγάλων διαστάσεών του εκτιμώμενων 4x3x5 m (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6 Αποκολλημένο τέμαχος μεγάλων διαστάσεων, το οποίο προκάλεσε καταστροφή οικίας κατά το Δεκέμβριο 1992 – Ιανουάριο 1993 (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνίες λήψης 09/07/2018, αριστερά και 18/07/2018, δεξιά)

1.3 Σκοπός μελέτης

Σκοπό της παρούσας εργασίας αποτελεί:

- η ανάπτυξη του σύνθετου τεχνικογεωλογικού μοντέλου του εξεταζόμενου πρανού σύμφωνα με επιτόπιες έρευνες και μετρήσεις πεδίου και ο προσδιορισμός του μηχανισμού καταπτώσεων,
- η ανάλυση και η προσομοίωση της αστοχίας με την ανάπτυξη μοντέλου με το πρόγραμμα RAMMS:: Rockfall, η εκτίμηση των παραμέτρων της κίνησης των βραχοτεμαχών και η αξιολόγησή του με βάση εμπειρικούς συντελεστές για την απόδοση ρεαλιστικής προσομοίωσης της αστοχίας,
- η εκτίμηση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας του εξεταζόμενου πρανού έναντι βραχοκαταπτώσεων, καθώς και
- η πρόταση ενεργητικών και παθητικών μέτρων προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανού για τον περιορισμό της επικινδυνότητας σε όσο το δυνατό χαμηλότερο επίπεδο

1.4 Μεθοδολογία εκπόνησης εργασίας

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου στην περιοχή μελέτης κατά το διάστημα Ιουλίου – Αυγούστου 2018. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προσανατολισμού ασυνεχειών με γεωλογική πυξίδα και δοκιμές κρουσσιμέτρησης με τη χρήση της σφύρας Schmidt για την εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας των σχηματισμών.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις του πρανούς με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR (Light Detection And Ranging) και με πτήσεις με μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle) για την τρισδιάστατη λεπτομερή αποτύπωση του εξεταζόμενου πρανούς. Με τη χρήση των κατάλληλων λογισμικών (CloudCompare, Pix4D mapper, ArcMap) και υπολογιστικών μέσων προσδιορίστηκαν με ακρίβεια οι δομές του πρανούς, καθώς και ο όγκος επισφαλών τεμαχών και δομών παλαιών καταπτώσεων.

Επιπλέον, για την τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση του μετώπου του πρανούς χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης, όπως ελήφθησαν από τις επισκέψεις στο πεδίο για την αποτύπωση των δομών και τον προσδιορισμό της εξελικτικής πορείας του ανάγλυφου του μετώπου του πρανούς χρησιμοποιήθηκαν αεροφωτογραφίες από το Google Earth, καθώς και φωτογραφίες από προσωπικά αρχεία των κατοίκων του οικισμού σε ηλεκτρονική μορφή, μέσω του ιστότοπου (<http://www.eptahori.gr/>).

1.4 Διάρθρωση εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το γεωλογικό υπόβαθρο και η γεωτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής. Αναλύονται οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης και παρουσιάζονται τα λιθοστρωματογραφικά χαρακτηριστικά κάθε σχηματισμού της περιοχής. Επιπρόσθετα, εξετάζονται οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής σύμφωνα με τα υδρολιθολογικά στοιχεία των σχηματισμών και αναλύονται κλιματικά στοιχεία και συγκεκριμένα ο όγκος βροχόπτωσης, ο οποίος αποτελεί κύριο παράγοντα αστάθειας του πρανούς. Επιπλέον, παρουσιάζεται η σεισμικότητα της περιοχής και εκτιμάται η σεισμική της επικινδυνότητα.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών και διακρίνονται Τεχνικογεωλογικές Ενότητες (ΤΕ) κατά μήκος του πρανούς, σύμφωνα με τη δομή και τη σύστασή τους. Το εξεταζόμενο πρανές διακρίθηκε σε τρεις (3) Τομείς, όπου σε κάθε έναν αναλύθηκε η ποιότητα της βραχώμαζας και τα χαρακτηριστικά του κάθε σχηματισμού, ενώ πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κάθε Τεχνικογεωλογική Ενότητα για τον προσδιορισμό της τεχνικογεωλογικής τους συμπεριφοράς. Τέλος, αναπτύχθηκε το σύνθετο τεχνικογεωλογικό μοντέλο του

περιοχής και εκτιμάται η σεισμική της επικινδυνότητα.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν και σαρώσεις του πρσανούς με τη χρήση γεωδαιτικών μεθόδων και, συγκεκριμένα, με επίγεια σάρωση LiDAR (Light Detection And Ranging) και με τη μέθοδο φωτογραμμετρίας με πτήσεις με μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω αναλύεται ο μηχανισμός κατάπτωσης των βραχοτεμαχών.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται ανάλυση των βραχοκαταπτώσεων και αναπτύσσεται το μοντέλο προσομοίωσης με τη χρήση του προγράμματος RAMMS:: Rockfall. Εξετάζονται όλες οι δυνητικές τροχιές των βραχοτεμαχών κατά μήκος του πρσανούς και εκτιμώνται οι παράμετροι της κίνησης. Επιπλέον, αναλύονται οι δυσμενέστερες τροχιές σε κάθε τομέα του πρσανούς και αξιολογούνται οι εκτιμώμενες παράμετροι σύμφωνα με εμπειρικούς συντελεστές αναπήδησης.

Στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται εκτίμηση της επικινδυνότητας και της επικινδυνότητας της οικιστικής ζώνης έναντι βραχοκαταπτώσεων, βασιζόμενη σε παραδοχές στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, οι οποίες αφορούν το ανάγλυφο του μετώπου του πρσανούς, την ποιότητα της βραχώμαζας, τις δομές παλαιότερων καταπτώσεων, τον όγκο των τεμαχών επιδεκτικών έναντι κατάπτωσης, την παρουσία ζώνης επέμβασης και την παρουσία βλάστησης.

Στο Κεφάλαιο 7 προτείνεται μία σειρά ενεργητικών και παθητικών μέτρων προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρσανούς για τον περιορισμό της επικινδυνότητας σε όσο το δυνατό χαμηλότερο επίπεδο. Επιπλέον, παρουσιάζονται και παλαιότερα μέτρα προστασίας που εφαρμόστηκαν κατά καιρούς για την αντιμετώπιση των βραχοκαταπτώσεων.

2. Γεωλογικές συνθήκες

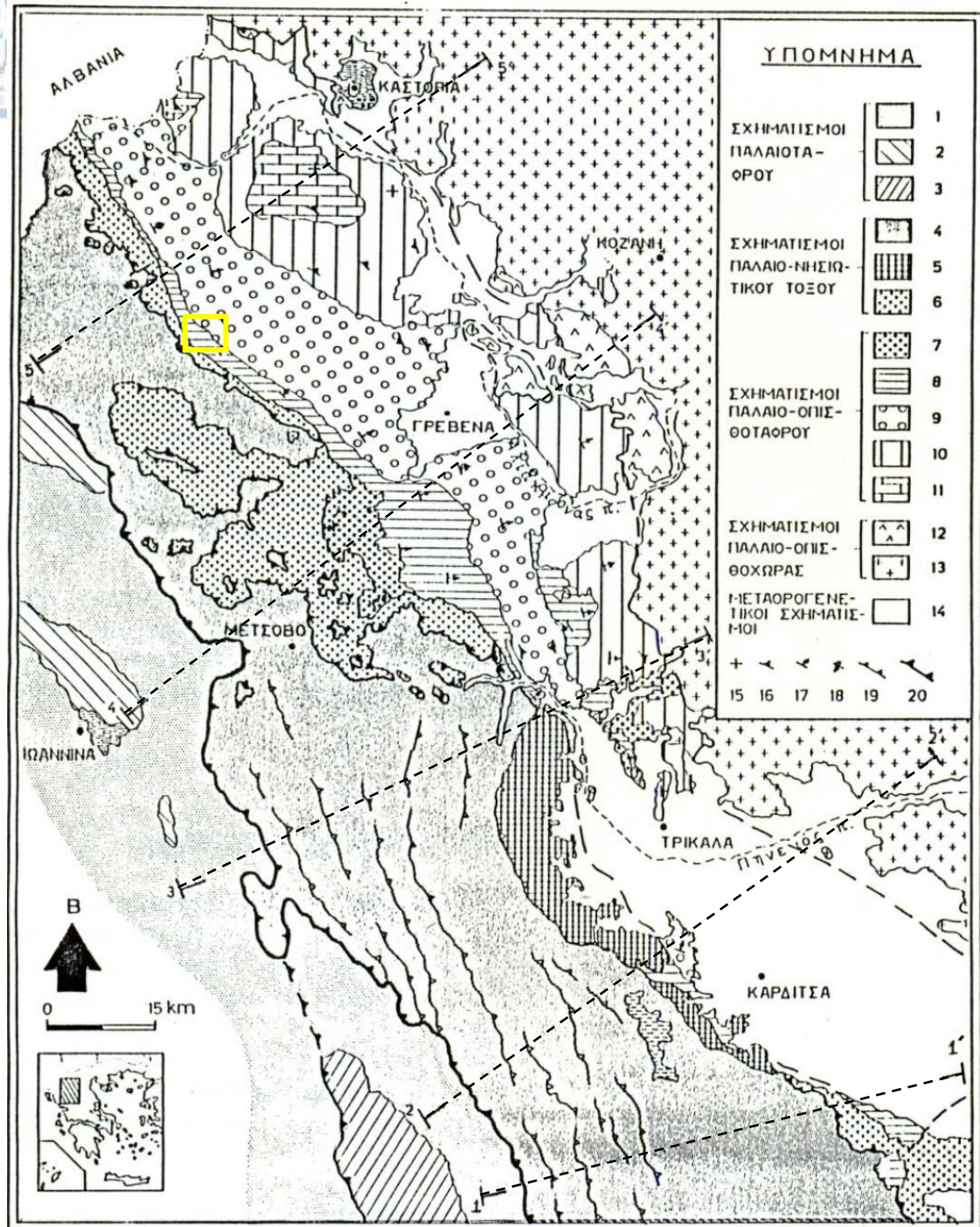
2.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής

2.1.1 Γεωτεκτονική και παλαιογεωγραφική θέση

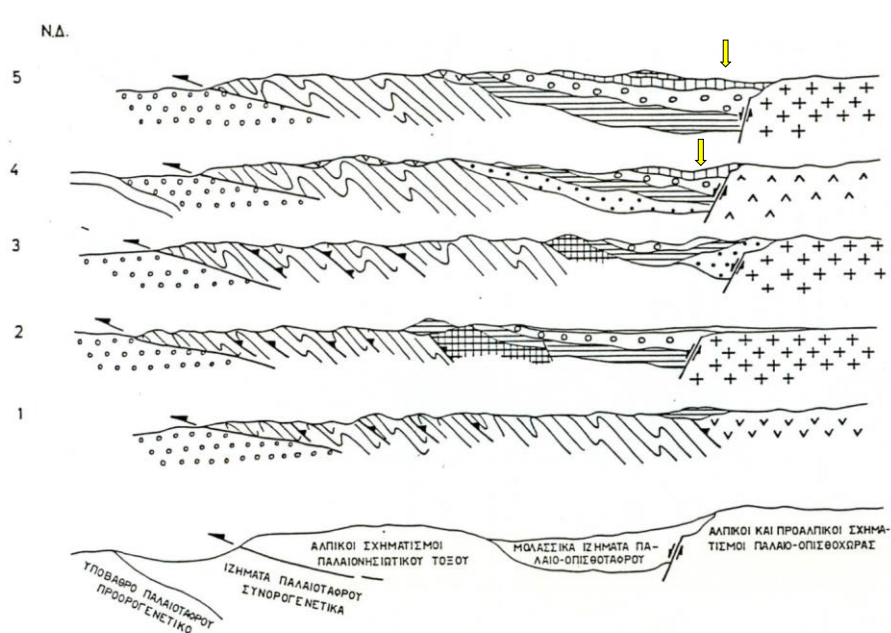
Η ευρύτερη περιοχή ανήκει γεωτεκτονικά στην Υποπελαγονική ζώνη και συνιστά την πληρέστερη και σπουδαιότερη μολασσική αύλακα της Ελλάδας, τη Μεσοελληνική Αύλακα. Αναπτύχθηκε το Άνω Ηώκαινο κατά την τελική ορογενετική φάση και λειτούργησε ως λεκάνη απόθεσης μολασσικών ιζημάτων κατά το Ολιγόκαινο – Μέσο Μειόκαινο (Μουντράκης, 2010). Η συνολική εξέλιξη της Μεσοελληνικής αύλακας έχει θεωρηθεί ως μια εσωτερική λεκάνη των Ελληνίδων, η οποία ακολούθησε παθητικά το τέλος του αλπικού κύκλου με τον ειδικότερο χαρακτηρισμό του υστεροτεκτονικού σταδίου (Aubouin, 1974), (Λέκκας Ε. , και συν., 1999).

Η μολασσική λεκάνη της Μεσοελληνικής αύλακας συνιστά ένα στενό και επίμηκες βύθισμα με μήκος περίπου 130 km και πλάτος μεγαλύτερο των 40 km. Εκτείνεται από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ ακολουθώντας το ελληνικό ορογενετικό τόξο, μέχρι τη Θεσσαλική πεδιάδα (Bourcart, 1922), όπου βυθίζεται κάτω από τις προσχώσεις της, ενώ πιθανολογείται η εξάπλωσή της νοτιότερα έως την Όθρυς (Μουντράκης, 2010).

Παλαιογεωγραφικά η μολασσική λεκάνη κατά το Ολιγόκαινο - Κατώτερο Μειόκαινο λειτούργησε ως οπισθοτάφρος πίσω από το τότε νησιωτικό τόξο, το οποίο περιλάμβανε την Πίνδο, την ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας και το κάλυμμα των οφιολίθων της Βόρειας Πίνδου, ενώ κατά την ίδια περίοδο λειτουργούσε δυτικότερα η τάφρος με απόθεση φλύσχη στο γεωλογικό χώρο της Ιόνιας ζώνης και της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης (Σχήματα 2.1 και 2.2), (Παπανικολάου και συν, 1988). Η Μεσοελληνική αύλακα δεν αποτελεί μια ενιαία λεκάνη ιζηματογένεσης με συνεχή πλήρωση, αλλά συνιστά ένα παλαιογεωγραφικό χώρο μέσα στον οποίο διαμορφώθηκαν κατά τη διάρκεια της εξέλιξής του πολλές επιμέρους και σχετικά περιορισμένης χρονικής διάρκειας λεκάνες ιζηματογένεσης (Παπανικολάου και συν, 1977).



Σχήμα 2.1 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Μεσοελληνικής Αύλακας και των γειτονικών της περιοχών (η περιοχή μελέτης σημειώνεται με κίτρινο πλαίσιο) με ταξινόμηση σύμφωνα με την παλαιογεωδυναμική τους θέση στα πλαίσια του εξελισσόμενου ορογενετικά τόξου των Ελληνίδων. 1. Ενιαίος φλύσξης Γαβρόβου – Ιονίου 2. Ανθρακικοί σχηματισμοί Ιονίου 3. Ανθρακικοί σχηματισμοί Γαβρόβου 4. Σχηματισμοί Πίνδου 5. Ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας 6. Οφιόλιθοι Β. Πίνδου, Οφιόλιθοι Όθρυς 7. Σχηματισμός Κρανιάς 8. Σχηματισμός Επταχωρίου 9. Σχηματισμός Πενταλόφου 10. Σχηματισμός Τσοτυλίου 11. Σχηματισμός Όντρια 12. Οφιόλιθοι Βούρινου 13. Κρυσταλλικό υπόβαθρο Πελαγονικής s.l. 14. Πλειο-τεταρτογενές 15. Οριζόντια στρώματα 16. Κλίση στρωμάτων ως 15° 17. Κλίση στρωμάτων μεγαλύτερη από 15° 18. Ανάστροφα στρώματα 19. Εφιππεύσεις 20. Επωθήσεις (τροποποιημένο από Παπανικολάου και συν., 1988)

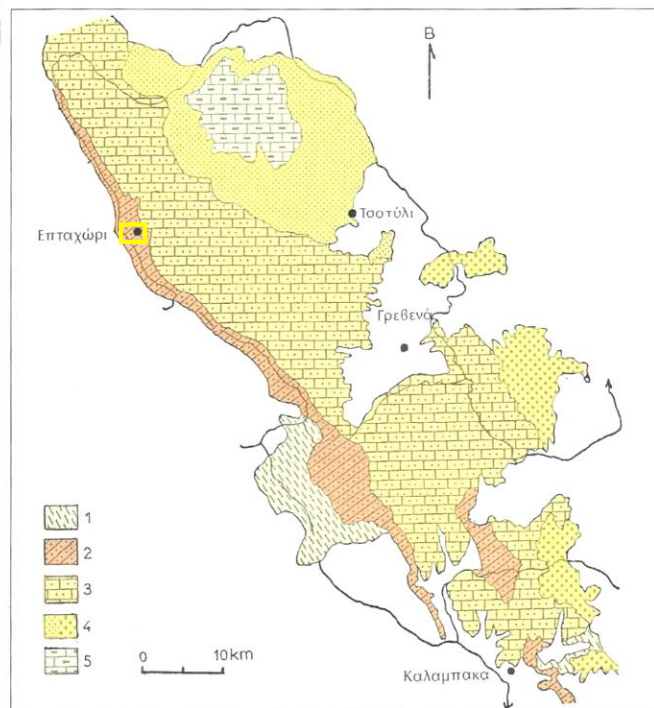


Σχήμα 2.2 Πέντε εγκάρσιες τομές (όπως σημειώνονται οι θέσεις τους στο Σχήμα 2.1) κατά μήκος της Μεσοελληνικής Αύλακας, της οροσειράς της Πίνδου και της περιοχής μελέτης (κίτρινα βέλη) που δείχνουν τη συνολική δομή και τη γενικευμένη σχηματική με βάση την παλαιογεωδυναμική ερμηνεία (τροποποιημένο από Παπανικολάου και συν., 1988)

Η Μεσοελληνική αύλακα συνιστά τμήμα της Υποπελαγονικής ζώνης, όμως εκτείνεται στο γεωλογικό χώρο μεταξύ αυτής και της ζώνης Πίνδου. Το αλπικό υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται κυρίως από μεγάλου πάχους οφιολιθικές μάζες και Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους, πάνω στο οποίο αποτέθηκαν μολασσικά μεταλλικά ιζήματα συνολικού πάχους 5 km με προμήθεια υλικού ιζηματογένεσης από τις αναδυμένες οροσειρές της Πίνδου και της Πελαγονικής (Μουντράκης, 2010). Χαρακτηρίζεται από πολυφασική ιζηματογένεση, η οποία λάμβανε χώρα κοντά στο επίπεδο της θάλασσας με τη δυνατότητα συνεχούς βύθισης της λεκάνης στη θάλασσα και, συνεπώς, εναλλασσόμενα διαστήματα επίκλυσης και απόσυρσης της θάλασσας και απόθεσης θαλάσσιων ιζημάτων. Η διαδικασία αυτή είχε σαν αποτέλεσμα την πλήρωση των επιμέρους λεκανών της αύλακας και τη δημιουργία κλειστών λιμνοθαλασσών ή λεκανών με λιμναίες ή ακόμα και ποταμοχειμάρειες αποθέσεις.

2.1.2 Λιθοστρωματογραφία

Τα μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας διακρίθηκαν σε πέντε (5) σχηματισμούς σύμφωνα με τη λιθοστρωματογραφία τους και τις διαφορετικές φάσεις των ιζημάτων. Οι σχηματισμοί αυτοί, από τους παλαιότερους στους νεότερους είναι οι εξής (Σχήμα 2.3):



Σχήμα 2.3 Χάρτης εξάπλωσης μολασσικών σχηματισμών της Μεσοελληνικής αύλακας και της περιοχής μελέτης (κίτρινο πλαίσιο) 1: Ανώτερο Ηώκαινο (σειρά Κρανιάς), 2: Ολιγόκαινο (σειρά Επταχωρίου), 3: Ακουϊτάνιο (σειρά Πενταλόφου – Μετεώρων), 4: Βουρδιγάλιο (σειρά Τσοτούλιου), 5: Ελθέτιο (σειρά Όντρια) (Μουντράκης, 2010)

- Σειρά Κρανιάς. Πρόκειται για κλαστική ακολουθία η οποία αποτελείται από κροκαλοπαγή και λατυποπαγή θαλάσσια επικλυσιογενή, που επωθήθηκαν στο αλπικό υπόβαθρο, κυρίως στους οφίολιθους της βόρειας Πίνδου και τα οποία συνιστούν τα πρώτα μολασσικά ιζήματα της αύλακας. Οι σχηματισμοί είναι ηλικίας Άνω Ηώκαινου και εμφανίζουν μέσο πάχος 200 m. Η σειρά Κρανιάς παρουσιάζει μικρή εμφάνιση, καθώς δεν εκτείνεται βορειότερα της περιοχής.
- Σειρά Επταχωρίου. Πρόκειται για λιμναία ιζήματα που αποτελούνται από εναλλαγές τεφρών μαργών και χαρακτηριστικών τεφροκύανων ιλυολίθων, μέσα στους οποίους παρεμβάλλονται λεπτοί και παχύτεροι οριζόντες ψαμμιτών. Στη βάση της σειράς παρατηρούνται λεπτές ενστρώσεις κροκαλοπαγούς βάσεως. Οι σχηματισμοί είναι ηλικίας Ολιγόκαινου και εμφανίζουν μέσο πάχος 600 m. Η σειρά ονομάστηκε από το ομώνυμο χωριό του Επταχωρίου και αποτελεί την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας.
- Σειρά Πενταλόφου – Μετεώρων. Πρόκειται θαλάσσια ιζήματα με επίδραση ποταμοχειμάριας δράσης που αποτελούνται από συμπαγή στρώματα κροκαλοπαγών με εναλλαγές ψαμμιτών. Διακρίνεται μία κατώτερη σειρά πολύμικτων κροκαλοπαγών με διασταυρούμενη στρώση που χαρακτηρίζουν την περιοχή των Μετεώρων και μια ανώτερη σειρά κροκαλοπαγών με ενστρώσεις ψαμμιτών και ιλυολίθων. Οι σχηματισμοί είναι ηλικίας Ανώτερου

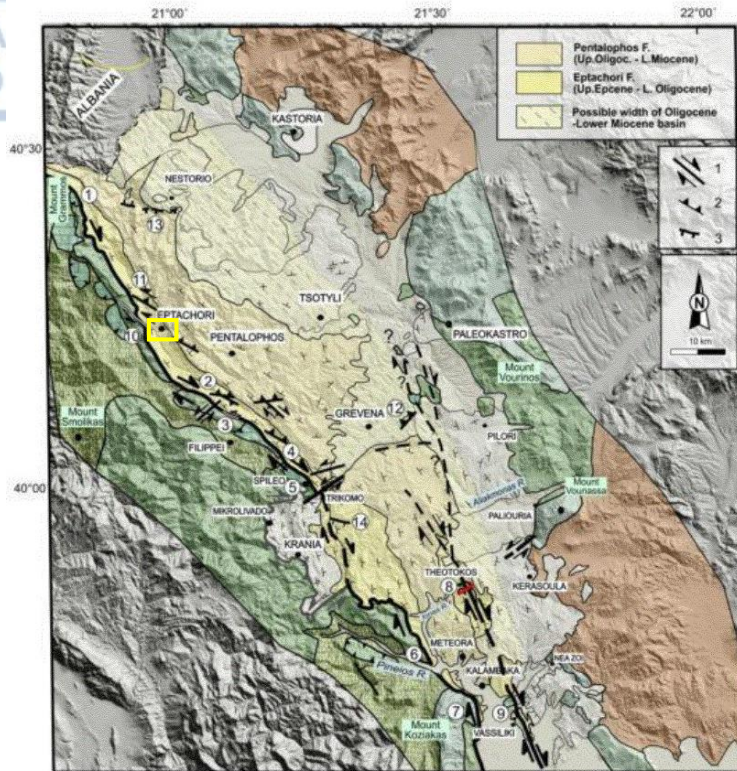
Ολιγόκαινου – Κάτω Μειόκαινου (Ακουιτάνιου) και εμφανίζουν μέσο πάχος 3000 m.

- Σειρά Τσοτυλίου. Πρόκειται για ιζήματα λιμναίας και χερσαίας φάσης που αποτελούνται κυρίως από μάργες με τοπικές και πυκνές εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων, καθώς και λιγνιτικών στρωμάτων. Τοπικά παρατηρούνται εμφανίσεις χαλαρών κροκαλοπαγών με παρουσία ογκόλιθων από τους παραπάνω σχηματισμούς. Οι σχηματισμοί είναι ηλικίας Άνω Ακουιτάνιου – Βουρδιγαλίου και εμφανίζουν μέσο πάχος 600 m.
- Σειρά Όντρια. Πρόκειται για θαλάσσια και λιμναία ιζήματα και συνιστούν μια σειρά η οποία αποτελείται, από πάνω προς τα κάτω, από μάργες και ψαμμιτομαργαϊκούς ασβεστόλιθους με ενστρώσεις λιγνιτικών στρωμάτων, ασβεστόλιθους και ψαμμίτες. Οι σχηματισμοί είναι ηλικίας Κάτω Μειόκαινου (Βουρδιγαλίου) – Άνω Μειόκαινου.

2.1.3 Τεκτονική

Στον ευρύτερο χώρο της Μεσοελληνικής αύλακας εντοπίζονται αρκετές ρηξιγενείς ζώνες οι οποίες διαμόρφωσαν τοπικά τις κοίτες των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, με σημαντικότερη τη ζώνη Πραμόριτσα, η οποία παρουσιάζει διεύθυνση A – Δ και έχει διαμορφώσει την κοίτη του ομώνυμου ποταμού (Λέκκας Ε. , και συν., 1999). Τα ρήγματα της ζώνης αυτής εμφανίζονται με διεύθυνση περίπου A – Δ, παρουσιάζουν αριστερόστροφη κίνηση και εντοπίζονται τοπικά στα κροκαλοπαγή της σειράς Πενταλόφου – Μετεώρων. Σημαντικές ρηξιγενείς ζώνες και ρήγματα εντοπίζονται στην περιοχή με διεύθυνση BA – NΔ, όπου παρουσιάζουν επίσης αριστερόστροφη κίνηση. Τα ρήγματα αυτά διαμόρφωσαν το ανάγλυφο της περιοχής και εντοπίζονται τοπικά μικρής κλίμακας στους μολασσικούς σχηματισμούς.

Στην περιοχή διακρίνονται δύο κύριες νεοτεκτονικές μακροδομές οι οποίες αφορούν το ρηξιτέμαχος του Τσοτυλίου στα βόρεια και το ρηξιτέμαχος των Γρεβενών στα νότια, τα οποία οριοθετούνται μεταξύ τους από τη ρηξιγενή ζώνη Πραμόριτσα. Πιο αναλυτικά, το ρηξιτέμαχος του Τσοτυλίου οριοθετείται από την κοίτη του ποταμού Αλιάκμονα στα βόρεια και ανατολικά και από τον ποταμό Πραμόριτσα στα νότια και περιλαμβάνει τα μολασσικά ιζήματα της λεκάνης. Οι διευθύνσεις των ρηγμάτων και των ρηξιγενών ζωνών είναι ΒΔ – ΝΑ και ΒΑ – ΝΔ, ακολουθώντας τη διεύθυνση ανάπτυξης των κύριων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής (Σχήμα 2.4). Το ρηξιτέμαχος των Γρεβενών οριοθετείται από τον ποταμό Πραμόριτσα στα βόρεια, από την κοίτη του ποταμού Αλιάκμονα στα ανατολικά και από τον ποταμό Βενέτικο στα δυτικά και νότια και περιλαμβάνει κυρίως το σχηματισμό Πενταλόφου – Μετεώρων. Οι διευθύνσεις των ρηγμάτων είναι κυρίως A – Δ και B – N, ενώ των ρηξιγενών ζωνών είναι ΒΑ – ΝΔ και Α – Δ (Λέκκας Ε. , και συν., 1999).



Σχήμα 2.4 Σχηματισμοί Επταχωρίου και Πενταλόφου, όπου με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η πιθανή ανάπτυξη της λεκάνης και η περιοχή απόθεσης κατά το Ολιγόκαινο – Κατώτερο Μειόκαινο, με κίτρινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης και με έντονη μαύρη γραμμή και βέλη σημειώνονται οι τεκτονικές επαφές και οι σχετικές κινήσεις. 1: Ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, 2: Ανάστροφα ρήγματα/ Επωθήσεις, 3: Κανονικά ρήγματα. Με γκρι χρώμα σημειώνεται ο σχηματισμός Κρανιάς (Βαμβακά, 2009)

2.2 Γεωλογία περιοχής μελέτης

2.2.1 Εισαγωγή

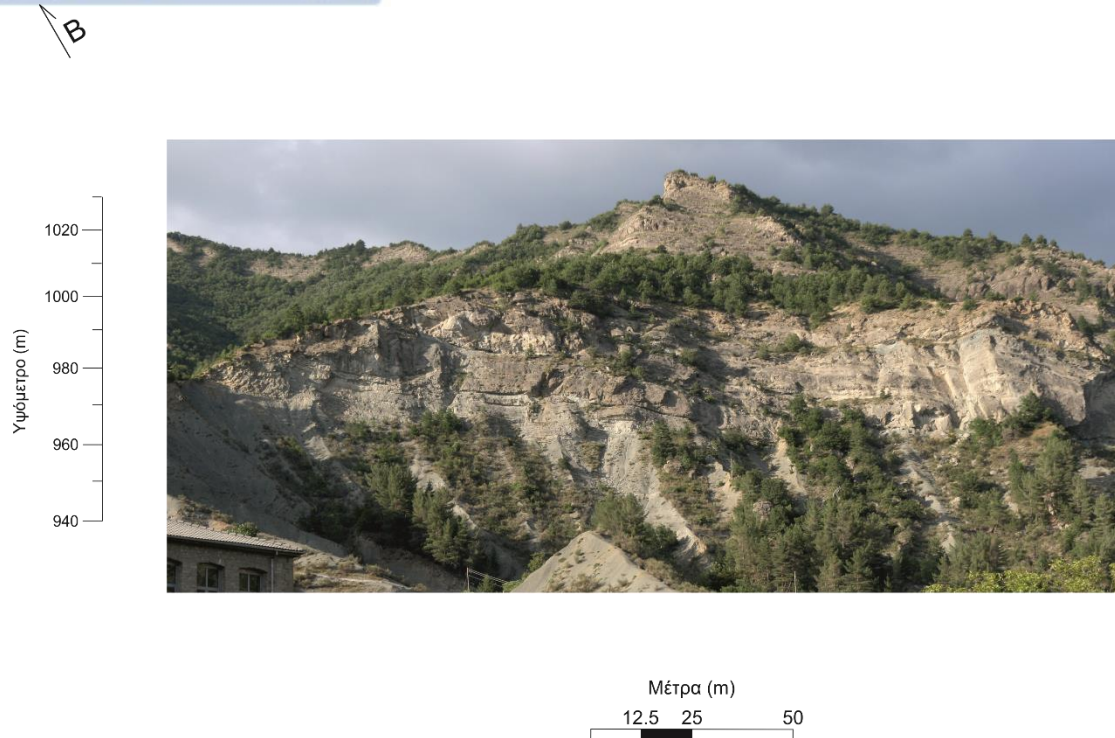
Η περιοχή μελέτης αποτελείται γεωλογικά από τους σχηματισμούς της σειράς Επταχωρίου. Ο λιθότυπος της σειράς Επταχωρίου που επικρατεί στην περιοχή είναι ιλυόλιθοι με ενστρώσεις ψαμμιτών πάχους μερικών εκατοστών έως και 6 – 8 m. Οι σχηματισμοί διακρίνονται από τεμαχώδη δομή και χαρακτηρίζονται από στρωσιγένεια και παρουσία συστημάτων διακλάσεων. Η επιφάνεια της στρώσης παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή, καθώς συνιστά την εμμένουσα ασυνέχεια όλων των σχηματισμών.

2.2.2 Στρωματογραφία

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από σχετικά απλή στρωματογραφική ακολουθία, όπου οι ιλυόλιθοι καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα του εξεταζόμενου πρσανούς και εκτείνονται σε υψόμετρο έως περίπου 990 m από την επιφάνεια της θάλασσας



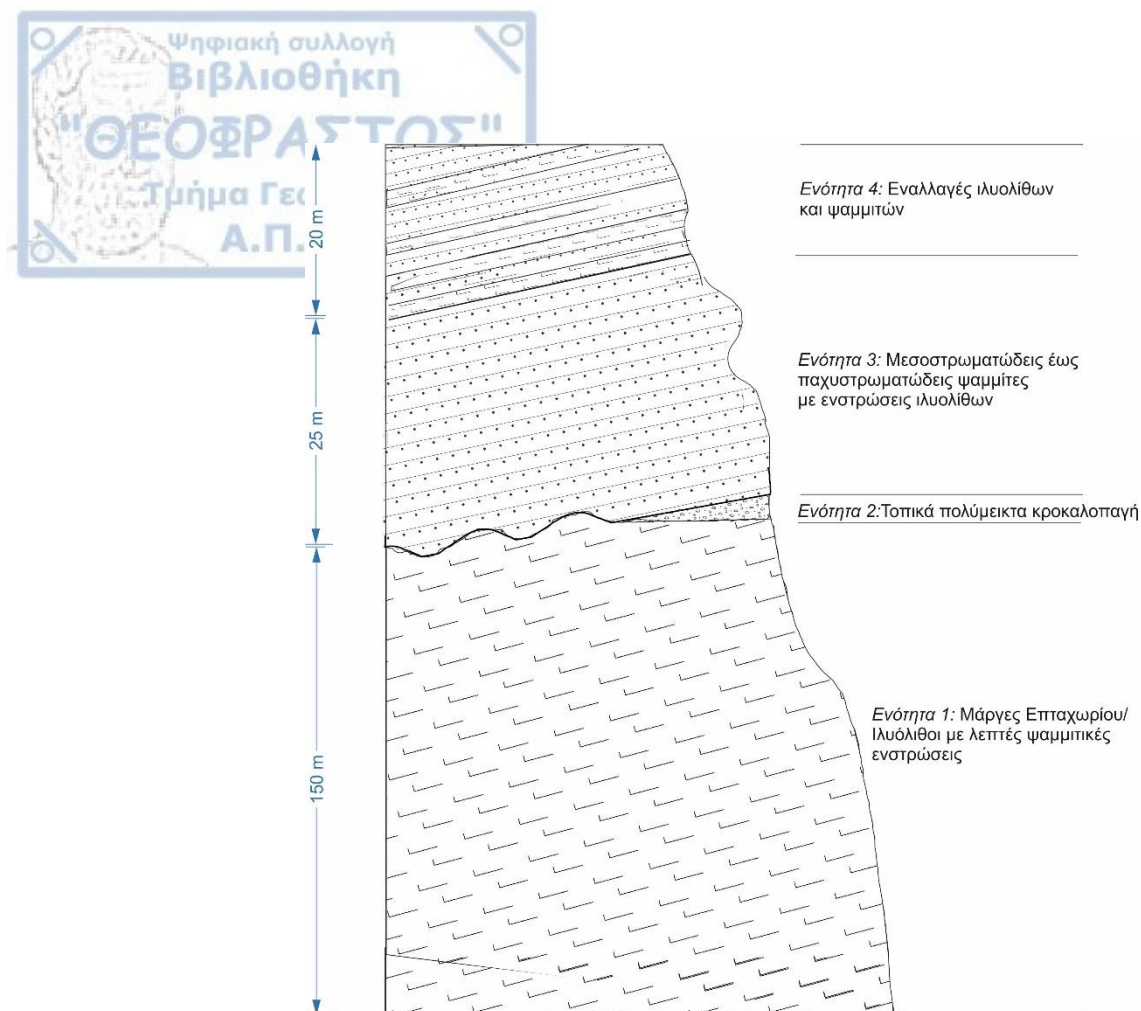
(Google Earth) και οι υπερκείμενοι ψαμμιτικοί ορίζοντες με ενστρώσεις ιλυολίθων εκτείνονται αντίστοιχα έως 1030 m (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Γενική όψη του πρανούς προς ΝΔ μέσα από τον οικισμό με κατακόρυφη κλίμακα ύψους για τη διαστασιολόγηση του πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 18/07/2018)

Σύμφωνα με τις γεωλογικές παρατηρήσεις και την αναγνώριση των σχηματισμών στο πεδίο, τα ιζήματα της περιοχής ακολουθούν την παρακάτω στρωματογραφία, από τους κατώτερους προς τους ανώτερους ορίζοντες, όπως παρουσιάζεται και στη στρωματογραφική στήλη (Σχήμα 2.6):

- Μάργες Επταχωρίου/ Ιλυόλιθοι με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις
- Τοπικά πολύμεικτα κροκαλοπαγή
- Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων
- Εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών



Σχήμα 2.6 Απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη των σχηματισμών στην περιοχή μελέτης από τους ανώτερους προς τους κατώτερους με τα αντίστοιχα πάχη τους.

Στο ακόλουθο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η αποτύπωση της παραπάνω στρωματογραφικής ακολουθίας στο πεδίο, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά κάθε σχηματισμού.



Σχήμα 2.7 Όψη του πρανούς προς ΔΝΔ, όπου διακρίνεται η στρωματογραφική ακολουθία των σχηματισμών της περιοχής. Λήψη επί της Εθνικής Οδού ΕΟ Κοζάνης Ιωαννίνων, ανάντη του Επταχωρίου (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 12/07/2018)

2.2.2.1 Μάργες Επταχωρίου/ Ιλυόλιθοι με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις

Πρόκειται ιλυομιγείς μάργες ηλικίας Σταμπίου, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως μαλακοί ιλυόλιθοι – μαργαϊκοί ιλυόλιθοι με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις πάχους μερικών εκατοστών έως και 2 μέτρων. Οι μάργες Επταχωρίου (γνωστές ως «κάτσακας», ονομασία που αποδόθηκε από τους ντόπιους) αποτελούν χαρακτηριστικό σχηματισμό και βάση της ομώνυμης ενότητας και διακρίνονται από το τεφροκύανο χρώμα τους (Σχήμα 2.8). Οι ιλυόλιθοι καταλαμβάνουν τη βάση του πρανού με μέσο πάχος 150 m δημιουργώντας χαρακτηριστικές εικόνες σε όλη την έκταση της περιοχής ανάντη του οικισμού, λόγω της επιφανειακής απορροής των υδάτων. Χαρακτηρίζονται έντονα από το φαινόμενο της σχάσης, καθώς εμφανίζονται ψαθυροί και κερματισμένοι σε μικρά τεμάχια, της τάξης των 2 – 10 εκατοστών, κυρίως στον πόδα του πρανού.



Σχήμα 2.8 Μάργες Επταχωρίου με το χαρακτηριστικό τεφροκύανό τους χρώμα στη βάση του πρανού με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις, όπου στα ανώτερα τμήματα διακρίνονται ψαμμιτικοί πάγκοι με αυξανόμενο πάχος. Διακρίνεται η αποσάθρωση των ιλυολίθων (σχάση) και οι χαρακτηριστικές δομές λόγω επιφανειακής απορροής υδάτων (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 09/07/2018)

2.2.2.2 Τοπικά πολύμεικτα κροκαλοπαγή

Παρατηρείται η ανάπτυξη τοπικών κροκαλοπαγών στο ανατολικό τμήμα του πρανού σε μέσο υψόμετρο 980 m, τα οποία υπέρκεινται των ιλυολίθων και σταδιακά

μεταβαίνουν στους υπερκείμενους ψαμμιτικούς ορίζοντες. Επιπλέον, εμφανίζονται σειρές κροκαλοπαγών στη βάση του πρανού, υποδηλώνοντας την επίκλυση των μολασσικών ιζημάτων στο αλπικό και στο οφιολιθικό υπόβαθρο. Τα κροκαλοπαγή εμφανίζονται καλά συγκολλημένα και αποτελούνται κυρίως από οφιολιθικά σώματα καθώς και από ανθρακικά ιζήματα του αλπικού υποβάθρου (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 Πολύμεικτα κροκαλοπαγή καλά συγκολλημένα. Λήψη πεσμένου τεμάχους παλαιάς κατολίσθησης από αγροτικό δρόμο ανατολικά του πρανού (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 18/07/2018)

2.2.2.3 Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων

Στα μέσα του πρανού και σε μέσο υψόμετρο 995 m εμφανίζονται ψαμμιτικές αποθέσεις πάχους 4 – 8 m με τοπικούς λεπτούς ιλυολιθικούς ορίζοντες πάχους μερικών cm (Σχήμα 2.10). Οι ψαμμίτες είναι ηλικίας Ανώτερου Σταμπίου (Κατώτερου Ολιγόκαινου) και χαρακτηρίζονται από τη βιβλιογραφία ως ψαμμιτικές μάργες και ψηφιοπαγείς ασβεστόλιθοι Ταλιάρου. Παρουσιάζουν διακριτή στρώση η οποία ακολουθεί τη στρώση των σχηματισμών της περιοχής. Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από ψαμμιτικούς πάγκους με μέσο πάχος 30 m, οι οποίοι παρουσιάζουν διακυμάνσεις κατά μήκος του πρανού. Συγκεκριμένα, στο δυτικό τμήμα του πρανού οι ψαμμιτικοί πάγκοι εμφανίζονται μεσοστρωματώδεις στην επαφή τους με τους υποκείμενους ιλυολίθους και μεταβαίνουν σε παχυστρωματώδεις συμπαγείς πάγκους με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων με συνολικό πάχος περίπου 25 m. Στο κεντρικό τμήμα του πρανού εμφανίζονται συμπαγείς ψαμμίτες με αραιότερες ιλυολιθικές ενστρώσεις με μέσο πάχος 20 m, οι οποίοι παρουσιάζουν κυματοειδή

μορφή στην επαφή τους με τους ιλυόλιθους, υποδηλώνοντας διαφορετική φάση ιζηματογένεσης της Μεσοελληνικής αύλακας. Στο ανατολικό τμήμα εμφανίζονται παχυστρωματώδεις συμπαγείς ψαμμίτες πάχους περίπου 15 m οι οποίοι υπέρκεινται τοπικών κροκαλοπαγών. Ο σχηματισμός αυτός εμφανίζει φαινόμενα διάβρωσης

2.2.2.4 Εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών

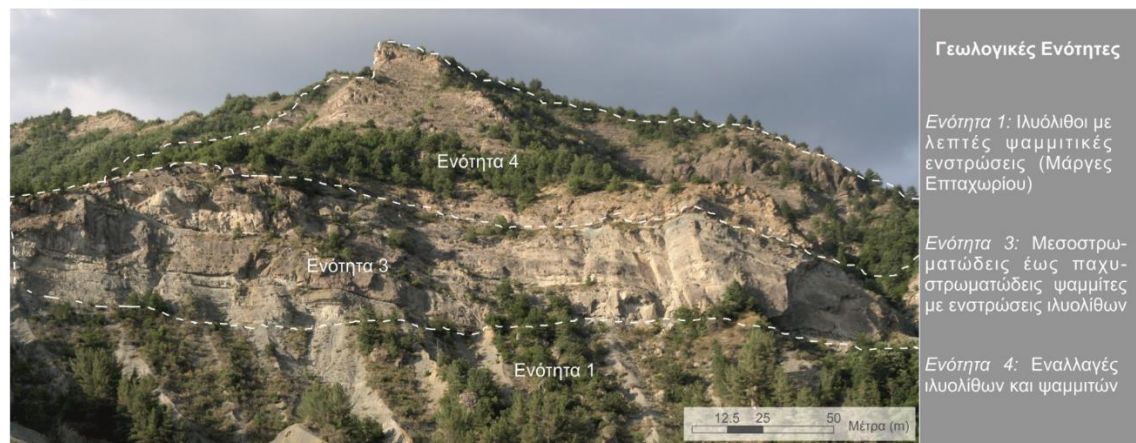
Πρόκειται για συνεχείς εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών με στρώματα πάχους 1 – 5 m σε περίπου ίσες αναλογίες και συνολικό πάχος περίπου 20 m. Ο σχηματισμός αυτός καταλαμβάνει το ανώτερο τμήμα του πρανούς, εμφανίζει έντονα φαινόμενα αποσάθρωσης και χαρακτηρίζεται από παρουσία βλάστησης (Σχήμα 2.11).

2.2.3 Τεκτονική

Τα μολασσικά ιζήματα χαρακτηρίζονται ως μεταλικά ιζήματα τα οποία αποτέθηκαν με το τέλος της ορογενετικής διαδικασίας. Χαρακτηρίζονται από απουσία ισχυρών τεκτονικών δράσεων και δομών, καθώς και από ανεπτυγμένα συστήματα διακλάσεων. Οι σχηματισμοί της Μεσοελληνικής αύλακας έχουν υποστεί τοπικά τεκτονικά επεισόδια τα οποία εκδηλώνονται με μικρά κρασπεδικά ρήγματα στα όρια της λεκάνης με επιφανειακές εμφανίσεις. Συγκεκριμένα, στην ευρύτερη περιοχή σύμφωνα με τη συλλογή αεροφωτογραφιών, εντοπίζονται ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ – ΝΔ και παράταξης $30^{\circ} - 40^{\circ}$ (Χρηστάρας και συν., 1997).

Οι σχηματισμοί της περιοχής εμφανίζονται στρωματώδεις έως τοπικά τεμαχώδεις και χαρακτηρίζονται από την παρουσία συστημάτων διακλάσεων. Η επιφάνεια της στρώσης αποτελεί την κύρια επιφάνεια ασυνέχειας των σχηματισμών και την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχώμαζας και χαρακτηρίζεται από την απουσία συνέχειας με το βάθος, καθώς εντοπίζεται επιφανειακά με μικρή συνέχεια σε βάθος. Τα στρώματα παρουσιάζουν κλίση αντίρροπη με την κλίση του πρανούς, καθώς βυθίζονται ΒΑ

Επιπλέον, κατά μήκος του εξεταζόμενου πρανούς εντοπίζονται παρακατακόρυφες ασυνέχειες διεύθυνσης ΒΒΑ – ΝΝΔ, καθώς και τοπικές ρωγματώσεις διεύθυνσης Β – Ν έως ΒΑ – ΝΔ, κυρίως εντός των ψαμμιτικών οριζόντων. Οι διακλάσεις αυτές πιθανώς συνδέονται με το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής, καθώς οι διευθύνσεις του ταυτίζονται με τις κύριες τεκτονικές γραμμές της ευρύτερης περιοχής, όπως αναφέρθηκαν στο παραπάνω Κεφάλαιο 2.2.3.



Σχήμα 2.10 Όψη του πρανούς προς ΝΔ όπου διακρίνονται οι γεωλογικές ενότητες της περιοχής και η διακύμανση του πάχους των ψαμμιτών κατά μήκος του πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 12/07/2018)



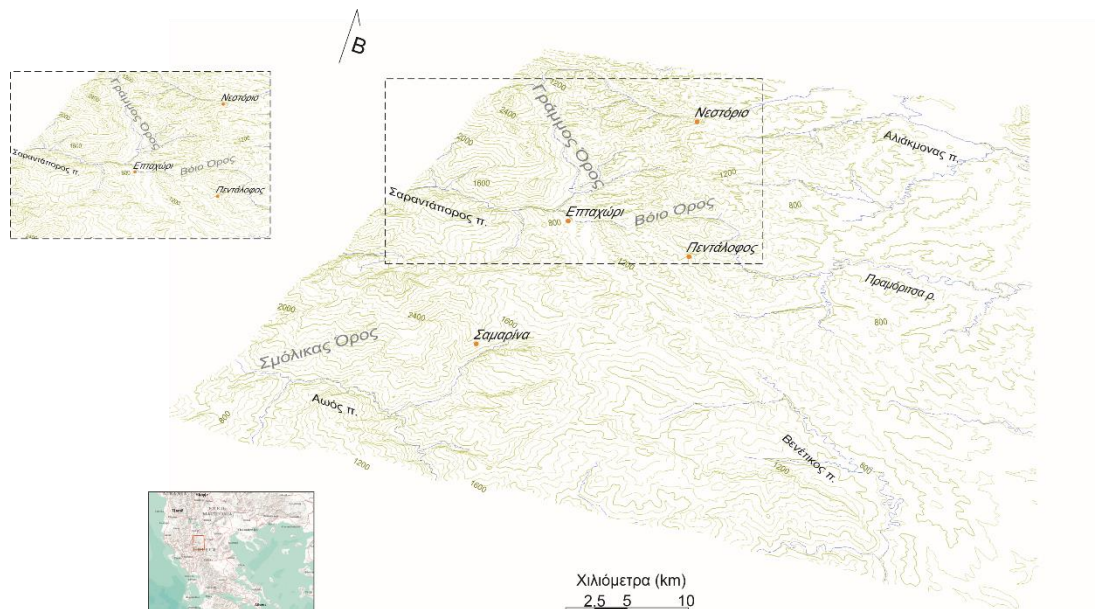
Σχήμα 2.11 Όψη του πρανούς προς ΑΒΑ όπου διακρίνονται οι γεωλογικές ενότητες της περιοχής και η στρώση των ιλυολιθικών και ψαμμιτικών οριζόντων (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 12/07/2018)

2.3 Υδρογεωλογικές συνθήκες

2.3.1 Γενικά

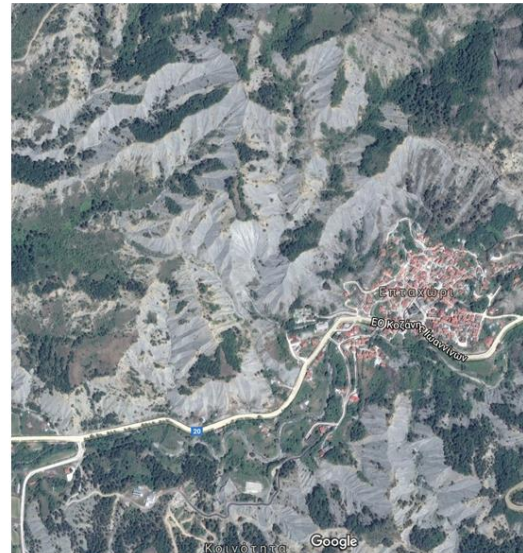
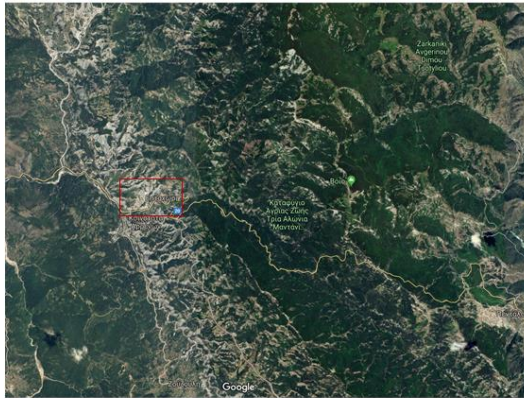
Οι υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής εξαρτώνται από τη γεωλογική δομή και την τεκτονική της. Πιο αναλυτικά, εξαρτώνται άμεσα από τη λιθολογία των σχηματισμών της περιοχής, την κοκκομετρία τους, το βαθμό διαγένεσής τους, το πορώδες τους αλλά και από τις υδραυλικές τους παραμέτρους. Ο προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων των μολασσικών σχηματισμών δεν ήταν δυνατός λόγω έλλειψης υδρογεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή.

Οι σχηματισμοί που συνιστούν την περιοχή μελέτης και γενικότερα, τη Μεσοελληνική αύλακα χαρακτηρίζονται χαμηλής έως πολύ χαμηλής υδροπερατότητας σχηματισμοί. Συνεπώς, στην περιοχή αναμένεται περιορισμένη υδροφορία μέσα στους μολασσικούς σχηματισμούς λόγω του χαμηλού πρωτογενούς τους πορώδους. Η ανάπτυξη μικρής δυναμικότητας υδροφορίας, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, επιβεβαιώνεται από την παρουσία πηγών, οι οποίες εντοπίζονται στην επαφή των ψαμμιτών με τους ιλυόλιθους και χαρακτηρίζονται ως πηγές υπερχείλισης. Επιπλέον, στην περιοχή εντοπίζεται ανεπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο, όπου ο κύριος ποταμός που διαρρέει τον οικισμό του Επταχωρίου είναι ο Σαραντάπορος ποταμός (Σχήμα 2.12). Η παρουσία πυκνού υδρογραφικού δικτύου υποδηλώνει την απουσία υπόγειας υδροφορίας στην ευρύτερη περιοχή, καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων λόγω της πολύ χαμηλής περατότητας των σχηματισμών.



Σχήμα 2.12 Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Επταχωρίου, όπου διακρίνονται οι ορεινοί όγκοι που οριοθετούν την περιοχή μελέτης και το υδρογραφικό δίκτυο με τους κύριους ποταμούς.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της περιοχής αποτελεί η εκτεταμένη αποψίλωση των πρανών, κυρίως κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Σαραντάπορου (Σχήμα 2.13), η οποία οφείλεται σε εκτεταμένη υλοτόμηση. Η εκτεταμένη αποψίλωση οδηγεί στην αποκάλυψη των κατώτερων στρωμάτων των ιλυολίθων, οι οποίοι παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα διάβρωσης δημιουργώντας χαρακτηριστικές δομές (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.13 Χαρακτηριστικές εικόνες εκτεταμένης αποψίλωσης της ευρύτερης περιοχής κατά μήκος της ζώνης Πίνδου και της κοίτης του Σαραντάπορου ποταμού (αριστερή εικόνα) και αποκάλυψης των μαργών Επταχωρίου με χαρακτηριστικές δομές (δεξιά εικόνα) (Google Earth)



Σχήμα 2.14 Χαρακτηριστικές δομές μαργών Επταχωρίου λόγω αποσάθρωσης. Λήψη επί της Εθνικής Οδού ΕΟ Κοζάνης Ιωαννίνων, εντός του Επταχωρίου (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 09/07/2018)

2.3.2 Κλιματικά στοιχεία περιοχής

Για τον προσδιορισμό του όγκου βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης συγκεντρώθηκαν κλιματικά δεδομένα από τους κοντινότερους σταθμούς βροχόπτωσης της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) στην περιοχή μελέτης. Στην περιοχή του Επταχωρίου βρίσκεται εγκατεστημένος βροχομετρικός σταθμός της Δ.Ε.Η. σε υψόμετρο 980 m, του οποίου η λειτουργία έχει ανασταλεί περίπου από το έτος 1998. Λόγω έλλειψης δεδομένων βροχόπτωσης από το σταθμό αυτό, αντλήθηκαν δεδομένα για την περιοχή του Επταχωρίου από παλαιότερη μελέτη που εκπονήθηκε στην περιοχή από τους Χρηστάρας και συν., 1997, όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω στοιχεία πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του όγκου βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης, καθώς ο προσδιορισμός του κρίνεται αναγκαίος εφόσον αποτελεί τον κύριο παράγοντα αστάθειας του εξεταζόμενου φαινομένου.

Τα κλιματικά στοιχεία της περιοχής μελέτης που συλλέχθηκαν αφορούν το μηνιαίο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μετρημένων σε χιλιοστά βροχής (mm) του βροχομετρικού σταθμού Επταχωρίου της Δ.Ε.Η. για τα υδρολογικά έτη 1984 – 1985 έως 1991 – 1992 και των μετεωρολογικών σταθμών της Ε.Μ.Υ. Καστοριάς (κωδικός σταθμού WMO:16614, υψόμετρο σταθμού: 657 m «Καστοριά») και Κόνιτσας (κωδικός σταθμού WMO:16628, υψόμετρο σταθμού: 465 m «Κόνιτσα») για τα υδρολογικά έτη 2013 – 2014 έως 2016 – 2017.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή του Επταχωρίου για το διάστημα 1984 – 1985 έως 1991 – 1992 υπολογίστηκε σε 850.0 mm παρουσιάζοντας ελάχιστη τιμή 645.0 mm κατά το υδρολογικό έτος 1984 – 1985 και μέγιστη 1140.0 mm κατά το υδρολογικό έτος 1990 – 1991. Στην περιοχή της Καστοριάς για το διάστημα 2013 – 2014 έως 2016 – 2017 η μέση βροχόπτωση υπολογίστηκε 694.3 mm ελάχιστη τιμή 446.8 mm κατά το υδρολογικό έτος 2016 – 2017 και μέγιστη 823.0 mm κατά το υδρολογικό έτος 2014 – 2015, ενώ Στην περιοχή της Κόνιτσας για το ίδιο διάστημα η μέση βροχόπτωση υπολογίστηκε 601.1 mm ελάχιστη τιμή 268.3 mm επίσης κατά το υδρολογικό έτος 2016 – 2017 και μέγιστη 761.0 mm κατά το υδρολογικό έτος 2014 – 2015 επίσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία παρατηρείται μείωση του ύψους βροχόπτωσης με τη μείωση του υψομέτρου, όπως είναι λογικό. Συνεπώς, στην περιοχή του Επταχωρίου αναμένονται μεγάλα ύψη βροχόπτωσης, ανάλογα με αυτά των παραπάνω εξεταζόμενων υδρολογικών ετών, ικανά να προκαλέσουν ενεργοποίηση των βραχοκαταπτώσεων σύμφωνα με το μηχανισμό αστοχίας, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

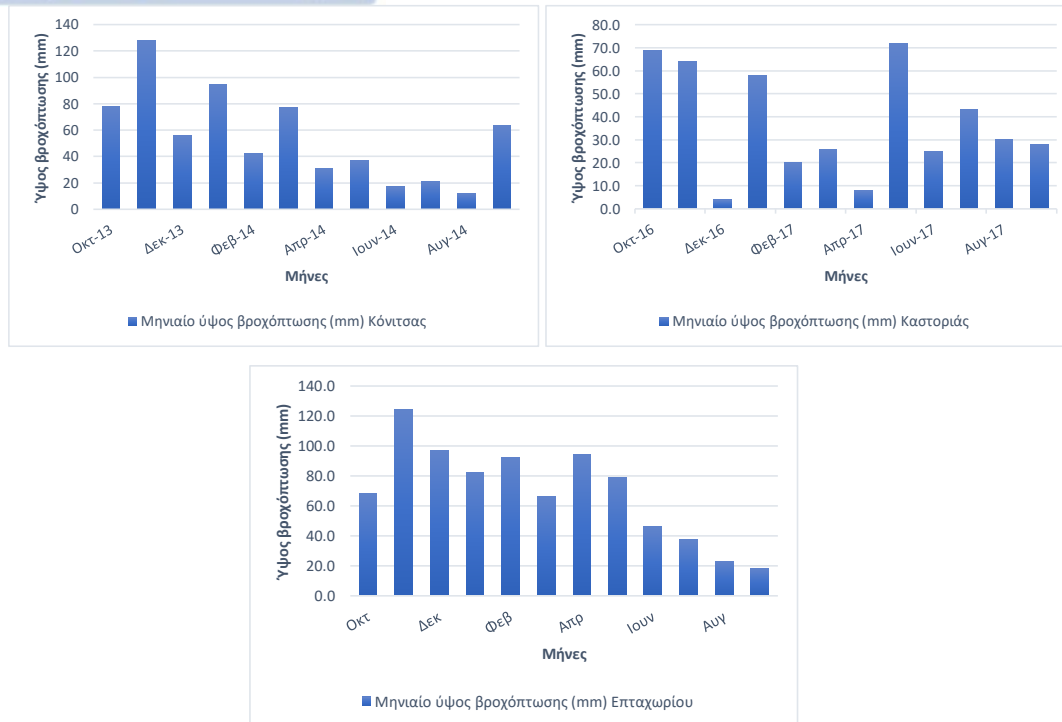
Στο παρακάτω Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η ετήσια κατανομή της βροχόπτωσης στην περιοχή του Επταχωρίου για τα υδρολογικά έτη 1984 – 1985 έως 1991 – 1992 και στην Καστοριά και στην Κόνιτσα για τα υδρολογικά έτη 2013 – 2014 έως 2016 – 2017.



Σχήμα 2.15 Ετήσια κατανομή βροχόπτωσης στην περιοχή Καστοριάς και Κόνιτσας για τα υδρολογικά έτη 2013 – 2014 έως 2016 – 2017 και στην περιοχή του Eπταχωρίου για τα υδρολογικά έτη 1984 – 1985 έως 1991 – 1992

Στο ακόλουθο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η ενδοετήσια κατανομή του ύψους βροχόπτωσης διαφορετικό υδρολογικό έτος σε κάθε σταθμό για την εκτίμηση της κατανομής της βροχόπτωσης. Παρατηρείται ότι ο κύριος όγκος κατακρημνισμάτων αντιστοιχεί στην υγρή περίοδο και εντοπίζεται κατά τους μήνες Νοέμβριο έως Ιανουάριο κάθε υδρολογικού έτους. Ακολουθεί αισθητή μείωση του ύψους βροχόπτωσης κατά την ξηρή περίοδο, από τον Απρίλιο έως τον Αύγουστο κάθε έτους, με εξαίρεση τις υψηλές τιμές που εντοπίστηκαν στην περιοχή της Καστοριάς κατά τους θερινούς μήνες του έτους 2016 – 2017. Στην περιοχή του Eπταχωρίου ακολουθεί η αντίστοιχη κατανομή του ύψους βροχόπτωσης, εμφανίζοντας μεγάλα ύψη βροχόπτωσης με μέση τιμή 68.8 mm καθ' όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους και μείωσής τους μόνο κατά τους θερινούς μήνες. Το μέγιστο

ύψος βροχόπτωσης εντοπίζεται το μήνα Νοέμβριο και αντιστοιχεί σε 123.9 mm, ενώ το ελάχιστο ύψος βροχόπτωσης αντιστοιχεί σε 18.3 mm κατά το μήνα Σεπτέμβριο.



Σχήμα 2.16 Μέσες μηνιαίες τιμές ύψους βροχόπτωσης (mm) για διαφορετικά υδρολογικά έτη των σταθμών Καστοριάς, Κόνιτσας και Επταχωρίου

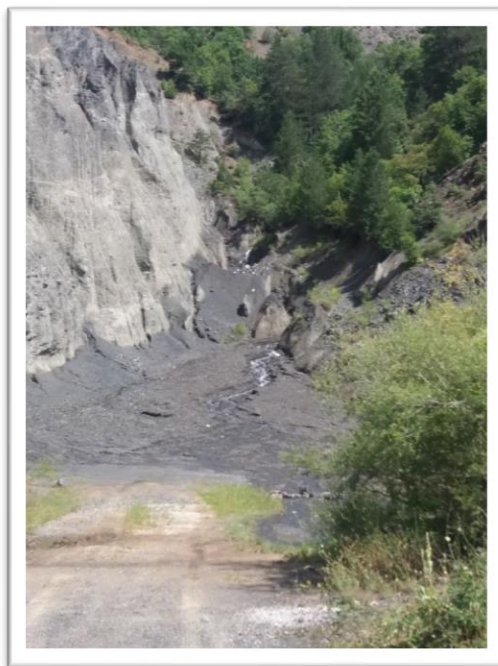
2.3.3 Υδρολιθολογικά στοιχεία σχηματισμών

Οι σχηματισμοί της περιοχής μελέτης διακρίνονται υδρολιθολογικά σε δύο ομάδες, όπως παρουσιάζεται στον ακόλουθο υδρογεωλογικό χάρτη της ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 2.18). Στην πρώτη ομάδα περιλαμβάνονται οι στεγανοί σχηματισμοί και αποτελούνται από τους ιλυόλιθους, οι οποίοι παρουσιάζουν πολύ χαμηλή υδροπερατότητα και πρακτικά αδιαπέρατη υδρογεωλογική συμπεριφορά. Χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλό πρωτογενές πορώδες και κλειστές επιφάνειες ασυνεχειών, χωρίς να εμφανίζουν εμμόνη με το βάθος και συνιστούν το στεγανό υπόβαθρο των μολασσικών σχηματισμών.

Στη δεύτερη ομάδα περιλαμβάνονται οι ημιπερατοί σχηματισμοί και αποτελούνται από τους υπερκείμενους ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή, σχηματισμοί οι οποίοι παρουσιάζουν γενικά χαμηλή υδροπερατότητα, όμως σαφώς υψηλότερη σε σύγκριση με των ιλυολίθων. Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη δευτερογενούς πορώδους, λόγω της παρουσίας ασυνεχειών με ανοιχτές επιφάνειες και των ρηγμάτων της περιοχής και επιτρέπουν την ανάπτυξη ενός υδροφορέα μικρής δυναμικότητας, ο οποίος πιθανώς χαρακτηρίζεται υπό πίεση, καθώς αναπτύσσεται ανάμεσα στις ενστρώσεις αδιαπέρατων και ημιπερατών στρωμάτων των μολασσικών ιζημάτων. Η σειρά των κροκαλοπαγών εμφανίζει επίσης

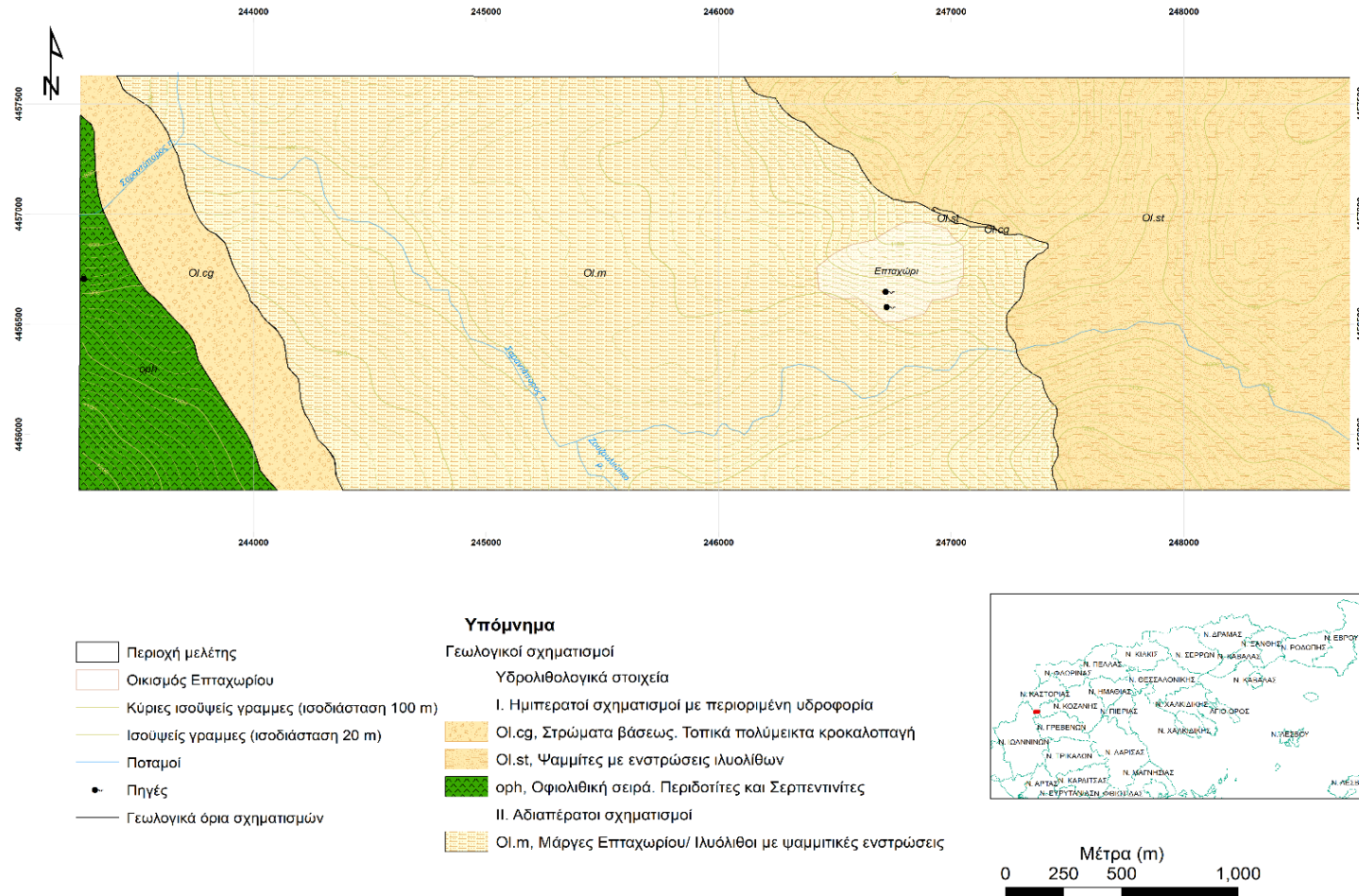
μικρής δυναμικότητας υδροφορία, η οποία δυνητικά οφείλεται στη σύσταση του σχηματισμού και του συγκολλητικού υλικού, καθώς αποτελείται από ασβεστοτικό υλικό που προέρχεται από τον υπερκείμενο σχηματισμό των ψηφитоπαγών ασβεστολίθων Ταλιάρου αλλά και από τους ανθρακικούς σχηματισμούς του αλπικού υπόβαθρου.

Συνεπώς, στην περιοχή μελέτης αναπτύσσεται υδροφορία μέσα στους ψαμμιτικούς ορίζοντες και στα κροκαλοπαγή, ο οποίος τροφοδοτείται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα μέσω των διακλάσεων και των ρηγμάτων της περιοχής. Ο υδροφόρος ορίζοντας εκφορτίζεται μέσω αρκετών πηγών που εντοπίστηκαν στην περιοχή και χαρακτηρίζονται ως πηγές υπερχειλίσης, οι οποίες αναπτύσσονται στην επαφή μαργών και ψαμμιτικών οριζόντων. Αρκετές πηγές εντοπίστηκαν κατά μήκος ρεμάτων στην εθνική οδό Κοζάνης – Ιωαννίνων (Σχήμα 2.17) αλλά και εντός του οικισμού του Επταχωρίου εντοπίστηκαν δύο πηγές. Χαρακτηρίζονται από μόνιμη ροή, σύμφωνα με πληροφορίες κατοίκων και παρουσιάζουν διακυμάνσεις στη παροχή τους κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους σύμφωνα με την υγρή και την ξηρή περίοδο.



Σχήμα 2.17 Πηγή υπερχείλισης επί της Εθνικής Οδού ΕΟ Κοζάνης Ιωαννίνων (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 09/07/2018)

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

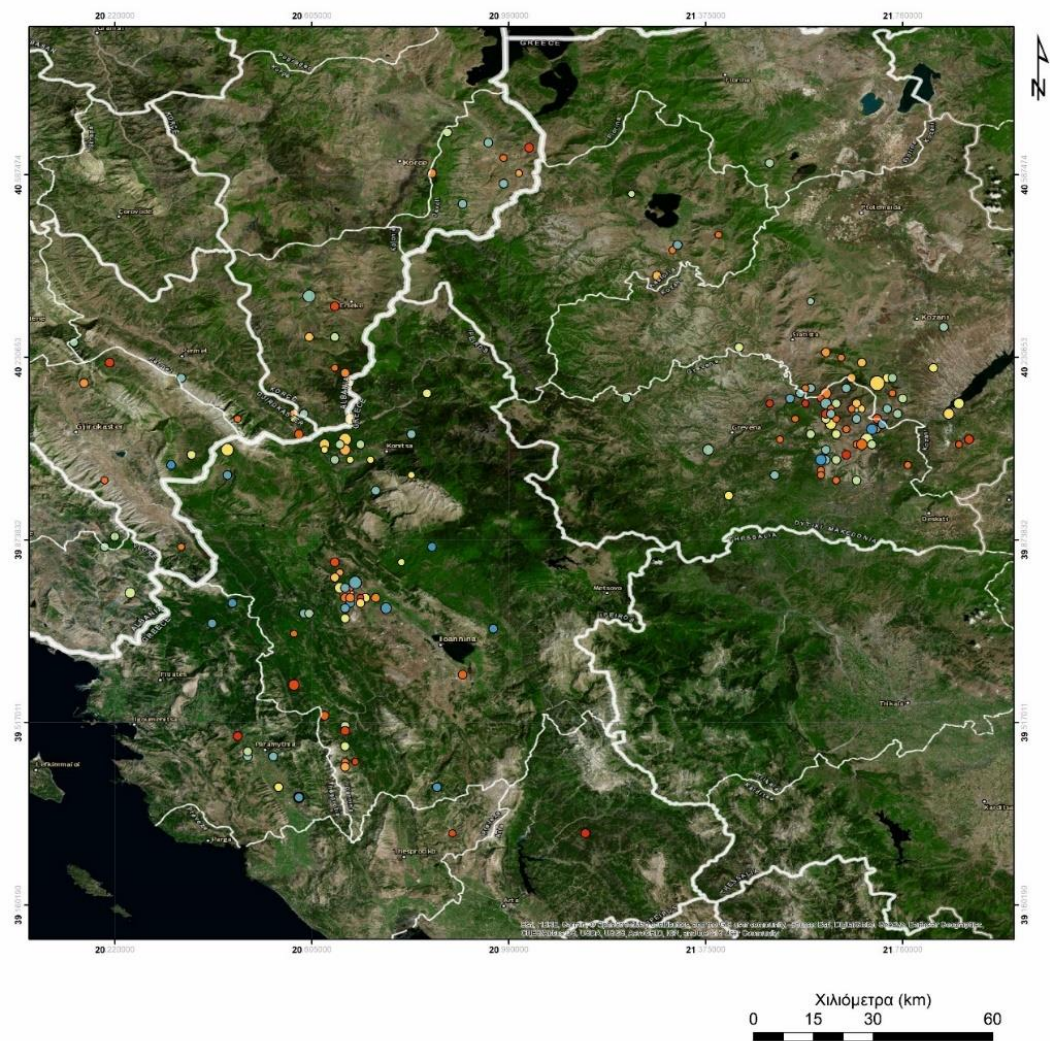


Σχήμα 2.18 Υδρογεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης

2.4 Στοιχεία σεισμικότητας

Η περιοχή μελέτης και η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από απουσία καταγεγραμμένης ιστορικής σεισμικότητας, ενώ πλήρης καταγραφή σεισμικών γεγονότων πραγματοποιείται τα τελευταία 54 χρόνια. Για την εκτίμηση της σεισμικότητας και των σεισμοτεκτονικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης αλλά και της ευρύτερης περιοχής στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επεξεργάστηκαν στοιχεία σεισμικότητας των τελευταίων 25 ετών (1993 έως σήμερα) σύμφωνα με στοιχεία του καταλόγου σεισμών από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (<http://www.gein.noa.gr/el/>). Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκαν οι σεισμοί μεγέθους μεταξύ 4 και 8 σε απόσταση από την περιοχή του Επταχωρίου ακτίνας 80 km, όπως παρουσιάζονται στο χάρτη σεισμικότητας του Σχήματος 2.19. Σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρείται ότι η περιοχή του Επταχωρίου χαρακτηρίζεται από απουσία σεισμικών γεγονότων, ενώ στην ευρύτερη περιοχή παρατηρούνται αρκετοί σεισμοί μικρού μεγέθους και μικρού βάθους. Κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο εντοπίζεται μόνο ένας σημαντικός σεισμός στην περιοχή της Κοζάνης μεγέθους 6.1 ο οποίος εκδηλώθηκε το Μάιο του έτους 1995.

Η παραπάνω εικόνα της τεκτονικής κατάστασης επιβεβαιώνεται από την απουσία τεκτονικών δομών και νεοτεκτονικών ρηγμάτων στην περιοχή του Επταχωρίου, όπως υποδεικνύει ο Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος στο φύλλο «Γρεβενά» (Σχήμα 2.20), όπου ανήκει η περιοχή μελέτης. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, δε θεωρείται εμφανής συσχέτιση μεταξύ σεισμικών γεγονότων και εκδήλωσης φαινομένων βραχοκαταπτώσεων στο εξεταζόμενο πραινές, χωρίς όμως να αποκλείεται η εκδήλωση μεμονωμένων φαινομένων λόγω σεισμικών δονήσεων.



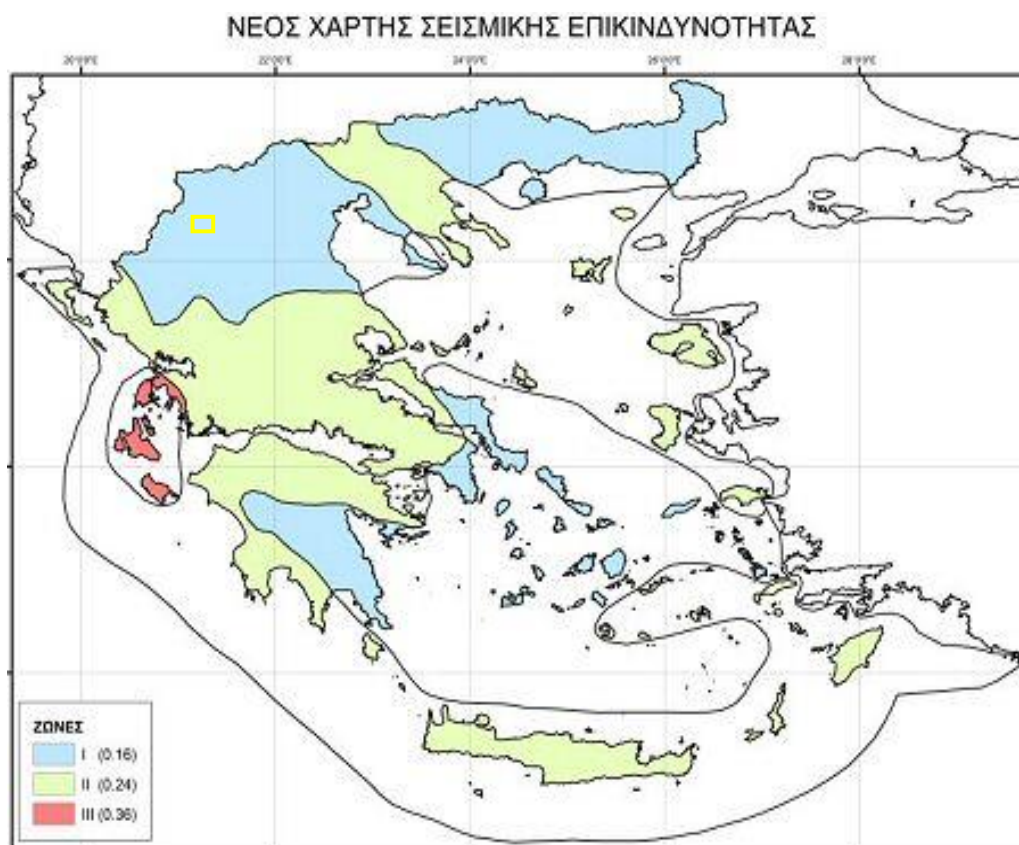
Υπόμνημα

Μέγεθος σεισμού	Βάθος (km)
◦ $4.0 < M < 4.2$	● < 15
◦ $4.2 < M < 4.5$	● $15 - 30$
◦ $4.5 < M < 5.0$	● $30 - 60$
◦ $5.0 < M < 5.4$	● $60 - 90$
◦ $5.4 < M < 6.1$	● > 90

Σχήμα 2.19 Χάρτης σεισμικότητας ευρύτερης περιοχής μελέτης για την περίοδο των ετών 1993 – 2018.



Επιπρόσθετα, η ευρύτερη περιοχή μελέτης σύμφωνα με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000) (ΦΕΚ 1154Β/12.8.2003) και το νέο Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας ανήκει στην Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας Ι, με αναμενόμενη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού 0.16 g. Ο νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας διακρίνει τρεις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (I, II και III), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.21 Νέος Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, όπου σημειώνεται η περιοχή μελέτης (κίτρινο πλαίσιο) (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, (2001))

3. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών και διακρίνονται Τεχνικογεωλογικές Ενότητες (ΤΕ) κατά μήκος του πρανούς, σύμφωνα με τη δομή και τη σύστασή τους. Το εξεταζόμενο πρανές διακρίθηκε σε τρεις (3) Τομείς οι οποίοι αποτέλεσαν μέτωπα τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης. Σε κάθε Τομέα αναλύθηκε η ποιότητα της βραχώμαζας και τα χαρακτηριστικά του κάθε σχηματισμού, ενώ πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κάθε Τεχνικογεωλογική Ενότητα για τον προσδιορισμό της τεχνικογεωλογικής τους συμπεριφοράς. Τέλος, παρουσιάζεται το τεχνικογεωλογικό μοντέλου του πρανούς, σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιήθηκε ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας.

3.2 Μεθοδολογία

Για τον προσδιορισμό της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών πραγματοποιήθηκε σάρωση του πρανούς με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR (Light Detection And Ranging) για την τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, λήφθηκαν εικόνες πεδίου υψηλής ανάλυσης και επεξεργάστηκαν ώστε να συνθέσουν την πανοραμική όψη του εξεταζόμενου πρανούς (Σχήμα 3.1). Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και με βάση λεπτομερείς παρατηρήσεις πεδίου της δομής των σχηματισμών και της λεπτομερούς αποτύπωσης από τη σάρωση, προσδιορίστηκαν κατά μήκος του πρανούς τρεις τομείς (Τομέας 1 – 3) (Σχήμα 3.1), οι οποίοι αποτέλεσαν μέτωπα τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης και χρησιμοποιήθηκαν για την επακόλουθη ανάλυση αστοχίας. Σε κάθε τομέα προσδιορίστηκαν Τεχνικογεωλογικές Ενότητες (ΤΕ) με βάση τη λιθολογία και τη δομή της βραχώμαζας και την κατάσταση των ασυνεχειών.



Σχήμα 3.1 Τρεις τομείς κατά μήκος του πρανούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, ημερομηνία λήψης 18/07/2018)

3.3 Ταξινόμηση βραχώμαζας

Για τον προσδιορισμό της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών για τη διάκρισή τους σε Τεχνικογεωλογικές Ενότητες (ΤΕ) απαιτείται η εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών τους παραμέτρων, οι οποίες ορίζονται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών και τη δομή της βραχώμαζας. Οι τεχνικογεωλογικές παράμετροι των εξεταζόμενων σχηματισμών δε δύναται να προσδιοριστούν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, καθώς δεν κατέστη δυνατή η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των σχηματισμών για την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών λόγω της δυσπρόσιτης περιοχής. Για τον προσδιορισμό και την καλύτερη κατανόηση της δομής της βραχώμαζας, καθώς και για λόγους πληρότητας της μελέτης πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της βραχώμαζας του εξεταζόμενου πρηνούς, η οποία βασίστηκε σε λεπτομερείς παρατηρήσεις πεδίου τόσο της δομής του συνόλου της βραχώμαζας όσο και της κατάστασης και ποιότητας των ασυνεχειών. Η ταξινόμηση της μολασσικής βραχώμαζας της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (GSI) και συγκεκριμένα με το διάγραμμα GSI για σχάσιμη μολάσσα (Σχήμα 3.2), όπως προτάθηκε από τους Hoek, Marinos and Marinos, 2004 (Μαρίνος, 2007). Κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα (ΤΕ) βαθμονομήθηκε με ένα εύρος τιμών του δείκτη GSI, ανάλογα με τον τύπο της βραχώμαζας. Οι τιμές συνολικά παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 3.1.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΓΙΑ ΣΧΑΣΙΜΗ ΜΟΛΑΣΣΑ Εφαρμόζεται κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές (Ε. Hoek, Π. Μαρίνος και Β. Μαρίνος, 2004)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (κυρίως επίπεδα στρώσης)	ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ							
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ			ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, υγρές, μη αποσπασμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασμένες και ομαλότερες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Μετρίως αποσπασμένες και εξοχλωμένες επιφάνειες	ΠΟΛΥ ΠΟΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ομαλές επιφάνειες με σπάνια επιφάνειά ή υλικό πλήρωσης με γενική δραστηριότητα				
Βασίζονται στην περιγραφή της λιθολογικής αίστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχείων (κυρίως της στρώσης) της βραχώμαζας επίλετες το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Επίλεκτη η θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήσει τη μέση τιμή του GSI από τις κομπίλες. Το να επιλέξει ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσει ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχείων μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκαταμμένες ασυνέχειες όταν οι αστάθειες επίλετες επιφάνειες (όπως διατυμμένα επίπεδα στρώσης) έχουν διαμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθιστούν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αστοχή ορισμένων βραχωδών μινωτικών από τη προσωρινά του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετατόπιση προς το δεξιά στις στήλες της μέτρησης, ποτικής και πολύ ποτικής κατάστασης ασυνεχείων. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργιών τάσεων στους υπολογισμούς.										
	ΤΥΠΟΣ M3. Παχυστρωματώδης ψαμμίτης σε στρώσεις μεγάλου πάχους ή ισχυρά συγκαλλημένα κροκαλοπαγή. Η επίδραση των ιλυολιθικών ενστρώσεων ελαχιστοποιείται από τον περιορισμό της βραχώμαζας. Σε ρηχές σήραγγες ή πηγάδι, αυτές οι στρώσεις ίσως προκαλέσουν δομικά ελεγχόμενη αστάθεια		70	60	M3	50				
	ΤΥΠΟΣ M4. Ψαμμίτης ή ισχυρά συγκαλλημένα κροκαλοπαγή με λεπτές ενστρώσεις ιλυολιθίου		ΤΥΠΟΣ M5. Ψαμμίτης και κροκαλοπαγή με σχιστώδη ιλυολίθιο σε ανάλογες ποσότητες			M4	40	M5	M6	30
	ΤΥΠΟΣ M7. Εντονα, ανάλογα την αποσάθρωση, στρωσιγενής - σχάσιμος έως αποδιοργανωμένος ιλυολιθός ή ιλυώδης σχιστόλιθος με ή χωρίς μερικές πολύ λεπτές στρώσεις ψαμμίτη								M7	20
										10

Σχήμα 3.2 Διάγραμμα Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (Geological Strength Index – GSI) για μολασσικούς σχηματισμούς στην επιφάνεια (Μαρίνος, 2007)

3.4 Τεχνικογεωλογικές ενότητες (ΤΕ)

Για τον προσδιορισμό της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς και την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας των καταπτώσεων βράχων διακρίθηκαν Τεχνικογεωλογικές ενότητες (ΤΕ) κατά μήκος του πρανού. Για τον προσδιορισμό των τεχνικογεωλογικών ενότητων αξιολογήθηκε η λεπτομερής αποτύπωση και η γεωμετρική παραμετροποίηση τεμαχών και ασυνεχειών της βραχώμαζας, καθώς εξετάστηκε λεπτομερώς η δομή και η σύσταση των σχηματισμών σε κάθε τομέα του πρανού και η ταξινόμηση της βραχώμαζας, όπως προσδιορίστηκε στην Ενότητα 3.3. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκε η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των επιμέρους γεωλογικών σχηματισμών, η οποία εξαρτάται από τις εναλλαγές ασθενών και συμπαγών μελών, το πάχος του σχηματισμού αλλά και το βαθμό συνεκτικότητάς του. Προσδιορίστηκαν πέντε (5) τεχνικογεωλογικές ενότητες κατά μήκος του πρανού, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και αποτυπώνονται στο πεδίο στο Σχήμα 3.3 και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Πίνακας 3.1 Τεχνικογεωλογικές Ενότητες (ΤΕ) κατά μήκος του πρανού και χαρακτηρισμός βραχώμαζας

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ (ΤΕ)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕ	ΤΥΠΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ GSI
1	Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις	M6 – M7	25 – 35
2	Εναλλαγές μεσοστρωματώδους ψαμμίτη και ιλυολίθων σε περίπου ίσες αναλογίες	M5	35 – 40
3	Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με τοπικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων	M3 – M4	45 – 55
4	Αποσαθρωμένοι ψαμμίτες με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων	M4	40 – 45
5	Μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων	M5	35 – 40



Σχήμα 3.3 Διάκριση πέντε (5) Τεχνικογεωλογικών Ενότητων (TE) και θέσεις διατομών κατά μήκος του εξεταζόμενου πρανού

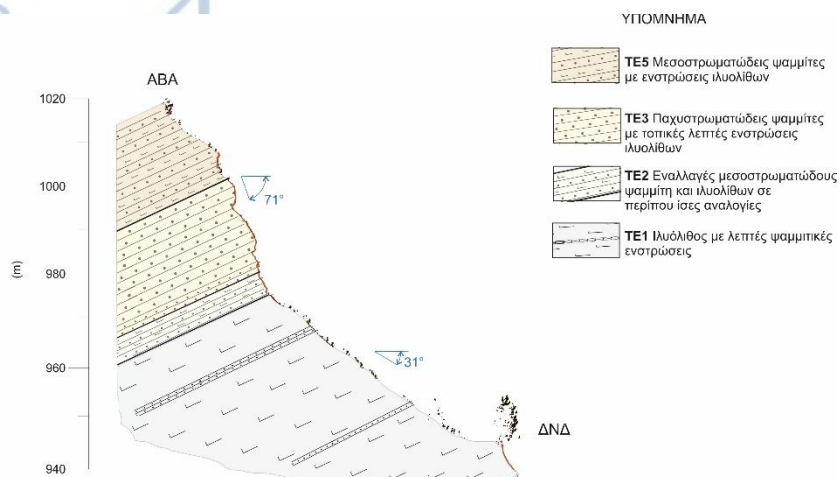
3.4.1 Τομέας 1

3.4.1.1 Ποιότητα βραχώμαζας

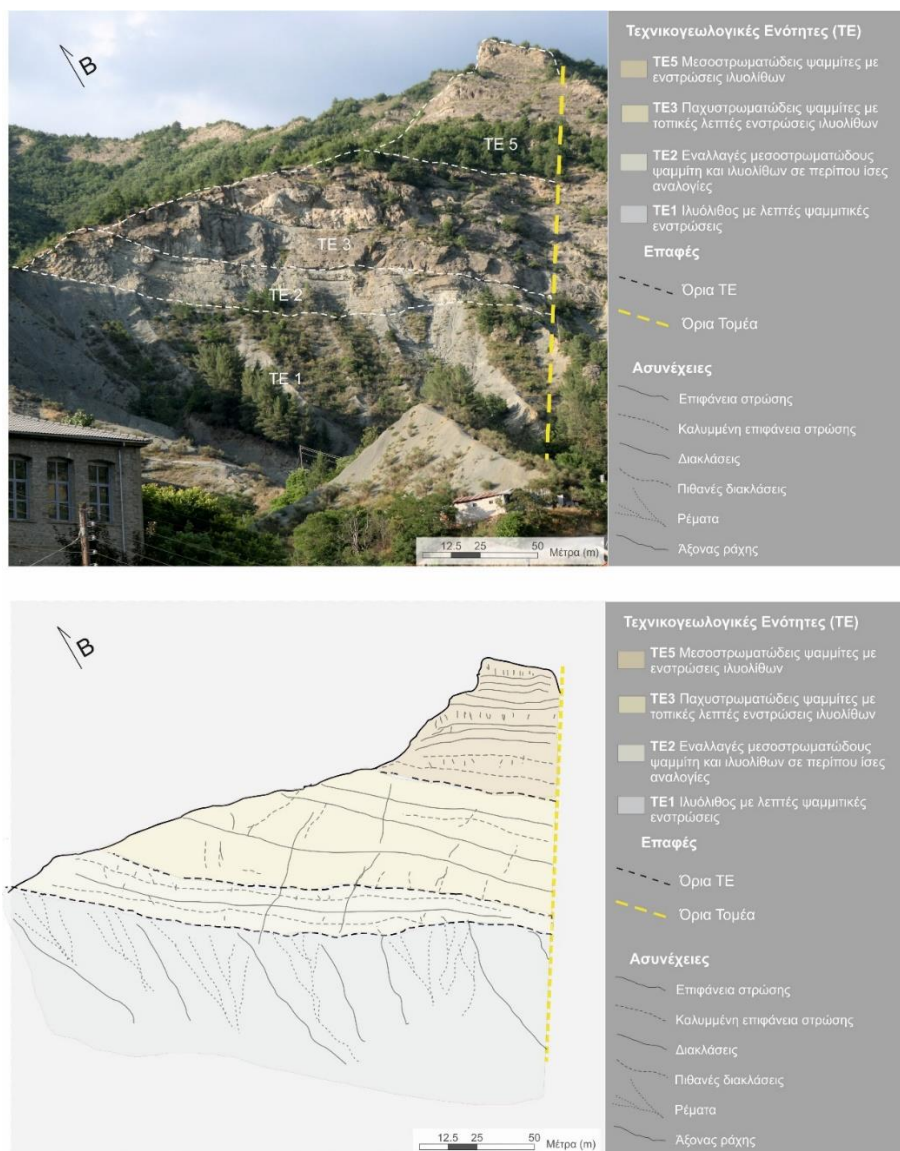
Ο Τομέας 1 καλύπτει το δυτικό τμήμα του πρανούς (Σχήμα 3.1). Η περιοχή αποτελείται γεωλογικά από μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με εναλλαγές ιλυολίθων, οι οποίοι υπέρκεινται παχυστρωματώδων ψαμμιτών πάχους περίπου 25 m και μεταβαίνουν σταδιακά σε μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ίσες εναλλαγές ιλυολίθων, καταλήγοντας σε ιλυόλιθο με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις στη βάση του πρανούς με μέσο πάχος 40 m. Η παραπάνω στρωματογραφική ακολουθία αποτυπώνεται στην τεχνικογεωλογική διατομή του Σχήματος 3.4, όπου αποτυπώνεται η κλίση του πρανούς, η οποία κυμαίνεται από 31° στη βάση του πρανούς έως 71° στα ανώτερα τμήματα, καθώς και στην τεχνικογεωλογική τομή του Τομέα 1 (Σχήμα 3.5). Η επιφάνεια της στρώσης αποτελεί την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχώμαζας, η οποία παρουσιάζει διεύθυνση κλίσης αντίρροπη του μετώπου του πρανούς. Κατά μήκος της στρώσης παρατηρούνται σημαντικές υποσκαφές δημιουργώντας επικρεμάμενα τεμάχια συμπαγών ψαμμιτών. Εντός των ψαμμιτικών πάγκων εντοπίζονται παρακατακόρυφες ασυνέχειες του κύριου συστήματος διακλάσεων, οι οποίες παρουσιάζουν συνέχεια κατά μήκος του πρανούς 2 – 5 m. Οι ασυνέχειες αυτές δρουν ως εφελκυστικές ρωγμές λόγω του μικρού ανοίγματός τους (1 – 10 cm), οι οποίες δημιουργούνται από τη διαβρωτική δράση του νερού, όπου οι υδατικές πιέσεις τις διευρύνουν και την αποτόνωση της βραχώμαζας λόγω του έντονου ανάγλυφου. Κατά μήκος των ασυνεχειών αυτών αποκολλούνται ψαμμιτικά τεμάχια από τη βραχώμαζα, τα οποία ελέγχονται από τη γεωμετρία της επιφάνειας της στρώσης αλλά και από μικροδιακλάσεις εντός των ψαμμιτικών οριζόντων οι οποίες διαχωρίζουν τη βραχώμαζα σε μικρότερα τεμάχια και αποτελούν νέες απότομες επιφάνειες αποκόλλησης και δημιουργούν δυνητικά προς κατάπτωση τεμάχια.

3.4.1.2 TE1. Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις

Πρόκειται για υγιή τεφρό έως τεφροκύανο ιλυόλιθο μέτριας έως χαμηλής αντοχής με ενστρώσεις ικανών ψαμμιτικών οριζόντων. Εμφανίζουν στην επιφάνεια έντονο κερματισμό λόγω αποσάθρωσης και του φαινομένου της σχάσης δημιουργώντας αποδιοργανωμένη δομή με τοπική συμπεριφορά εδαφικού μέσου (Σχήμα 3.6). Η βραχώμαζα στο σύνολό της χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλό βαθμό κερματισμού, καθώς με το βάθος εμφανίζει πολύ συμπαγή δομή και η αποσάθρωση εντοπίζεται μόνο στα επιφανειακά στρώματα σε βάθος ελάχιστων μέτρων. Κύρια ασυνέχεια όλου του σχηματισμού αποτελεί η επιφάνεια στρώσης, η οποία παρουσιάζει μεγάλη εμμονή. Υδρογεωλογικά ο σχηματισμός θεωρείται αδιαπέρατος και η κυκλοφορία του νερού περιορίζεται στα ανώτερα στρώματα.



Σχήμα 3.4 Τεχνικογεωλογική διατομή 1-1 διεύθυνσης ΑΒΑ – ΔΝΔ Τομέα 1



Σχήμα 3.5 Τεχνικογεωλογική τομή Τομέα 1



Σχήμα 3.6 Ιλυόλιθος με το χαρακτηριστικό τεφρακύανο χρώμα στη βάση του πρανούς έντονα αποσαθρωμένος με αποδιοργανωμένη δομή

3.4.1.3 TE2. Εναλλαγές μεσοστρωματώδους ψαμμίτη και ιλυολίθων σε περίπου ίσες αναλογίες

Πρόκειται για εναλλαγές μεσοστρωματώδους τεφρού ψαμμίτη μέτριας έως μεγάλης αντοχής με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων σε περίπου ίσες αναλογίες. Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες εμφανίζουν πάχος 1 – 5 m και ακολουθούν την επιφάνεια της στρώσης. Η βραχόμαζα παρουσιάζει στρωματώδη δομή και διακρίνεται από την παρουσία ιλυολιθικών οριζόντων, οι οποίοι πιθανώς απομειώνουν τα χαρακτηριστικά της. Εμφανίζεται μέτρια αποσαθρωμένη, όπου τα ιλυολιθικά μέλη έχουν υποστεί υποσκαφή κατά μήκος της επιφάνειας της στρώσης και παρουσιάζονται επικρεμάμενα τα υπερκείμενα ψαμμιτικά στρώματα. Οι ιλυολιθικές ενστρώσεις εμφανίζονται λείες και μπορούν να αποτελέσουν δυνητικές επιφάνειες ολίσθησης των ψαμμιτικών πάγκων. Υδρογεωλογικά ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται από μέτρια έως χαμηλή υδροπερατότητα με ανάπτυξη μικρής δυναμικότητας υδροφορία.

3.4.1.4 TE3. Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με τοπικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων

Πρόκειται για παχυστρωματώδεις τεφρούς έως τεφροκίτρινους ψαμμίτες μέσα στους οποίους παρεμβάλλονται σποραδικές λεπτές ιλυολιθικές ενστρώσεις. Οι ψαμμιτικοί πάγκοι εμφανίζουν πάχος που κυμαίνεται από 2 έως 8 m με μέσο 4 m. Η βραχόμαζα εμφανίζει τεμαχώδη δομή, καθώς διακρίνεται η κύρια επιφάνεια της στρώσης και παρακατακόρυφες διακλάσεις. Η βραχόμαζα παρουσιάζεται μέτρια αποσαθρωμένη, κυρίως κατά μήκος της επιφάνειας στρώσης όπου παρατηρείται ανάπτυξη έντονης βλάστησης. Υδρογεωλογικά ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται ημιπερατός και αναπτύσσεται περιορισμένος υδροφόρος.

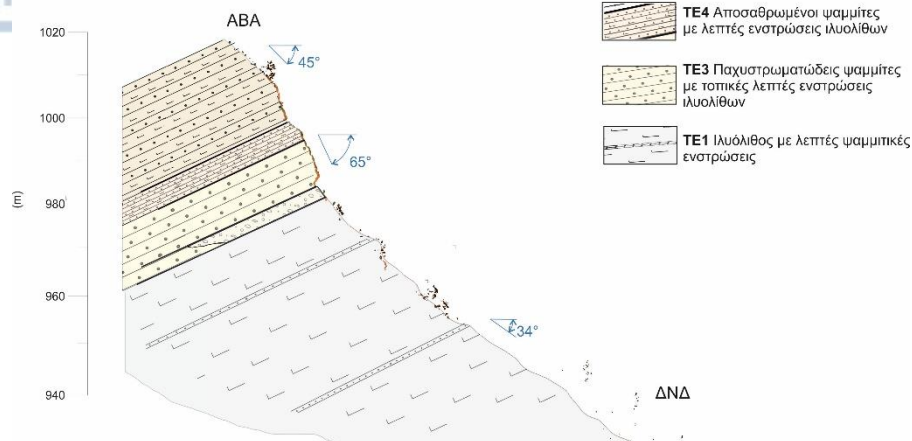
3.4.1.5 TE5. Μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων

Πρόκειται για μεσοστρωματώδεις τεφρούς έως τεφροκασάνινους ψαμμίτες πάχους 0.5 – 2 m με εναλλαγές ιλυολιθικών στρώσεων πάχους 20 – 50 cm. Ο σχηματισμός εμφανίζεται μέτρια αποσαθρωμένος, κυρίως στα ιλυολιθικά μέλη και μόνο στα επιφανειακά τμήματα. Η βραχώμαζα εμφανίζει στρωματώδη δομή, με κύρια ασυνέχεια την επιφάνεια στρώσης και εμφανίζονται κάθετες μικροδιατμήσεις στους ψαμμιτικούς πάγκους ως αποτέλεσμα της τεκτονικής της περιοχής. Υδρογεωλογικά ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται από χαμηλή υδροπερατότητα.

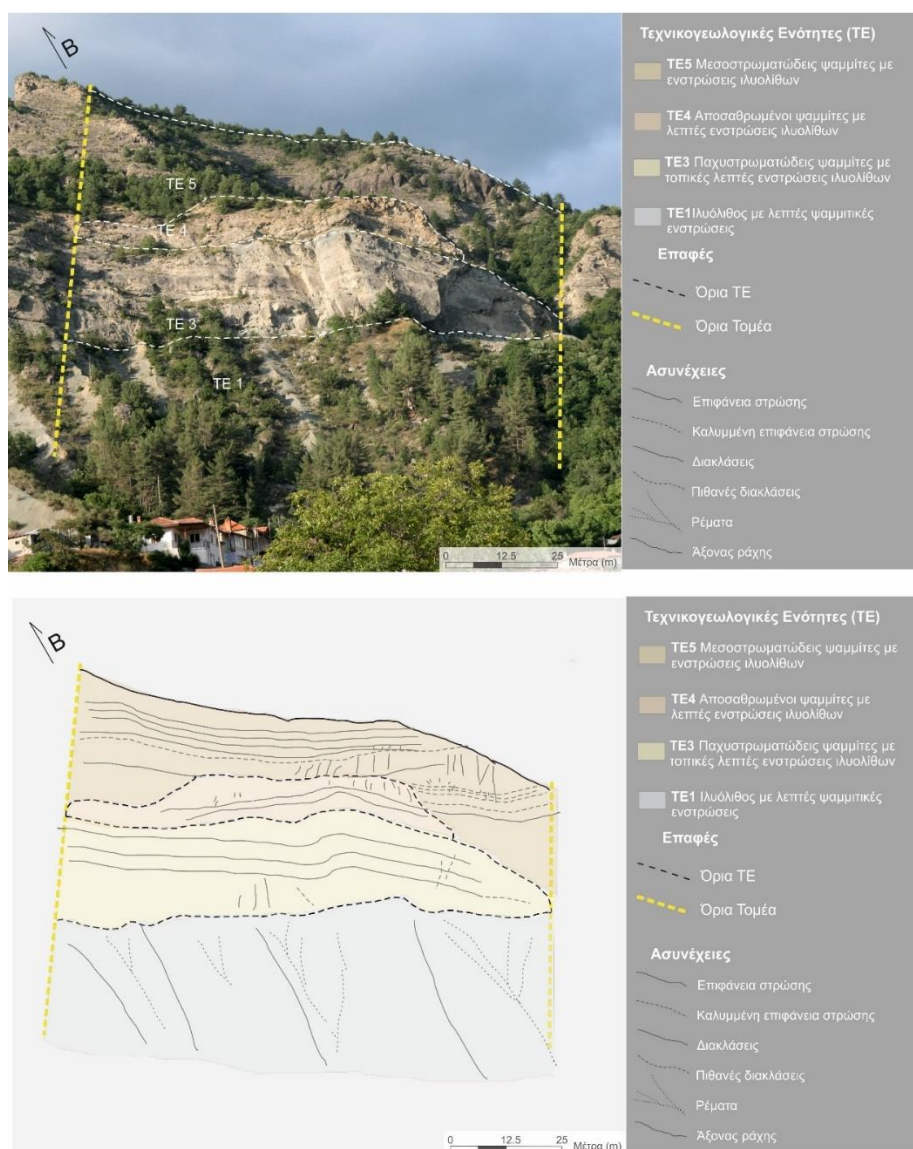
3.4.2 Τομέας 2

3.4.2.1 Ποιότητα βραχώμαζας

Ο Τομέας 2 καλύπτει το κεντρικό τμήμα του πρανούς (Σχήμα 3.1). Η περιοχή αποτελείται γεωλογικά από μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με εναλλαγές ιλυολίθων, οι οποίοι υπέρκεινται παχυστρωματωδών ψαμμιτών πάχους περίπου 25 m, όπου παρεμβάλλεται ορίζοντας αποσαθρωμένου ψαμμίτη μεταβαίνουν σταδιακά σε μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ίσες εναλλαγές ιλυολίθων. Η βάση του πρανούς καλύπτεται από ιλυόλιθο με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις με μέσο πάχος 50 m. Η παραπάνω στρωματογραφική ακολουθία αποτυπώνεται στην τεχνικογεωλογική διατομή του Σχήματος 3.7, καθώς και στην τεχνικογεωλογική τομή του Τομέα 2 (Σχήμα 3.8). Η κλίση του πρανούς παρουσιάζει διακυμάνσεις, καθώς στη βάση του πρανούς παρατηρείται κλίση 34° , ανέρχεται $64^\circ - 66^\circ$ στους ψαμμιτικούς πάγκους και καταλήγει $37^\circ - 54^\circ$ στα ανώτερα τμήματα. Η επιφάνεια της στρώσης, αντίρροπη του μετώπου του πρανούς αποτελεί κι εδώ την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχώμαζας, κατά μήκος της οποίας παρατηρούνται σημαντικές υποσκαφές δημιουργώντας επικρεμάμενα τεμάχια συμπαγών ψαμμιτών. Κατά μήκος κύριων παρακατακόρυφων ασυνεχειών αποκολλούνται ψαμμιτικά τεμάχια από τη βραχώμαζα και ελέγχονται από τη γεωμετρία της επιφάνειας της στρώσης αλλά και από μικροδιακλάσεις. Αυτές εντοπίζονται εντός των ψαμμιτικών οριζόντων και διαχωρίζουν τη βραχώμαζα σε μικρότερα τεμάχια και αποτελούν νέες απότομες επιφάνειες αποκόλλησης δημιουργώντας δυνητικά προς κατάπτωση τεμάχια.



Σχήμα 3.7 Τεχνικογεωλογική διατομή 2-2 διεύθυνσης ΑΒΑ – ΔΝΔ Τομέα 2



Σχήμα 3.8 Τεχνικογεωλογική τομή Τομέα 2

3.4.2.2 TE1. Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις

Πρόκειται για ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμιτικών οριζόντων, όμοιο με την αντίστοιχη TE του Τομέα 1. Στο τμήμα αυτό αναπτύσσεται έντονη βλάστηση εντός των ιλυολίθων υποδηλώνοντας την παρουσία υγρασίας από την πιθανή εκφόρτιση της υδροφορίας των υπερκείμενων ψαμμιτικών οριζόντων. Συνεπώς η αποσάθρωση είναι εντονότερη στο τμήμα αυτό και δημιουργείται εμφανείς υποσκαφές στον πόδα του πρανούς.

3.4.2.3 TE3. Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με τοπικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων

Πρόκειται για παχυστρωματώδεις ψαμμίτες μέσα στους οποίους παρεμβάλλονται σποραδικές λεπτές ιλυολιθικές ενστρώσεις. Στη βάση της ενότητας εντοπίζεται τοπικά λεπτός φακοειδής ορίζοντας πολύμεικτων κροκαλοπαγών αποτελούμενα από οφιολιθικά τεμάχια καλά συγκολλημένα με ασβεστιτικό υλικό. Οι ψαμμιτικοί πάγκοι εμφανίζουν πάχος που κυμαίνεται από 4 έως 8 m με μέσο 6 m. Η βραχόμαζα εμφανίζει συμπαγή δομή και διακρίνεται μόνο η επιφάνεια της στρώσης, ενώ απουσιάζουν οι παρακείμενες παρακατακόρυφες διακλάσεις. Τοπικά εμφανίζεται στο μέσο του τομέα μικροδομή πτύχωσης των ψαμμιτών, η οποία πιθανώς οφείλεται στην τεκτονική της ευρύτερης περιοχής. Η βραχόμαζα παρουσιάζεται ελάχιστα αποσαθρωμένη, κυρίως κατά μήκος της επιφάνειας στρώσης όπου παρατηρούνται δομές εξαλλοίωσης και απουσία βλάστησης. Υδρογεωλογικά ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται ημιπερατός και αναπτύσσεται περιορισμένος υδροφόρος.

3.4.2.4 TE4. Αποσαθρωμένοι ψαμμίτες με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων

Πρόκειται για αποσαθρωμένους έντονα εξαλλοιωμένους μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με λεπτές εναλλαγές ιλυολιθικών οριζόντων. Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες εμφανίζουν πάχος 0.5 – 2 m και η βραχόμαζα εμφανίζει αποδιοργανωμένη δομή. τα ιλυολιθικά μέλη εμφανίζονται έντονα εξαλλοιωμένα και λόγω της υποσκαφής του οι υπερκείμενοι ψαμμιτικοί όγκοι εμφανίζονται επικρεμάμενοι. αναπτύσσεται περιορισμένος υδροφόρος.

3.4.2.5 TE5. Μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων

Πρόκειται για μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες πάχους 0.5 – 2 m με εναλλαγές ιλυολιθικών στρώσεων πάχους 20 – 50 cm, όμοιο με την αντίστοιχη TE του Τομέα 1. Ο σχηματισμός εμφανίζεται μέτρια έως έντονα αποσαθρωμένος με έντονο τεφροκαστάνινο χρώμα στους ψαμμίτες. Ο βαθμός αποσάθρωσης αποτυπώνεται στην εξαλλοίωση στις ιλυολιθικές ενστρώσεις κατά μήκος της επιφάνειας στρώσης, όπου αναπτύσσεται πυκνή βλάστηση.

Ο Τομέας 3 καλύπτει το ανατολικό τμήμα του πρανούς (Σχήμα 3.1). Η περιοχή αποτελείται γεωλογικά από μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με εναλλαγές ιλυολίθων, οι οποίοι υπέρκεινται ιλυολίθου με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις στη βάση του πρανούς με μέσο πάχος 40 m. Η παραπάνω στρωματογραφική ακολουθία αποτυπώνεται στην τεχνικογεωλογική διατομή του Σχήματος 3.9, όπου αποτυπώνεται η κλίση του πρανούς, η οποία κυμαίνεται από 33° στη βάση του πρανούς έως 75° στα ανώτερα τμήματα, καθώς και στην τεχνικογεωλογική τομή του Τομέα 3 (Σχήμα 3.10). Στον τομέα αυτό παρατηρούνται έντονες υποσκαφές κατά μήκος της στρώσης εντός των ψαμμιτικών παγκων δημιουργώντας επικρεμάμενα τεμάχη συμπαγών ψαμμιτών.

Παρατηρούνται κύριες παρακατακόρυφες ασυνέχειες κατά μήκος των οποίων αποκολλούνται σημαντικά τεμάχη, ελεγχόμενα από τη γεωμετρία της επιφάνειας της στρώσης αλλά και από κάθετες μικροδιακλάσεις. Κατά μήκος των ασυνεχειών αυτών δημιουργούνται νέες απότομες επιφάνειες ελέγχοντας δυνητικά προς κατάπτωση τεμάχη, καθώς δημιουργούνται χαραδρώσεις και ρέματα πίσω από το μέτωπο του πρανούς από την έντονη διαβρωτική δράση του νερού.

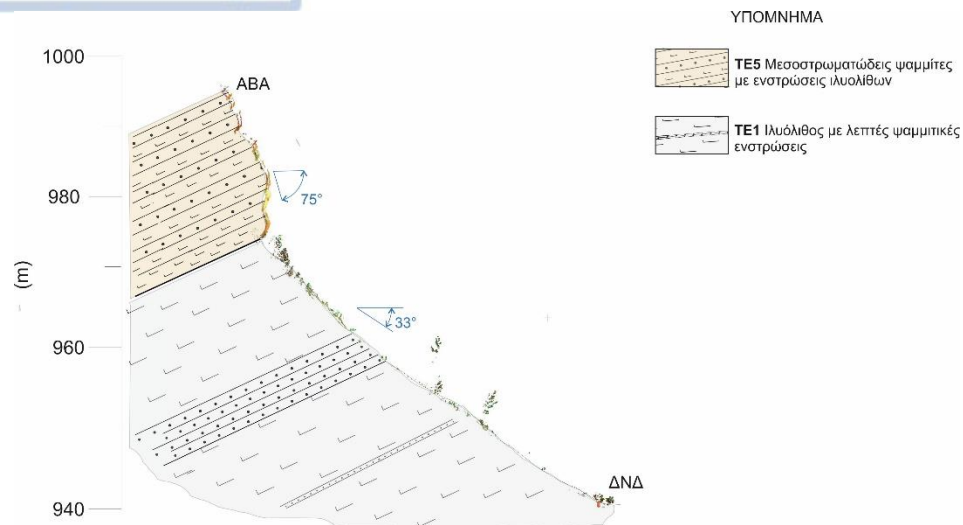
3.4.3.2 TE1. Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις

Πρόκειται για ιλυόλιθο με ενστρώσεις ικανών ψαμμιτικών οριζόντων, όμοιο με την αντίστοιχη TE του Τομέα 1. Στο τμήμα αυτό αναπτύσσεται τοπικά έντονη βλάστηση εντός των ιλυολίθων στο δυτικό άκρο παρουσιάζοντας πολύ έντονη αποσάθρωση και δημιουργία μεγάλου ρέματος στον πόδα του πρανούς προκαλώντας υποσκαφή στα ανώτερα μέλη. Στα μέσα της ενότητας εντοπίζεται σημαντική ψαμμιτική ένστρωση αποτελούμενη από λεπτούς ψαμμιτικούς πάγκους συνολικού πάχους 5 m.

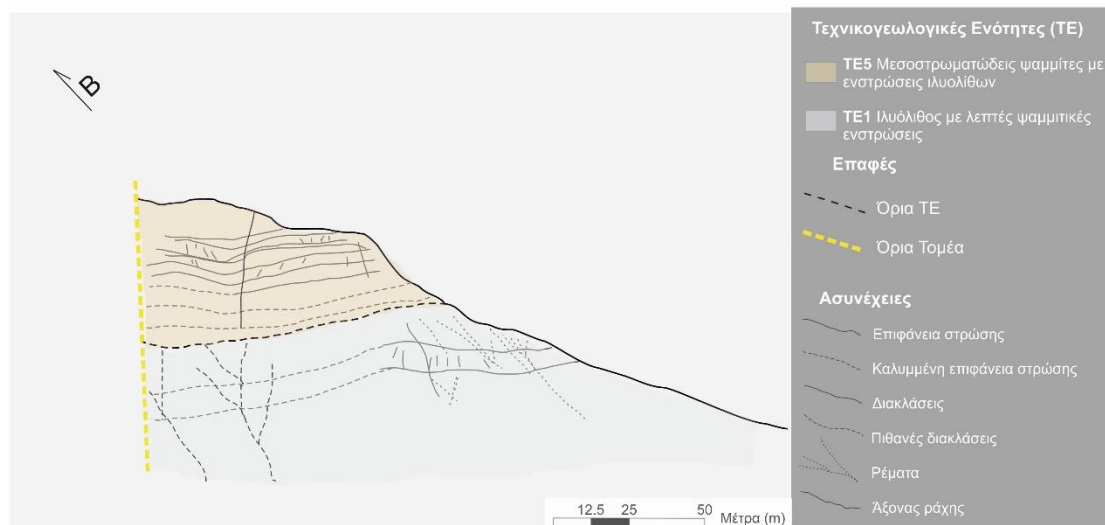
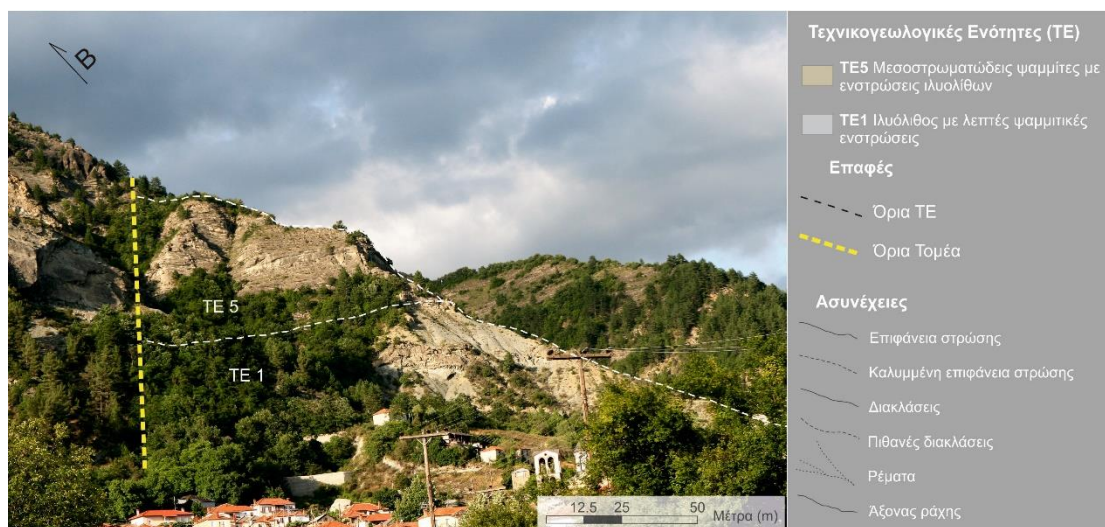
3.4.3.3 TE5. Μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις ιλυολίθων

Πρόκειται για μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες πάχους 0.5 – 2 m με εναλλαγές ιλυολιθικών στρώσεων πάχους 20 – 50 cm, όμοιο με την αντίστοιχη TE του Τομέα 2. Ο σχηματισμός εμφανίζεται μέτρια αποσαθρωμένος με έντονο τεφροκαστάνινο χρώμα στους ψαμμίτες. Η βραχώμαζα εμφανίζει στρωματώδη δομή, με κύρια ασυνέχεια την επιφάνεια στρώσης και τοπικές μικροδιατμήσεις στους ψαμμιτικούς πάγκους ως αποτέλεσμα της τεκτονικής της περιοχής. Στα μέσα του τομέα εμφανίζονται παρακατακόρυφες διακλάσεις, οι οποίες αποτέλεσαν επιφάνειες ολίσθησης παλαιότερων αστοχιών και κατά μήκος αυτών ευνοείται η αποσάθρωση της βραχώμαζας και η δημιουργία ρέματος προς τα κατόντη. Ο σχηματισμός στο

τμήμα αυτό διακρίνεται από μεγάλη συμμετοχή ιλυολιθικού στρώματος στη βάση της ενότητας, όπου αναπτύσσεται τοπικά βλάστηση.



Σχήμα 3.9 Τεχνικογεωλογική διατομή 3-3 διεύθυνσης ΑΒΑ – ΔΝΔ Τομέα 3



Σχήμα 3.10 Τεχνικογεωλογική τομή Τομέα 3

4. Ανάλυση μηχανισμού αστοχίας καταπτώσεων

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση μηχανισμού κατάπτωσης κατά μήκος του εξεταζόμενου πρानούς με βάση το τεχνικογεωλογικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3.

4.2 Μεθοδολογία

Η ανάλυση του μηχανισμού των καταπτώσεων στο εξεταζόμενο πρानές πραγματοποιείται πιθανολογικά σύμφωνα με λεπτομερείς παρατηρήσεις και μετρήσεις πεδίου αλλά και με τον προσδιορισμό σημαντικών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτές αφορούν τη δομή και τη γεωμετρία του μετώπου του πρανούς, τον όγκο και το σχήμα των τεμαχών, αυτών που έχουν αποκολληθεί στο παρελθόν και αυτών που δύναται να αποκολληθούν, την αναγνώριση περιοχών επιδεκτικών σε καταπτώσεις βράχων, καθώς και τις ζώνες τροφοδοσίας κατά μήκος του πρανούς. Ο προσδιορισμός των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με σάρωσεις του πρανούς με τη χρήση γεωδαιτικών μεθόδων και, συγκεκριμένα, με επίγεια σάρωση LiDAR (Light Detection And Ranging) και με τη μέθοδο φωτογραμμετρίας με πτήσεις με μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Το εύρος και οι επιφάνειες σάρωσης για την περιοχή μελέτης, οι οποίες λήφθηκαν με τις παραπάνω μεθόδους απεικονίζονται στο παρακάτω Σχήμα 4.1.

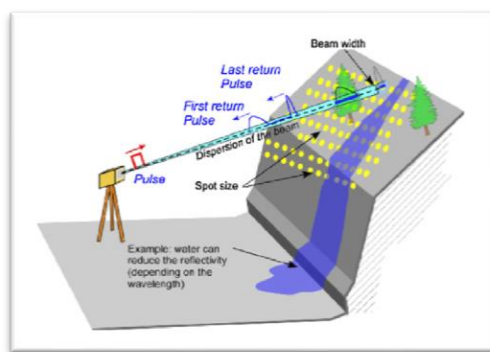


Σχήμα 4.1 Χάρτης θέσεων, εύρους σάρωσης (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και επιφάνειες σάρωσης (μπλε επιφάνειες) με τη χρήση LiDAR και UAV (Google Earth)

Οι μέθοδοι αυτές, καθώς και τα αποτελέσματά που αναλύονται στις παρακάτω ενότητες. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου, οι οποίες περιλαμβάνουν μετρήσεις στοιχείων ασυνεχειών με γεωλογική πυξίδα και τη συσχέτισή τους με τις αντίστοιχες μετρήσεις ασυνεχειών, όπως προέκυψαν από τα δεδομένα των σαρώσεων, καθώς πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές κρουσσιμέτρησης με τη χρήση της σφύρας Schmidt για την εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας του πετρώματος, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό συντελεστών αναπήδησης των βραχοτεμαχίων απαιτούμενων για την ανάλυση των καταπτώσεων, όπως αναλύεται στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 5.

4.2.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση πρηνούς με επίγεια σάρωση LiDAR

Η χρήση των επίγειων συστημάτων LiDAR (Light Detection And Ranging) αποτελεί μια νέα, αναπτυσσόμενη μέθοδο για τη λήψη ψηφιακών δεδομένων υψηλής ακρίβειας και τη δημιουργία μοντέλων αναγλύφου. Ένα σύστημα LiDAR είναι μια συσκευή, η οποία παράγει και εκπέμπει δέσμη laser (ή σειρά παλμών) υψηλής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Jaboyedoff, et al., 2012) προς το στόχο, ανακλάται σε αυτόν, επιστρέφει και καταγράφεται σε έναν οπτικό ανιχνευτή (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Απεικόνιση λειτουργίας επίγειου συστήματος LiDAR (Light Detection And Ranging) (Jaboyedoff, et al., 2012)

Τα συστήματα LiDAR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή μεγάλων ποσοτήτων πληροφοριών 3D του εδάφους με εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό εγγραφής (Jaboyedoff et al., 2012). Με αυτή τη μέθοδο καταγράφονται εκατομμύρια σημεία υψηλής ακρίβειας και συνιστούν ένα νέφος σημείων (point cloud), το οποίο μετά από επεξεργασία και καθαρισμό από θορύβους (βλάστηση, αέρας), παράγει μία γεωμετρικά σωστή τρισδιάστατη εικόνα του περιβάλλοντος σάρωσης (Vazaios et al., 2014)

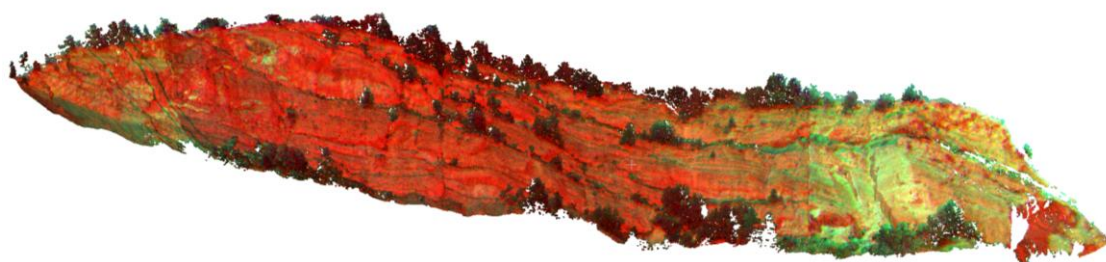
Για την εκτίμηση των συνθηκών καταπτώσεων τεμαχίων στο εξεταζόμενο πρηνές, τη διαστασιολόγηση και την αποτύπωση του αναγλύφου της περιοχής μελέτης επιλέχθηκε η χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR, καθώς κρίθηκε η πλέον κατάλληλη μέθοδος, λόγω του υψηλού και απότομου πρηνούς, για τη λεπτομερή απεικόνιση των υπολειμματικών δομών παλαιότερων καταπτώσεων και τεμαχίων επιδεκτικών

προς κατάπτωση και των διαστάσεων τους. Λήφθηκαν εικόνες από δύο σημεία μετρήσεων εντός του οικισμού του Επταχωρίου για την αποτύπωση δομής ύψους περίπου 80 m από απόσταση 200 m και 550 m από τις θέσεις 1 και 2, αντίστοιχα (Σχήμα 4.3).

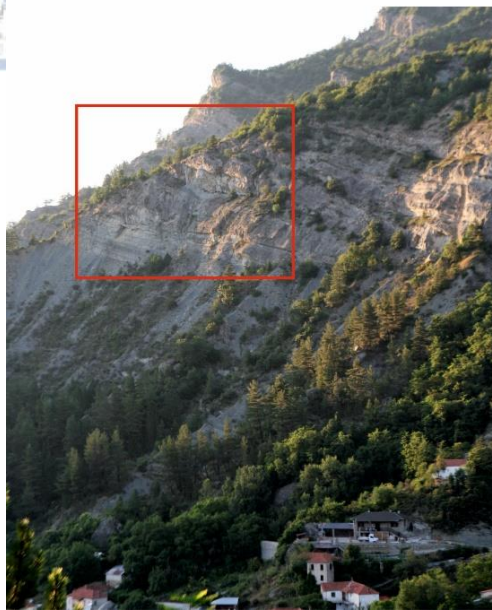


Σχήμα 4.3 Θέσεις επίγειας σάρωσης LiDAR πρανούς, χάρτης θέσεων (επάνω), Θέση 1 (κάτω αριστερά), Θέση 2 (κάτω δεξιά)

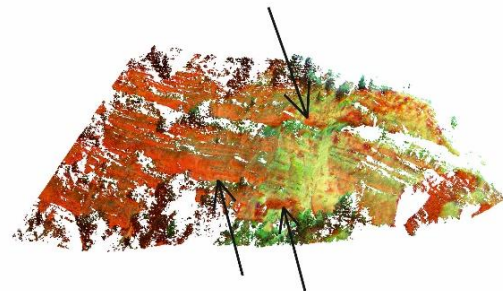
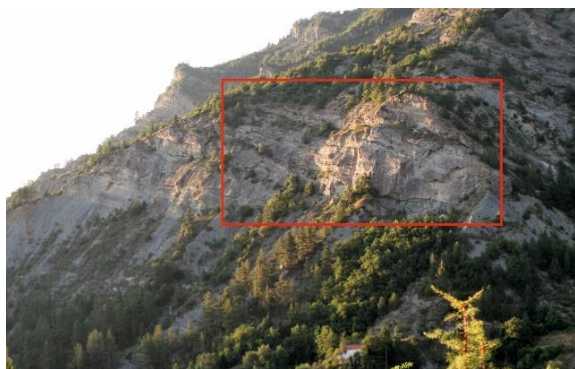
Τα παραγόμενα δεδομένα (point cloud) επεξεργάστηκαν με κατάλληλα λογισμικά (Cloud Compare) και γεωαναφέρθηκαν βάσει παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων UTM (WGS84 – 34N) δημιουργώντας τη συνολική εικόνα του μετώπου του πρανούς από την επίγεια σάρωση LiDAR, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4. Σύμφωνα με την τρισδιάστατη απεικόνιση του πρανούς εκτιμήθηκαν οι ζώνες τροφοδοσίας καταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς και αξιολογήθηκε ο όγκος και το σχήμα των τεμαχών επιδεκτικών προς κατάπτωση (Σχήματα 4.5 και 4.6).



Σχήμα 4.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση πρανούς με επίγεια σάρωση LiDAR



Σχήμα 4.5 Σύγκριση εικόνας πεδίου (αριστερά) και εικόνας σάρωσης με LiDAR (δεξιά) δυτικού τμήματος πρανούς, όπου με βέλη εντοπίζονται όγκοι τεμαχών επιδεκτικών προς κατάπτωση



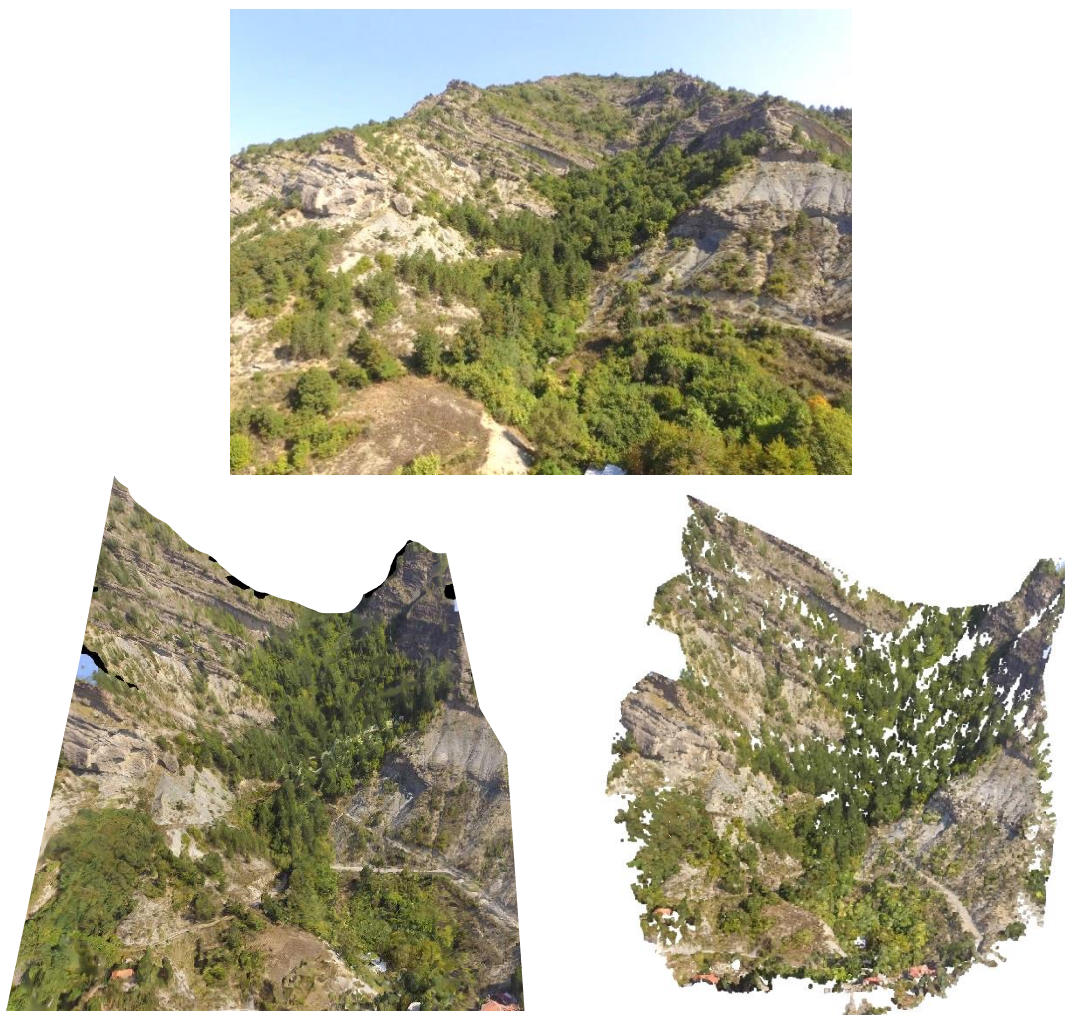
Σχήμα 4.6 Σύγκριση εικόνας πεδίου (αριστερά) και εικόνας σάρωσης με LiDAR (δεξιά) ανατολικού τμήματος πρανούς, όπου με βέλη εντοπίζονται όγκοι τεμαχών επιδεκτικών προς κατάπτωση

4.2.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση πρανούς με πτήση UAV

Για την εκτίμηση του γεωλογικού κινδύνου έναντι καταπτώσεων στο εξεταζόμενο πρανές και την πληρέστερη αποτύπωσή του πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικά πτήσεις με μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Αυτή η μέθοδος φωτογραμμετρίας κρίθηκε κατάλληλη λόγω της αυτονομίας κίνησης του UAV, καθώς πραγματοποιήθηκαν πτήσεις πάνω από δυσπρόσιτες περιοχές του πρανούς με χαμηλό κόστος απόκτησης και λειτουργίας, αλλά με τον περιορισμό της ενεργειακής αυτονομίας (Buill et al., 2016). Το UAV είναι εξοπλισμένο με μία κάμερα υψηλής ανάλυσης για τη λήψη εναέριων φωτογραφιών, GPS και αδρανειακό σύστημα πλοήγησης το οποίο καταγράφει 3D χωρικές συντεταγμένες, καθώς και τον

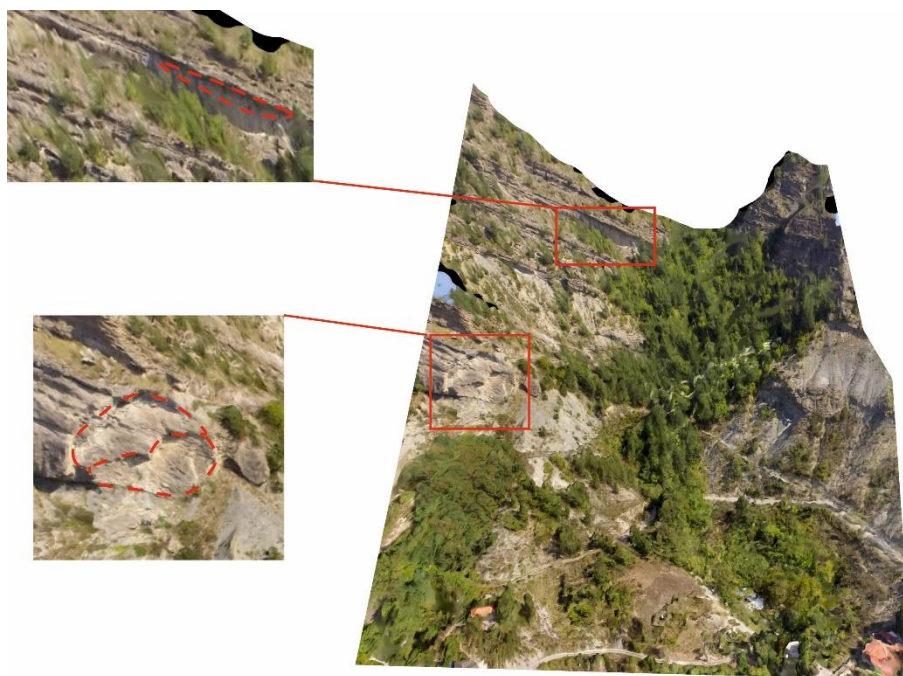
προσανατολισμό της κάμερας σε κάθε λήψη (Salvini et al., 2016). Με αυτή τη μέθοδο λαμβάνονται αεροφωτογραφίες υψηλής ευκρίνειας γεωανεφερμένες στο χώρο και ύστερα από την επεξεργασία τους με κατάλληλα λογισμικά παράγεται ένα λεπτομερές ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας DSM (Digital Surface Model), ένα νέφος σημείων (point cloud) αποτελούμενο από εκατομμύρια σημεία, καθώς και ένα τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής.

Η σάρωση του εξεταζόμενου πρανού πραγματοποιήθηκε στο ανατολικό του τμήμα καλύπτοντας περιοχή 0,51 km², όπου λήφθηκαν 131 εικόνες υψηλής ανάλυσης, οι οποίες επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Pix4Dmapper και δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του πρανού και το αντίστοιχο τρισδιάστατο point cloud, όπως επεξεργάστηκε με το λογισμικό Cloud Compare (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 Εναέρια εικόνα πεδίου ανατολικού τμήματος πρανού (επάνω) – Τμήμα τρισδιάστατου μοντέλου πρανού (κάτω αριστερά) και αντίστοιχο point cloud (κάτω δεξιά) με σάρωση UAV

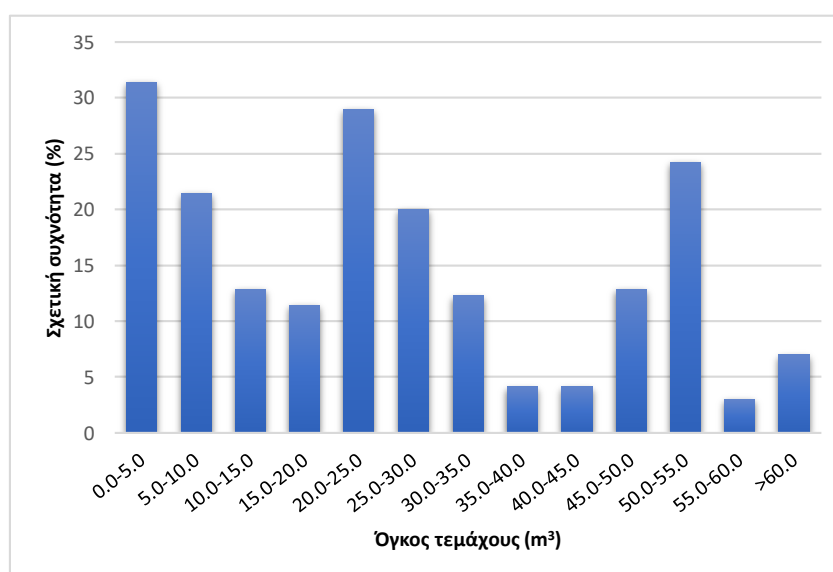
Με βάση τα παραπάνω μοντέλα αναγνωρίστηκαν σημαντικές δομές υποσκαφής κατά μήκος του πρσανούς, καθώς και περιοχές επιδεκτικές σε κατάπτωση και υπολογίστηκαν οι όγκοι βραχοτεμαχών με τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν, επισφαλών και δυνητικών προς κατάπτωση. Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 διακρίνονται κατά μήκος του πρσανούς επικρεμάμενα τεμάχια, τεμάχια επιδεκτικά σε κατάπτωση, δομές παλαιότερων καταπτώσεων, καθώς και πολυάριθμες δομές υποσκαφής. Σύμφωνα με την κατανομή των όγκων, όπως παρουσιάζεται στο σχετικό ιστόγραμμα του Σχήματος 4.10, παρατηρείται ότι τα τεμάχια κυμαίνονται μεταξύ 2.5 m^3 και 60.0 m^3 , ενώ τοπικά διακρίθηκαν μεγαλύτεροι όγκοι της τάξης των εκατοντάδων m^3 , οι οποίοι δεν κρίνονται ρεαλιστικοί, καθώς ο υπολογισμός τους πραγματοποιήθηκε αλγοριθμικά μέσω των χρησιμοποιούμενων λογισμικών. Οι συχνότερα παρατηρούμενοι όγκοι τεμαχών παλαιών αστοχιών σημειώνονται περίπου 2.5 m^3 , 10.0 m^3 , 25.0 m^3 και 55.0 m^3 , τιμές οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω για την προσομοίωση των βραχοκαταπτώσεων, καθώς συνεκτιμήθηκε μία ακραία τιμή για τους μέγιστους παρατηρούμενους όγκους τεμαχών με τιμή περίπου 100.0 m^3 . Επιπλέον, εκτιμήθηκαν οι όγκοι επικρεμάμενων τεμαχών, όπως αναγνωρίστηκαν κατά μήκος του πρσανούς, η κατανομή των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11. Παρατηρείται ότι οι επισφαλείς όγκοι κυμαίνονται μεταξύ 2.5 m^3 και 40.0 m^3 παρουσιάζοντας σχεδόν κανονική κατανομή με τους συχνότερα παρατηρούμενους όγκους τεμαχών να σημειώνονται περίπου 15.0 m^3 , ενώ παρατηρούνται μεγαλύτεροι όγκοι έως 120 m^3 , οι οποίοι δεν κρίνονται ρεαλιστικοί.



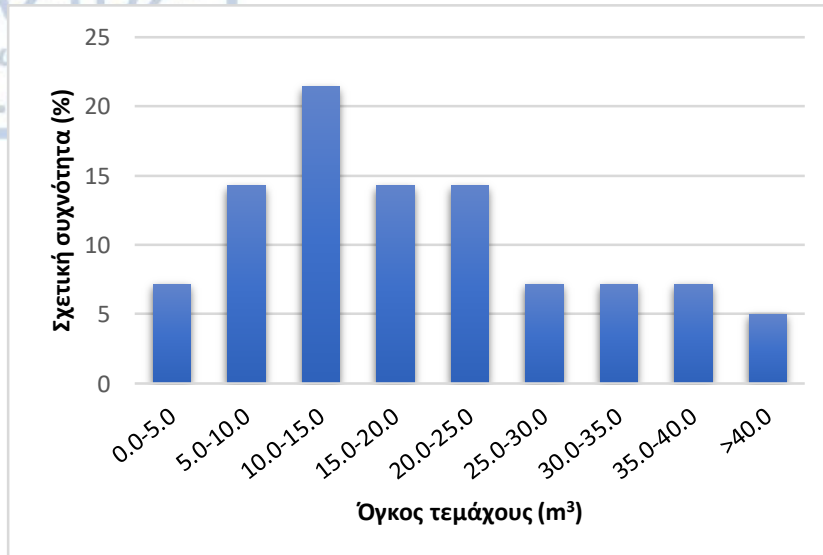
Σχήμα 4.8 Υπολογισμός όγκων βραχοτεμαχών με σάρωση UAV



Σχήμα 4.9 Παρουσίαση επικρεμάμενων τεμαχών, τεμαχών επιδεκτικών σε κατάπτωση, δομών παλαιότερων καταπτώσεων και δομών υποσκαφής, επάνω: όψη πρανούς προς ΝΔ, κάτω: όψη πρανούς προς ανατολικά.



Σχήμα 4.10 Ιστογράμμα όγκων τεμαχών παλαιών καταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς



Σχήμα 4.11 Ιστογράμμο όγκων επικρεμάμενων τεμαχών κατά μήκος του πρανούς

4.3 Μετρήσεις πεδίου

4.3.1 Μετρήσεις στοιχείων ασυνεχειών με γεωλογική πυξίδα

Για την ανάλυση έναντι βραχοκαταπτώσεων και τον προσδιορισμό των στοιχείων των βραχοτεμαχών και της τεκτονικής κατάστασης της βραχόμαζας του εξεταζόμενου πρανούς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ασυνεχειών στο πεδίο με γεωλογική πυξίδα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ανατολικό τμήμα του πρανούς σε θέσεις όπου θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές της κατάστασης των ασυνεχειών και κρίθηκαν προσβάσιμες (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12 Κύριες ασυνέχειες βραχόμαζας, όπως εντοπίστηκαν στη θέση μέτρησης στοιχείων προσανατολισμού ασυνεχειών

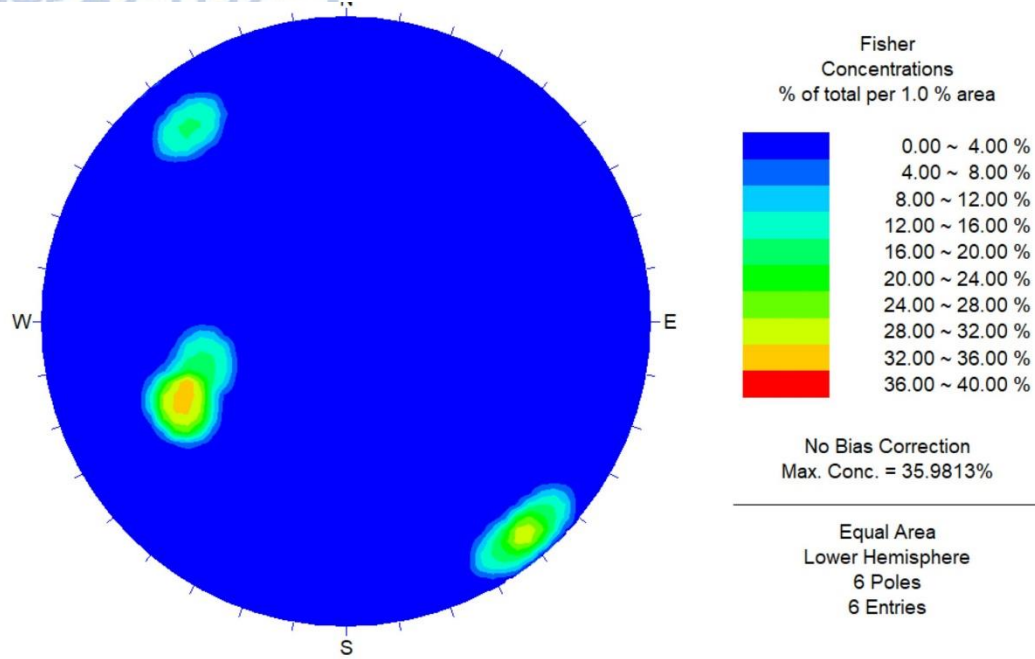
Σύμφωνα με τις μετρήσεις και τις λεπτομερείς παρατηρήσεις των σχηματισμών στο πεδίο διαπιστώθηκε πως κυριαρχούν δύο (2) οικογένειες ασυνεχειών σχηματίζοντας την παρατηρούμενη τεμαχώδη δομή της βραχώμαζας. Η πρώτη οικογένεια ασυνεχειών αντιπροσωπεύει τη στρώση (s), η οποία συνιστά την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχώμαζας και παραμένει σχεδόν σταθερή με βύθιση προς ΒΑ σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή με μέση κλίση 40° και διεύθυνση κλίσης 066°. Η δεύτερη οικογένεια ασυνεχειών (J1) αποτελείται από παρακατακόρυφες διακλάσεις με μέση απόσταση 3 m δημιουργώντας μπλοκ τεμαχών, κυρίως συμπαγών ψαμμιτών.

Επιπλέον, μέσα στους ψαμμιτικούς πάγκους παρατηρήθηκαν μικροδιακλάσεις (J2) σχεδόν παρακατακόρυφες με βύθιση προς ανατολικά, η μέτρηση των οποίων δεν κατέστη δυνατή, παρά μόνο σε μία θέση. Πρόκειται για κλειστές ασυνέχειες μικρού μήκος περίπου 60 cm χωρίς σταθερή διεύθυνση, καθώς παρουσιάζουν κυματοειδή μορφή.

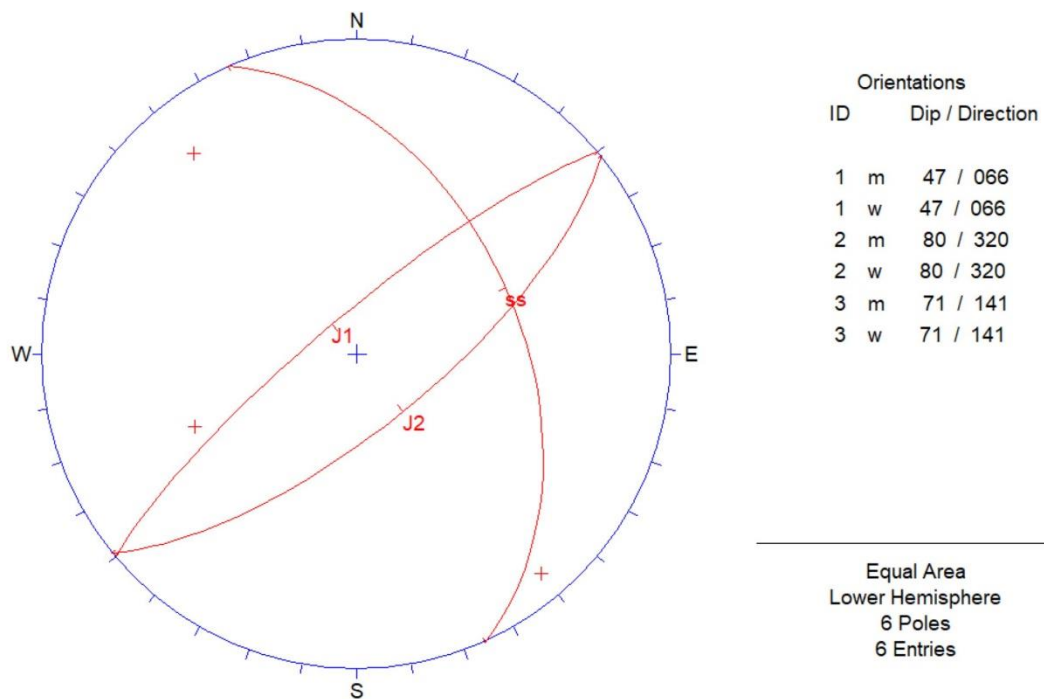
Τα τεκτονικά στοιχεία (κλίση/διεύθυνση κλίσης) των ασυνεχειών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Το διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών των τεκτονικών μετρήσεων πεδίου στην περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13, ενώ το τεκτονικό διάγραμμα των μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14, όπως επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Dips, της εταιρείας Rocscience Inc.

Πίνακας 4.1 Τεκτονικά στοιχεία μετρήσεων πεδίου

ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΚΛΙΣΗ (°)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ (°)
ΣΤΡΩΣΗ S	47	066
J1	80	320
J2	71	141



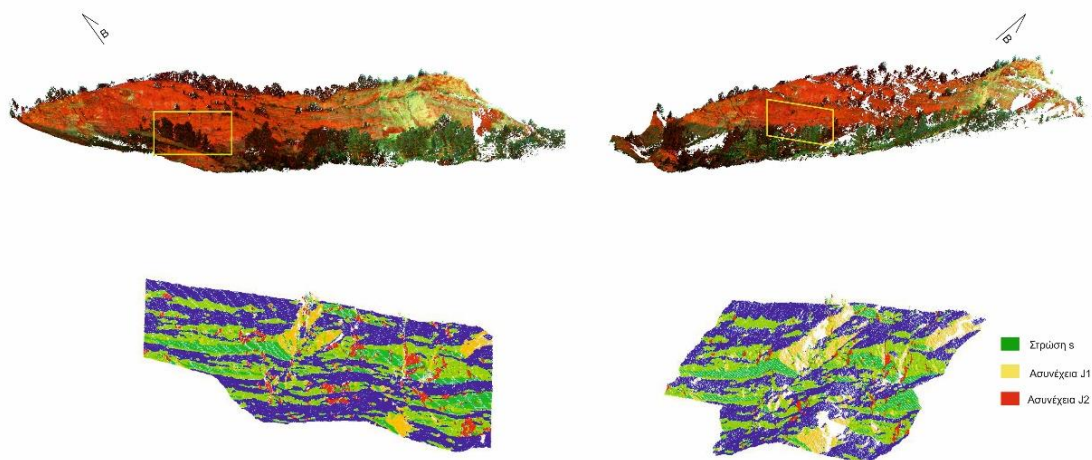
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών τεκτονικών μετρήσεων πεδίου



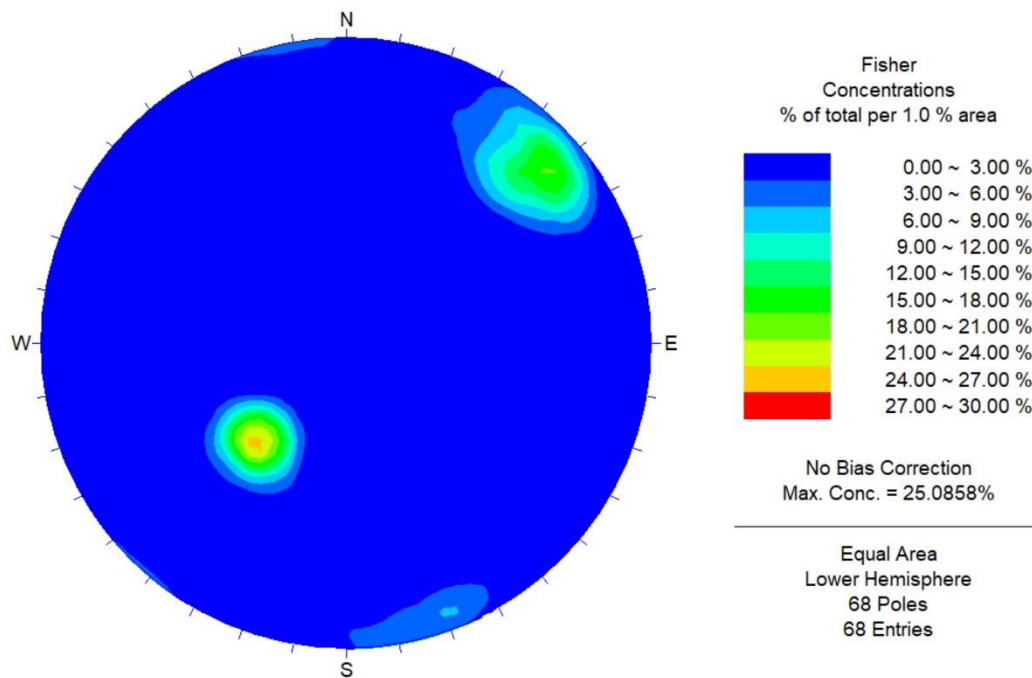
Σχήμα 4.14 Τεκτονικό διάγραμμα μετρήσεων πεδίου

4.3.2 Συσχέτιση στοιχείων ασυνεχειών από μετρήσεις πεδίου και από δεδομένα επίγειας σάρωσης LiDAR

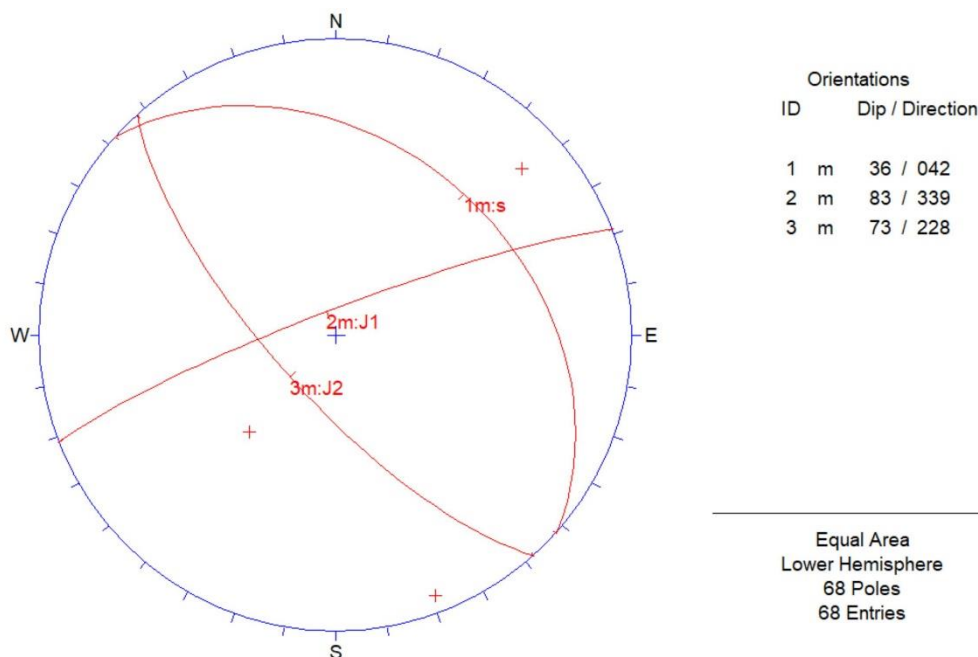
Με την επίγεια σάρωση LiDAR του μετώπου του πρανούς δημιουργήθηκε ένα πυκνό νέφος σημείων (point cloud) και αποτυπώθηκε λεπτομερώς το ανάγλυφο και η τεκτονική κατάσταση της βραχόμαζας. Πιο συγκεκριμένα, διακρίθηκαν οι κύριες ασυνέχειες της βραχόμαζας, όπως αναγνωρίστηκαν και μετρήθηκαν στο πεδίο. Από την επεξεργασία των δεδομένων με το αντίστοιχο λογισμικό Cloud Compare και με τη χρήση αντίστοιχου εργαλείου Compass, προσδιορίστηκαν τα στοιχεία προσανατολισμού (Κλίση/ Διεύθυνση κλίσης) των επιπέδων των ασυνεχειών. Για την καλύτερη επεξεργασία των στοιχείων επιλέχθηκε ένα τμήμα του πρανούς με τη μέγιστη πυκνότητα σημείων, όπου κρίθηκε αντιπροσωπευτικό της τεκτονικής κατάστασης του συνόλου της βραχόμαζας και διακρίνονται καθαρά οι επιφάνειες των ασυνεχειών, κυρίως εντός των παχυστρωματωδών ψαμμιτών του πρανούς (TE3) (Σχήμα 4.15). Το διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών των τεκτονικών μετρήσεων στην περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16, ενώ το τεκτονικό διάγραμμα των μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17, όπως επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Dips, της εταιρείας Rocscience Inc.



Σχήμα 4.15 Επιφάνειες κύριων ασυνεχειών αντιπροσωπευτικού τμήματος της βραχόμαζας, με τη χρήση του εργαλείου Compass του λογισμικού Cloud Compare



Σχήμα 4.16 Διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών τεκτονικών μετρήσεων δεδομένων LiDAR



Σχήμα 4.17 Τεκτονικό διάγραμμα μετρήσεων δεδομένων LiDAR

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις προσδιορίστηκαν τα στοιχεία προσανατολισμού των κύριων ασυνεχειών, όπως παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.2 σε σχέση με τις μετρήσεις ασυνεχειών στο πεδίο. Παρατηρείται πως η επιφάνεια της στρώσης παρουσιάζει διακυμάνσεις μεταξύ των δύο μετρήσεων στη διεύθυνση κλίσης και μικρή διαφορά στη γωνία κλίσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορά των θέσεων μέτρησης, καθώς με το επίγειο σύστημα LiDAR

προσδιορίστηκε ο ακριβής προσανατολισμός της επιφάνειας της στρώσης, ενώ οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν ανατολικότερα του πρανούς, όπου παρατηρήθηκε μεγαλύτερη κλίση της επιφάνειας, καθώς η προσέγγιση θέσης μέτρησης στο μέτωπο του πρανούς δεν κατέστη δυνατή λόγω μορφολογίας. Ωστόσο, οι διαφορές αυτές βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων, καθώς ο προσανατολισμός της στρώσης παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις εντός της σειράς Επταχωρίου. Οι μετρήσεις της κύριας παρακατακόρυφης ασυνέχειας J1, που συνιστά το κύριο σύστημα διακλάσεων της περιοχής μελέτης βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους παρουσιάζοντας ελάχιστη διαφορά στη διεύθυνση κλίσης, υποδεικνύοντας την αξιοπιστία και την ακρίβεια μέτρησης της επίγειας σάρωσης LiDAR. Τέλος, οι μετρήσεις του δεύτερου συστήματος διακλάσεων συμφωνούν στον προσδιορισμό μόνο της γωνίας κλίσης. Πρόκειται για το σύστημα μικροδιακλάσεων, οι οποίες εντοπίζονται εντός των ψαμμιτικών πάγκων, η διεύθυνση των οποίων παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις καθώς εμφανίζουν κυματοειδή μορφή, όπως επιβεβαιώθηκε από την έρευνα πεδίου.

Πίνακας 4.2 Τεκτονικά στοιχεία ασυνεχειών μετρήσεων δεδομένων LiDAR και μετρήσεων πεδίου

ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ LIDAR	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ
	ΚΛΙΣΗ (°)/ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ (°)	ΚΛΙΣΗ (°)/ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ (°)
ΣΤΡΩΣΗ S	36/ 042	47/ 066
ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ J1	83/ 339	80/ 320
ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ J2	73/ 228	71/ 141

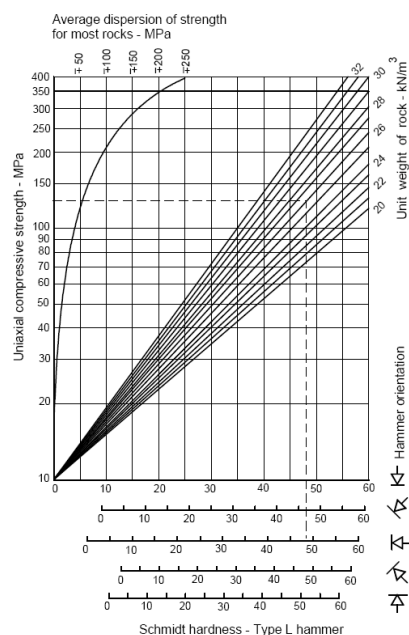
4.3.3 Δοκιμές κρουσιμέτρησης με σφύρα Schmidt

Για την εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας του πετρώματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κρουσιμέτρησης με τη χρήση της σφύρας Schmidt σε επιφάνειες ιλυολίθων και ψαμμιτών. Η χρήση της σφύρας Schmidt αποτελεί μία γρήγορη και οικονομική μέθοδο για την εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας του εξεταζόμενου βράχου προσφέροντας αρκετά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι μικρές απαιτήσεις σε εξοπλισμό και η άμεση λήψη αποτελεσμάτων. Εντούτοις, η εκτίμηση της σκληρότητας αφορά μόνο την επιφανειακή ζώνη του πετρώματος με περιορισμένο βάθος επιρροής, περίπου 2 – 3 cm (Αστερίου, 2016). Επιπλέον, οι μετρήσεις είναι ευαίσθητες στη μεταβολή της υγρασίας και της αποσάθρωσης, καθώς δοκιμές έδειξαν ότι οι παραμικρές αλλαγές στο βαθμό αποσάθρωσης του βράχου μειώνουν αντίστοιχα τις τιμές αναπήδησης της σφύρας (Aydin & Basu, 2005).

Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κρουσιμέτρησης με σφύρα Schmidt σε δύο θέσεις στο ανατολικό τμήμα του πρανούς σε ελεύθερες επιφάνειες υγιών και αποσαθρωμένων ιλυολιθικών και ψαμμιτικών στρωμάτων (Σχήμα 4.18). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη σφύρα είτε κάθετη στην επιφάνεια του πετρώματος είτε υπό κλίση από κάτω. Από τις τιμές αναπήδησης, όπως προέκυψαν από τη σφύρα Schmidt προσδιορίστηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS (MPa) σύμφωνα με το ειδικό βάρος του πετρώματος, το οποίο θεωρήθηκε 21 και 26 kN/m³ για τον ιλυόλιθο και τον ψαμμίτη αντίστοιχα (Σχήμα 4.19). Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.18 Θέσεις μέτρησης με τη σφύρα Schmidt σε ιλυολιθικούς και ψαμμιτικούς οριζόντες



Σχήμα 4.19 Συσχέτιση τιμών αναπήδησης σφύρας Schmidt και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS (MPa) σύμφωνα με το ειδικό βάρος του πετρώματος (kN/m³) (Deere & Miller, 1966)

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα δοκιμών κρουσιμέτρησης στου σχηματισμούς της περιοχής μελέτης

ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΤΙΜΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ ΣΦΥΡΑΣ SCHMIDT (-)	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ UCS (MPa)
ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	21	30
ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	24	52
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	32	66

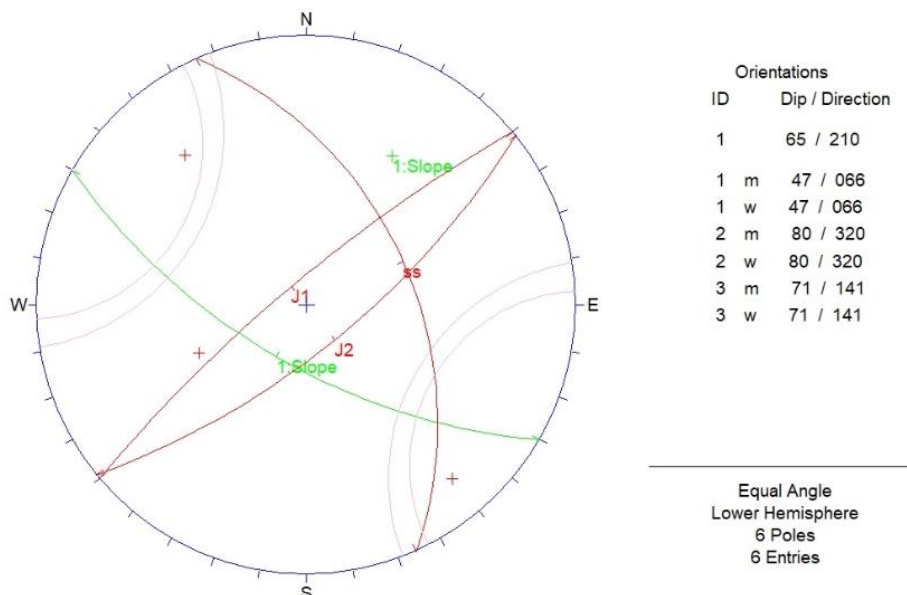
4.4 Μηχανισμός κατάπτωσης βραχοτεμαχών

Βάσει λεπτομερών παρατηρήσεων πεδίου και σύμφωνα με τα τελευταία καταγεγραμμένα γεγονότα βραχοκαταπτώσεων, κρίνεται ότι το σχήμα των αποκολλημένων ψαμμιτικών τεμαχών και των δυνητικών προς κατάπτωση, ορίζεται ως ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με τοπικά αποστρογγυλεμένες άκρες έως πολύγωνο (Σχήμα 4.20). Τα αποκολλημένα τεμάχη, όπως εντοπίζονται στη βάση του πρανούς, συνιστούν το αποτέλεσμα απόσπασης από μεγαλύτερα αρχικά τεμάχη που αποκολλήθηκαν από το πρανές και διαμόρφωσαν το τελικό τους παρατηρούμενο σχήμα έπειτα από αναπήδηση, κύλιση και ολίσθηση, συμπαρασύροντας μικρότερα τεμάχη από τον πόδα του απότομου πρανούς.



Σχήμα 4.20 Τυπικές δομές αποκολλημένων ψαμμιτικών όγκων

Στο εξεταζόμενο πρανές κύριο μηχανισμό αστοχίας αποτελεί η ανατροπή βραχοτεμαχών συμπαγών ψαμμιτών κατά μήκος της επιφάνειας της στρώσης, η οποία ελέγχεται από τα συστήματα παρακατακόρυφων διακλάσεων της βραχόμαζας (Σχήμα 4.21).



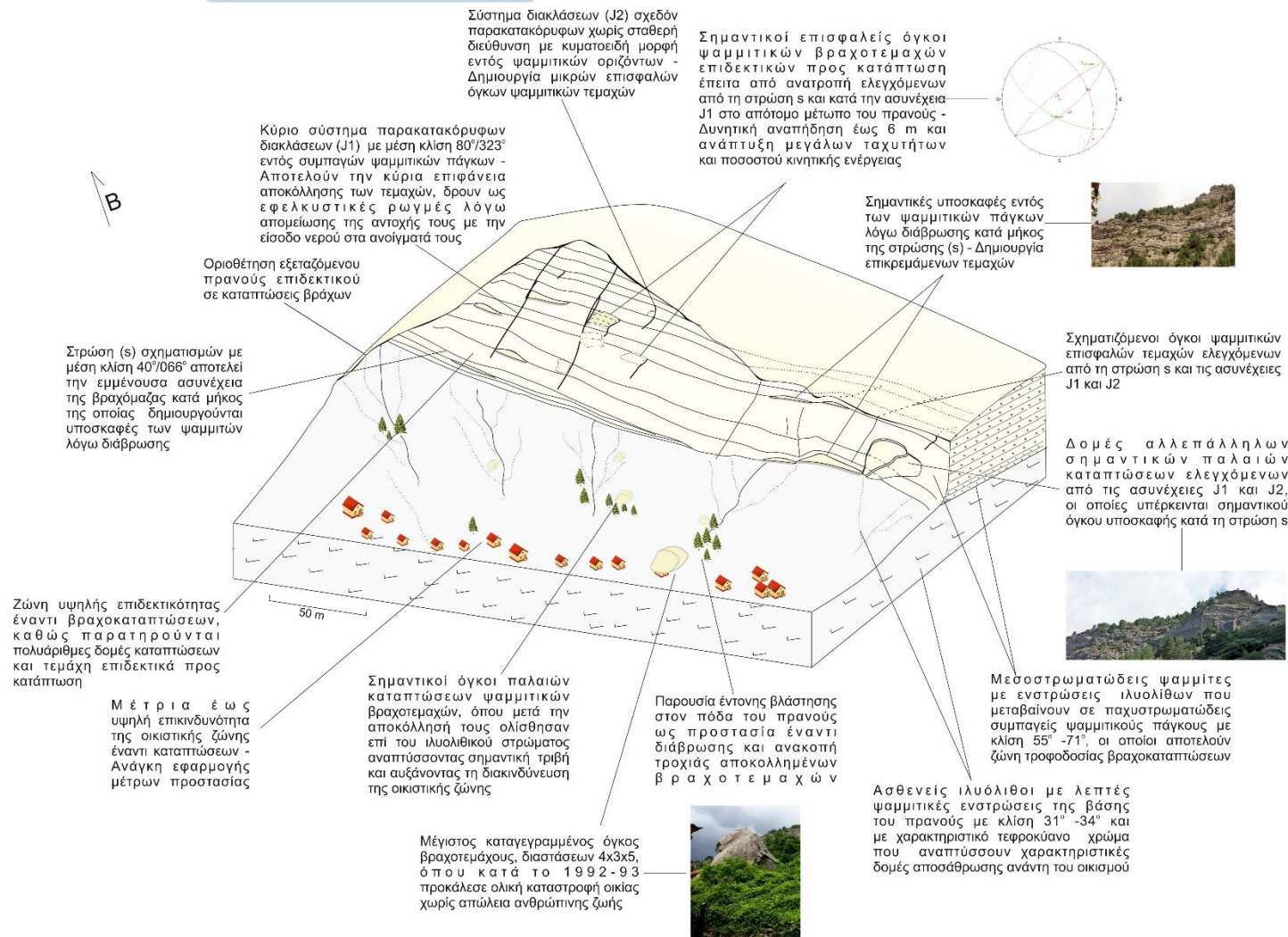
Σχήμα 4.21 Κινηματική ανάλυση έναντι ανατροπής στο εξεταζόμενο πρανές.

Κύρια επιφάνεια αποκόλλησης κρίνεται ότι αποτελεί το σύστημα των παρακατακόρυφων ασυνεχειών κατά μήκος του πρανούς, όπως εντοπίζονται κυρίως εντός των παχυστρωματωδών ψαμμιτών (TE3). Οι ασυνέχειες αυτές εντοπίζονται ανοιχτές με άνοιγμα 4 – 5 cm έως τοπικά 10 cm, συμβάλλοντας στην αποτόνωση της βραχόμαζας και την αποσυμπίεσή της στην επιφάνεια. Κατά μήκος των ασυνεχειών αυτών χάνεται η επαφή με το μητρικό πέτρωμα και προκαλείται αποκόλληση τμήματος της βραχόμαζας. Σημαντικό ρόλο στη διεύρυνση των ασυνεχειών αυτών καταλαμβάνει το νερό που δέχεται το μέτωπο του πρανούς από τις έντονες βροχοπτώσεις της περιοχής, όπως αναλύθηκε στην αντίστοιχη Ενότητα 2.3.2. Με αυτόν τον τρόπο οι ασυνέχειες διευρύνονται τοπικά, δημιουργώντας σημαντικές ζώνες αστάθειας με υψηλή επιδεκτικότητα σε καταπτώσεις συμπαγών ψαμμιτικών τεμαχών. Ωστόσο, λόγω της απουσίας αρχείου καταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς, δε δύναται η συσχέτιση φαινομένων καταπτώσεων με περιόδους υψηλής βροχόπτωσης στην περιοχή έρευνας. Συνεπώς, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, γίνεται η παραδοχή ότι τα φαινόμενα καταπτώσεων βράχων πραγματοποιήθηκαν χωρίς την άμεση δράση του επιφανειακού και υπόγειου νερού, καθώς δε δύναται η συσχέτιση των φαινομένων καταπτώσεων με περιόδους έντονης βροχόπτωσης, λόγω έλλειψης καταγεγραμμένων γεγονότων. Η δράση του νερού κυριάρχησε ως

παράγοντας αποτόνωσης και απομείωσης της συνοχής και, κατ' επέκταση, της αντοχής της βραχώμαζας δημιουργώντας οριακά ασταθείς συνθήκες. Κατά την αποτόνωση του πετρώματος και στην οριακή συνθήκη αποκόλλησης τεμάχους σημαντική επιφάνεια αποκόλλησης συνιστούν οι δευτερεύουσες τοπικές ασυνέχειες της βραχώμαζας κατά μήκος των οποίων διαμορφώνονται μικρότερα τεμάχια.

Επιπλέον, σημαντική παράμετρο έναντι αστάθειας του μετώπου του πρανούς αποτελούν οι δομές υποσκαφής κατά μήκος της επιφάνειας της στρώσης λόγω διάβρωσης των υποκείμενων ιλυολιθικών ή ψαμμιτικών, όπως εντοπίζονται εντός των παχυστρωματωδών ψαμμιτών (TE3) και των εναλλαγών ψαμμιτών με ιλυολίθους (TE2 και TE5), δημιουργώντας σημαντικές ζώνες αστάθειας. Ο μεγάλος αριθμός τέτοιων δομών υποσκαφής αυξάνει την επιδεκτικότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων από το μέτωπο του πρανούς.

Ο παραπάνω μηχανισμός αστοχίας αποδίδεται λεπτομερώς σχηματικά στο παρακάτω μοντέλο προσομοίωσης των συνθηκών αστοχίας της περιοχής μελέτης (conceptual model) (Σχήμα 4.21)



Σχήμα 4.22 Μοντέλο προσομοίωσης των συνθηκών αστοχίας της περιοχής μελέτης (conceptual model)

5. Ανάλυση και προσομοίωση βραχοκαταπτώσεων

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση των βραχοκαταπτώσεων και αναπτύσσεται το μοντέλο προσομοίωσης με τη χρήση του προγράμματος RAMMS:: Rockfall. Εξετάζονται όλες οι δυνητικές τροχιές των βραχοτεμαχίων κατά μήκος του πρανούς και εκτιμώνται οι παράμετροι της κίνησης. Επιπλέον, αναλύονται οι δυσμενέστερες τροχιές σε κάθε τομέα του πρανούς και αξιολογούνται οι εκτιμώμενες παράμετροι σύμφωνα με εμπειρικούς συντελεστές αναπήδησης.

5.2 Μεθοδολογία

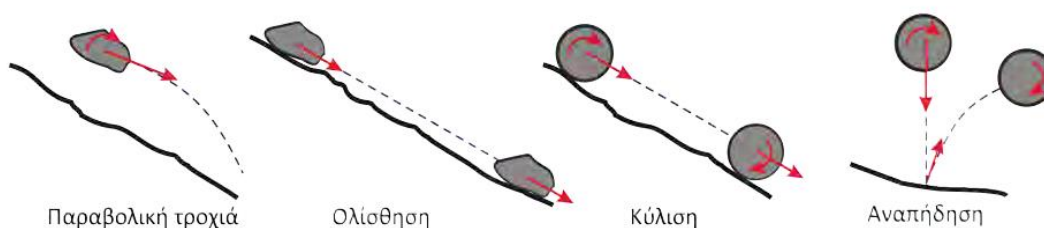
5.2.1 RAMMS:: Rockfall

Η ανάλυση και η προσομοίωση των βραχοκαταπτώσεων του εξεταζόμενου πρανούς πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation) και συγκεκριμένα με το πρόγραμμα RAMMS:: Rockfall. Το λογισμικό αυτό συνιστά ένα χρήσιμο εργαλείο για την αριθμητική ανάλυση καταπτώσεων τεμαχίων και την προσομοίωση της τροχιάς κάθε μεμονωμένου τεμάχους σε τρισδιάστατο έδαφος (Leine, et al., 2013) από το σημείο απελευθέρωσής του από το μητρικό πέτρωμα, εστιάζοντας στο διαφορετικό σχήμα των τεμαχίων. Κάθε τέμαχος θεωρείται και διαμορφώνεται ως ένα πολυεδρικό άκαμπτο σώμα (rigid body), το οποίο κατά την πρόσκρουσή του σε μία ψηφιδωτή επιφάνεια αναπτύσσει τριβή (Christen, et al., 2012). Το λογισμικό RAMMS αναπτύχθηκε στο Κέντρο Μηχανικής (Institute for Mechanical Systems, ETH Zurich) σε συνεργασία με και την ομάδα προγράμματος RAMMS του Ινστιτούτου WSL για την έρευνα χιονοστιβάδων SLF (WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, SLF/WSL, <https://www.wsl.ch/en.html>).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των καταπτώσεων με το RAMMS:: Rockfall διακρίνονται από υψηλή ακρίβεια για την επίτευξη της οποίας απαιτούνται ακριβή και λεπτομερή δεδομένα εισαγωγής, για παράδειγμα το σχήμα του τεμάχους και η ακριβής θέση του σημείου απελευθέρωσής του, όπως αναλύεται στη συνέχεια. Η προσομοίωση και η κατασκευή των μοντέλων αστοχίας βασίζεται στην ανάλυση και στην ευκρίνεια των δεδομένων (κυρίως των τοπογραφικών δεδομένων), καθώς και στην ακριβή παραμετροποίηση των ζωνών τροφοδοσίας και της επιφάνειας του εδάφους. Συνεπώς, τα δεδομένα από λεπτομερείς παρατηρήσεις πεδίου και τα δεδομένα παλαιότερων καταπτώσεων είναι απαραίτητα για τη βαθμονόμηση παραμέτρων του μοντέλου, προκειμένου να βελτιωθούν τα αποτελέσματα προσομοίωσης (Vo, 2015).

5.2.2 Κινήσεις τεμαχών

Τα τεμάχια μετά την αποκόλλησή τους από το πρανές βρίσκονται στον αέρα και διαγράφουν παραβολική τροχιά (Σχήμα 5.1), η οποία ελέγχεται από τη βαρύτητα και περιγράφεται επαρκώς από τις εξισώσεις κίνησης. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση λειτουργεί και το RAMMS:: Rockfall, καθώς θεωρεί το αποκολλημένο τέμαχος σε ελεύθερη πτώση και εισάγει αργότερα τις δυνάμεις τριβής. Η κίνηση του τεμάχους είναι ομαλά επιταχυνόμενη κατά τον άξονα y και ευθύγραμμη ομαλή κατά τον άξονα x (Αστερίου, 2016). Η κίνηση του τεμάχους διέπεται επίσης από τη βαρυτική δύναμη, η οποία ενεργεί παγκοσμίως και ως οπισθέλκουσα δύναμη (drag force), η οποία αναπτύσσεται από την αντίσταση εξαιτίας του αέρα και επηρεάζει ανεπαίσθητα την κίνηση, καθώς και από γυροσκοπικές δυνάμεις, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν την περιστροφή γύρω από έναν άξονα κύλισης των πετρωμάτων ακανόνιστου σχήματος.



Σχήμα 5.1. Τύποι κίνησης τεμαχών κατά τις καταπτώσεις (Αστερίου, 2016)

Στη συνέχεια τα τεμάχια ολισθαίνουν κατά μήκος του πρανούς, με το οποίο βρίσκονται σε συνεχή επαφή. Αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής, οι οποίες δρουν σε σημεία της επιφάνειας του τεμάχους που έρχονται σε επαφή με το έδαφος. Οι δυνάμεις αυτές ενεργούν σε ένα σημείο πάνω στην επιφάνεια του βραχώδους τεμάχους δημιουργώντας ροπές που προκαλούν περιστροφικές κινήσεις (RAMMS::ROCKFALL User Manual). Με αυτόν τον τρόπο η ολίσθηση του τεμάχους μετατρέπεται σταδιακά σε κύλιση, κατά την οποία τα σημεία της περιφέρειας του τεμάχους περιστρέφονται όντας σε συνεχή επαφή με το πρανές (Αστερίου, 2016). Ο προσδιορισμός των δυνάμεων τριβής πραγματοποιείται σύμφωνα με το νόμο Coulomb, καθορίζοντας το συντελεστή τριβής μ , ο οποίος εξαρτάται από το υλικό του τεμάχους. Το RAMMS:: Rockfall καθορίζει τις τιμές του συντελεστή τριβής σύμφωνα με την επιφάνεια του εδάφους, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Το βραχώδες τέμαχος μετά την αποκόλλησή του από το πρανές δύναται να προσκρούσει σε μία επιφάνεια του πρανούς και να πραγματοποιήσει αναπήδηση ξεκινώντας εκ νέου παραβολική τροχιά. Η ανάλυση της τροχιάς αναπήδησης πραγματοποιείται με τη χρήση συντελεστών αναπήδησης, οι οποίοι γενικά ορίζονται ως ο λόγος των σχετικών ταχυτήτων μετά και πριν την κρούση του τεμάχους στο πρανές (Αστερίου, 2016). Στο RAMMS :: Rockfall η αναπήδηση πραγματοποιείται όταν η τριβή που εξαρτάται από την ολίσθηση φθάνει τις μέγιστες τιμές της. Κάθε τύπος επιφάνειας εδάφους διαθέτει ελάχιστη και μέγιστη τριβή που εξαρτάται από

την ολίσθηση (Πίνακας 5.1). Η παράμετρος K (σταθερά αναλογικότητας τριβής ολίσθησης) ελέγχει το ρυθμό αύξησης της τριβής από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή του, ενώ η παράμετρος β ελέγχει το ρυθμό αύξησης απελευθέρωσης της τριβής καθώς ο βράχος αναχωρεί από το έδαφος. Η παράμετρος β συνδέεται με το βάθος διείσδυσης του βράχου μέσα στο έδαφος, καθώς μικρές τιμές β αντιστοιχούν σε μεγάλα βάθη διείσδυσης, τα οποία συνδέονται με μαλακά υλικά. Εάν το β παίρνει μεγάλες τιμές η τριβή αφαιρείται αμέσως καθώς το τέμαχος απομακρύνεται από το έδαφος, ενώ αντίθετα παίρνει μικρές τιμές, η τριβή δύναται να δράσει ακόμα και όταν το τέμαχος δε βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος (Vo, 2015).

Πίνακας 5.1 Τύποι εδάφους και τιμές φυσικών παραμέτρων στο RAMMS:: Rockfall (RAMMS::ROCKFALL User Manual)

Τύπος εδάφους (Terrain)	μ_{min}	μ_{max}	β	K
Extra Soft	0.2	2	50	1
Soft	0.25	2	100	1.25
Medium Soft	0.3	2	125	1.5
Medium	0.35	2	150	2
Medium Hard	0.4	2	175	2.5
Hard	0.55	2	185	3
Extra Hard	0.8	2	200	4
Snow	0.1	0.35	150	2

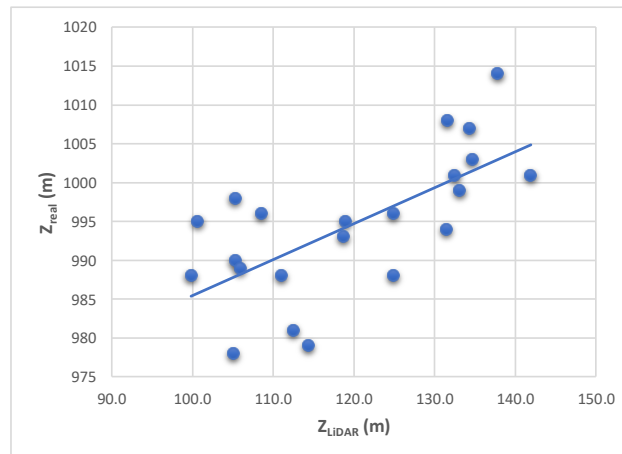
5.3 Δεδομένα εισαγωγής

5.3.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM)

Το βασικότερο στοιχείο εισαγωγής για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους αποτελεί το Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM), το οποίο αποτυπώνει λεπτομερώς το ανάγλυφο της περιοχής. Για την ανάλυση των βραχοκαταπτώσεων στο RAMMS:: Rockfall στην εξεταζόμενη περιοχή δημιουργήθηκε ένα λεπτομερές και ακριβές μοντέλο εδάφους από τα δεδομένα της επίγειας σάρωσης του πρσανούς με LiDAR. Πραγματοποιήθηκε γεωαναφορά του μοντέλου στο χώρο με το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων UTM, WGS84/34N. Στη συνέχεια για κάθε ζεύγος συντεταγμένων (x , y) στα δεδομένα point cloud προσδιορίστηκε το αντίστοιχο υψόμετρο και έγινε αναγωγή της τιμής αυτής στο πραγματικό υψόμετρο του μετρούμενου σημείου σύμφωνα με δεδομένα GPS. Πιο αναλυτικά, διακρίθηκαν 26 σημεία και βάσει αυτών πραγματοποιήθηκε συσχέτιση

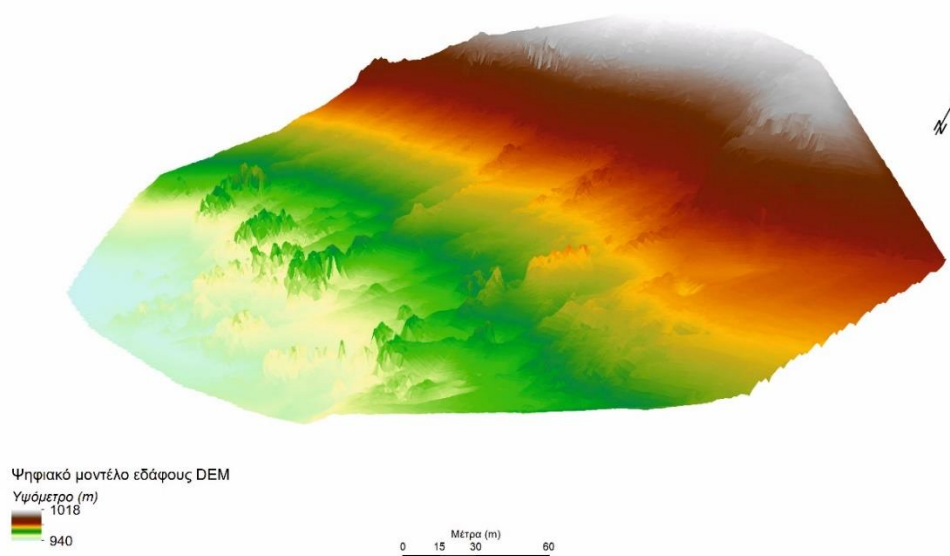
των τιμών (Σχήμα 5.2) με το ελάχιστο δυνατό στατιστικό σφάλμα μεταξύ των υψομέτρων όπως λήφθηκαν από το σύστημα αναφοράς του LiDAR και των πραγματικών υψομέτρων από GPS και η σχέση τους εκφράζεται με την παρακάτω Σχέση 5.1. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίστηκε ο άξονας z των υψομέτρων του μοντέλου αποδίδοντας την υψομετρική διαβάθμιση του πρανούς.

$$Z_{real} = 0.46 \cdot Z_{LiDAR} + 939.17 \quad 5.1$$



Σχήμα 5.2 Συσχέτιση τιμών υψομέτρου όπως υπολογίστηκε από τη σάρωση LiDAR και των πραγματικών υψομέτρων μεταξύ 26 σημείων κατά μήκος του μετώπου του πρανούς

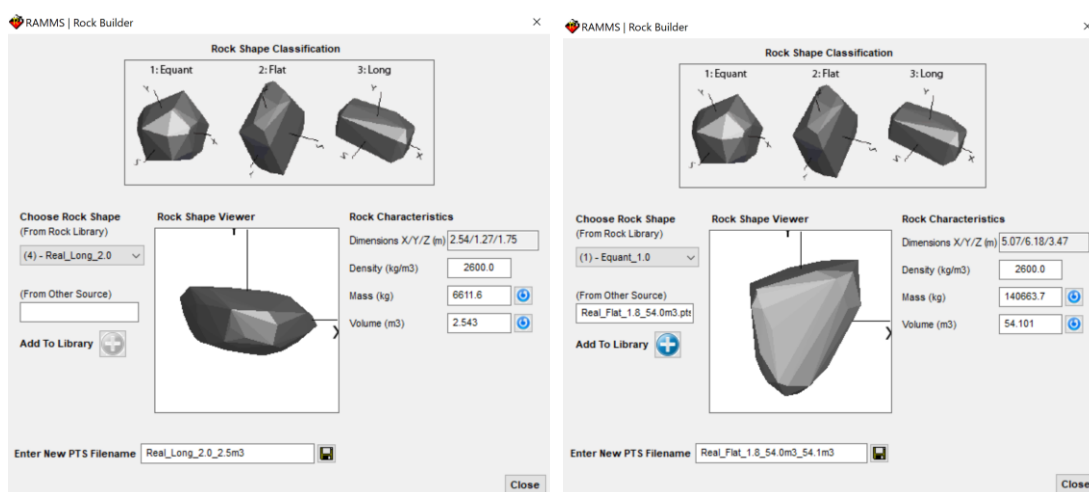
Το παραγόμενο DEM (Σχήμα 5.3) δημιουργήθηκε με ανάλυση 0.5 m και με υψόμετρο που κυμαίνεται από 940 m έως 1018 m, αποτυπώνοντας με μεγάλη ακρίβεια και υψηλή ανάλυση το ανάγλυφο του πρανούς και σημαντικές δομές, όπως ρέματα και τεκτονικές δομές.



Σχήμα 5.3 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) περιοχής μελέτης από δεδομένα LiDAR

5.3.2 Στοιχεία τεμαχών

Το RAMMS:: Rockfall προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να καθορίσει τα τεμάχη προσομοιώνοντάς τα με τις πραγματικές τους διαστάσεις. Μέσω της βιβλιοθήκης Rock Builder του προγράμματος χρησιμοποιώντας τρία (3) βασικά σχήματα διαμορφώθηκαν τα τεμάχη τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, έγινε επιλογή του καταλληλότερου σχήματος των τεμαχών σύμφωνα με εκτιμήσεις και λεπτομερείς παρατηρήσεις πεδίου των αποκολλημένων τεμαχών της περιοχής, το οποίο ορίζεται ως "Long". Επιπλέον, μέσω του προγράμματος πραγματοποιείται υπολογισμός της μάζας του τεμάχους σύμφωνα με την πυκνότητα του σχηματισμού, η οποία ορίστηκε 2600 kg/m^3 , καθώς πρόκειται για τεμάχη ψαμμιτών και εισήχθηκε ο όγκος του τεμάχους, όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 5.2.2. Στο παρακάτω Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται τα στοιχεία δύο (2) αντιπροσωπευτικών βραχοτεμαχών



Σχήμα 5.4 Διαστασιολόγηση αντιπροσωπευτικών βραχοτεμαχών μέσω της βιβλιοθήκης Rock Builder στο RAMMS:: Rockfall

5.3.3 Τύπος υλικού εδάφους

Κατά την πρόσκρουση του αποκολλημένου τεμάχους στην επιφάνεια του πρανού πραγματοποιείται αναπήδηση του τεμάχους και απορρόφηση ενέργειας, η οποία εξαρτάται από το υλικό του εδάφους με το οποίο έρχεται σε επαφή το τέμαχος. Το RAMMS:: Rockfall διακρίνει οκτώ (8) τύπους εδαφών, από πολύ μαλακό έως πολύ σκληρό και τους ομαδοποιεί με αντίστοιχες παραμέτρους (Πίνακας 5.1). Στην περιοχή μελέτης το υλικό του εδάφους διακρίθηκε σε δύο κατηγορίες, μέτρια σκληρό (medium hard) και σκληρό (hard), σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 5.2. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν με κατάλληλα πολύγωνα περιοχές για κάθε τύπο εδάφους στην περιοχή μελέτης και επιλέχθηκε το επίπεδο σκληρότητας κάθε περιοχής.

Πίνακας 5.2 Τύποι εδαφών στο RAMMS:: Rockfall (RAMMS::ROCKFALL User Manual)

Category	Picture	Description	Example	Category	Picture	Description	Example
Extra Soft		Very wet ground. Cannot cross without deep sink-in. No high vegetation.	Moor, turf, gley	Medium Hard		Penetration depths are small. Ground is flat. Rocky debris is present. Shallow surface soil. Usually little (initial) vegetation.	Non-paved mountain roads, mountain meadow, pebble
Soft		Soft ground with many deep soil layers. Ground contains no large rock fragments. Often very moist. Foot inundations remain and are visible. Wet and deep surface soil.	Moist meadow	Hard		Rocks jump over ground. Mixture of large and small rocks. Usually without any vegetation.	Rock scree, pebble, coarse rock, paved roads
Medium Soft		Rocks penetrate meadow surface leaving impact scars. Soil is deep, few rock fragments. Rank vegetation.	Meadow	Extra Hard		Ground is very hard and is marginally deformed by rocks. No vegetation and no surface soil.	Bedrock, cliff
Medium		Meadow is deep, but contains rock fragments. The meadow can be covered with vegetation. Soil structure of a medium deepness. Rank vegetation.	Meadow	Snow		Rocks slide on snow surface.	Snow

5.3.4 Δασικές περιοχές

Η παρουσία βλάστησης και δασικής έκτασης έχει σημαντικό αντίκτυπο στη ζώνη επίδρασης της κατάπτωσης, καθώς και στην ταχύτητα του τεμάχους. Το RAMMS:: Rockfall διακρίνει τρεις (3) τύπους δασικών περιοχών (Πίνακας 5.3), ανάλογα με την έκταση που καταλαμβάνουν, είτε σε τετραγωνικά μέτρα (m^2) είτε σε εκτάρια (ha), όπου $1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$.

Πίνακας 5.3 Τύποι δασικών περιοχών στο RAMMS:: Rockfall ανάλογα με την έκτασή τους (RAMMS::ROCKFALL User Manual)

Τύποι δασικών περιοχών	Έκταση (m^2 / ha)
Open Forest	20
Medium Forest	35
Dense Forest	50



Στην περιοχή μελέτης οι περιοχές φυτοκάλυψης είναι ελάχιστες και εντοπίζονται κυρίως στον πόδα του πρανούς εντός των αποσαθρωμένων ιλυολίθων. Οι περιοχές αυτές ανήκουν στην κατηγορία «Open Forest» και προσδιορίστηκαν με κατάλληλα πολύγωνα κατά μήκος του πρανούς.

5.3.5 Ζώνες τροφοδοσίας

Κατά μήκος του βραχώδους πρανούς διακρίθηκαν ζώνες τροφοδοσίας υλικού κατάπτωσης και σημεία απελευθέρωσης τεμαχών. Το RAMMS:: Rockfall δίνει τη δυνατότητα επιλογής σημείου απελευθέρωσης ορίζοντάς το ως σημείο, γραμμή ή περιοχή. Στο εξεταζόμενο πρανές ορίστηκαν περιοχές μέσα στις ζώνες τροφοδοσίας του πρανούς οι οποίες εντοπίζονται εντός των παχυστρωματωδών ψαμμιτών, των αποσαθρωμένων ψαμμιτών και των μεσοστρωματωδών ψαμμιτών με εναλλαγές ιλυολίθων, TE3, TE4 και TE5, αντίστοιχα.

Συνοπτικά, τα δεδομένα εισαγωγής στο RAMMS:: Rockfall για την ανάλυση των βραχοκαταπτώσεων στο εξεταζόμενο πρανές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.4 .

Πίνακας 5.4 Δεδομένα εισαγωγής στο RAMMS:: Rockfall για την ανάλυση βραχοκαταπτώσεων

ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ (DEM)	Ανάλυση 0.5 m Δημιουργία από δεδομένα LiDAR
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΜΑΧΩΝ	Σχήμα: Long Όγκοι: 2.5 m ³ 10.0 m ³ 26.0 m ³ 54.0 m ³
ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	Συνολικά: Medium hard - Hard Ψαμμίτης: Hard Ιλυόλιθος: Medium hard
ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	Καθόλου βλάστηση έως Open forest
ΖΩΝΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ	Γραμμικές ζώνες κατά μήκος της στρώσης και επιφανειών αποκόλλησης

5.4 Αποτελέσματα ανάλυσης βραχοκαταπτώσεων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της αστοχίας πραγματοποιήθηκε βάσει των τριών (3) Τομέων, όπως διακρίθηκαν ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας στο Κεφάλαιο 3.2. Σε κάθε Τομέα πραγματοποιήθηκε ανάλυση της βραχοκατάπτωσης και παραμετροποιήθηκαν ανάλογα όλα τα χαρακτηριστικά του πρσανούς και οι παράγοντες που διέπουν την ενεργοποίηση της αστοχίας, καθώς εκτιμήθηκε ο όγκος και το σχήμα των επισφαλών τεμαχών και των τεμαχών επιδεκτικών σε κατάπτωση. Συνοπτικά οι παράμετροι της ανάλυσης της αστοχίας σε κάθε Τομέα του εξεταζόμενου πρσανούς οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της αστοχίας στο RAMMS:: Rockfall παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.5 .

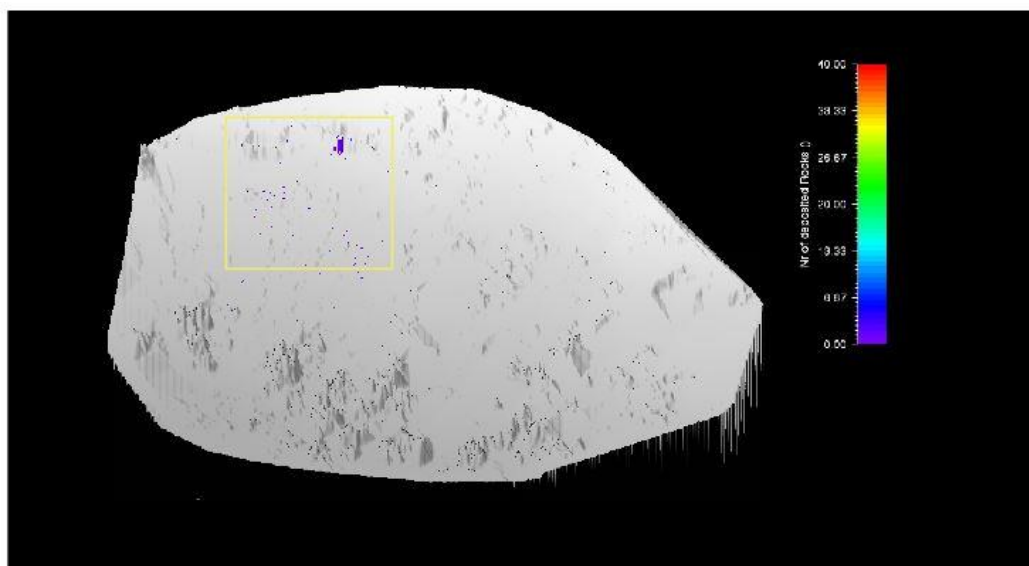
Πίνακας 5.5 Δεδομένα εισαγωγής στο RAMMS:: Rockfall για την ανάλυση βραχοκαταπτώσεων σε κάθε Τομέα του εξεταζόμενου πρσανούς

ΤΟΜΕΑΣ	ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΒΛΑΣΤΗΣΗ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΜΑΧΩΝ
1	Συνολικά: Hard Ψαμμίτης: Hard Ιλυόλιθος: Medium hard	Καθόλου	Σχήμα: Long Όγκοι: 2.5 m ³ 10.0 m ³ 26.0 m ³ 54.0 m ³
2	Συνολικά: Hard Ψαμμίτης: Hard Ιλυόλιθος: Medium hard	Open forest	Σχήμα: Long Όγκοι: 2.5 m ³ 10.0 m ³ 26.0 m ³
3	Συνολικά: Medium Hard	Καθόλου	Σχήμα: Long Όγκοι: 10.0 m ³ 26.0 m ³ 54.0 m ³

5.4.1 Τομέας 1

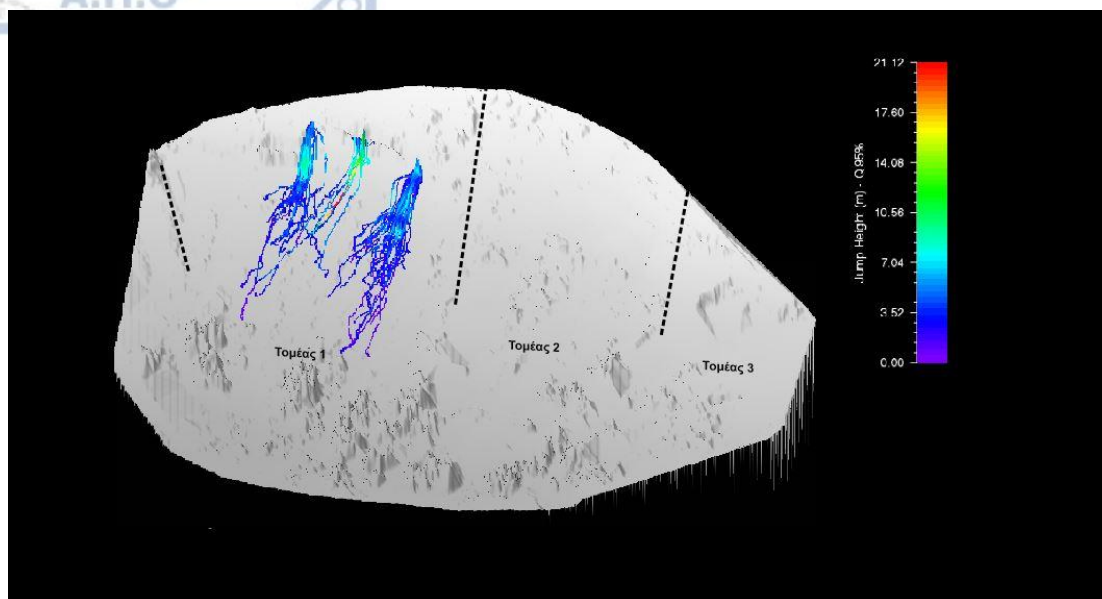
Για την ανάλυση της αστοχίας στον Τομέα 1 του εξεταζόμενου πρσανούς χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Οι παραπάνω τιμές εκτιμήθηκαν και αποδόθηκαν σύμφωνα με λεπτομερείς παρατηρήσεις πεδίου. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις (4) τιμές όγκων βραχοτεμαχών όπως διακρίθηκαν σε θέσεις παλαιότερων αστοχιών, όπου τα τεμάχη όγκου 2.5 m³ χαρακτηρίζουν τις κυρίαρχες δομές υποσκαφής του ψαμμίτη, τα τεμάχη όγκων 10 m³ και 26 m³ συνιστούν τα αντιπροσωπευτικά τεμάχη παλαιών καταπτώσεων και τα τεμάχη όγκου 54 m³ αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο παρατηρούμενο

αποκολλημένο τέμαχος. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι η περιοχή στερείται βλάστησης για την εκτίμηση των δυσμενέστερων συνθηκών αστοχίας. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και ορίζοντας τη ζώνη τροφοδοσίας καταπτώσεων ως γραμμή ακολουθώντας τη στρώση των σχηματισμών και τις δομές παρατηρούμενων αστοχιών δημιουργήθηκαν όλες οι δυνητικές τροχιές των βραχοτεμαχών στο RAMMS:: Rockfall (Σχήμα 5.6), οι οποίες ανέρχονται στις 160. Παρατηρείται ότι τα τεμάχη αποκολλούνται από ένα μέσο ύψος 1000 m και διανύουν απόσταση περίπου 40 m έως τα μέσα του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης του πρανούς, καθώς πιθανώς ανακόπτεται η πορεία τους λόγω της παρουσίας έντονα αποσαθρωμένου ιλυόλιθου. Η κατανομή των αποκολλημένων τεμαχών είναι μεγάλη στο εξεταζόμενο τμήμα του πρανούς, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.5, με το μέγιστο αριθμό τεμαχών στην ίδια τοποθεσία να φθάνει τα 6 – 8.



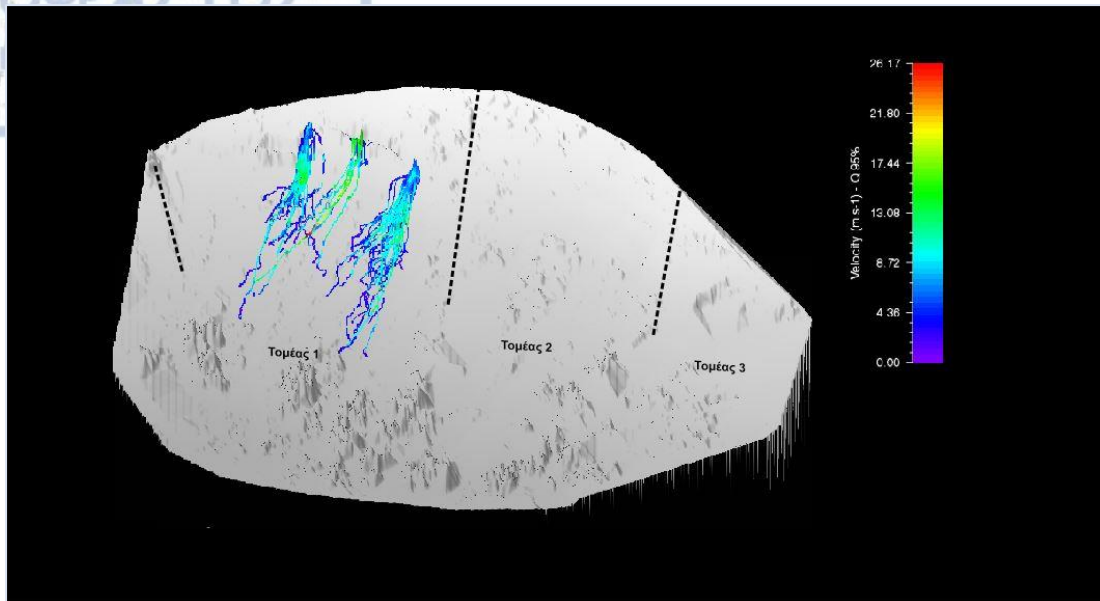
Σχήμα 5.5 Κατανομή αποκολλημένων τεμαχών του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall

Το μέσο ύψος αναπήδησης των τεμαχών ανέρχεται στα 3.2 m (Σχήμα 5.6), ενώ σε ορισμένες τροχιές εμφανίζει μέγιστες τιμές 10 m έως περίπου 18 m πολύ τοπικά.

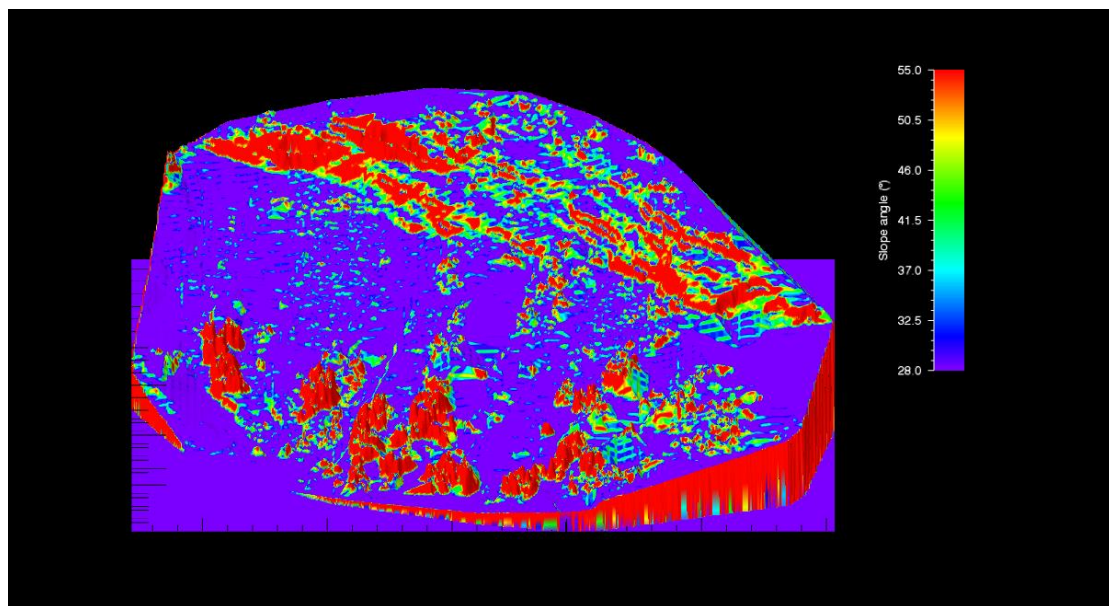


Σχήμα 5.6 Ύψος αναπήδησης (m) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall

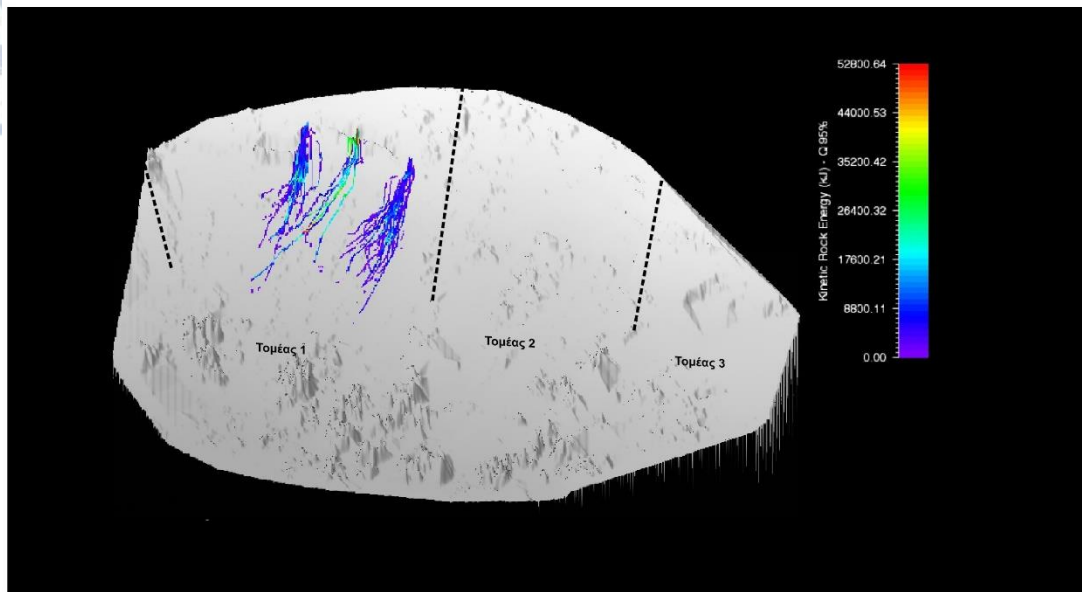
Η ταχύτητα των τεμαχών αμέσως μετά την αποκόλλησή τους κυμαίνεται από 6 m/s έως 10 m/s και αποκτά μεγαλύτερες τιμές κατά την ολίσθηση και αναπήδησή τους στην επαφή ψαμμιτών και ιλυολίθων αλλά και στο ιλυολιθικό στρώμα, οι οποίες ανέρχονται έως 15 m/s (Σχήμα 5.7). Τα βραχοτεμάχια κατά την κύλισή τους επί του ιλυολιθικού στρώματος δε χάνουν την ταχύτητά τους διατηρώντας τη περίπου στα 10 – 13 m/s, παρά μόνο μειώνεται σε ορισμένες τροχιές έως 2 – 4 m/s. Παρατηρείται ότι από το δεύτερο σημείο τροφοδοσίας τα τεμάχια αποκτούν αμέσως μεγάλες ταχύτητες κατά την αποκόλλησή τους από τους ψαμμιτικούς πάγκους πιθανώς λόγω της απότομης κλίσης του πρανούς, όπου στο σημείο αυτό φθάνει τις 55° (Σχήμα 5.8) και λόγω της αναπήδησής τους στους υποκείμενους ψαμμιτικούς πάγκους, όπως υποδεικνύουν και τα μεγάλα ύψη αναπήδησης στις αντίστοιχες τροχιές. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει η κατανομή της κινητικής ενέργειας των βραχοτεμαχίων στις τροχιές αυτές (Σχήμα 5.9) όπου εμφανίζει τις μέγιστες τιμές της, αμέσως μετά την αποκόλλησή τους τα τεμάχια αποκτούν έως και 40.000 kJ, η οποία διατηρείται κατά την κίνησή τους. Σε αρκετές τροχιές τα τεμάχια διατηρούν την κινητική τους ενέργεια με μέση τιμή 14.500 kJ. Σε ορισμένες τροχιές το ποσοστό της κινητικής ενέργειας των βραχοτεμαχίων χάνεται κατά την κίνησή τους και απορροφάται από το στρώμα του αποσαθρωμένου ιλυόλιθου, όπου ανακόπτεται η πορεία τους και αποτίθενται τα τεμάχια στο στρώμα αυτό δίνοντας την εικόνα του Σχήματος 5.5.



Σχήμα 5.7 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall

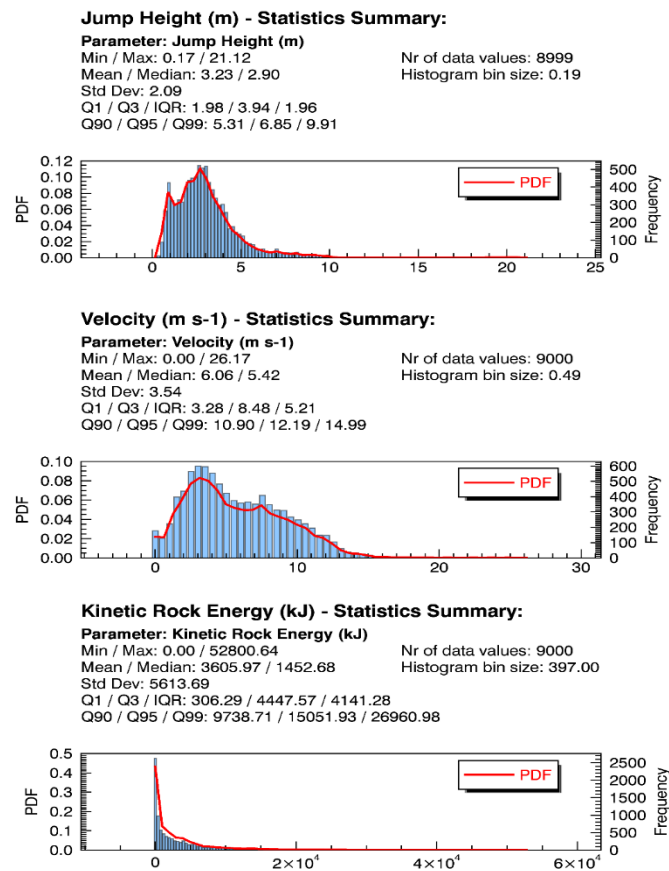


Σχήμα 5.8 Κλίσεις του μετώπου του πρανούς στο RAMMS:: Rockfall



Σχήμα 5.9 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall

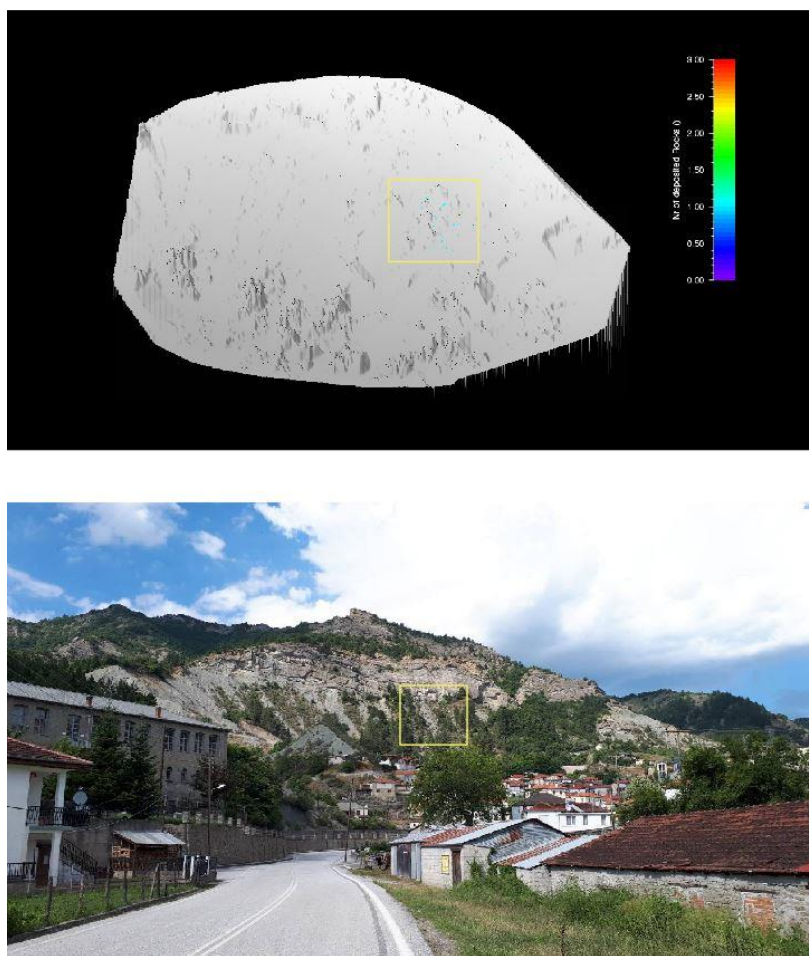
Συνολικά, τα στατιστικά στοιχεία για τις παραπάνω παραμέτρους παρουσιάζονται στα ακόλουθα ιστογράμματα (Σχήμα 5.10) όπως δημιουργήθηκαν στο RAMMS:: Rockfall.



Σχήμα 5.10 Ιστογράμματα κατανομής ύψους αναπήδησης (m), ταχύτητας (m/s) και κινητικής ενέργειας (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall

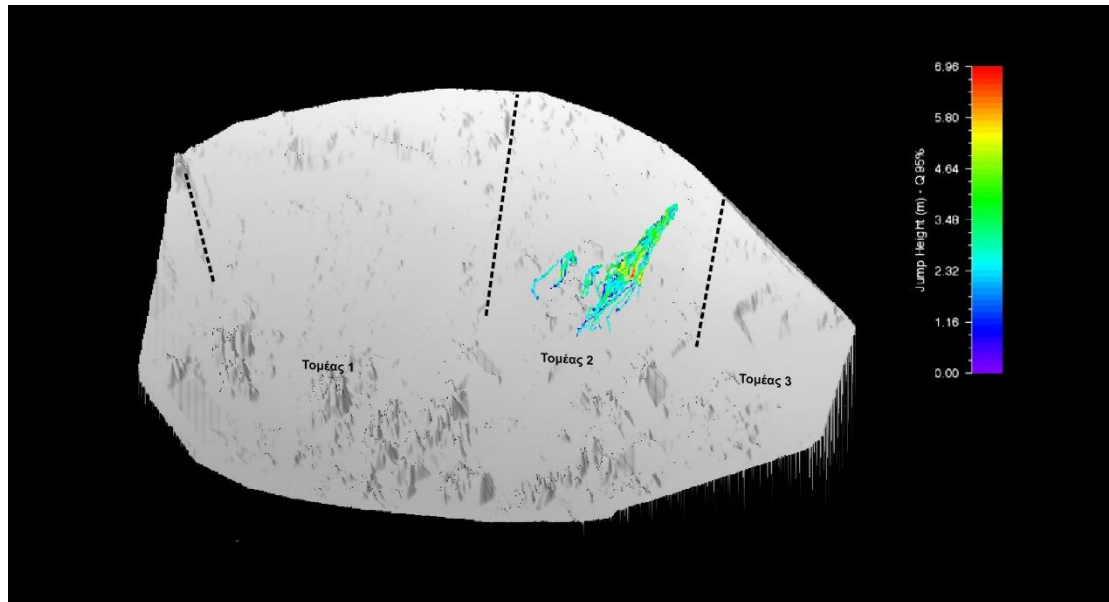
5.4.2 Τομέας 2

Για την ανάλυση της αστοχίας στον Τομέα 2 του εξεταζόμενου πρανούς χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5, οι οποίες αποδόθηκαν σύμφωνα με λεπτομερείς παρατηρήσεις πεδίου. Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) τιμές όγκων βραχοτεμαχών, εξαιρώντας τις μέγιστες τιμές όγκων των 54 m³, καθώς δεν παρατηρήθηκαν τέτοια τεμάχια στον Τομέα αυτό. Επιπλέον, κατά την ανάλυση αξιολογήθηκε η βλάστηση στην περιοχή καθώς είναι έντονη η παρουσία της στη βάση του πρανούς. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και ορίζοντας τη ζώνη τροφοδοσίας καταπτώσεων ως γραμμή ακολουθώντας τη στρώση των σχηματισμών και τις δομές παρατηρούμενων αστοχιών δημιουργήθηκαν όλες οι δυνητικές τροχιές των βραχοτεμαχών στο RAMMS:: Rockfall (Σχήμα 5.12), οι οποίες ανέρχονται στις 120. Παρατηρείται ότι τα τεμάχια αποκολλούνται από ένα μέσο ύψος 1003 m και διανύουν απόσταση περίπου 35 m έως τα μέσα του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης του πρανούς, καθώς πιθανώς ανακόπτεται η πορεία τους λόγω της παρουσίας έντονα αποσαθρωμένου ιλυόλιθου. Η κατανομή των αποκολλημένων τεμαχών είναι περιορισμένη στο εξεταζόμενο τμήμα του πρανούς, καθώς παρατηρείται η απόθεση μεμονωμένων βραχοτεμαχών στην ίδια τοποθεσία (Σχήμα 5.11).



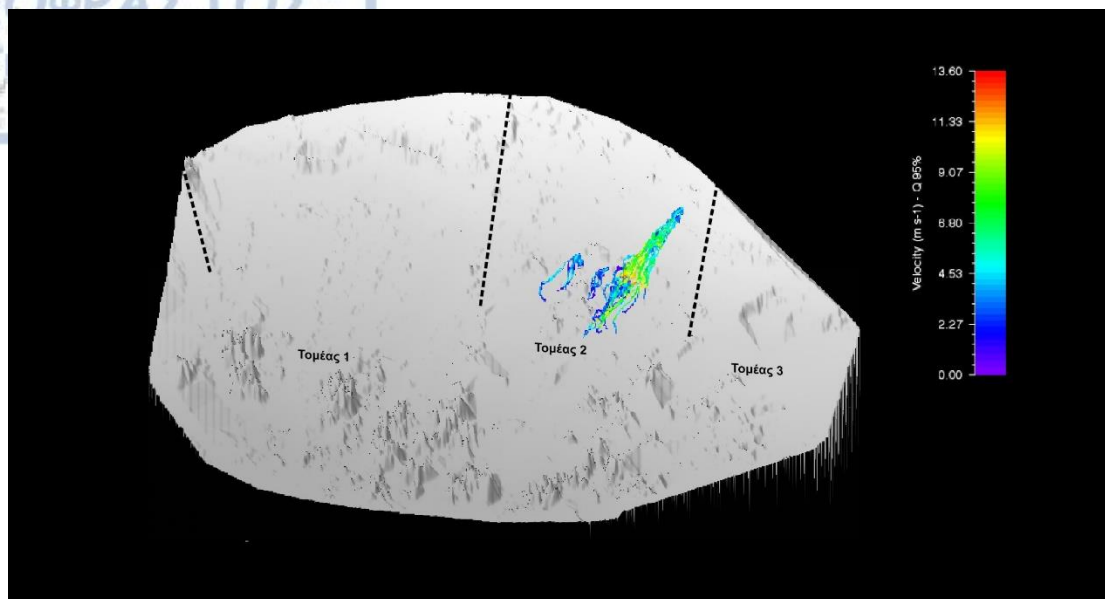
Σχήμα 5.11 Κατανομή αποκολλημένων τεμαχών του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται μικρότερα ύψη αναπήδησης με αυτά του Τομέα 1, όμως είναι εξίσου σημαντικά καθώς ανέρχονται έως τα 6 m. Το μέσο ύψος είναι επίσης 2.3 m και εντοπίζεται προς τη βάση του πρανούς, ενώ σχεδόν όλα τα τεμάχια αμέσως μετά την αποκόλλησή τους από το πρανές εμφανίζουν μέγιστες τιμές ύψους αναπήδησης 4 – 6 m (Σχήμα 5.12).

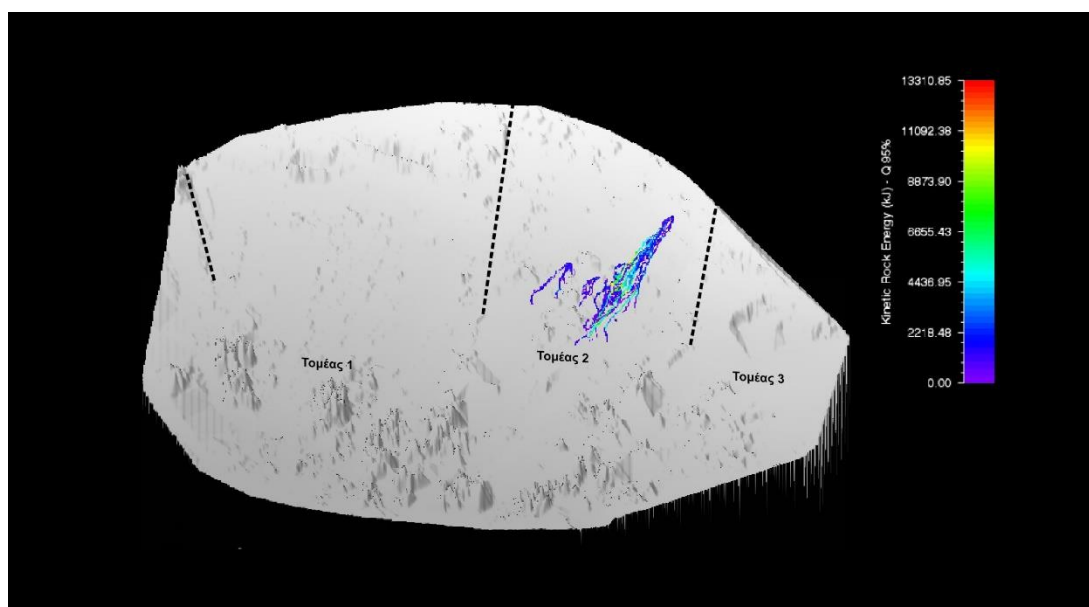


Σχήμα 5.12 Ύψος αναπήδησης (m) τεμαχίων σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

Η ταχύτητα των τεμαχίων αμέσως μετά την αποκόλλησή τους κυμαίνεται από 3 m/s έως 6 m/s και αποκτά μεγαλύτερες τιμές κατά την ολίσθηση και αναπήδησή τους στην επαφή ψαμμιτών και ιλυολίθων αλλά και στο ιλυολιθικό στρώμα, οι οποίες ανέρχονται έως 12 m/s (Σχήμα 5.13). Τα βραχοτεμάχια κατά την κύλισή τους επί του ιλυολιθικού στρώματος διατηρούν την υψηλή ταχύτητά τους περίπου στα 10 – 13 m/s, παρά μόνο σε ορισμένες τροχιές μειώνεται έως 2 – 4 m/s. Παρατηρείται ότι από το υψηλότερο σημείο τροφοδοσίας τα τεμάχια αποκτούν αμέσως μεγάλες ταχύτητες κατά την αποκόλλησή τους από τους ψαμμιτικούς πάγκους και αυξάνονται έως τις μέγιστες τιμές τους κατά την κίνησή τους πιθανώς λόγω της απότομης κλίσης του πρανούς, όπου στο σημείο αυτό φθάνει τις 55° και λόγω της αναπήδησής τους στους υποκείμενους ψαμμιτικούς πάγκους, όπως υποδεικνύουν και τα μεγάλα ύψη αναπήδησης στις αντίστοιχες τροχιές έως τα 6 m. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει η κατανομή της κινητικής ενέργειας των βραχοτεμαχίων στις τροχιές αυτές (Σχήμα 5.14) όπου εμφανίζει τις μέγιστες τιμές της, αμέσως μετά την αποκόλλησή τους τα τεμάχια αποκτούν έως και 5.500 kJ, η οποία διατηρείται κατά την κίνησή τους. Σε αρκετές τροχιές τα τεμάχια αρχικά διατηρούν την κινητική τους ενέργεια με μέση τιμή 1.200 kJ η οποία χάνεται κατά την κίνησή τους.



Σχήμα 5.13 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall



Σχήμα 5.14 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

Συνολικά, τα στατιστικά στοιχεία για τις παραπάνω παραμέτρους παρουσιάζονται στα ακόλουθα ιστογράμματα (Σχήμα 5.15) όπως δημιουργήθηκαν στο RAMMS:: Rockfall.

Jump Height (m) - Statistics Summary:

Parameter: Jump Height (m)

Min / Max: 0.50 / 6.96

Mean / Median: 2.30 / 2.26

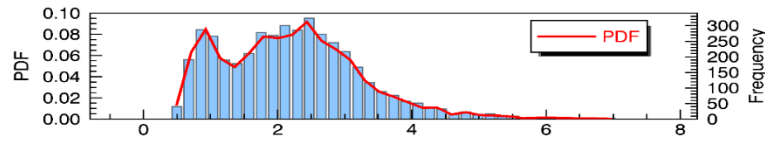
Std Dev: 1.04

Q1 / Q3 / IQR: 1.49 / 2.93 / 1.43

Q90 / Q95 / Q99: 3.60 / 4.15 / 5.37

Nr of data values: 4296

Histogram bin size: 0.17



Velocity (m s-1) - Statistics Summary:

Parameter: Velocity (m s-1)

Min / Max: 0.00 / 13.60

Mean / Median: 3.86 / 3.17

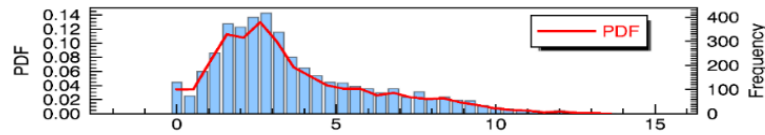
Std Dev: 2.50

Q1 / Q3 / IQR: 2.06 / 5.19 / 3.13

Q90 / Q95 / Q99: 7.75 / 8.98 / 11.08

Nr of data values: 4296

Histogram bin size: 0.39



Kinetic Rock Energy (kJ) - Statistics Summary:

Parameter: Kinetic Rock Energy (kJ)

Min / Max: 0.00 / 13310.85

Mean / Median: 1104.34 / 407.25

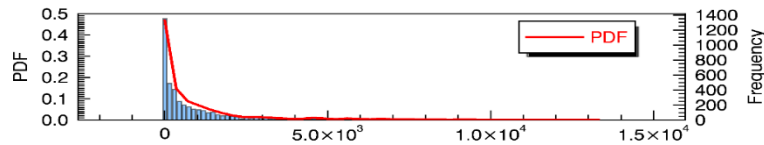
Std Dev: 1758.68

Q1 / Q3 / IQR: 89.88 / 1287.11 / 1197.23

Q90 / Q95 / Q99: 3081.78 / 5164.60 / 8636.41

Nr of data values: 4296

Histogram bin size: 146.27

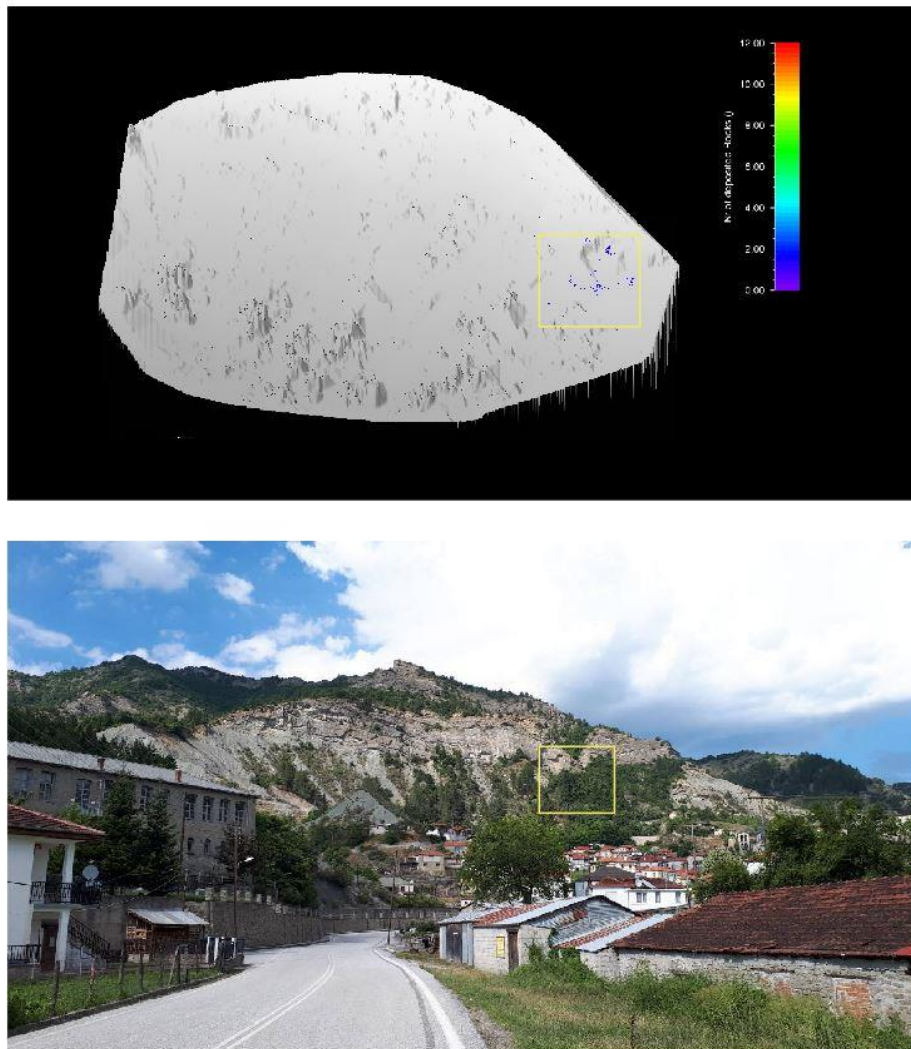


Σχήμα 5.15 Ιστογράμματα κατανομής ύψους αναπήδησης (m), ταχύτητας (m/s) και κινητικής ενέργειας (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

5.4.3 Τομέας 3

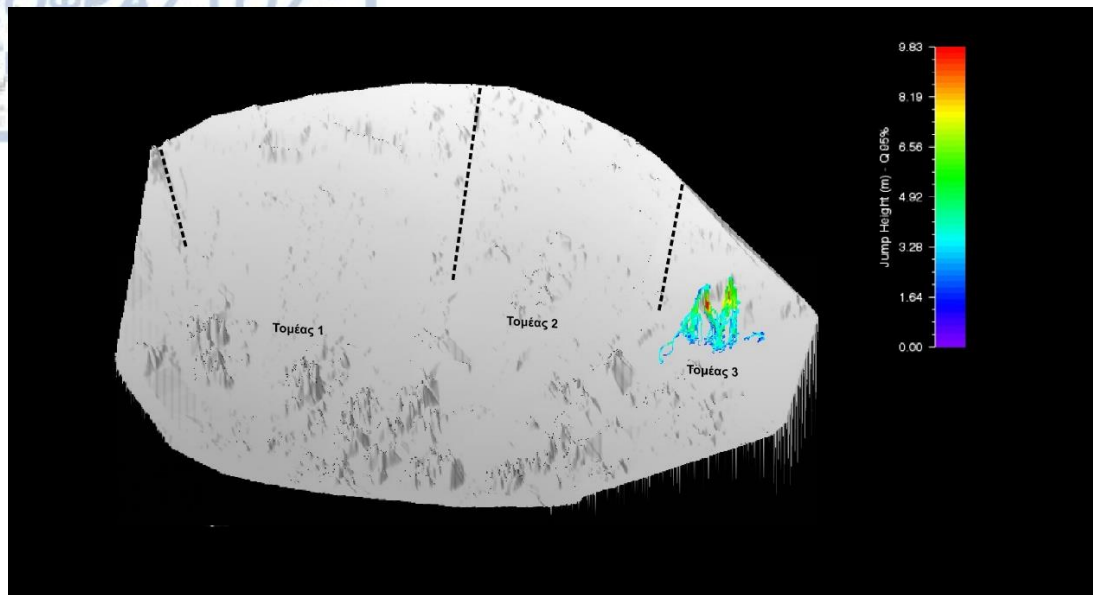
Για την ανάλυση της αστοχίας στον Τομέα 3 του εξεταζόμενου πρανού χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5, οι οποίες αποδόθηκαν σύμφωνα με λεπτομερείς παρατηρήσεις πεδίου. Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) τιμές όγκων βραχοτεμαχών, εξαιρώντας τις μικρότερες τιμές όγκων των 2.5 m³, οι οποία χαρακτηρίζουν δομές υποσκαφής, καθώς δεν παρατηρήθηκαν τέτοιες αστοχίες στον Τομέα αυτό. Επιπλέον, κατά την ανάλυση θεωρήθηκε ότι η περιοχή στερείται βλάστησης για την εκτίμηση των δυσμενέστερων συνθηκών αστοχίας. Η ζώνη τροφοδοσίας για την παρούσα ανάλυση ορίστηκε ως γραμμή σε θέση σημαντικής παλαιάς κατάπτωσης ακολουθώντας τη στρώση των σχηματισμών και τις επιφάνειες αποκόλλησης κατά την οποία αποκολλήθηκαν τα εκτιμώμενα μεγέθη τεμαχών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης στο RAMMS:: Rockfall παρουσιάζονται στο Σχήμα όπου διακρίνονται όλες οι δυνητικές τροχιές των βραχοτεμαχών, οι οποίες ανέρχονται στις 150. Παρατηρείται ότι τα τεμάχια αποκολλούνται από ένα μέσο ύψος 990 m και διανύουν απόσταση περίπου 25 m έως τα μέσα του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης του πρανού,

καθώς πιθανώς ανακόπτεται η πορεία τους λόγω της παρουσίας έντονα αποσαθρωμένου ιλυόλιθου. Η κατανομή των αποκολλημένων τεμαχών είναι περιορισμένη στο εξεταζόμενο τμήμα του πρανούς, με το μέγιστο αριθμό τεμαχών στην ίδια τοποθεσία να φθάνει τα 2 – 3 (Σχήμα 5.16).



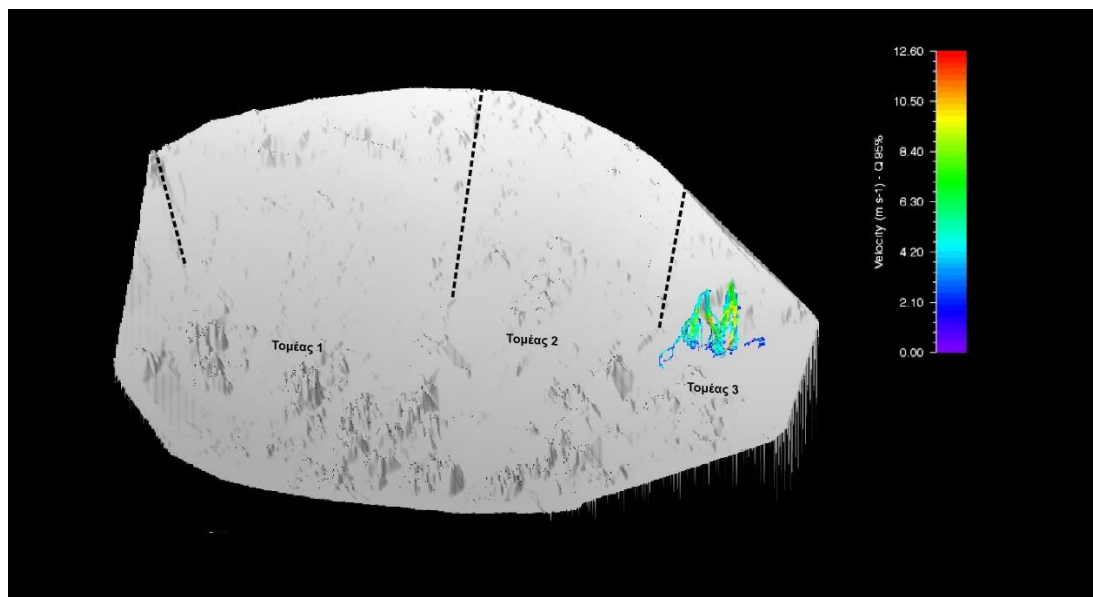
Σχήμα 5.16 Κατανομή αποκολλημένων τεμαχών του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall

Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται τα μικρότερα ύψη αναπήδησης σε σύγκριση με του άλλους τομείς, όμως είναι εξίσου σημαντικά καθώς ανέρχονται έως τα 8 m. Το μέσο ύψος αναπήδησης ανέρχεται στα 3 m, ενώ παρατηρείται πως όλα τα τεμάχια αμέσως μετά την αποκόλλησή τους από το πρανές εμφανίζουν μέγιστες τιμές ύψους αναπήδησης 6 – 8 m (Σχήμα 5.17). Η ταχύτητα των τεμαχών αμέσως μετά την αποκόλλησή τους κυμαίνεται από 4 m/s έως 6 m/s και αποκτά μεγαλύτερες τιμές κατά την ολίσθηση και αναπήδησή τους στα ψαμμιτικά στρώματα, οι οποίες ανέρχονται έως 10 m/s (Σχήμα 5.18). Τα βραχοτεμάχια κατά την κύλισή τους επί του ιλυολιθικού στρώματος διατηρούν την υψηλή ταχύτητά τους περίπου στα 6 – 9 m/s, παρά μόνο σε ορισμένες τροχιές μειώνεται έως 2 – 4 m/s προς τη βάση του πρανούς.

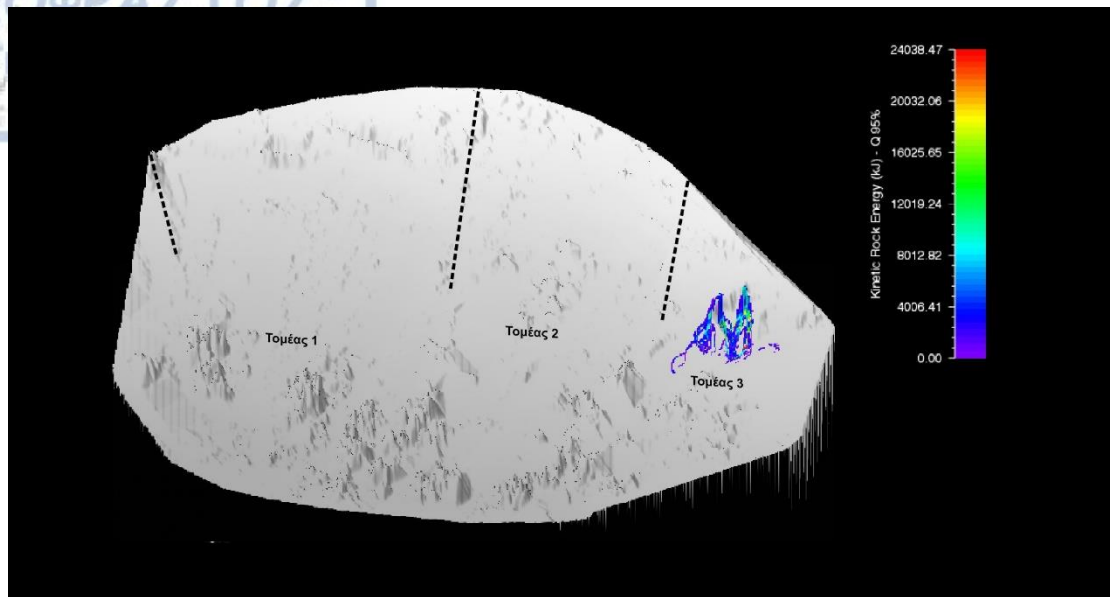


Σχήμα 5.17 Ύψος αναπήδησης (m) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall

Παρατηρείται ότι από τα σημεία απελευθέρωσής τους τα τεμάχια αποκτούν αμέσως μεγάλες ταχύτητες κατά την αποκόλλησή τους από τους ψαμμιτικούς πάγκους και αυξάνονται έως τις μέγιστες τιμές τους κατά την κίνησή τους πιθανώς λόγω της απότομης κλίσης του πρανού, όπου στο σημείο αυτό φθάνει τις 55° και λόγω της αναπήδησής τους στους υποκείμενους ψαμμιτικούς πάγκους, όπως υποδεικνύουν και τα μεγάλα ύψη αναπήδησης στις αντίστοιχες τροχιές έως τα 8 m. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει η κατανομή της κινητικής ενέργειας των βραχοτεμαχών στις τροχιές αυτές (Σχήμα 5.19) όπου εμφανίζει τις μέγιστες τιμές της, καθώς αμέσως μετά την αποκόλλησή τους τα τεμάχια αποκτούν έως και 8.000 kJ, η οποία διατηρείται κατά την κίνησή τους μειούμενη έως 4.000 kJ.

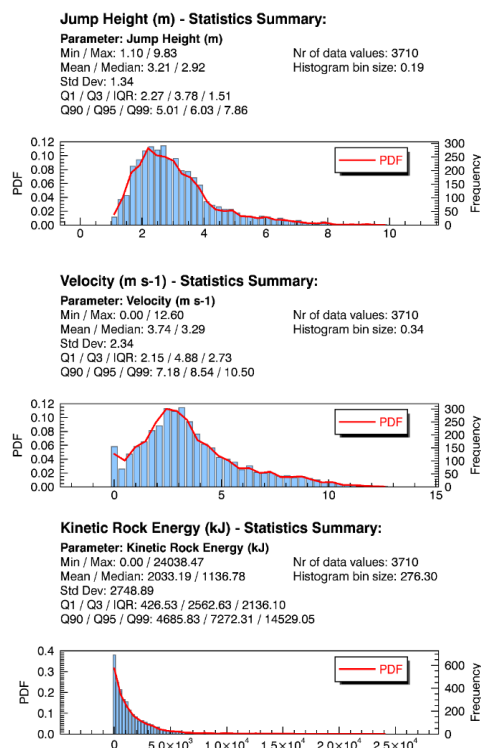


Σχήμα 5.18 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall



Σχήμα 5.19 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall

Συνολικά, τα στατιστικά στοιχεία για τις παραπάνω παραμέτρους παρουσιάζονται στα ακόλουθα ιστογράμματα (Σχήμα 5.20) όπως δημιουργήθηκαν στο RAMMS:: Rockfall.



Σχήμα 5.20 Ιστογράμματα κατανομής ύψους αναπήδησης (m), ταχύτητας (m/s) και κινητικής ενέργειας (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

5.4.4 Ανάλυση δυσμενέστερων καταπτώσεων

Σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις των βραχοκαταπτώσεων εντοπίστηκαν σε κάθε Τομέα του πρανούς δυνητικές τροχιές τεμαχών οι οποίες συνιστούν το δυσμενέστερο σενάριο αστοχίας, καθώς τα τεμάχια εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές ταχυτήτων και ύψους αναπήδησης. Στην παρούσα ενότητα αναλύονται οι συνθήκες και οι παράμετροι των συγκεκριμένων τροχιών λόγω της υψηλής τους επικινδυνότητας και προσομοιώνονται οι πραγματικές συνθήκες με την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης των σχηματισμών του πρανούς, ώστε να αποδοθεί προσεγγιστικά μία ρεαλιστική προσομοίωση της αστοχίας.

5.4.4.1 Εκτίμηση συντελεστών αναπήδησης με τη σκληρότητα σφύρας Schmidt

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης έχουν προταθεί αρκετές τιμές και σχέσεις ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος και τις ιδιότητες της κίνησης. Στην παρούσα εργασία, οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης των σχηματισμών εκτιμώνται σύμφωνα με τα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών κρουσιμέτρησης με χρήση της σφύρας Schmidt (Κεφάλαιο 4.3.3) και συνεκτιμώντας την επιφανειακή αποσάθρωση του σχηματισμού από τις αντίστοιχες τιμές της σφύρας Schmidt κατά τη μέτρηση της σκληρότητας. Σε γενικές γραμμές η αύξηση της σκληρότητας της σφύρας Schmidt σχετίζεται γραμμικά με την αύξηση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης, καθώς όσο πιο σκληρό είναι ένα υλικό τόσο μεγαλύτερος είναι ο κάθετος και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης, οι οποίοι συνιστούν τον κινηματικό συντελεστή. Ο διαχωρισμός του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης σε κάθετο (n_{cor}) και εφαπτομενικό (t_{cor}) ερμηνεύει τους διαφορετικούς μηχανισμούς της κίνησης κατά την αναπήδηση του τεμαχίου, όπου κατά την κάθετη σε σχέση με το πρανές διεύθυνση, η απώλεια της κίνησης οφείλεται στην παραμόρφωση των σωμάτων και στην διάδοση των ελαστικών κυμάτων, ενώ στην εφαπτομενική διεύθυνση η απώλεια κίνησης αποδίδεται στην αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ των σωμάτων. Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης παρά την εμφάνιση αυξημένης διακύμανσης τιμών, συνιστά τον καλύτερο και απλούστερο τρόπο για την προσομοίωση της αναπήδησης, ενώ ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης, ο οποίος συνοδεύει τον κάθετο στην προσομοίωση της κρούσης, δεν εμφανίζει ευαισθησία στις παραμέτρους της κίνησης. Συνεπώς, κρίνεται αντιπροσωπευτική η εκτίμηση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης, ο οποίος θεωρείται ισοδύναμος με τον κάθετο (Αστερίου, 2016).

Για τον προσδιορισμό του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης (v_{cor}) χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις οι οποίες αναπτύχθηκαν από επιτόπου δοκιμές ρίψης τεμαχίων και συνδέουν την τιμή του συντελεστή με τις τιμές της σφύρας Schmidt (Πίνακας 5.6). Συγκεκριμένα, πρόκειται για τη σχέση 6.1 η οποία προτάθηκε από τον Αστερίου, 2016, καθώς και για τη σχέση 6.2, όπως προτάθηκε από τους Asteriou *et al.*, 2013 (όπου R, τιμές αναπήδησης σφύρας Schmidt). Οι τιμές του κινηματικού



συντελεστή όπως προέκυψαν από τις παραπάνω σχέσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

$$v_{cor} = 0.0123 \cdot R + 0.18 \quad 6.1$$

$$v_{cor} = 0.235 \cdot \exp(0.022 \cdot R) \quad 6.2$$

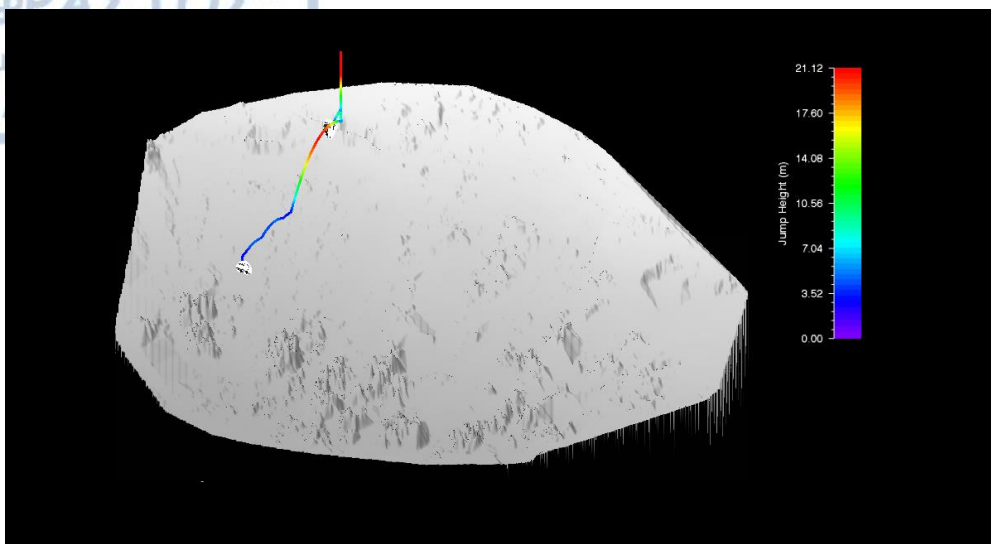
Πίνακας 5.6 Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης σύμφωνα με τη σκληρότητα της σφύρας Schmidt

ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΤΙΜΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ ΣΦΥΡΑΣ SCHMIDT R (-)	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ (V_{COR})	
		ΣΧΕΣΗ 6.1	ΣΧΕΣΗ 6.2
ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	21	0.44	0.37
ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	24	0.48	0.40
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	32	0.57	0.48

5.4.4.2 Ανάλυση τροχιάς

Για την ανάλυση των δυσμενέστερων βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς διακρίθηκαν σε κάθε εξεταζόμενο Τομέα οι τροχιές τεμαχών με τις δυσμενέστερες συνθήκες, όπου παρουσίασαν τη μέγιστη επιδεκτικότητα.

Αναλυτικά, στον Τομέα 1 εκτιμήθηκαν κυρίως δύο (2) τροχιές οι οποίες παρουσιάζουν μέγιστες τιμές παραμέτρων (Σχήματα 5.21 και 5.22). Τα τεμάχια τα οποία πραγματοποιούν αυτές τις τροχιές συνιστούν τους δύο μεγαλύτερους εξεταζόμενους όγκους, 54 m³ και 100 m³. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι τα τεμάχια που διαγράφουν την τροχιά 1 μετά την αποκόλλησή τους πραγματοποιούν αναπήδηση εμφανίζοντας μέγιστα ύψη και τιμές ταχυτήτων, ενώ το τεμάχιο της τροχιάς 2 πραγματοποιεί κύλιση και ολίσθηση επί του πρανούς εμφανίζοντας μέγιστες τιμές τριβής.

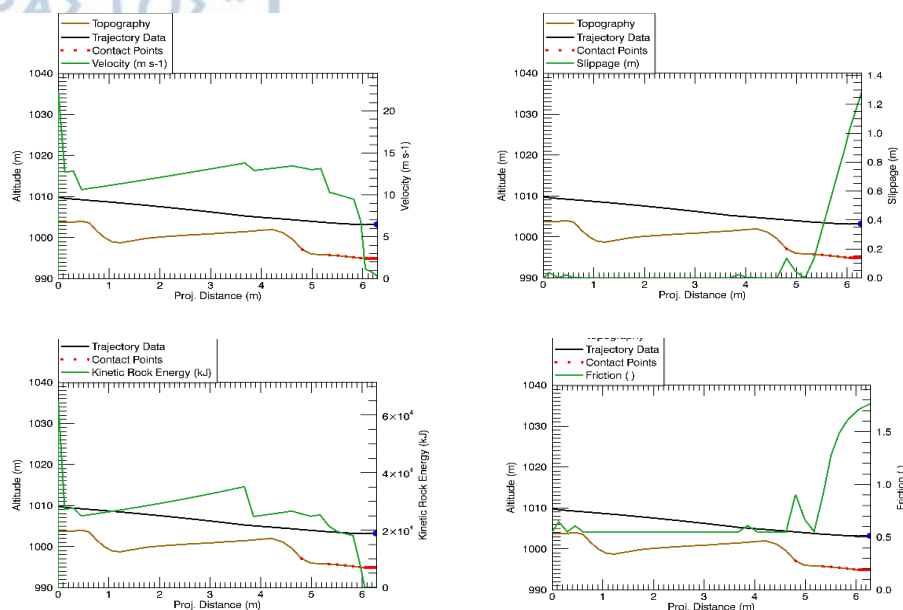


Σχήμα 5.21 Ανάλυση δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών τεμαχών του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall



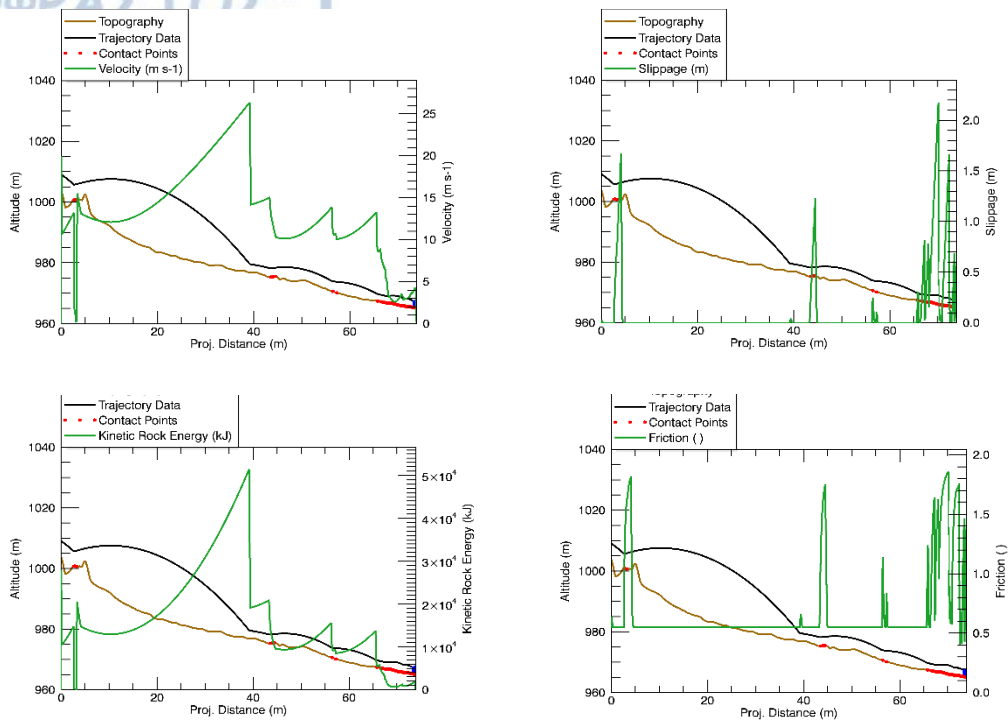
Σχήμα 5.22 Απεικόνιση στο πεδίο των δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών (Τροχιά 1 και 2) τεμαχών του Τομέα 1

Στην τροχιά 1 παρατηρείται πως το τέμαχος αμέσως μετά την αποκόλλησή του από το συμπαγή ψαμμιτικό πάγκο πραγματοποιεί αναπήδηση σχεδόν επιτόπου διανύοντας ελάχιστη απόσταση 1 m και φθάνοντας σε μέγιστο ύψος έως 20 m (Σχήμα 5.23) αποκτώντας μεγάλες τιμές κινητικής ενέργειας. Κατά την κρούση του τεμάχους στο υγιές ψαμμιτικό στρώμα πραγματοποιείται απώλεια ενέργειας της τάξης περίπου του 58%, τιμή που συμφωνεί με την εκτίμηση του κινηματικού συντελεστή ανάλυσης για το σχηματισμό αυτό. Στη συνέχεια το τέμαχος πραγματοποιεί κύλιση με αυξανόμενη ταχύτητα έως 15 m/s επί των ψαμμιτικών οριζόντων κατά την οποία αναπτύσσονται οι μεγάλες τιμές τριβής.



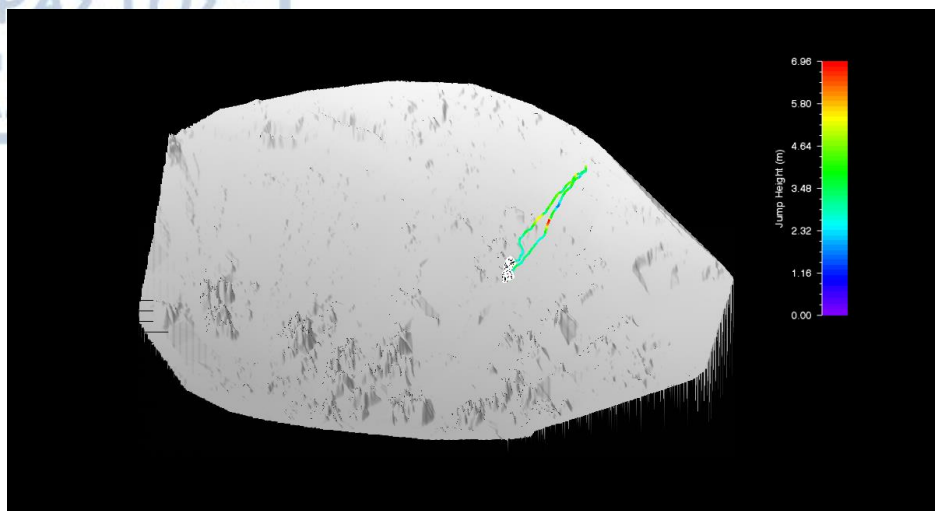
Σχήμα 5.23 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμάχους κατά την τροχιά 1 του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall

Στην τροχιά 2 το τέμαχος αμέσως μετά την αποκόλλησή του πραγματοποιεί μία αναπήδηση όμοια με αυτή του τεμάχους της τροχιάς 1 με μέγιστο ύψος έως 20 m (Σχήμα 5.24) και στη συνέχεια πραγματοποιεί μία ακόμη όμοια αναπήδηση διανύοντας μεγαλύτερη απόσταση περίπου 40 m. Κατά την πρώτη κρούση επί του συμπαγούς ψαμμίτη πραγματοποιείται απώλεια ενέργειας κατά 64%, ενώ κατά τη δεύτερη κρούση επί του ιλυολιθικού στρώματος η απώλεια υπολογίζεται περίπου 60%. Παρατηρείται ότι οι τιμές απόσβεσης της κινητικής ενέργεια όπως υπολογίστηκαν στο RAMMS:: Rockfall ξεπερνούν τις τιμές απόσβεσης που υποδεικνύει ο συντελεστής αναπήδησης για τους αντίστοιχους σχηματισμούς. Συνεπώς θεωρείται πιο ρεαλιστική μία προσέγγιση κατά την οποία πραγματοποιείται μικρότερη απορρόφηση ενέργειας από τους σχηματισμούς του υποβάθρου και με βάση την υπολειπόμενη ενέργεια πραγματοποιείται κύλιση και ολίσθηση επί του ιλυολιθικού στρώματος με ανάπτυξη τριβής, όπως υποδεικνύεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 5.24 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμάχους κατά την τροχιά 2 του Τομέα 1 στο RAMMS:: Rockfall

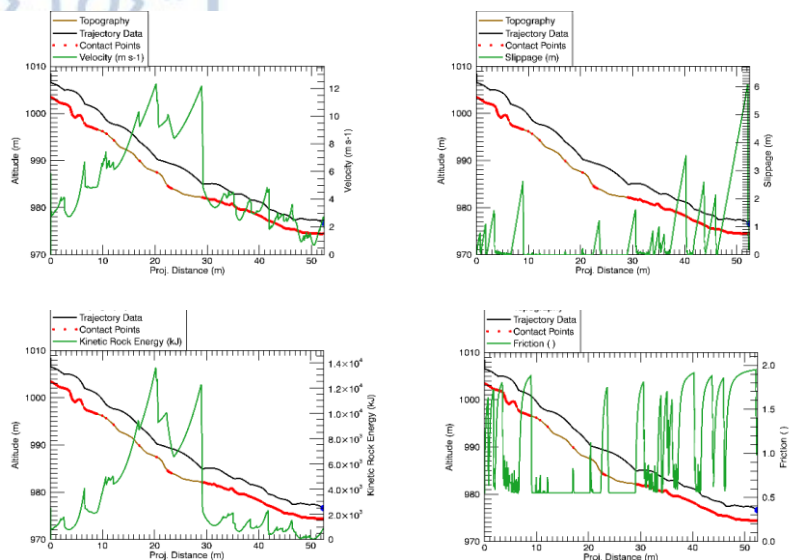
Στον Τομέα 2 εκτιμήθηκαν δύο (2) τροχιές τεμαχών που εμφανίζουν μέγιστες τιμές παραμέτρων και αφορούν το μεγαλύτερο εξεταζόμενο όγκο του τμήματος αυτού των 54 m^3 (Σχήματα 5.25 και 5.26). Στην τροχιά 3 το τέμαχος αμέσως μετά την αποκόλλησή του πραγματοποιεί εναλλασσόμενα αναπηδήσεις με μέγιστο ύψος 4 m (Σχήμα 5.27) και κύλιση επί αποσαθρωμένου ψαμμιτικού ορίζοντα, ανάλογα με την κλίση του μετώπου του πρανούς, έως την τελική αναπήδηση επί απότομου τμήματος συμπαγούς ψαμμίτη, σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου με μέγιστο ύψος περίπου 5 m. Κατά τις πρώτες κρούσεις η απώλεια της ενέργειας του τεμάχους είναι μικρή της τάξης του 35 – 55%, ενώ κατά την τελευταία αναπήδηση περίπου 83%. Οι παραπάνω τιμές απώλειας ενέργειας για τις πρώτες αναπηδήσεις κρίνονται συντηρητικές αλλά ρεαλιστικές σύμφωνα με τις αντίστοιχες τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης του αποσαθρωμένου ψαμμίτη, ενώ για την τελευταία αναπήδηση το ποσοστό απώλειας ενέργειας ξεπερνάει κατά πολύ την προτεινόμενη τιμή του συντελεστή. Αμέσως μετά την αναπήδηση πραγματοποιείται ολίσθηση επί του ιλυολιθικού στρώματος με μέγιστη ταχύτητα 11 m/s και συνεχή ανάπτυξη τριβής, εμφανίζονται μέγιστες τιμές κατά την ολίσθηση προς τη βάση του πρανούς.



Σχήμα 5.25 Ανάλυση δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών (Τροχιά 3 και 4) τεμαχών του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

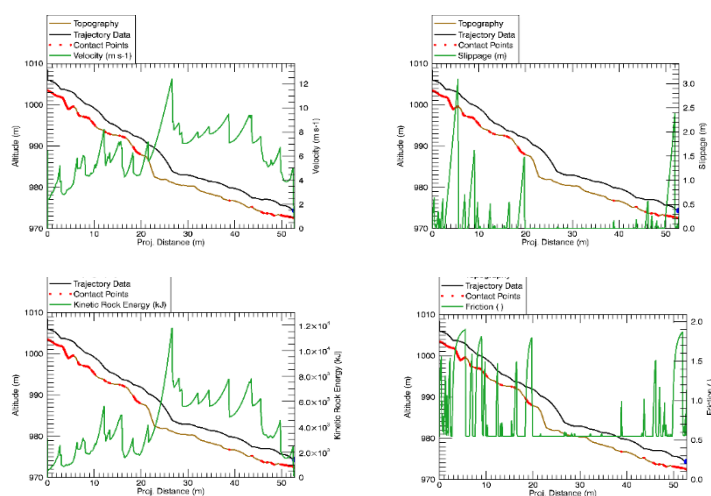


Σχήμα 5.26 Απεικόνιση στο πεδίο των δύο (2) δυσμενέστερων τροχιών (Τροχιά 3, πάνω και 4, κάτω) τεμαχών του Τομέα 2



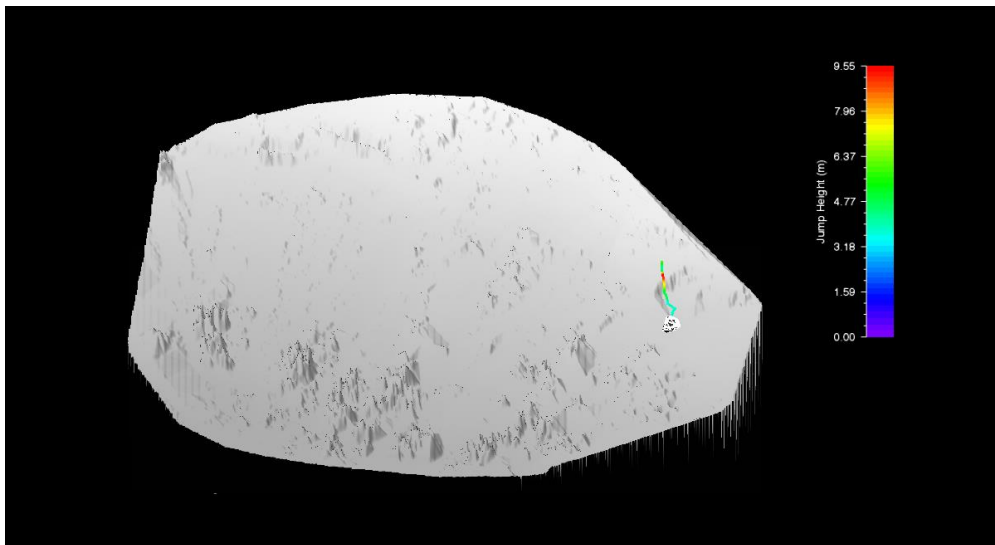
Σχήμα 5.27 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμάχους κατά την τροχιά 3 του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

Στην τροχιά 4 το βραχοτέμαχος αμέσως μετά την αποκόλλησή του από τον ορίζοντα αποσαθρωμένου ψαμμίτη πραγματοποιεί ολίσθηση με αυξανόμενη ταχύτητα έως και 12 m/s (Σχήμα 5.28) και αναπτύσσει μέγιστες τιμές τριβής. Κατά την κίνησή του αποκτά μεγάλες τιμές κινητικής ενέργειας έως την αναπήδησή του όπου φθάνει σε μέγιστο ύψος 6 m. Κατά την κρούση του τεμάχους στο υγιές ψαμμιτικό στρώμα πραγματοποιείται απώλεια ενέργειας της τάξης περίπου του 50%, τιμή που συμφωνεί με την εκτίμηση του κινηματικού συντελεστή ανάλυσης για το σχηματισμό αυτό. Στη συνέχεια, το τέμαχος πραγματοποιεί ξανά ολίσθηση επί του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης του πρανού αναπτύσσοντας τις προηγούμενες μέγιστες τιμές τριβής.



Σχήμα 5.28 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμάχους κατά την τροχιά 4 του Τομέα 2 στο RAMMS:: Rockfall

Στον Τομέα 3 επιλέχθηκε μία (1) μόνο τροχιά λόγω ομοιομορφίας των δυνητικών τροχιών του τμήματος αυτού και αφορά το μέγιστο εξεταζόμενο όγκο της περιοχής των 100 m³ (Σχήματα 5.29 και 5.30).



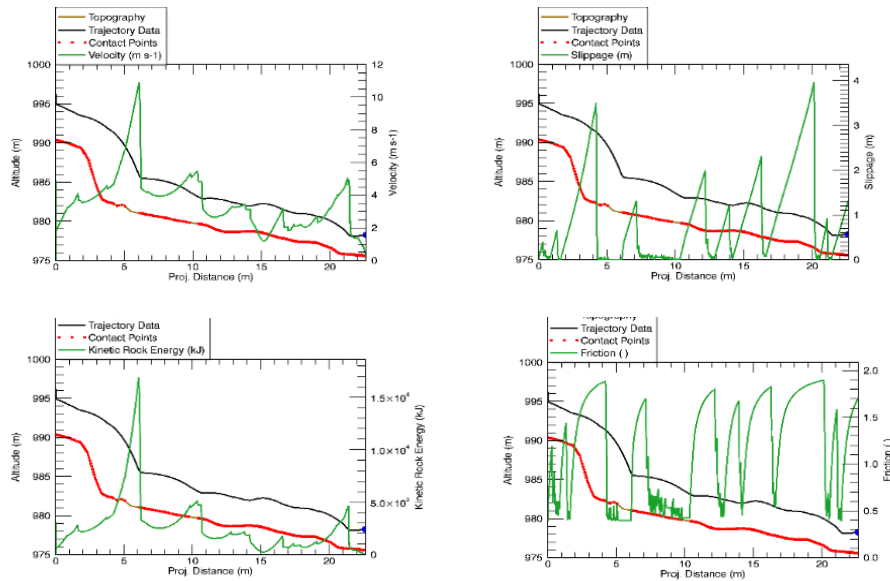
Σχήμα 5.29 Ανάλυση μίας (1) δυσμενούς τροχιάς (Τροχιά 5) τεμάχους του Τομέα στο RAMMS:: Rockfall



Σχήμα 5.30 Απεικόνιση στο πεδίο μίας (1) δυσμενούς τροχιάς (Τροχιά 5) τεμάχους του Τομέα 3

Στην τροχιά 5 το βραχοτέμαχος αμέσως μετά την αποκόλλησή του από τον ορίζοντα συμπαγούς ψαμμίτη πραγματοποιεί ολίσθηση με απότομα αυξανόμενη ταχύτητα λόγω του υψηλού ανάγλυφου έως και 12 m/s (Σχήμα 5.31) και αναπτύσσει μέγιστες τιμές τριβής. Κατά την κίνησή του αποκτά μεγάλες τιμές κινητικής ενέργειας και πραγματοποιεί μία αναπήδηση επί συμπαγούς ψαμμίτη όπου φθάνει σε μέγιστο

ύψος 9 m και μία ακόμα επί ιλυολιθικού στρώματος με μέγιστο ύψος 4 m. Κατά την κρούση του τεμάχους στο υγιές ψαμμιτικό στρώμα πραγματοποιείται απώλεια ενέργειας της τάξης περίπου του 75%, τιμή που ξεπερνάει την προτεινόμενη τιμή του συντελεστή, ενώ κατά την κρούση στο ιλυολιθικό στρώμα η απώλεια ενέργειας εκτιμάται στο 60%, τιμή που συμφωνεί με την τιμή του αντίστοιχου κινηματικού συντελεστή ανάλυσης. Στη συνέχεια, το τέμαχος πραγματοποιεί ολίσθηση επί του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης του πρανούς αναπτύσσοντας μέγιστες τιμές τριβής.



Σχήμα 5.31 Διαγράμματα ταχύτητας (επάνω αριστερά), κινητικής ενέργειας (κάτω αριστερά), ολίσθησης (επάνω δεξιά) και τριβής (κάτω δεξιά) τεμάχους κατά την τροχιά 5 του Τομέα 3 στο RAMMS:: Rockfall

6. Εκτίμηση επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων οικισμού

6.1 Εισαγωγή

Η διακινδύνευση (Risk, R) μίας περιοχής εκφράζει τις συνέπειες της εκδήλωσης ενός καταστροφικού φυσικού φαινομένου, εξαρτώμενη από τη χωρική πιθανότητα εκδήλωσης αυτού, την επικινδυνότητα. Η διακινδύνευση ορίζεται ως εξής:

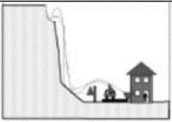
$$R = \sum [H \sum (VA)]$$

Ο όρος 'επικινδυνότητα' (*Hazard, H*) εκφράζει τη χωρική πιθανότητα εκδήλωσης ενός καταστροφικού φαινομένου σε ορισμένο τόπο και σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας βασίζεται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως είναι το ανάγλυφο του πρανούς, η αντοχή των υλικών, η βροχόπτωση.

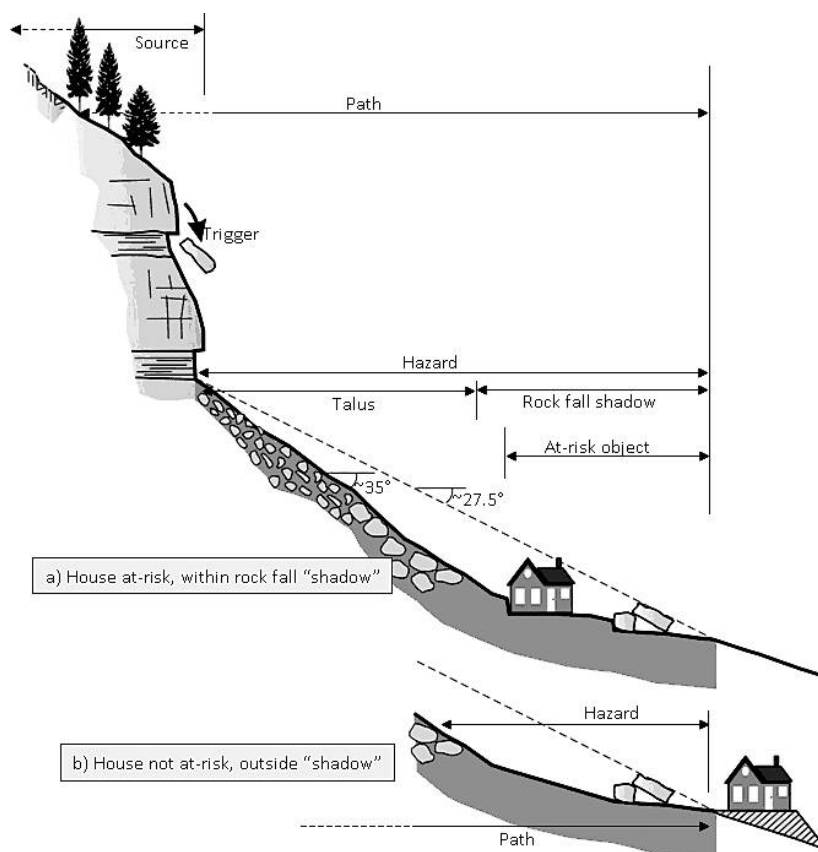
Ο όρος 'τρωτότητα' (*Vulnerability, V*) εκφράζει τον αριθμό των στοιχείων εκτεθειμένων σε κίνδυνο από ένα συγκεκριμένο φυσικό φαινόμενο και βαθμονομείται με κλίμακα από 0 έως 1.

Ο όρος 'κόστος' (*Amount, A*) εκφράζει το κόστος που προκαλείται από την εκδήλωση του φαινομένου και εκτιμάται με όρους καταστροφής, αριθμών κτιρίων, τραυματισμών, ακόμα και ανθρώπινων ζωών. Το γινόμενο της τρωτότητας και του κόστους (VA) συνιστά τις συνέπειες του φυσικού φαινομένου και συγκεκριμένα, της εκδήλωσης βραχοκατάπτωσης (*Van Westen et al., 2006*).

Οι παραπάνω όροι, καθώς και η βαρύτητα και η σημαντικότητά τους αποδίδονται σχηματικά στα παρακάτω Σχήματα 6.1 και 6.2, τα οποία προσδιορίζουν τη διακινδύνευση των κτιρίων στη βάση των αντίστοιχων πρανών έναντι βραχοκατάπτωσης, καθώς και τους συνοδούς όρους. Η εκτίμηση της διακινδύνευσης της οικιστικής ζώνης έναντι των βραχοκαταπτώσεων συνιστά μία πολύπλοκη διαδικασία, όπου απαιτείται λεπτομερής καταγραφή των στοιχείων εκτιθέμενων σε κίνδυνο, όπως κατοικιών και κτιρίων, καθώς και τον αριθμό των κατοίκων και των απειλούμενων ανθρώπινων ζωών. Η ανάλυση αυτή δεν πραγματοποιείται περαιτέρω, καθώς δεν αποτελεί σκοπό της παρούσας εργασίας, όπου πραγματοποιείται εκτίμηση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας. Ο όρος 'επιδεκτικότητα' εκφράζει τη χωρική πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκατάπτωσης, η εκτίμηση της οποίας βασίζεται στην ποιότητα και την κατάσταση της βραχώμαζας και στη μορφολογία του μετώπου του πρανούς.

Type	Before	After	Likely damage to elements at risk	Factors determining risk
Impact by single blocks			Buildings: Total collapse not likely. Localized damage Persons in buildings: Minor to major injury likely Infrastructure: Coverage and obstruction of traffic Persons in traffic: Loss of life/ major injury possible	• Volume of rockfall blocks • Number of rockfall blocks • Location of source zone • Distance to Elements at risk • Triggering factors • Local topography along track • Intermediate obstacles

Σχήμα 6.1 Απεικόνιση διακινδύνευσης του κτιρίου στη βάση του πρανούς έναντι βραχοκατάπτωσης (Van Westen et al., 2006)



Σχήμα 6.2 Απεικόνιση διακινδύνευσης του κτιρίου στη βάση του πρανούς έναντι βραχοκατάπτωσης (Wyllie, 2015)

6.2 Μεθοδολογία

Ο προσδιορισμός της επιδεκτικότητας και η εκτίμηση της επικινδυνότητας ου πρανούς έναντι εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων ανάντη του οικισμού του Επταχωρίου πραγματοποιήθηκε με βάση ένα ποιοτικό σύστημα εκτίμησης, του οποίου η ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Το σύστημα βασίστηκε σε εύλογες παραδοχές οι οποίες αφορούν το ανάγλυφο του μετώπου του πρανούς, την ποιότητα της βραχώμαζας, τις δομές παλαιότερων καταπτώσεων, τον όγκο των τεμαχών επιδεκτικών έναντι κατάπτωσης, την παρουσία ζώνης επέμβασης και την παρουσία βλάστησης (Πίνακας 6.1). Ανάλογα με την εκτίμηση του μεγέθους οι περιοχές βαθμονομούνται με Χαμηλή, Μέτρια και Υψηλή επιδεκτικότητα και επικινδυνότητα.

Πίνακας 6.1 Παράμετροι εκτίμησης επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ
	– Ποιότητα βραχώμαζας – Όγκος βραχοτεμαχίων – Παλαιότερες αστοχίες – Κλίση μετώπου πρανούς – Πιθανότητα εκδήλωσης κατάπτωσης	– Κλίση βάσης πρανούς – Παρουσία βλάστησης – Παρουσία ζώνης επέμβασης ανάντη οικισμού

6.3 Εκτίμηση επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας κατά μήκος του πρανούς

Η ανάλυση και η εκτίμηση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας του εξεταζόμενου πρανούς του οικισμού πραγματοποιείται ανά ζώνες (Ζώνη I – V) από ΒΑ προς ΝΔ, σύμφωνα με τη διάκριση των τριών Τομέων κατά μήκος του πρανούς. Συνολικά η ανάλυση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας ανά ζώνη κατά μήκος του πρανούς παρουσιάζεται στο *Σχήμα 6.3* και ο χαρακτηρισμός κάθε ζώνης παρουσιάζεται στον *Πίνακα 6.2*.

Πίνακας 6.2 Ανάλυση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας ανά ζώνη κατά μήκος του πρανούς

ΖΩΝΗ	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ
I	Υψηλή	Υψηλή
II	Μέτρια – Υψηλή	Μέτρια – Υψηλή
III	Χαμηλή	Χαμηλή
IV	Υψηλή	Υψηλή
V	Μέτρια	Μέτρια



Σχήμα 6.3 Ανάλυση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας ανά ζώνη κατά μήκος του πρανούς

6.3.1 Ζώνη I

Η Ζώνη I αποτελεί τμήμα του Τομέα 1, ο οποίος καλύπτει το δυτικό τμήμα του πρανούς. Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται σημαντικές δομές παλαιότερων καταπτώσεων και συγκεκριμένα παρατηρούνται σημαντικές υποσκαφές κατά μήκος της στρώσης δημιουργώντας επικρεμάμενα τεμάχια συμπαγών ψαμμιτών. Οι όγκοι των παλαιότερων αστοχιών ποικίλλουν, καθώς εμφανίζονται μικροί όγκοι περίπου $2.5 - 5 \text{ m}^3$, οι οποίοι αποτελούν τις δομές υποσκαφής έως και μέγιστοι όγκοι έως 200 m^3 . Εντός των ψαμμιτικών πάγκων εντοπίζονται παρακατακόρυφες ασυνέχειες του κύριου συστήματος διακλάσεων κατά μήκος των οποίων δύναται να αποκολληθούν ψαμμιτικά τεμάχια από τη βραχώμαζα, καθώς οι ασυνέχειες αυτές δρουν ως εφελκυστικές ρωγμές λόγω του ανοίγματός τους, όπως δημιουργούνται από τη διαβρωτική δράση του νερού. Στη ζώνη αυτή εντοπίζονται σημαντικοί όγκοι επικρεμάμενων τεμαχίων συμπαγούς ψαμμίτη, η αποκόλληση των οποίων ευνοείται και από την κλίση του μετώπου του πρανούς, η οποία κυμαίνεται από 31° στη βάση του πρανούς έως 71° στα ανώτερα τμήματα. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η Ζώνη I χαρακτηρίζεται από υψηλή επιδεκτικότητα.

Κατά μήκος της Ζώνης I παρατηρείται αραιή βλάστηση στη βάση του πρανούς, η οποία δεν είναι ικανή να ανακόψει την τροχιά δυνητικών προς κατάπτωση τεμαχίων, τα οποία καταλήγουν στην οικιστική ζώνη. Η κλίση της βάσης του πρανούς είναι μικρή περίπου 30° και κατά μήκος αυτής καθίσταται αδύνατη η πρόσβαση για επέμβαση σε περίπτωση αστοχίας για προστασία των κτισμάτων κατάντη αυτής. Συνεπώς, η Ζώνη I χαρακτηρίζεται από υψηλή επικινδυνότητα.

6.3.2 Ζώνη II

Η Ζώνη II αποτελεί επίσης τμήμα του Τομέα 1 κατά μήκος της οποίας παρατηρούνται δομές παλαιότερων καταπτώσεων. Συγκεκριμένα εντοπίζονται δομές υποσκαφής κατά μήκος της στρώσης των ψαμμιτικών πάγκων με τον χαρακτηριστικό όγκο τους, καθώς αναγνωρίζονται και επικρεμάμενα τεμάχια επιδεκτικά προς κατάπτωση μικρών όγκων έως 30 m^3 . Στη ζώνη αυτή εμμένουσα ασυνέχεια αποτελεί η στρώση των σχηματισμών, καθώς εντοπίζονται και πολυάριθμες μικροδιακλάσεις εντός των ψαμμιτικών πάγκων, οι οποίες λειτουργούν δυνητικά ως επιφάνειες αποκόλλησης τεμαχίων. Η αποκόλληση των τεμαχίων αυτών ευνοείται από την κλίση του πρανούς στο τμήμα αυτό η οποία κυμαίνεται από 50° έως 70° . Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η Ζώνη II χαρακτηρίζεται από μέτρια – υψηλή επιδεκτικότητα.

Κατά μήκος της Ζώνης II παρατηρείται βλάστηση στη βάση του πρανούς, ικανή να ανακόψει την τροχιά των επικρεμάμενων τεμαχίων που δύναται να αποκολληθούν από την περιοχή αυτή. Η κλίση της βάσης του πρανούς είναι μικρή περίπου 35° και κατά μήκος αυτής καθίσταται αδύνατη η πρόσβαση για επέμβαση σε περίπτωση

αστοχίας για προστασία της οικιστικής ζώνης κατάντη αυτής. Συνεπώς, η Ζώνη II χαρακτηρίζεται από μέτρια – υψηλή επικινδυνότητα.

6.3.3 Ζώνη III

Η Ζώνη III αποτελεί τμήμα του Τομέα 2, ο οποίος καλύπτει το κεντρικό τμήμα του πρανούς. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από απουσία σημαντικών δομών παλαιότερων καταπτώσεων, παρά μόνο εντοπίζονται δομές υποσκαφής με τους αντίστοιχους όγκους. Η κλίση του πρανούς ανέρχεται στις $64^{\circ} - 66^{\circ}$ στους ψαμμιτικούς πάγκους και καταλήγει $37^{\circ} - 54^{\circ}$ στα ανώτερα στρώματα εναλλαγών ψαμμιτών και ιλυολίθων. Κατά μήκος της ζώνης αυτής εντοπίζεται ορίζοντας αποσαθρωμένου ψαμμίτη, στον οποίο παρατηρούνται επικρεμάμενα τεμάχια συμπαγών ψαμμιτών μικρών όγκων έως 25 m^3 δημιουργούμενα από φαινόμενα υποσκαφής. Επιπλέον, στην περιοχή αυτή δεν εμφανίζονται σημαντικοί όγκοι επικρεμάμενων τεμαχίων. Συνεπώς, η Ζώνη III χαρακτηρίζεται από χαμηλή επιδεκτικότητα.

Στη Ζώνη III παρατηρείται παρουσία σημαντικής βλάστησης στη βάση του πρανούς, η οποία δύναται να κατακρατήσει βραχοτεμάχια κατά την κατάπτωσή τους. Η κλίση της βάσης του πρανούς κυμαίνεται μεταξύ 30° και 34° και κατά μήκος αυτής καθίσταται αδύνατη η πρόσβαση για επέμβαση σε περίπτωση αστοχίας για προστασία της οικιστικής ζώνης κατάντη αυτής. Συνεπώς, η Ζώνη III χαρακτηρίζεται από χαμηλή επικινδυνότητα.

6.3.4 Ζώνη IV

Η Ζώνη IV αποτελεί επίσης τμήμα του Τομέα 2 κατά μήκος της οποίας παρατηρούνται σημαντικές δομές παλαιότερων καταπτώσεων οι οποίες χαρακτηρίζονται από τους μέγιστους όγκους της εξεταζόμενης περιοχής. Η αποκόλληση των τεμαχίων αυτών πραγματοποιήθηκε κατά μήκος των παρακατακόρυφων ασυνεχειών του κύριου συστήματος διακλάσεων. Επιπλέον, εντοπίζονται και σημαντικές δομές υποσκαφής, ιδίως στην επαφή των υπερκείμενων ψαμμιτών με το ιλυολιθικό στρώμα της βάσης. Στη ζώνη αυτή εντοπίζονται σημαντικοί όγκοι επικρεμάμενων τεμαχίων οι οποίοι σχηματίζονται κατά μήκος των μικροδιακλάσεων εντός των ψαμμιτικών οριζόντων επί του στρώματος εναλλαγών ψαμμιτών και ιλυολίθων. Η αποκόλληση των τεμαχίων αυτών ευνοείται από την κλίση των στρωμάτων αυτών η οποία κυμαίνεται μεταξύ 40° και 55° , ενώ στα υποκείμενα στρώματα ψαμμιτών η κλίση ανέρχεται έως 65° . Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η Ζώνη IV χαρακτηρίζεται από υψηλή επιδεκτικότητα.

Στη Ζώνη IV παρατηρείται παρουσία ιδιαίτερα έντονης βλάστησης, η οποία δύναται να κατακρατήσει τους μέσους όγκους των δυνητικών προς κατάπτωση τεμαχίων, σε αντίθεση με τους μέγιστους αναμενόμενους όγκους. Επιπλέον, η εκτίμηση αυτή υποστηρίζεται από την ύπαρξη πεσμένων τεμαχίων μέσου όγκου περίπου 60 m^3 στη

συγκεκριμένη περιοχή τα οποία κατακρατήθηκαν από την πυκνή βλάστηση, η οποία ανέκοψε την τροχιά τους, όπως υπέδειξε η έρευνα πεδίου. Η κλίση της βάσης του πρανούς κυμαίνεται μεταξύ 30° και 34° και κατά μήκος αυτής καθίσταται αδύνατη η πρόσβαση για επέμβαση σε περίπτωση αστοχίας για προστασία της οικιστικής ζώνης κατάντη αυτής. Συνεπώς, η Ζώνη IV χαρακτηρίζεται από υψηλή επικινδυνότητα.

6.3.4 Ζώνη V

Η Ζώνη V ανήκει εξ' ολοκλήρου στον Τομέα 3, ο οποίος καλύπτει το ανατολικό τμήμα του πρανούς. Στη ζώνη αυτή παρατηρούνται έντονες υποσκαφές κατά μήκος της στρώσης και κύριων παρακατακόρυφων ασυνεχειών εντός των ψαμμιτικών παγκων δημιουργώντας επικρεμάμενα τεμάχια συμπαγών ψαμμιτών μέσου όγκου $20 - 40 \text{ m}^3$. Επιπλέον, στην περιοχή αυτή εντοπίζονται επικρεμάμενα τεμάχια μικρών όγκων $5 - 10 \text{ m}^3$ εντός ψαμμιτικής ένστρωσης στον ιλυολιθικό ορίζοντα της βάσης. Η αποκόλληση των τεμαχίων αυτών ευνοείται από την κλίση των στρωμάτων αυτών η οποία ανέρχεται έως 75° στα ανώτερα στρώματα. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η Ζώνη V χαρακτηρίζεται από μέτρια επιδεκτικότητα.

Στη Ζώνη V παρατηρείται έντονη βλάστηση στο δυτικό της τμήμα, η οποία εντοπίζεται τόσο στη βάση του πρανούς όσο και στις χαραδρώσεις και τα ρέματα πίσω από το μέτωπο του πρανούς τα οποία σχηματίζονται από την έντονη διαβρωτική δράση του νερού. Η βλάστηση αυτή δύναται να κατακρατήσει οριακά τους μέσους όγκους των δυνητικών προς κατάπτωση τεμαχίων. Η κλίση της βάσης του πρανούς κυμαίνεται μεταξύ 30° και 34° και κατά μήκος αυτής καθίσταται αδύνατη η πρόσβαση για επέμβαση σε περίπτωση αστοχίας για προστασία της οικιστικής ζώνης κατάντη αυτής. Συνεπώς, η Ζώνη V χαρακτηρίζεται από μέτρια επικινδυνότητα.

7. Προτεινόμενα μέτρα προστασίας

7.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση των συνθηκών έναντι βραχοκαταπτώσεων και η εκτίμηση της επικινδυνότητας αποσκοπούν στην εκτίμηση και στην προσέγγιση των συνθηκών αστοχίας και των παραμέτρων που τη διέπουν, καθώς και στη μείωση των συνεπειών της αστοχίας και στην προστασία της οικιστικής ζώνης. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, όπως αναλύθηκαν κρίνεται αναγκαία η πρόταση μέτρων προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανούς για τον περιορισμό της επικινδυνότητας σε όσο το δυνατό χαμηλότερο επίπεδο.

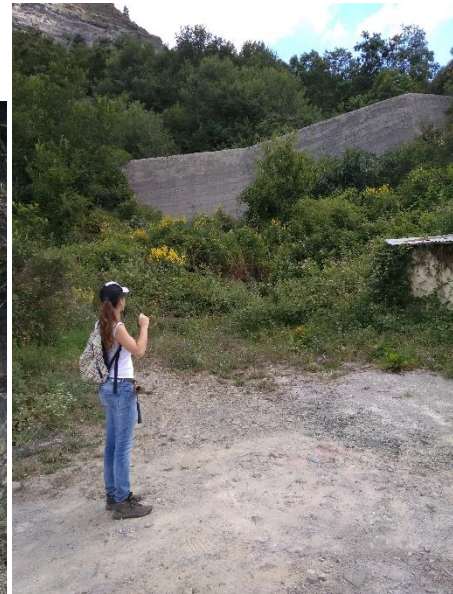
Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επέμβασης στο πρανές βασίζεται σε κριτήρια που αφορούν την αποτελεσματικότητά της, το χρόνο ζωής της κατασκευής και τον τρόπο εφαρμογής της, καθώς και την προστασία του περιβάλλοντα χώρου και της αισθητικής του. Σε γενικές γραμμές, τα μέτρα προστασίας αποσκοπούν στη μείωση της επικινδυνότητας του φαινομένου, δηλαδή της πιθανότητας εμφάνισης της αστοχίας και στη σταθεροποίηση του πρανούς (ενεργητικά μέτρα προστασίας), καθώς και στην ελαχιστοποίηση των συνεπειών της αστοχίας και στην ελεγχόμενη ανάσχεση της κίνησης των βραχοτεμαχών (παθητικά μέτρα προστασίας).

7.2 Παλαιότερα μέτρα προστασίας

Οι βραχοκαταπτώσεις ανάντη του οικισμού του Επταχωρίου αποτελούν συχνό φαινόμενο με μικρή περίοδο επαναληψιμότητας προκαλώντας κατά καιρούς καταστροφές στην οικιστική ζώνη. Συνεπώς, κατά τις προηγούμενες δεκαετίες ελήφθησαν μέτρα προστασίας έναντι των βραχοκαταπτώσεων, κυρίως παθητικά.

Αναλυτικά, κατασκευάστηκαν τοίχοι ανάσχεσης οπλισμένου σκυροδέματος (Σχήμα 7.1) ύψους περίπου 3 m στη μέση του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης εγκάρσια των ρεμάτων και των χαραδρώσεων δημιουργούμενων από την αποσάθρωση του ιλυολίθου λόγω επιφανειακής απορροής υδάτων. Οι τοίχοι αυτοί κατασκευάστηκαν κυρίως κατά τις δεκαετίες 1970 και 1990, σύμφωνα με πληροφορίες των κατοίκων, όπου κατά τις χωματουργικές εργασίες διανοίχθηκαν οδοί προσπέλασης για τη διέλευση των μηχανημάτων στο ανατολικό τμήμα του πρανούς. Μετά την κατασκευή τους οι τοίχοι επιχώθηκαν με φερτό υλικό αποτελούμενο κυρίως από αμμοχάλικα, το οποίο λήφθηκε από την κοίτη του ποταμού Σαραντάπορου. Οι τοίχοι αυτοί φαίνεται να λειτούργησαν αποτελεσματικά ως παθητικά μέτρα προστασίας, καθώς συγκράτησαν μικρούς όγκους βραχοτεμαχών έως 5 – 10 m³, οι οποίοι εντοπίστηκαν από τις έρευνες πεδίου μαζί με επιχώσεις από υλικά διάβρωσης του πρανούς. Επιπλέον, διακρίθηκαν δομές καταστροφής στη στέψη των τοίχων αυτών από την

κίνηση βραχοτεμαχών μεγαλύτερου όγκου, τα οποία δεν κατακρατήθηκαν από τα φράγματα ανάσχεσης.



Σχήμα 7.1 Τοίχοι ανάσχεσης οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευασμένοι κατά το 1970 – 1990 πρानούς (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, λήψη επί της οδού προσπέλασης, ημερομηνία λήψης 18/07/2018)

Επιπρόσθετα, για την προστασία του πρानούς έναντι κατάπτωσης εφαρμόστηκε ένα ενεργητικό μέτρο προστασίας, το οποίο αφορά την κάλυψη του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης με γαιώδες υλικό και πραγματοποίηση δενδροφύτευσης στο τμήμα αυτό για την ελάττωση της διάβρωσης του στρώματος. Το μέτρο αυτό λειτούργησε ευνοϊκά στην προστασία του στρώματος της βάσης, όμως επιτεύχθηκε μικρή ελάττωση της επικινδυνότητας, καθώς εκδηλώθηκαν νέες βραχοκαταπτώσεις δημιουργούμενες από τις διακλάσεις των υπερκείμενων ψαμμιτικών πάγκων, οι οποίες δρουν ως εφελκυστικές ρωγμές, σύμφωνα με την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας.

Συνεπώς, τα παραπάνω μέτρα προστασίας κρίθηκαν αποτελεσματικά μόνο τοπικά, μειώνοντας της διακινδύνευση της περιοχής κατά μικρό ποσοστό. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η λήψη μέτρων προστασίας και η κατασκευή έργων σε μεγαλύτερη κλίμακα για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου.

7.3 Ενεργητικά μέτρα προστασίας

Η εφαρμογή ενεργητικών μέτρων προστασίας αποσκοπεί στην ελάττωση του κινδύνου εκδήλωσης της κατάπτωσης από τη ζώνη τροφοδοσίας, η οποία εντοπίζεται εντός των συμπαγών ψαμμιτικών πάγκων και επί της επαφής των υπερκείμενων ψαμμιτών με τους υποκείμενους ιλυόλιθους. Η αποτελεσματικότερη μέθοδος προστασίας είναι η αφαίρεση επικρεμάμενων και δυνητικών προς κατάπτωση τεμαχών ('ξεσκάρωμα') κατά μήκος του πρανούς, η εφαρμογή της οποία κρίνεται

αδύνατη στο εξεταζόμενο πρηνές, λόγω της αδυναμίας προσέγγισης της ζώνης τροφοδοσίας. Σύμφωνα με την εξέταση της περιοχής, την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας και με βάση τον παραπάνω περιορισμό προτείνεται η εφαρμογή δύο (2) ενεργητικών μέτρων προστασίας για τη μείωση της πιθανότητας εκδήλωσης καταπτώσεων, τα οποία είναι τα εξής:

— **Αποστράγγιση πρηνούς**

Σύμφωνα με την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας και θεωρώντας κύριο παράγοντα αστάθειας τη διαβρωτική δράση του νερού, προτείνεται η κατασκευή τάφρων απορροής στην στέψη του πρηνούς και περιμετρικά αυτού. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η επιφανειακή απορροή των υδάτων και η μείωση του όγκου νερού που κατεισδύει στις ανοιχτές διακλάσεις των ψαμμιτικών πάγκων, οι οποίες δρουν ως εφελκυστικές ρωγμές προκαλώντας καταπτώσεις τεμαχών.

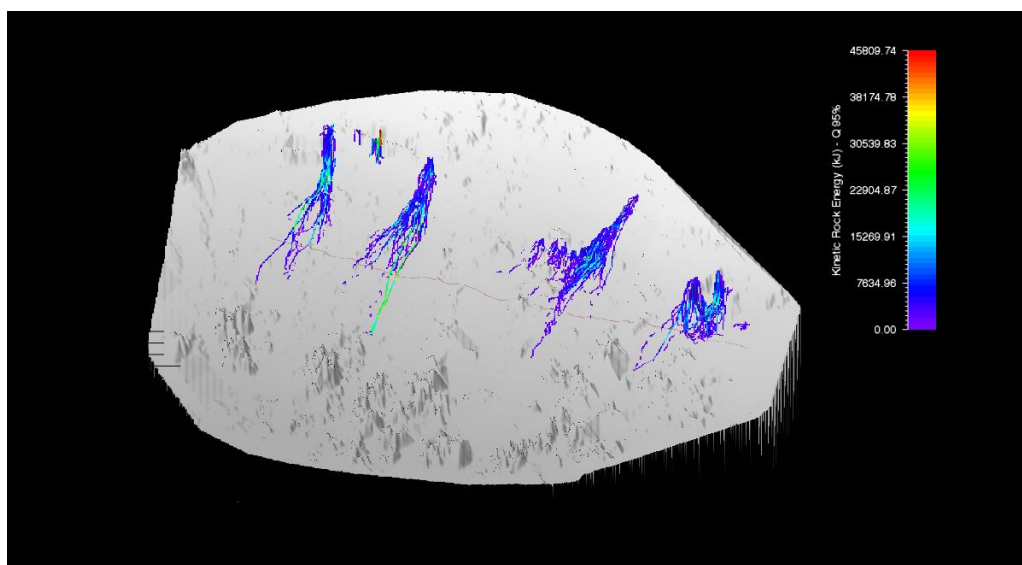
Επιπλέον, προτείνεται συμπληρωματικά η διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών εντός της ζώνης τροφοδοσίας μειώνοντας τις υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται στις διακλάσεις. Η διάνοιξη των οπών δύναται να εφαρμοσθεί κυρίως από το ανατολικό τμήμα του πρηνούς μέσω των οδών προσπέλασης με όσο το δυνατό συντηρητικό εξοπλισμό για την επίτευξη της ελάχιστης όχλησης της βραχώμαζας και την αποτροπή καταπτώσεων. Προτείνεται η διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών ανά 3 – 5 m μήκος με μικρό βάθος έως 5 m, λόγω της απουσίας συνέχειας με το βάθος που χαρακτηρίζει τους μολασσικούς σχηματισμούς.

— **Εφαρμογή γεωϋφάσματος και φυτοκάλυψης**

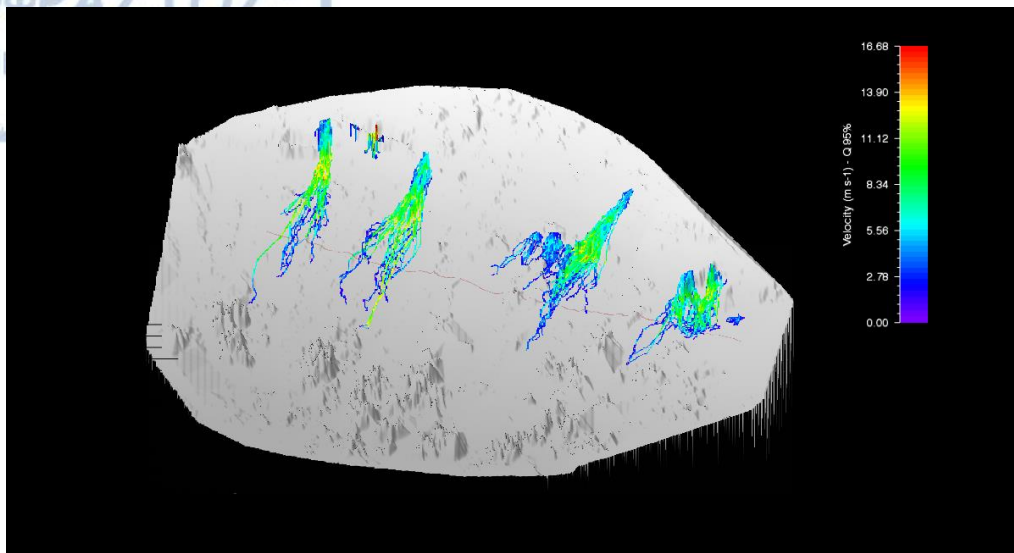
Προτείνεται η εφαρμογή γεωϋφάσματος κυρίως στη διεπιφάνεια των ψαμμιτικών πάγκων και του υποκείμενου ιλυολιθικού στρώματος, αλλά και κατά μήκος του ιλυολιθικού στρώματος στη βάση του πρηνούς για προστασία έναντι διάβρωσης. Επιπλέον, με τη χρήση του κατάλληλου υλικού δύναται να επιτευχθεί απορρόφηση μεγάλου ποσοστού ενέργειας των βραχοτεμαχών και αύξηση της τριβής μεταξύ των ολισθαίνοντων βραχοτεμαχών και του ιλυολίθου της βάσης για την προστασία της οικιστικής ζώνης έναντι καταπτώσεων. Κατά μήκος του στρώματος αυτού προτείνεται δένδροφύτευση τόσο για την απορρόφηση των επιφανειακών υδάτων για προστασία του πρηνούς έναντι διάβρωσης, όσο και για την επίτευξη καλύτερου αισθητικού αποτελέσματος με την ελάχιστη όχληση του περιβάλλοντος.

7.4 Παθητικά μέτρα προστασίας

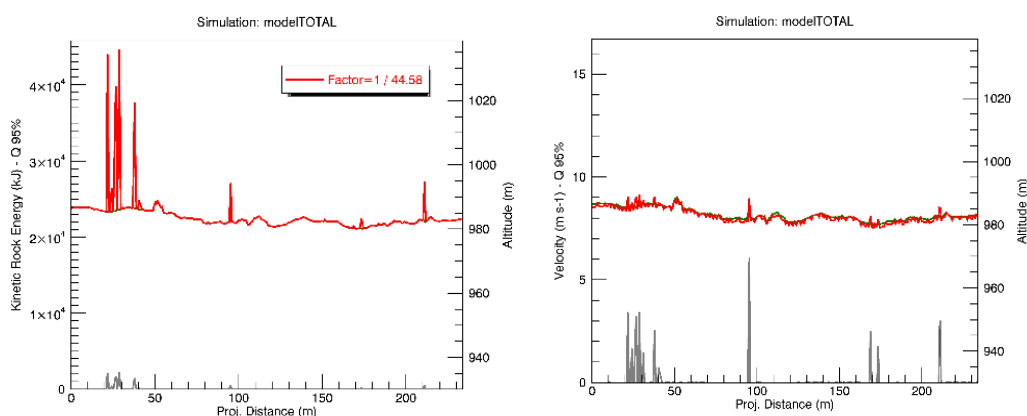
Η εφαρμογή παθητικών μέτρων προστασίας κρίνεται ως η καταλληλότερη μέθοδος προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων και υπερτερούν έναντι των ενεργητικών μέτρων λόγω της μεγαλύτερης αποτελεσματικότητάς τους αλλά και λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας στην κατασκευή των αντίστοιχων έργων. Η επιλογή των κατάλληλων παθητικών μέτρων ανάσχεσης βασίζεται στις παραμέτρους κίνησης των τεμαχών και στην τοπογραφία της βάσης του πρανούς, όπου πρόκειται να εφαρμοσθούν. Για τον προσδιορισμό των κατάλληλων μέτρων προστασίας εκτιμήθηκε η μέση κινητική ενέργεια και η ταχύτητα των ολισθαίνοντων βραχοτεμαχών όλων των δυνητικών τροχιών όπως εκτιμήθηκαν από το RAMMS:: Rockfall επί του ιλυολιθικού στρώματος του πρανούς κατά μήκος μίας τομής στη μέση της βάσης του (Σχήματα 7.2 και 7.3). Παρατηρείται πως η μέση κινητική ενέργεια στη θέση αυτή ανέρχεται περίπου στα 15.000 kJ, ενώ η ταχύτητα κυμαίνεται από 8 έως 9 m/s (Σχήμα 7.4). Επιπλέον, εκτιμάται ότι οι τιμές αυτές εμφανίζονται μειωμένες στον πόδα του πρανούς λόγω της ανάπτυξης τριβής και βάσει των τιμών αυτών πραγματοποιείται η εκτίμηση των μέτρων.



Σχήμα 7.2 Κινητική ενέργεια (kJ) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του συνόλου του πρανούς κατά μήκος τομής (κόκκινη γραμμή) στη μέση της βάσης του πρανούς στο RAMMS:: Rockfall



Σχήμα 7.3 Ταχύτητα (m/s) τεμαχών σε όλες τις δυνητικές τροχιές του συνόλου του πρανούς κατά μήκος τομής (κόκκινη γραμμή) στη μέση της βάσης του πρανούς στο RAMMS:: Rockfall



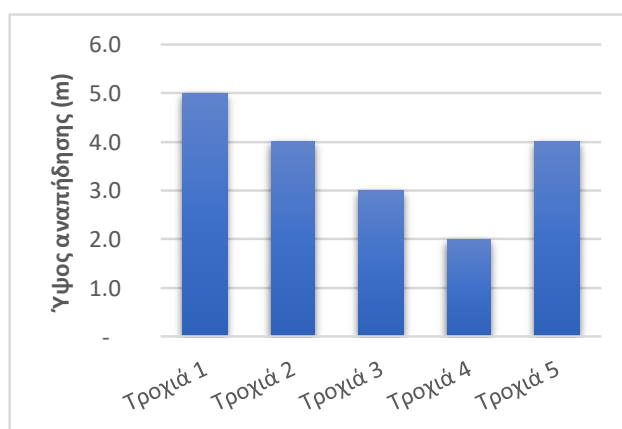
Σχήμα 7.4 Διαγράμματα κινητικής ενέργειας (kJ) (αριστερά) και ταχύτητας (m/s) (δεξιά) τεμαχών κατά μήκος τομής στη βάση του πρανούς

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης της προσομοίωσης της αστοχίας, προτείνεται η εφαρμογή των εξής δύο (2) παθητικών μέτρων προστασίας στη βάση του εξεταζόμενου πρανούς:

— Δυναμικοί φράχτες ανάσχεσης βραχοκαταπτώσεων

Προτείνεται η κατασκευή φραχτών ανάσχεσης περιμετρικά του οικισμού. Για τη διαστασιολόγηση των φραχτών, σύμφωνα και με τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων στη βάση του πρανούς εκτιμήθηκε το ύψος αναπήδησης των δυσμενέστερων τροχιών σε όλο το μήκος του πρανούς, όπως αναλύθηκαν στην Ενότητα 5.4.4.2 (Σχήμα 7.5). Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, προτείνεται η κατασκευή φραχτών ανάσχεσης σε δύο σειρές στη βάση του πρανούς για την αποτελεσματικότερη προστασία της οικιστικής ζώνης έναντι βραχοκαταπτώσεων (Σχήμα 7.6). Πιο αναλυτικά, η πρώτη σειρά φραχτών δύναται να ανέρχεται σε ύψος 3

η με μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας έως και 10.000 kJ για τη συγκράτηση τεμαχών με μεγάλη ταχύτητα και κινητική ενέργεια, όπως υπολογίστηκε παραπάνω κατά μήκος της τομής στη βάση του πρανού. Η δεύτερη σειρά φραχτών δύναται να ανέρχεται σε μικρότερο ύψος έως 2 m με ικανότητα απορρόφησης ενέργειας έως 8.500 kJ για τη συγκράτηση τεμαχών με αισθητά μειωμένη κινητική ενέργεια. Ενδεικτικά, για την πρώτη σειρά προτείνεται η κατασκευή εύκαμπτων φραχτών τύπου Geobrugg συστήματος RXE-10000 με μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, ενώ για τη δεύτερη σειρά προτείνεται η κατασκευή δυναμικών φραχτών τύπου Maccaferri με μικρότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Σχήμα 7.7). Επιπλέον, για την εφαρμογή του προτεινόμενου μέτρου κρίνεται αναγκαίο να εξεταστεί λεπτομερώς το έδαφος θεμελίωσης, καθώς και να οριστεί το σύστημα θεμελίωσης, το σύστημα στήριξης και ο τύπος πλέγματος στο επίπεδο εργασίας στη βάση του πρανού.



Σχήμα 7.5 Διάγραμμα ύψους αναπήδησης (m) βραχοτεμαχών κατά μήκος των δυσμενέστερων τροχιών στη βάση του πρανού



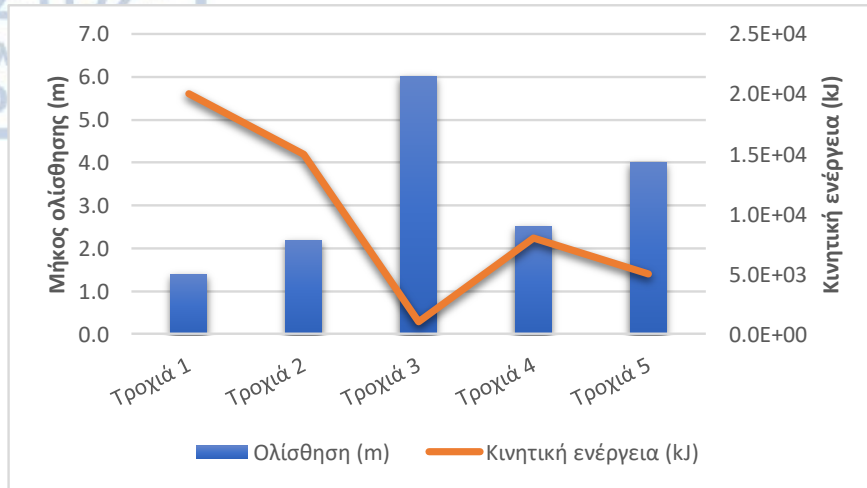
Σχήμα 7.6 Προτεινόμενες θέσεις κατασκευής δυναμικών φραχτών ανάσχεσης βραχοτεμαχών (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) στη βάση του πρανού



Σχήμα 7.7 Δυναμικοί φράχτες ανάσχεσης για την ανακοπή τροχιάς βραχοτεμαχών (<https://www.geobruqg.com/>, επάνω <https://www.maccaferri.com/gr/>, κάτω)

— Τάφροι περισυλλογής βραχοτεμαχών

Προτείνεται η κατασκευή τάφρων περισυλλογής τεμαχών (βραχοπαγίδες) περιμετρικά της οικιστικής ζώνης στη βάση του πρανούς μπροστά από τους φράχτες ανάσχεσης με σκοπό να ανακόψουν την τροχιά ολισθαίνοντων τεμαχών, των οποίων η τροχιά δεν ανακόπηκε από τους φράχτες. Για τη διαστασιολόγηση των τάφρων συνεκτιμήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων των δυσμενέστερων τροχιών σε όλο το μήκος του πρανούς, όπως αναλύθηκαν στην Ενότητα 5.4.4.2. Συγκεκριμένα, σε κάθε τροχιά προσδιορίστηκε το μήκος της ολίσθησης των τεμαχών επί της διεπιφάνειας των ψαμμιτικών πάγκων και του ιλυολιθικού στρώματος, καθώς και η κινητική ενέργεια των τεμαχών κατά την ολίσθησή τους προς τη βάση του πρανούς και την ανάπτυξη τριβής, όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 7.8). Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, προτείνεται η κατασκευή τάφρου πλάτους 2 – 5 m με βάθος έως 1 m, το οποίο θα επιχωθεί με εδαφικό υλικό για απορρόφηση μέσης ενέργειας 10.000 kJ των τεμαχών (Σχήμα 7.9). Η ακριβής διαστασιολόγηση των προαναφερόμενων μέτρων προστασίας δύναται να αξιολογηθεί με τη σύνταξη λεπτομερούς τοπογραφικού διαγράμματος μεγάλης κλίμακας.



Σχήμα 7.8 Διάγραμμα μήκους ολίσθησης (m) και κινητικής ενέργειας (kJ) βραχοτεμαχίων κατά μήκος των δυσμενέστερων τροχιών στη βάση του πρανού



Σχήμα 7.9 Προτεινόμενη θέση κατασκευής τάφρου περισυλλογής βραχοτεμαχίων (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) στη βάση του πρανού

8. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αφορά την ανάλυση βραχοκαταπτώσεων και την πρόταση μέτρων προστασίας του βόρειου απότομου πρανού με γενική διεύθυνση μετώπου ΒΔ – ΝΑ ανάντη του οικισμού του Επταχωρίου.

Σκοπό της εργασίας αποτελεί η γεωλογική και τεχνικογεωλογική ερμηνεία του φαινομένου και ο προσδιορισμός του μηχανισμού καταπτώσεων, η εκτίμηση της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας του εξεταζόμενου πρανού έναντι βραχοκαταπτώσεων, η ανάλυση και η προσομοίωση της αστοχίας με την ανάπτυξη μοντέλου με το πρόγραμμα RAMMS:: Rockfall, καθώς και η πρόταση ενεργητικών και παθητικών μέτρων προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανού για τον περιορισμό της επικινδυνότητας σε όσο το δυνατό χαμηλότερο επίπεδο

Η περιοχή μελέτης αποτελείται γεωλογικά από μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας και, αναλυτικά, από τους σχηματισμούς της σειράς Επταχωρίου. Ο λιθότυπος της σειράς Επταχωρίου που επικρατεί στην περιοχή είναι εναλλαγές ψαμμιτών με λεπτούς ιλυολιθικούς ορίζοντες, οι οποίοι καλύπτουν της βάση του εξεταζόμενου πρανού. Οι σχηματισμοί διακρίνονται από τεμαχώδη δομή και χαρακτηρίζονται από στρωσιγένεια και παρουσία συστημάτων διακλάσεων. Οι σχηματισμοί της περιοχής παρουσιάζουν τεμαχώδη δομή, η οποία ελέγχεται από την επιφάνεια της στρώσης με γενική διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, η οποία αποτελεί την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχόμαζας, καθώς και από παρακατακόρυφες διακλάσεις διεύθυνσης ΒΒΔ – ΝΝΑ εντός των ψαμμιτικών πάγκων.

Η επικινδυνότητα του εξεταζόμενου πρανού έναντι βραχοκαταπτώσεων κρίνεται μέτρια έως υψηλή, καθώς κατά μήκος του μετώπου του πρανού παρατηρούνται πολυάριθμες δομές παλαιότερων αστοχιών, οι οποίες αφορούν κυρίως υποσκαφές λόγω διάβρωσης ασθενών ιλυολιθικών στρωμάτων υποκείμενων ψαμμιτικών πάγκων δημιουργώντας ασταθή επικρεμάμενα τεμάχια, θέτοντας σε υψηλό κίνδυνο τον οικισμό κατάντη. Επιπρόσθετα, για τον προσδιορισμό του υψηλού βαθμού επικινδυνότητας συνεκτιμήθηκε η πιθανότητα αποκόλλησης νέων τεμαχών σύμφωνα με την εξελικτική πορεία του αναγλύφου του πρανού, η οποία διαμορφώθηκε από παλαιότερα πολυάριθμα φαινόμενα καταπτώσεων.

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε γεωλογική και τεχνικογεωλογική έρευνα στην περιοχή μελέτης κατά το διάστημα Ιουλίου – Αυγούστου 2018, καθώς και μετρήσεις πεδίου, οι οποίες περιλάμβαναν μετρήσεις προσανατολισμού ασυνεχειών με γεωλογική πυξίδα και δοκιμές κρουσιμέτρησης με τη σφύρα Schmidt. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις του πρανού με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR (Light Detection And Ranging) και με πτήσεις με μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle) για την τρισδιάστατη λεπτομερή αποτύπωση του εξεταζόμενου πρανού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών αναπτύχθηκε το σύνθετο τεχνικογεωλογικό μοντέλο της περιοχής και προσδιορίστηκε ο κύριος μηχανισμός αστοχίας, τον οποίο αποτελεί η ανατροπή βραχοτεμαχών συμπαγών ψαμμιτών κατά μήκος της επιφάνειας της στρώσης, η οποία ελέγχεται από τα συστήματα παρακατακόρυφων διακλάσεων της βραχόμαζας. Οι διακλάσεις αυτές δρουν ως εφελκυστικές ρωγμές κατά μήκος του μετώπου του εξεταζόμενου πρανού, καθώς το υψηλό ποσοστό ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που χαρακτηρίζει την περιοχή εισέρχεται στις ανοιχτές ασυνέχειες της βραχόμαζας διευρύνοντάς τις τοπικά και δημιουργώντας σημαντικές ζώνες αστάθειας, καθώς το νερό δρα ως παράγοντας αποτόνωσης και απομείωσης της συνοχής και, κατ' επέκταση, της αντοχής της βραχόμαζας δημιουργώντας οριακά ασταθείς συνθήκες. Κύριες ζώνες αστάθειας αποτελούν οι δομές υποσκαφής κατά μήκος του μετώπου του πρανού. Τα σχηματιζόμενα βραχοτεμάχια παρουσιάζουν όγκους που κυμαίνονται μεταξύ 2.5 m^3 και 60.0 m^3 , με συχνότερα παρατηρούμενους περίπου 5.0 m^3 , 25.0 m^3 και 55.0 m^3 , ενώ διακρίθηκαν επισφαλή τεμάχια με όγκους μεταξύ 2.5 m^3 και 40.0 m^3 , με μέσο περίπου 15.0 m^3 .

Η ανάλυση βραχοκαταπτώσεων και η προσομοίωση της αστοχίας στο πρανές πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη μοντέλων με το πρόγραμμα RAMMS:: Rockfall, το οποίο συνιστά ένα πλήρες και ειδικευμένο πρόγραμμα προσομοίωσης τροχιών σε τρεις διαστάσεις. Εξετάστηκαν όλες οι δυνητικές τροχιές των βραχοτεμαχών κατά μήκος του πρανού και αναλύθηκαν οι δυσμενέστερες τροχιές όπου επιδείκνυαν το μέγιστο κίνδυνο, εκτιμώντας το χειρότερο σενάριο βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του πρανού. Επιπλέον, αναλύθηκαν οι παράμετροι των συγκεκριμένων τροχιών λόγω της υψηλής τους επικινδυνότητας και προσομοιώνονται οι πραγματικές συνθήκες με την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης των σχηματισμών του πρανού, ώστε να αποδοθεί προσεγγιστικά μία ρεαλιστική προσομοίωση της αστοχίας.

Σύμφωνα με τα μοντέλα προσομοίωσης στο RAMMS:: Rockfall, τα βραχοτεμάχια των οποίων οι όγκοι υπολογίστηκαν παραπάνω, αναπτύσσουν μέσο ύψος αναπήδησης 3 – 4 m με μέγιστο τοπικά έως 8 m κατά την αναπήδησή τους στους ψαμμιτικούς πάγκους, όπου η ταχύτητες των βραχοτεμαχών κυμαίνονται από 5 m/s έως 8 m/s φθάνοντας σε μέγιστη ταχύτητα 15 m/s. Κατά τη διάρκεια της κίνησής τους, τα τεμάχια αναπτύσσουν υψηλά ποσοστά κινητικής ενέργειας (8.000 – 12.000 kJ), τα οποία μειώνονται, όπως υποδεικνύουν οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης, κατά την ολίσθησή τους επί του ιλυολιθικού στρώματος της βάσης του πρανού. Κατά την κίνησή τους αυτή αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής, οι οποίες προκαλούν την απορρόφηση υψηλού ποσοστού ενέργειας με αποτέλεσμα την ανακοπή της τροχιάς των βραχοτεμαχών ή την κύλισή τους έως τον πόδα του πρανού, απειλώντας την οικιστική ζώνη.

Συμπερασματικά, βάσει της ανάλυσης των συνθηκών έναντι βραχοκαταπτώσεων και της εκτίμησης της επικινδυνότητας και των συνθηκών αστοχίας και των παραμέτρων που τη διέπουν, προτείνεται η εφαρμογή μέτρων προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος του εξεταζόμενου πρανού για τον περιορισμό της επικινδυνότητας σε όσο το δυνατό χαμηλότερο επίπεδο. Συγκεκριμένα, προτείνεται η εφαρμογή ενεργητικών μέτρων προστασίας και βάσει του μηχανισμού αστοχίας προτείνεται:

- **Αποστράγγιση πρανούς** με κατασκευή τάφρων απορροής στη στέψη του για μείωση του όγκου νερού που κατεισδύει και ελάττωση της διαβρωτικής του δράσης, καθώς και διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών εντός των ψαμμιτικών πάγκων ανά 3 – 5 m με μικρό βάθος έως 5 m. Η εφαρμογή του μέτρου αυτού κρίνεται δύσκολη λόγω προσβασιμότητας του μετώπου του πρανούς.
- **Εφαρμογή γεωϋφάσματος και φυτοκάλυψης**, κυρίως στη διεπιφάνεια των ψαμμιτικών πάγκων και του υποκείμενου ιλυολιθικού στρώματος, αλλά και κατά μήκος του ιλυολιθικού στρώματος στη βάση του πρανού για προστασία έναντι διάβρωσης και για απορρόφηση μεγάλου ποσοστού ενέργειας των βραχοτεμαχών και αύξηση της τριβής μεταξύ των ολισθαίνοντων βραχοτεμαχών και του ιλυολίθου της βάσης για την προστασία της οικιστικής ζώνης έναντι καταπτώσεων.

Επιπλέον, προτείνεται η εφαρμογή παθητικών μέτρων προστασίας που αποτελούν καταλληλότερη μέθοδο προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων και η επιλογή και η διαστασιολόγηση των οποίων βασίζεται στις παραμέτρους κίνησης των τεμαχών και στην τοπογραφία της βάσης του πρανού, όπου πρόκειται να εφαρμοσθούν και αναλυτικά προτείνονται:

- **Δυναμικοί φράχτες ανάσχεσης βραχοκαταπτώσεων** με κατασκευή σε δύο σειρές στη βάση του πρανού για αποτελεσματικότερη προστασία της οικιστικής ζώνης έναντι βραχοκαταπτώσεων. Πιο αναλυτικά, η πρώτη σειρά φραχτών δύναται να ανέρχεται σε ύψος 3 m με μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας έως και 10.000 kJ για τη συγκράτηση τεμαχών με μεγάλη ταχύτητα και κινητική ενέργεια, όπως υπολογίστηκε παραπάνω κατά μήκος της τομής στη βάση του πρανού. Η δεύτερη σειρά φραχτών δύναται να ανέρχεται σε μικρότερο ύψος έως 2 m με ικανότητα απορρόφησης ενέργειας έως 8.500 kJ για τη συγκράτηση τεμαχών με αισθητά μειωμένη κινητική ενέργεια.
- **Τάφροι περισυλλογής βραχοτεμαχών (βραχοπαγίδες)** πλάτους 2 – 5 m με βάθος έως 1 m, το οποίο θα επιχωθεί με εδαφικό υλικό για απορρόφηση μέσης ενέργειας 10.000 kJ των τεμαχών περιμετρικά της οικιστικής ζώνης στη βάση του πρανού μπροστά από τους φράχτες ανάσχεσης με σκοπό να ανακόψουν την τροχιά ολισθαίνοντων τεμαχών, των οποίων η τροχιά δεν ανακόπηκε από τους φράχτες.



- Asteriou, P., Saroglou, H., & Tsiambaos, G. (2013).** Rockfalls: influence of rock hardness on the trajectory of falling rock blocks. *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Πρακτικά 13ου Διεθνούς Συνεδρίου, XLVII*. Χανιά. Ανάκτηση από <http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.11033>
- Aubouin, J. (1974).** Des tectoniques superposees et de leur signification par rapport aux modelew geophysiques. L' exemple de Dinarides; paleitectonique, tartitectonique, neotectonique. *Bull. Soc. Geol. France*, 15, σσ. 426-460. Paris.
- Aydin, A., & Basu, A. (2005).** The Schmidt hammer in rock material characterizatou. *Engineering Geology*, 81.1, 1-14.
- Bourcart, J. (1922).** *Les Confins albanais administres par la France (1916-1920). Contribution a la Geographie et a la Geologie de l' Albanie moyenne. These.* Paris: University of Paris, 308 pp.
- Buill, F., Núñez-Andrés, A., Lantada, N., & Prades, A. (2016).** Comparison of Photogrammetric Techniques for Rockfalls Monitoring. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 44 042023, World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2016)*. doi:10.1088/1755-1315/44/4/042023
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R. G., Schweizer, A., Graf, C., . . . Volkwein, A. (2012).** *Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool "RAMMS" for gravitational natural hazards.* INTERPRAEVENT, p. 9.
- Deere, D., & Miller, R. (1966).** Engineering classification and index properties for intact rock. *Tech. Report Air Force Weapons Lab*, 65-116.
- Dips**, Version 5.1, Rocscience Inc.
- GEOBRUGG**, Swiss BRUGG, <https://www.geobrugg.com/>
- Google Earth**, Google Earth Pro.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abella, A., Derron, M., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzin, A. (2012).** Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards*, 5–28. doi:10.1007/s11069-010-9634-2
- Leine, R., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P., & Gerber, W. (2013).** *Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape.* Multibody System Dynamics.
- Maccaferri Hellas**, Officine Maccaferri, <https://www.maccaferri.com/gr/>

Salvini, R., Mastrorocco, G., Seddaiu, M., Rossi, D., & Vanneschi, C. (2016). The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8:1, 34-52.
doi:10.1080/19475705.2016.1199053

SLF/WSL, E. Z., RAMMS::ROCKFALL User Manual, RAMMS (RAPid Mass Movement Simulation): <http://ramms.slf.ch/ramms/>

Van Westen, C., Van Asch, T., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bull Eng Geol Env*, 65, 167–184.
doi:10.1007/s10064-005-0023-0

Vazaios, I., Vlachopoulos, N., Latto, M., & Diederichs, M. (2014). *LiDAR as input for Discrete Fracture Networks: A comparison of automated and manual joint mapping using a scanned surface model*. Canadian Geotechnical Society, GeoRegina, Regina, SK, Sept-Oct.

Vo, D. (2015). *RAMMS::Rockfall versus Rockyfor3D in rockfall trajectory simulations at the Community of Vik, Norway*. Oslo: Master Thesis in Geosciences, Department of Geosciences, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo.

WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, SLF/WSL,
<https://www.wsl.ch/en.html>

Wyllie, D. (2014). *Rockfall Engineering: Development and calibration of an improved model for analysis of rock fall hazards on highways and railways*. Vancouver: Doctor of Philosophy's Thesis, Geological Engineering, Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies, University of British Columbia, June.

Wyllie, D. (2015). *Rock Fall Engineering*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Αστερίου, Π. (2016). *Διερεύνηση των γεωτεχνικών παραμέτρων που ελέγχουν τις καταπτώσεις βράχων*. Αθήνα: Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Βαμβακά, Α. (2009). *Γεωμετρία της παραμόρφωσης και κινηματική ανάλυση στη Μεσοελληνική Αύλακα*. Θεσσαλονίκη: Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας, Τομέας Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Βόιον. <http://www.tovoion.com/>

Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.
<http://www.gein.noa.gr/el/>

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, (Ε.Μ.Υ.).

Λέκκας, Ε., Παπανικολάου, Δ., Κράνης, Χ., Λόζιος, Σ., Φουντούλης, Ι., Σκούρτσος, Ε., & Νομικού, Β. (1999). *Νεοτεκτονικός Χάρτης της Ελλάδος (κλίμακα 1:100.000), Επεξηγηματικό τεύχος, Φύλλο "Γρεβενά"*. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Αθηνών, Επιτροπή Τεκτονικής της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας.

Λέκκας, Ε., Παπανικολάου, Ι., Κρανής, Χ., Λοζιος, Σ., Φουντούλης, Ι., Νομικού, Ε., & Σκούρτσος, Ε. (1995-1996). *Νεοτεκτονικός Χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο "Γρεβενά", κλίμακα 1:100.000*. Επιτροπή Τεκτονικής της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης και Πρόγνωσης Σεισμών .

Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωϋλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων*. Αθήνα: Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μουντράκης, Δ. (2010). *Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδος*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.). (2001).
<http://www.oasp.gr/>

Παπανικολάου, Δ., & Σιδέρης, Χ. (1977). Συμβολή εις την γνώσιν της Μολάσσης του Ελλαδικού χώρου. *Ι. Προκαταρκτική έρευνα εις την περιοχήν Καναλίων Καρδίτσης, Ann. Geol. Pays Hellen., 28*, σσ. 387-417.

Παπανικολάου, Δ., Λέκκας, Ε., Μαριολακος, Η., & Μίρκου, Ρ. (1988). Συμβολή στη γεωδυναμική εξέλιξη της Μεσοελληνικής Αύλακας. *Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, XX*, σσ. 17-36. Αθήνα.

Το Επταχώρι. (2016). (Φ. Σ. Επταχωριτών, Παραγωγός), <http://www.eptahori.gr/>

Χρηστάρας, Β., Αναγνωστόπουλος, Χ., Ντότσικα, Ε., Σπυρόπουλος, Ν., & Πουτούκης, Δ. (1997). Κατολισθητικά φαινόμενα και υδρογεωλογικές συνθήκες στα πρανή της κοινότητας Επταχωρίου, Ν. Καστοριάς. *4ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας*, (σσ. 582-599). Θεσσαλονίκη.