



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ»

ΔΑΝΔΙΚΑ ΜΑΡΙΑ

ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΓΕΩΛΟΓΟΣ

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΞΕΩΝ ΣΤΗΝ  
ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΠΟΤΑΜΑ – ΠΡΟΥΣΣΟ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR ΚΑΙ UAV**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2020



ΔΑΝΔΙΚΑ ΜΑΡΙΑ

ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ  
ΔΙΠΟΤΑΜΑ – ΠΡΟΥΣΣΟ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ  
LIDAR ΚΑΙ UAV

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:**

Μαρίνος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, Επιβλέπων

Παπαθανασίου Γιώργος, Επίκουρος Καθηγητής ΔΠΘ, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Δρ. Μακεδών Θωμάς, Ε.ΔΙ.Π Α.Π.Θ, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής



© Δανδίκια Μαρία, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

## ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΠΟΤΑΜΑ – ΠΡΟΥΣΣΟ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR ΚΑΙ UAV

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.



## Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας, με κατεύθυνση Τεχνική Γεωλογία του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Βασίλειο Π. Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή Τεχνικής Γεωλογίας, ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος, τη συνεχή καθοδήγηση του και την επίλυση προβληματισμών που δημιουργήθηκαν γύρω από το θέμα της μεταπτυχιακής διπλωματικής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επίκουρο καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαθανασίου και στον Δρ. Μακεδόνα Θωμά, για την συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Στρατή Καραντανέλλη, υποψήφιο διδάκτορα, για την πολύτιμη καθοδήγηση του με την επεξεργασία των δεδομένων από το UAV και το Lidar.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάρα πολύ τη συμφοιτήτρια μου Ανδριάννα Γκοράνη για την άψογη επαγγελματική συνεργασία που είχαμε και για την ψυχολογική υποστήριξη της κατά τη διάρκεια αυτού του μεταπτυχιακού.

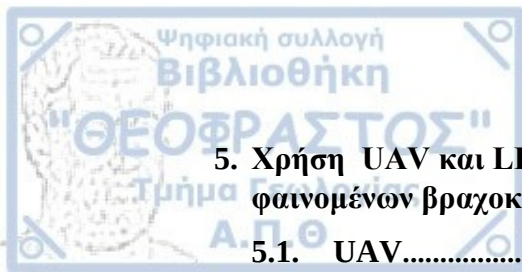
Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω και στη μητέρα μου για τη στήριξη της στη διάρκεια όλων των σπουδών μου και ιδιαίτερα για την υλοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής.

Χωρίς τη βοήθεια αυτών των ανθρώπων δε θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω το συγκεκριμένο απαιτητικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα.



## Περιεχόμενα

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Περίληψη .....                                     | 6  |
| Abstract.....                                      | 7  |
| 1. Εισαγωγή .....                                  | 8  |
| 1.1 Αντικείμενο – Σκοπός μελέτης.....              | 8  |
| 1.2 Ιστορικό περιοχής μελέτης.....                 | 10 |
| 1.3 Μεθοδολογία – Εργαλεία έρευνας .....           | 12 |
| 2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....                        | 14 |
| 2.1. Κατολισθήσεις.....                            | 14 |
| 2.2. Ταξινόμηση κατολισθήσεων .....                | 14 |
| 2.3. Βραχοκαταπτώσεις .....                        | 18 |
| 2.3.1. Αίτια εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων .....      | 18 |
| 2.3.2. Τροχιά .....                                | 20 |
| 2.3.3. Μέτρα αντιστήριξης .....                    | 21 |
| 3. Γεωλογικές Συνθήκες .....                       | 22 |
| 3.1. Γεωλογία ευρύτερης περιοχής μελέτης.....      | 22 |
| 3.1.1. Γεωτεκτονική θέση – στρωματογραφία .....    | 22 |
| 3.1.2. Σεισμοτεκτονική .....                       | 24 |
| 3.1.3. Υδρολογικές - Κλιματολογικές συνθήκες ..... | 28 |
| 3.2. Γεωλογία στενής περιοχής μελέτης.....         | 31 |
| 3.2.1. Γεωμορφολογικές συνθήκες.....               | 31 |
| 3.2.2. Γεωλογικές συνθήκες.....                    | 34 |
| 4. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες.....                 | 39 |
| 4.1. Μηχανισμός αστοχίας.....                      | 39 |
| 4.2. Τεχνικογεωλογικές ενότητες.....               | 43 |



|                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Χρήση UAV και LIDAR για την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των φαινομένων βραχοκαταπτώσεων .....</b> | <b>51</b> |
| <b>5.1. UAV.....</b>                                                                                    | <b>51</b> |
| 5.1.1. Γενικά.....                                                                                      | 51        |
| 5.1.2. Επεξεργασία δεδομένων .....                                                                      | 51        |
| 5.1.3. Πλεονεκτήματα χρήσης σε βραχοκαταπτώσεις .....                                                   | 52        |
| <b>5.2. Lidar .....</b>                                                                                 | <b>54</b> |
| 5.2.1. Γενικά.....                                                                                      | 54        |
| 5.2.2. Μεθοδολογία χρήσης .....                                                                         | 54        |
| 5.2.3. Πλεονεκτήματα χρήσης σε πρηνή .....                                                              | 56        |
| <b>5.3. Επεξεργασία δεδομένων.....</b>                                                                  | <b>57</b> |
| 5.3.1. Εισαγωγή .....                                                                                   | 57        |
| 5.3.2. Σύλλογή δεδομένων .....                                                                          | 57        |
| 5.3.3. Μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων.....                                                          | 61        |
| <b>6. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....</b>                                                                 | <b>67</b> |
| 6.1. Τεκτονική ανάλυση.....                                                                             | 67        |
| 6.2. Κινηματική ανάλυση ευστάθειας.....                                                                 | 72        |
| 6.2.1. Προσδιορισμός διατμητικής αντοχής ασυνεχειών .....                                               | 72        |
| 6.3. Ανίχνευση μετακινήσεων.....                                                                        | 79        |
| <b>7. Αξιολόγηση Επικινδυνότητας Βραχοκαταπτώσεων .....</b>                                             | <b>84</b> |
| 7.1. Γενικά στοιχεία.....                                                                               | 84        |
| 7.2. Αξιολόγηση επικινδυνότητας κατά μήκος του πρηνούς.....                                             | 86        |
| 7.3. Προτεινόμενα μέτρα προστασίας.....                                                                 | 91        |
| <b>8. Συμπεράσματα.....</b>                                                                             | <b>93</b> |
| <b>Βιβλιογραφία.....</b>                                                                                | <b>95</b> |

## Περίληψη

Οι βραχοκαταπτώσεις αδιαμφισβήτητα αποτελούν ένα σοβαρό και συχνό γεωλογικό φαινόμενο και μπορούν να αποβούν καταστροφικές για το ανθρωπογενές περιβάλλον. Επομένως, κρίνεται αναγκαίος ο εντοπισμός περιοχών, στις οποίες δύναται να λάβει χώρα το φαινόμενο. Έτσι, προκύπτει η έννοια της επικινδυνότητας και ως εκ τούτου η ποιοτική της προσέγγιση, με σκοπό την έγκαιρη αντιμετώπιση της εκδήλωσης ενός δυνητικού φαινομένου. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν όλα τα παραπάνω, σημαντικός είναι ο προσδιορισμός ορισμένων χαρακτηριστικών της βραχομάζας, τα οποία για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας λήφθηκαν με συμβατικές μεθόδους χαρτογράφησης και με μεθόδους τηλεπισκόπησης, όπως οι σαρωτές Lidar (Light Detection and Ranging) και τα ημιαυτόματα Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV). Τα τελευταία χρόνια η χρήση των τεχνολογιών αυτών παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στο χώρο των γεωπιστημών σε σχέση με προϋπάρχουσες μεθόδους.

Στην παρούσα μελέτη έγινε χρήση του επίγειου σαρωτή Lidar και πτήσεις UAV (Μάρτιος 2018, Μάιος 2019, Νοέμβριος 2019) που στόχο είχε την εξαγωγή όλων των απαραίτητων παραμέτρων σχετικά με την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση του πρανούς, την εύρεση του μηχανισμού αστοχίας, καθώς και την αξιολόγηση της επικινδυνότητας της εν λόγω περιοχής έναντι βραχοκαταπτώσεων. Η περιοχή μελέτης είναι στην περιοχή Διπόταμα – Προυσσό, Ευρυτανίας. Το πρανές αποτελείται από ασβεστόλιθο και έχει παρουσιάσει βραχοκαταπτώσεις, με την πιο πρόσφατη μεγάλης κλίμακας βραχοκατάπτωση να έχει λάβει χώρα το Φεβρουάριο του 2015. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν τα στοιχεία προσανατολισμού των συστημάτων ασυνεχειών, η εκτίμηση των δυνητικών αστοχιών, καθώς και η ανίχνευση πρόσφατης μετακίνησης στη γεωμορφολογία τους πρανούς (change detection). Συνεπώς, όλα αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας κατά μήκος του πρανούς, που μελετάται.

Στην αρχή της εργασίας, περιγράφεται το φαινόμενο των κατολισθήσεων και πιο συγκεκριμένα των βραχοκαταπτώσεων και των μηχανισμών που το προκαλούν. Έπειτα, παρουσιάζονται οι γεωλογικές συνθήκες τόσο της ευρύτερης, όσο και της στενής περιοχής μελέτης. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών, η εκτίμηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς, που περιλαμβάνει τον μηχανισμό αστοχίας και τέλος ορίστηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που αντιπροσωπεύουν την περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια, γίνεται μία εισαγωγή στη μεθοδολογία των τεχνολογιών Lidar και UAV και παρατίθενται τα πλεονεκτήματα χρήσης τους σε βραχοκαταπτώσεις. Ακολούθως, παρουσιάζεται η επεξεργασία των δεδομένων τόσο από τις συμβατικές μεθόδους, που προέκυψαν από την επιτόπου έρευνα, όσο και από τις νέες τεχνολογίες. Στη συνέχεια, αναφέρονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές τις μεθόδους, συγκρίθηκαν μεταξύ τους και επαληθεύτηκαν για την αξιοπιστία της μελέτης. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η



αξιολόγηση της επικινδυνότητας και παρατίθεται το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης των συνθηκών της περιοχής μελέτης (conceptual model).

## Abstract

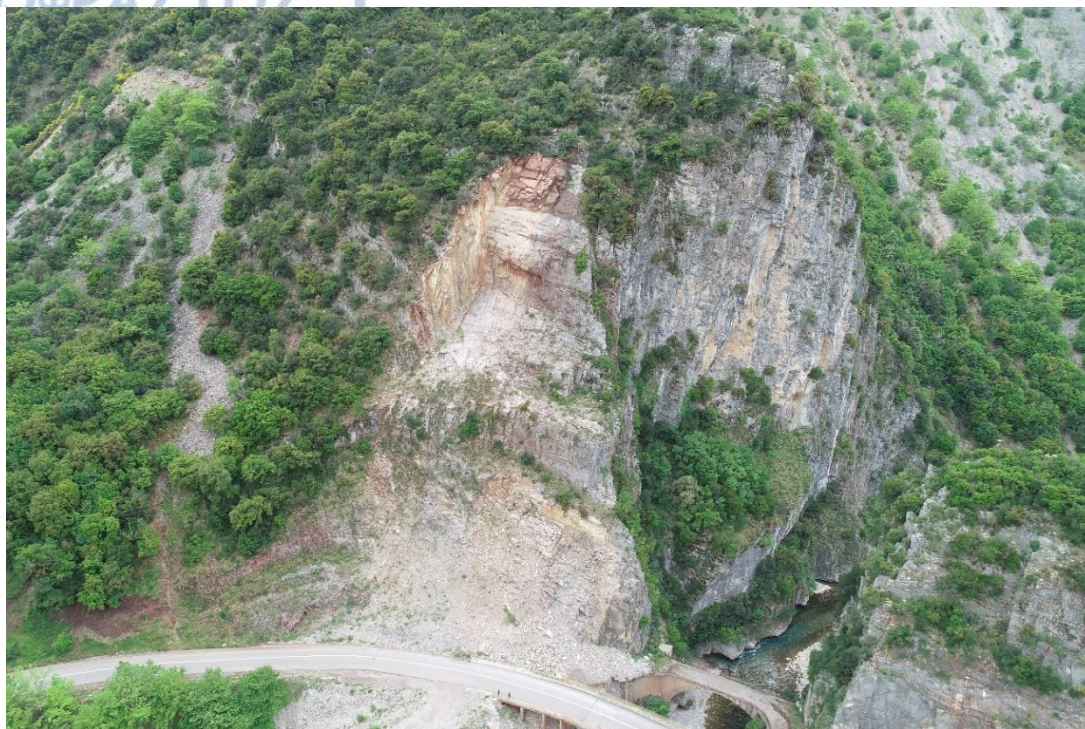
Rock falls undoubtedly pose a serious and common geological hazard and can result in catastrophic ramifications for the anthropogenic environment. Therefore, it is crucial to locate the specific regions where it is more possible that such phenomena occur. This way the concept of hazard and its qualitative assessment surfaced, aiming in early confrontation of a possible phenomenon. In order for the above mentioned to be executed, it is of high importance to determine the characteristics of the rock mass, which can be extracted either via conventional mapping methods or through remote sensing methods, such as Lidar scanners (Light Detection and Ranging) and semi-automatic Unmanned Aerial Vehicle systems (UAV). In recent years these technologies have yielded numerous advantages in the field of geoscientists in comparison to pre-existing methods (e.g. using a geological compass).

In the current project, there has been made use of the earthing scanner Lidar and UAV in purpose of assuming all the necessary parameters that concern both the geotechnical evaluation of the slope, the discovery of the failure mechanism as well as the assessment of the hazard in this particular area (opposite of the rock falls). The research area consists of the limestone slope, which has presented rock falls in the district of Dipotama – Prouso, Evritania. Through data evaluation, results indicated all the orientation elements of the discontinuity systems, the assessment of future possible discontinuities as well as the change detection in the slope's geomorphology. Consequently, those results were utilized for the spatial assessment of hazard along the slope, on which this study was conducted.

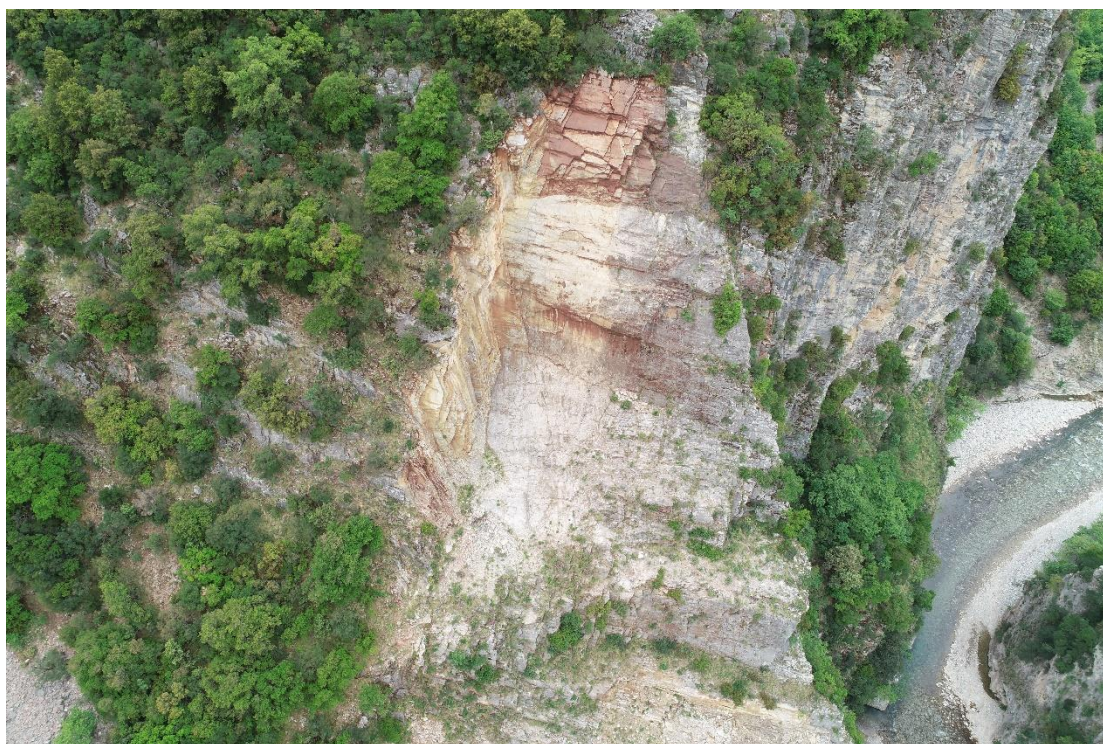
Initially, the project focuses in the landslide phenomenon and more specifically in the rock falls and the mechanisms which provoke such abnormal activities. Moreover, it sheds light on the geological conditions in the wide as well as in the narrow research area, the seismotectonics and the hydrological-climatological conditions. Following up, the research concentrates its main interest in the assessment of the geotechnical behavior, which consists of the failure mechanism and the geotechnical units. In addition to the above mentioned, there is an introduction in the philosophy behind Lidar and UAV usage and their advantages of rock fall usage are also indicated. Furthermore, the project demonstrates the data evaluation assumed not only from common methods that occur during ground research, but via new technologies as well. A detailed reference to the results that came up from these methodologies is included. Due to credibility reasons the results were validated. Conclusively, the spatial assessment of hazard is displayed and the final 3D conceptual model of the research area is presented.

Το υπό μελέτη πρανές έχει κατολισθήσει, με κατάρρευση μεγάλου τμήματος του, στα τέλη Φεβρουαρίου του 2015. Η μεγάλων διαστάσεων κατάρρευση του υλικού ήταν ικανή ώστε να αποκλείσει το οδικό δίκτυο που βρίσκεται ακριβώς παράλληλα με το πρανές, με αποτέλεσμα τον ολικό αποκλεισμό των κατοίκων της περιοχής. Τα χρόνια που ακολούθησαν οι μετακινήσεις του υλικού ήταν πολύ μικρότερης κλίμακας και δεν επέφεραν σημαντικό πρόβλημα στη λειτουργία του οδικού δικτύου.





Εικόνα 2: Φωτογραφία του υπό μελέτη πρανούς, λήψη με το UAV.



Εικόνα 3: Φωτογραφία του υπό μελέτη πρανούς, λήψη με το UAV.

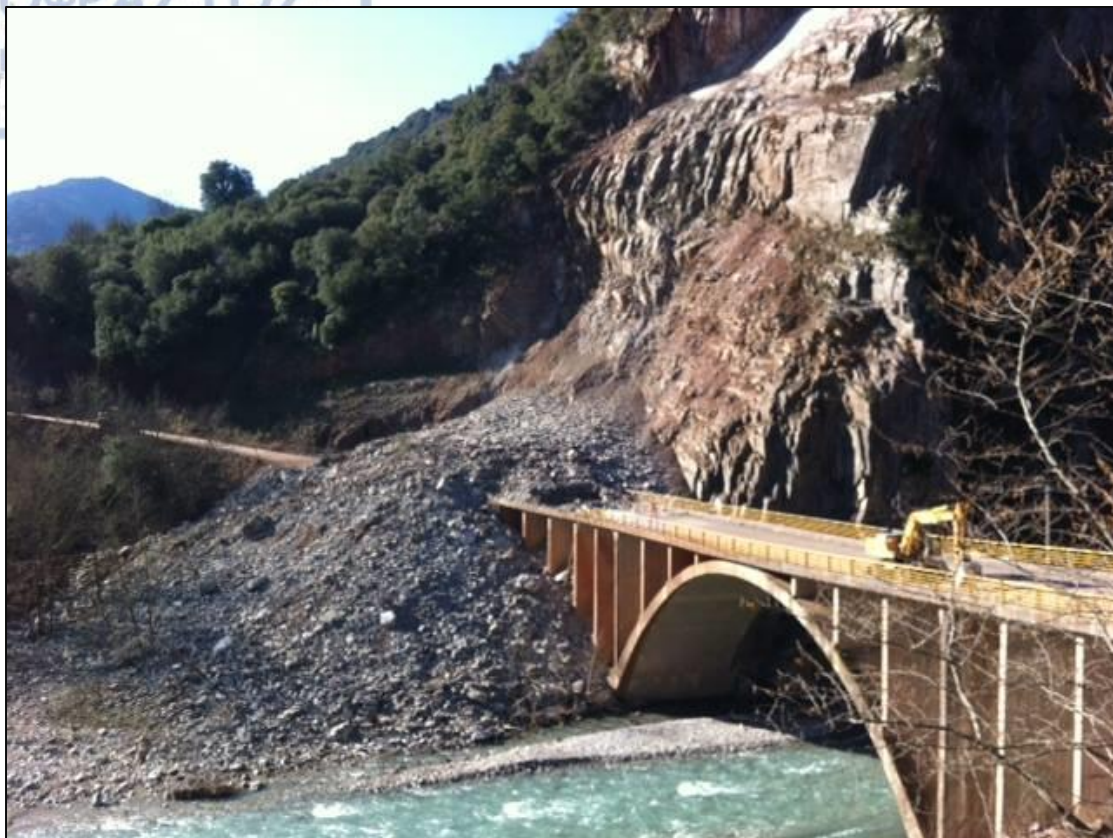
## 1.2 Ιστορικό περιοχής μελέτης

Συγκρίνοντας τις λήψεις που λήφθηκαν το Μάρτιο του 2018 με το Νοέμβριο του 2019 παρατηρήθηκε μία μικρή μετακίνηση υλικού στο κάτω μέρος του πρανούς κοντά στο ποτάμι. Η μετακίνηση αυτή ήταν αναγνωρίσιμη, αλλά συγκριτικά με τον όγκο του υλικού που έχει συγκεντρωθεί σε όλον τον πόδα του πρανούς είναι πολύ μικρής κλίμακας.

Μετά από βιβλιογραφική έρευνα διαπιστώθηκε ότι η μεγάλη αυτή συγκέντρωση του υλικού στη βάση του πρανούς προήλθε από μία μεγάλων διαστάσεων κατάπτωση υλικού, η οποία έλαβε χώρα στις 19 Φεβρουαρίου του 2015. Επίσης, δύο μέρες μετά πραγματοποιήθηκε μία ακόμα κατάπτωση στο κάτω μέρος του πρανούς, όμως μικρότερης κλίμακας.



Εικόνα 4: Φωτογραφία από την κατάπτωση που έλαβε χώρα στις 19 Φεβρουαρίου του 2015, <https://www.protothema.gr/>.



Εικόνα 5: Φωτογραφία από την κατάπτωση που έλαβε χώρα στις 19 Φεβρουαρίου του 2015, <https://www.protothema.gr/>.

Αρχές Φεβρουαρίου του 2015, σύμφωνα με τον Δήμο Καρπενησίου ο νομός Ευρυτανίας τέθηκε σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων, μετά την έντονη και συνεχόμενη βροχόπτωση στις 31 Ιανουαρίου του 2015. Λόγω της τεράστιας αυτής βραχοκατάπτωσης, οι επιστήμονες του Ι.Γ.Μ.Ε συνέταξαν μία γεωλογική έκθεση για το συμβάν.

Οι τεχνικοί από τη νομαρχία, οι οποίοι ήταν υπεύθυνοι για την διάνοιξη του οδικού δικτύου, ανακοίνωσαν ότι η κατολίσθηση οφείλεται στο φαινόμενο συστολής – διαστολής. Επιπλέον, θεώρησαν ότι οι πολλές και έντονες βροχοπτώσεις των προηγούμενων ημερών «πότισαν» εσωτερικά τα πετρώματα των πρανών στο σημείο.

Στη συνέχεια, ακολούθησαν ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι  $-10^{\circ}\text{C}$ ) και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να παγώσουν τα νερά που υπήρχαν εσωτερικά των βράχων. Η κατάρρευση του μεγάλου τμήματος του βουνού προκλήθηκε από τη διαστολή λόγω της ηλιοφάνειας την ημέρα της κατολίσθησης.



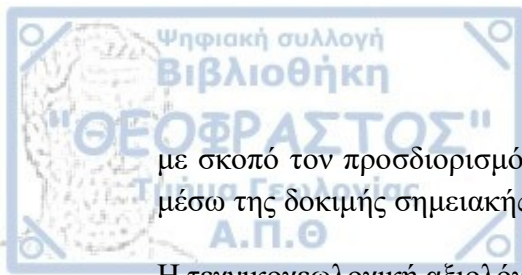
Εικόνα 6: Απόσπασμα της εφημερίδας "Ευρυτανικά Νέα" από τις 25/02/2015.

### 1.3 Μεθοδολογία – Εργαλεία έρευνας

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της συγκεκριμένης διπλωματικής εκτελέστηκε μία σειρά εργασιών. Αρχικά, ξεκίνησε η βιβλιογραφική αναζήτηση για μελέτες και εργασίες στη περιοχή ενδιαφέροντος καθώς και για παρόμοιες περιπτώσεις στον Ελλαδικό χώρο, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Με σκοπό, μια πρώτη επαφή με τις μεθόδους ανάλυσης και αντιμετώπισης παρόμοιων θεμάτων, γεωλογικού – γεωτεχνικού περιεχομένου.

Πραγματοποιήθηκε υπαίθρια επίσκεψη στην περιοχή μελέτης, Νοέμβριος 2019, για τη συλλογή επί τόπου μετρήσεων και χαρτογράφηση της θέσης. Η συλλογή των δεδομένων αφορούσε μετρήσεις προσανατολισμού των ασυνεχειών με την γεωλογική πυξίδα, χρήση της σφύρας Schmidt και του προφίλομέτρου με σκοπό τον υπολογισμό των παραμέτρων JRC και JCS των ασυνεχειών και την επίλυση του κριτηρίου Barton – Bandis (1990).

Επίσης, μέσω της χρήσης του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) για ασβεστολιθικές βραχομάζες (Μαρίνος, 2010), έγινε η υπαίθρια αξιολόγηση – διαχωρισμός της ποιότητας της βραχομάζας στην περιοχή μελέτης. Συλλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα από την υπαίθρο, τα οποία αποτέλεσαν το υλικό των εργαστηριακών δοκιμών



με σκοπό τον προσδιορισμό της μονοαξονικής αντοχής των πετρωμάτων,  $\sigma_{ci}$  (MPa), μέσω της δοκιμής σημειακής φόρτισης (Point Load Index).

Η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση έγινε βάσει των εξαγόμενων αποτελεσμάτων του GSI και του  $\sigma_{ci}$ , τα οποία αποτέλεσαν τις παραμέτρους που διερευνήθηκαν για τον διαχωρισμό των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων. Επίσης, βασικό κριτήριο αποτελούν και οι εναλλαγές στη λιθολογία των σχηματισμών της περιοχής μελέτης.

Ο έλεγχος της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών έχει ως απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό των πιθανών μηχανισμών αστοχίας που επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς. Επομένως, αναλύθηκαν οι μηχανισμοί αστοχίας που έχουν προκαλέσει βραχοκαταπτώσεις (back analysis) και οι δυνητικές αστοχίες στο πρανές (κινηματική ανάλυση, Dips 7.0.).

Κατά την πιο πρόσφατη υπαίθρια εργασία, Νοέμβριος 2019, έγινε πτήση μέσω μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV) περιμετρικά από το πρανές, καθώς και σάρωση με τον επίγειο σαρωτή Lidar. Τα εξαγόμενα δεδομένα και από τις δυο μεθόδους αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς και πιο συγκεκριμένα τα στοιχεία προσανατολισμού των κύριων οικογενειών ασυνεχειών που διατέμνουν το πρανές.

Έπειτα, έγινε η επεξεργασία και η αξιολόγηση των επιτόπου μετρήσεων, έτσι ώστε να μπορέσουν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των δεδομένων από το Lidar και το UAV. Μέσω αυτής της αξιολόγησης και σύγκρισης, υπολογίστηκαν τα τελικά στοιχεία προσανατολισμού των ασυνεχειών.

Επίσης, βασικός σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός των μετακινήσεων της βραχομάζας σε όλη την έκταση του πρανούς, στο διάστημα των τελευταίων 3 ετών. Για να επιτευχθεί η προαναφερθείσα εργασία, χρειάζεται να υπάρχουν δεδομένα από παλαιότερες πτήσεις και επίγειες σαρώσεις του πρανούς. Τα δεδομένα αυτά παρήχθησαν με επιτόπου επίσκεψη στην περιοχή μελέτης το διάστημα 2017 – 2019. Οπότε, μέσω του προγράμματος Cloud Compare, υπολογίστηκαν οι πιθανές μετακινήσεις, καθώς και ο όγκος του μετακινούμενου υλικού.

Το υπό μελέτη πρανές, βρίσκεται παράλληλα με τοπικό οδικό δίκτυο, οπότε κρίθηκε σημαντικό στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας να γίνει μια ποιοτική αξιολόγηση της επικινδυνότητας στη θέση μελέτης. Παραμετροποιήθηκαν συγκεκριμένοι παράγοντες οι οποίοι συμβάλουν στην αύξηση της επικινδυνότητας και ορίστηκαν ποιοτικά ζώνες επικινδυνότητας πάνω στο πρανές σε σχέση με το οδικό δίκτυο.

Σε τελευταίο στάδιο δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής (conceptual model) μέσω του προγράμματος CorelDRAW 2017. Στην κατασκευή του γεωλογικού προσομοιώματος της περιοχής και στη σωστή αποτύπωση όλων των γεωλογικών πληροφοριών, συνέβαλαν άμεσα η λήψη φωτογραφιών και η άμεση επαφή με το πρανές.

## **2. Θεωρητικό υπόβαθρο**

### **2.1. Κατολισθήσεις**

Με τον όρο «μετακίνηση μαζών» (mass movements) χαρακτηρίζεται κάθε μετακίνηση τμήματος πρानούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό (Varnes, 1978). Η κατολισθήση εκφράζει το αποτέλεσμα της αναζήτησης μίας νέας ισορροπίας τους εδάφους.

Τα φαινόμενα αυτά συνήθως συμβαίνουν σε βουνά ή παράκτιες περιοχές λόγω της αστάθειας των πλαγιών και των κρημνών, αλλά ορισμένες φορές και σε πεδιάδες εξαιτίας της αποσάθρωσης του υπεδάφους.

Γενικά, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία μεγάλη αύξηση στο συντέλεση κατολισθητικών φαινομένων. Πολλές από τις πιο μεγάλες καταστροφικές κατολισθήσεις προκλήθηκαν από έντονες βροχοπτώσεις ή τη δράση σεισμών.

Οι τοποθεσίες στις οποίες προκαλούνται κατολισθήσεις ποικίλουν ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει το φαινόμενο.

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων και πιο συγκεκριμένα των βραχοκαταπτώσεων αποτελεί έναν από τους κυριάρχους φυσικούς κινδύνους, κυρίως σε ορεινές περιοχές.

### **2.2. Ταξινόμηση κατολισθήσεων**

Ο Varnes (1978) πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων που περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις που μπορούν να παρατηρηθούν σε πρानή, εκτός των καθιζήσεων.

Σύμφωνα με τους Κούκη και Σαμπατακάκη (2007), η ταξινόμηση κατά Varnes είναι πιο «ευέλικτη» και εφαρμόζεται πιο εύκολα στις εκάστοτε συνθήκες.

Τα βασικά κριτήρια για την ταξινόμηση είναι ο τύπος της μετακίνησης και ο τύπος του μετακινούμενου υλικού.

Ανάλογα με τον τύπο της κίνησης διακρίνονται σε πτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εκτάσεις, ροές και σε σύνθετες, που αποτελούν συνδυασμό περισσότερων τύπων.

Επιπλέον, ανάλογα με το υλικό που μετακινείται διακρίνονται κινήσεις που γίνονται είτε στο υπόβαθρο, είτε στο έδαφος, το οποίο διακρίνεται σε κορήματα και γαίες.

Στην Εικόνα 7 φαίνονται οι διάφοροι τύποι ταξινόμησης πρανών που προκύπτουν από τον συνδυασμό των παραπάνω.

| Τύπος κίνησης                           | Υπόβαθρο                                                | Τύπος υλικού                                  |                                    |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|
|                                         |                                                         | Εδάφη                                         |                                    |
|                                         |                                                         | Κορήματα                                      | Γαίες                              |
| Πτώσεις                                 | Πτώσεις βράχων                                          | Πτώσεις κορημάτων                             | Πτώσεις γαιών                      |
| Ανατροπές                               | Ανατροπές βράχων                                        | Ανατροπές κορημάτων                           | Ανατροπές γαιών                    |
| Ολισθήσεις -<br>κυκλικές<br>μεταθετικές | καθίζηση βράχων<br>Ολίσθηση βράχων                      | Καθίζηση κορημάτων<br>Ολισθήσεις<br>κορημάτων | Καθίζηση γαιών<br>Ολισθήσεις γαιών |
| Πλευρικές<br>Εκτάσεις                   | Έκταση βράχων                                           | Έκταση κορημάτων                              | Έκταση γαιών                       |
| Ροές                                    | Ροή βράχων                                              | Ροή κορημάτων                                 | Ροή γαιών (ή ροή ιλύος)            |
| Σύνθετες                                | Συνδυασμός δύο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακινήσεων |                                               |                                    |

Εικόνα 7: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978).

Επομένως, τα είδη κατολισθητικών κινήσεων σύμφωνα με την ταξινόμηση του Varnes (1978) και των ορισμών από τους Κούκη και Σαμπατακάκη (2007), είναι τα εξής:

- **Καταπτώσεις (falls)**

Στις καταπτώσεις, μία μάζα οποιουδήποτε μεγέθους, αποσπάται από ένα απότομο εδαφικό ή βραχώδες πρανές, κατά μιας επιφάνειας, χωρίς ή ελάχιστη διατμητική μετατόπιση και η πτώση γίνεται κυρίως ελεύθερα, με αναπήδηση ή κύλιση στην επιφάνεια του πρανούς. Η μετακίνηση είναι πολύ μέχρι εξαιρετικά γρήγορη και είναι δυνατό να έχουν προηγηθεί αυτής μικρότερες μετακινήσεις που οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα.

- **Ανατροπές (topples)**

Στις ανατροπές, η κίνηση είναι μία προς τα έξω περιστροφή της αποσπώμενης μάζας από ένα βραχώδες κυρίως πρανές, γύρω από σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας. Προκαλείται κυρίως από τη βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή από την επίδραση του νερού (υδροστατικές πιέσεις, παγετός) που γεμίζει τις ασυνέχειες και ρωγμές.

- **Ολισθήσεις (slides)**

Στις ολισθήσεις, η μετακίνηση προϋποθέτει κυρίως διατμητική παραμόρφωση και μετατόπιση – θραύση του υλικού κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών, που μπορεί να είναι ορατές ή όχι και να εκδηλώνονται μέσα σε μία σχετικά στενή ζώνη. Η μετακίνηση μπορεί να είναι προοδευτική, δηλαδή η διατμητική θραύση να μη συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια που θα αποτελέσει τελικά την επιφάνεια θραύσης, αλλά να επεκτείνεται διαδοχικά πέρα από την αρχική περιοχή τοπικής

θραύσης. Η μάζα που μετατοπίζεται μπορεί να ολισθήσει προς τα κατάντη απομακρυνόμενη από την αρχική επιφάνεια θραύσης.

Σύμφωνα με το Varnes (1978), οι ολισθήσεις ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης καθώς και το μηχανισμό μετακίνησης διακρίνονται στις περιστροφικές και στις μεταθετικές.

➤ Περιστροφικές ολισθήσεις (rotational slides)

Οι περιστροφικές ολισθήσεις γίνονται συνήθως κατά μήκος κοίλων προς τα πάνω επιφανειών με μικρή παραμόρφωση στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας. Το ανώτερο τμήμα της μετακινούμενης μάζας κινείται σχεδόν κατακόρυφα προς τα κάτω με μία μικρή κάμψη προς τα πίσω, λόγω της περιστροφικής κίνησης, ενώ στη βάση της μετακινούμενης μάζας παρατηρείται ανύψωση (φούσκωμα).

➤ Μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides)

Στις μεταθετικές ολισθήσεις η μάζα που αποσπάται από το πρηνές μετακινείται προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω, κατά μήκος μίας κατά προσέγγιση επίπεδης ή ομαλής – κυματοειδούς επιφάνειας, με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κίνηση ή κάμψη. Η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει παράλληλα πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης.

• **Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)**

Στις πλευρικές εξαπλώσεις η κίνηση που επικρατεί είναι η πλευρική διάσταση του υλικού που διευκολύνεται από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές.

Οι βασικοί τύποι πλευρικών εξαπλώσεων είναι οι εξής:

➤ Εξαπλώση τεμαχών (block spreads)

Στις εξαπλώσεις τεμαχών οι βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που υπέρκεινται άλλων ασθενέστερων, διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές σε τεμάχια. Το υποκείμενο υλικό συνθλίβεται και συχνά καλύπτει τις ρωγμές που δημιουργούνται. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα, είναι πολύ αργή και η επιφάνεια της κατά κανόνα είναι πολύ μεγάλη.

➤ Εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads)

Οι εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης δημιουργούνται κυρίως σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες. Η θραύση είναι συνήθως βαθμιαία, δηλαδή ξεκινά σε μία περιοχή σαν τοπικό φαινόμενο και επεκτείνεται. Συχνά, η αρχική θραύση είναι μία εκτεταμένη καθίζηση και η προοδευτική επέκτασή της γίνεται αντίστροφα, δηλαδή από την αρχική θραύση προς τα πίσω (στέψη). Η κύρια μετατόπιση είναι μεταθετική.

➤ Σύνθετες πλευρικές εξαπλώσεις (complex spreads)

Οι σύνθετες πλευρικές εξαπλώσεις εκδηλώνονται ως έντονες παραμορφώσεις σε σχεδόν οριζόντια επιφανειακά σκληρά και διερρηγμένα πετρώματα που υπέρκεινται παχιών στρωμάτων σκληρών ρωγματομένων αργίλων ή μαλακών σχιστόλιθων τα οποία με τη σειρά τους υπέρκεινται κάποιου σκληρού βραχώδους υπόβαθρου.

### • Ροές (flows)

Οι ροές, υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά. Στις αργές ροές ταξινομείται από το Varnes και ο ερπυσμός, που είναι μία αργή, όχι άμεσα ορατή κίνηση του επιφανειακού μανδύα του εδάφους ή του σαθρού καλύμματος των πετρωμάτων. Ο όρος ερπυσμός χρησιμοποιείται για τις αργές και συνεχείς στο χώρο παραμορφώσεις (Varnes, 1976).

#### ➤ Ροές βραχώδους υπόβαθρου

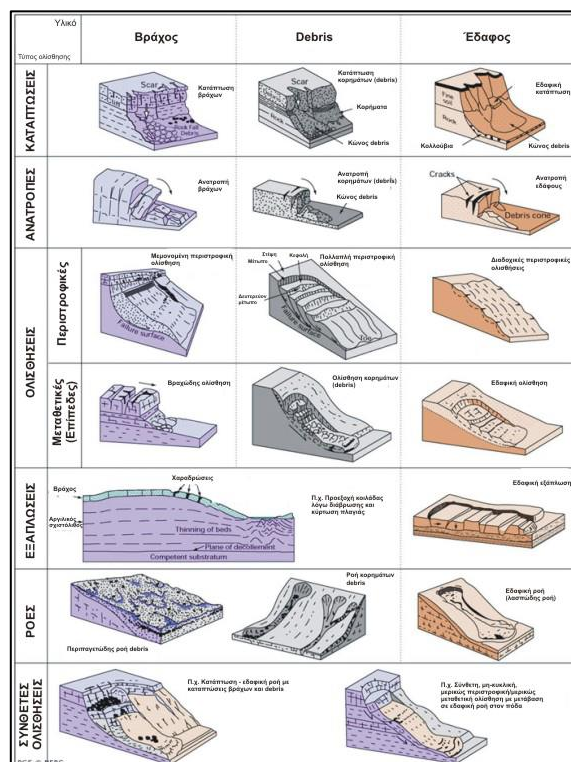
Στις ροές βραχώδους υπόβαθρου περιλαμβάνονται οι παραμορφώσεις της βραχομάζας που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές και μικρές ή μεγάλες ρωγμές – διακλάσεις, χωρίς εντοπισμό της μετατόπισης κατά μήκος μίας συγκεκριμένης επιφάνειας. Οι μετακινήσεις είναι εξαιρετικά αργές και λίγο πολύ σταθερές στο χρόνο.

#### ➤ Ροές κορημάτων

Στα χαλαρά υλικά οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες και πολύ πιο ευκρινείς σε σχέση με εκείνες στο βραχώδες υπόβαθρο. Οι επιφάνειες ολίσθησης μέσα στη μετακινούμενη μάζα δεν είναι ορατές. Το όριο ανάμεσα στη μετακινούμενη μάζα και στο υλικό που δεν μετακινείται είναι σαφές και εντοπίζεται σχετικά εύκολα.

### • Σύνθετες μετακινήσεις πρανών (composite slides)

Σαν σύνθετες ολισθήσεις ταξινομούνται αυτές στις οποίες διαφορετικού τύπου μετακινήσεις γίνονται σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας, μερικές φορές και ταυτόχρονα (Cruden and Varnes, 1996).



Εικόνα 8: Σχηματικά όλοι οι τύποι κατολισθήσεων (Varnes, 1978), από "Τεχνική Γεωλογία" Β.Χρηστάρας, Β.Μαρίνος.

### **2.3. Βραχοκαταπτώσεις**

#### **2.3.1. Αίτια εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων**

Στην περίπτωση καταπτώσεων βράχων (rock falls) η μάζα που μετακινείται (πέφτει) είναι μάζα βράχων ή μικρότερα τεμάχια βράχου, που αποσπάστηκαν από μία περιοχή του υποβάθρου. Οι πιο συχνές περιπτώσεις αναφέρονται σε εναλλαγές συμπαγών και λιγότερο συμπαγών πετρωμάτων ή σε συμπαγή πετρώματα με δυσμενή γεωμετρία ασυνεχειών.

Η προσέγγιση της ευστάθειας των βραχωδών πρανών αφορά κατά κύριο λόγο την ύπαρξη ασυνεχειών, που διατέμνουν τη βραχομάζα και αποτελούν επίπεδα αδυναμίας και επιφάνειες εκδήλωσης αστοχιών. Οι επιμέρους παράμετροι μηχανικής περιγραφής των ασυνεχειών έχουν σημαντικό ρόλο. Οι παράμετροι αυτοί είναι ο προσανατολισμός τους σε σχέση με το πρανές, η απόσταση μεταξύ των επιφανειών της κάθε οικογένειας (spacing), η εμμονή τους (persistence), η τραχύτητα (roughness), η διατμητική αντοχή τους (shear strength), το άνοιγμα (aperture) και το υλικό πλήρωσης τους (filling material) (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Ανάλογα με τις παραπάνω παραμέτρους και τις επιτόπου συνθήκες του κάθε πρανού, εκτιμώνται οι αναμενόμενες αστοχίες και γίνεται ανάλυση της ευστάθειας με τις μεθόδους της οριακής ισορροπίας, κατά μήκος συγκεκριμένων επιφανειών ολίσθησης χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες κατά περίπτωση παραμέτρους διατμητικής αντοχής, δηλαδή των επιπέδων ασυνεχειών ή της βραχομάζας.

Η εκτίμηση των δυνητικών ολισθήσεων, δίνει τη βασική πληροφόρηση σχετικά με τις δυνατότητες εκδήλωσης κάποιας μορφής αστάθειας στο πρανές και οφείλεται αποκλειστικά στα συστήματα των ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχομάζα. Επομένως, η βασική παράμετρος είναι ο προσανατολισμός των ασυνεχειών και η σύγκριση του με τον αντίστοιχο προσανατολισμό του μετώπου του πρανού.

Η αποτύπωση των επιπέδων, πρανούς και ασυνεχειών, γίνεται στο στερεοδιάγραμμα Schmidt. Στο στερεοδιάγραμμα επίσης αποτυπώνεται ο κύκλος τριβής των ασυνεχειών.

Οι δυνατές περιπτώσεις που διακρίνονται φαίνονται στην Εικόνα 9 και διαχωρίζονται:

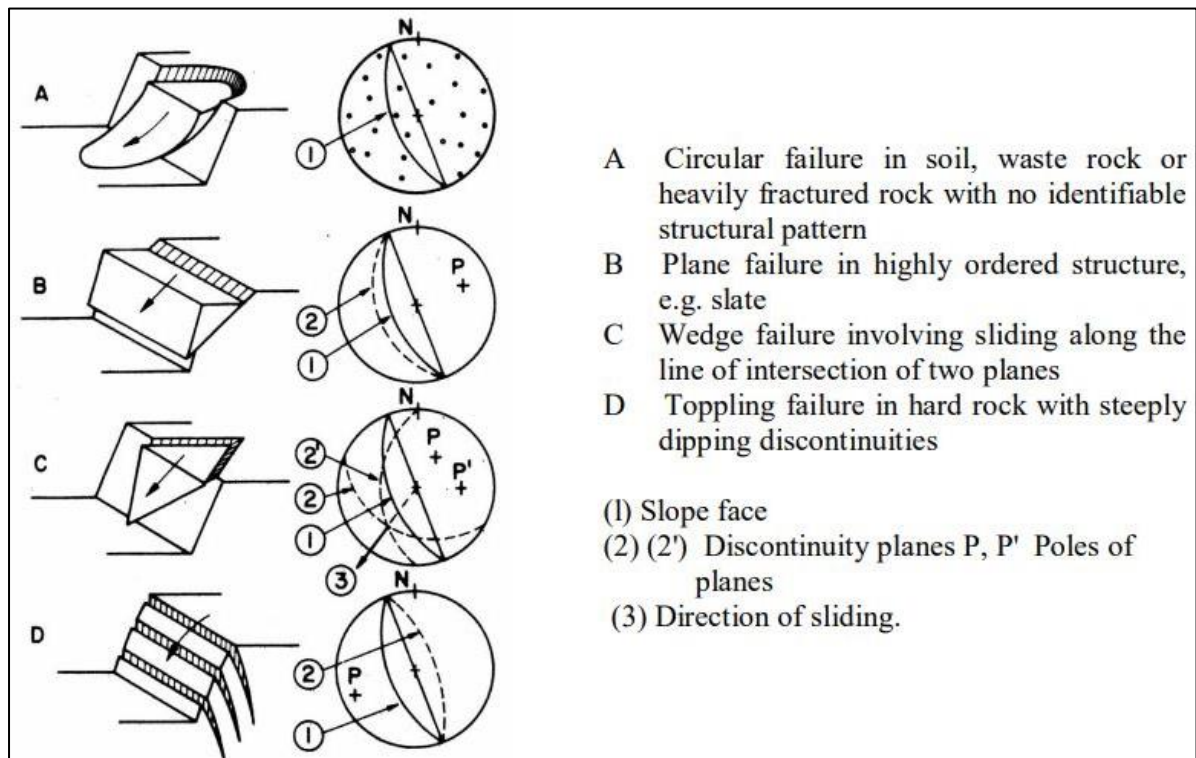
(α) Έντονη διασπορά των πόλων των ασυνεχειών, χωρίς την ύπαρξη συγκεκριμένων συστημάτων, πιστοποιεί έντονα διακλασμένη και τεκτονισμένη βραχομάζα. Δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος μίας μεικτής επιφάνειας ολίσθησης κατά προσέγγιση κυκλοειδούς μορφής.

(β) Ύπαρξη συστημάτων ασυνεχειών, δηλαδή συγκέντρωση πόλων, με προσανατολισμό ίδιο με του πρανού, συνεπάγεται δυνατότητα εκδήλωσης επίπεδης ολίσθησης κατά μήκος του συγκεκριμένου επιπέδου ασυνεχειών. Βασικές προϋποθέσεις για τη δυνατότητα εκδήλωσης: α) διαφορά διεύθυνσης κλίσης

ασυνεχειών – πρανούς  $\pm 20^\circ$ , β) υψηλή συνέχεια των ασυνεχειών, γ) γωνία κλίσης του συστήματος των ασυνεχειών μικρότερης εκείνης του πρανούς.

(γ) Ύπαρξη δύο συστημάτων ασυνεχειών, που το σημείο τομής εμπίπτει στη ζώνη μεταξύ του πρανούς και του κύκλου τριβής των ασυνεχειών. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται συνθήκες εκδήλωσης σφηνοειδούς ολίσθησης κατά μήκος της τομής των δύο επιπέδων.

(δ) Ύπαρξη συστήματος ασυνεχειών με διεύθυνση περίπου ίδια με αυτήν του πρανούς, αλλά με αντίθετη φορά κλίσης που δημιουργεί συνθήκες εκδήλωσης ανατροπών. Βασικές προϋποθέσεις για τη δυνατότητα εκδήλωσης: α) διαφορά διεύθυνσης ασυνεχειών – πρανούς  $\pm 20^\circ$  και β) μεγάλη γωνία κλίσης ασυνεχειών ( $>70^\circ$ ).



Εικόνα 9: Βασικοί τύποι ολισθήσεων πρανών και αντίστοιχα διαγράμματα στατιστικής επεξεργασίας πόλων ασυνεχειών - αποτύπωσης κυρίων επιπέδων (Hoek & Bray, 1973).

### 2.3.2. Τροχιά

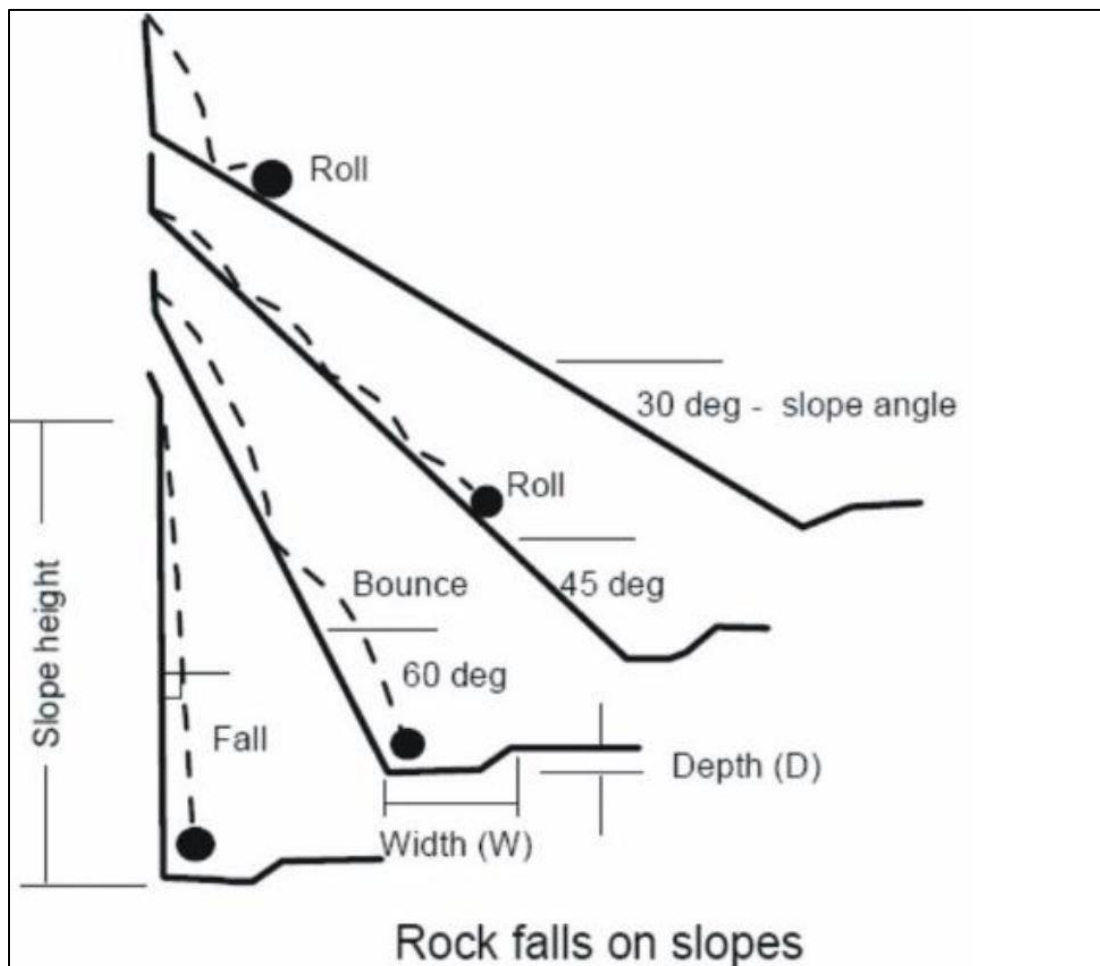
Η πτώση των βραχωδών τεμαχίων όσον αφορά στον τρόπο κίνησης τους επί της επιφάνειας του πρανούς κατηγοριοποιείται σε τρεις τύπους κίνησης.

Σε απότομα πρανή με κλίση μεγαλύτερη του 4:1 (ύψος: βάση, δηλαδή με κλίση περίπου  $76^\circ$ ), παρατηρούνται αστοχίες που εκδηλώνονται με ελεύθερη πτώση (free falling) της μάζας που αποκόπτεται από το πρανές.

Σε ηπιότερα πρανή παρατηρείται αναπήδηση (bouncing) της μάζας πάνω στο πρανές και θραύση σε μικρότερα τεμάχια, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από το είδος του υλικού και τη γωνία πρόσπτωσης.

Σε πρανή με κλίση μικρότερη των  $45^\circ$  (1:1), η κύρια κίνηση των καταπτώσεων μετατρέπεται σε κύλιση (rolling).

Επομένως, σε ένα πρανές που παρουσιάζει μεταβολές στην κλίση του, είναι δυνατόν η κίνηση της μάζας να μετατρέπεται από ελεύθερη πτώση σε αναπήδηση και κύλιση και αντίστροφα.

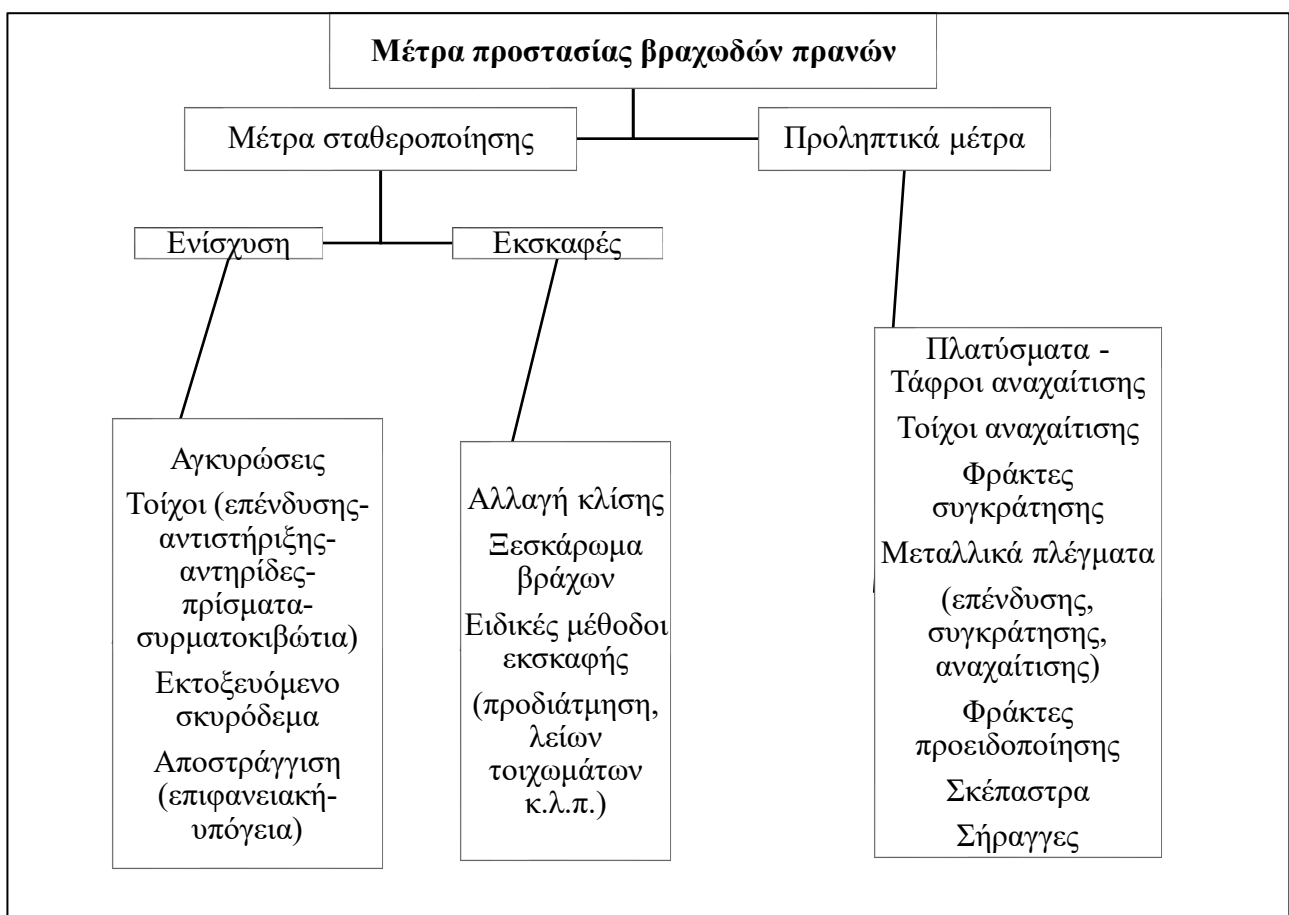


Εικόνα 10: Τύπος κίνησης βραχώδους τεμαχίου ανάλογα με την κλίση του πρανούς (Ritchie, 1963).

### 2.3.3. Μέτρα αντιστήριξης

Ο βασικός διαχωρισμός των μέτρων προστασίας στα βραχώδη πρανή έχει σχέση με το χρονικό παράγοντα που αυτά υλοποιούνται, δηλαδή πριν ή μετά την εκδήλωση του φαινομένου (προληπτικά μέτρα και μέτρα αποκατάστασης ή σταθεροποίησης). Στην περίπτωση των βραχωδών πρανών υπάρχει ένας σαφής διαχωρισμός μεταξύ παθητικών και ενεργών μέτρων, λόγω του είδους των συνηθέστερων αστοχιών (καταπτώσεις βράχων). Τα παθητικά μέτρα αποτελούν τη βασική πρακτική εφαρμογή.

Παρακάτω στην Εικόνα 11 διαχωρίζονται τα μέτρα αντιστήριξης των πρανών σε μέτρα σταθεροποίησης και σε προληπτικά μέτρα.



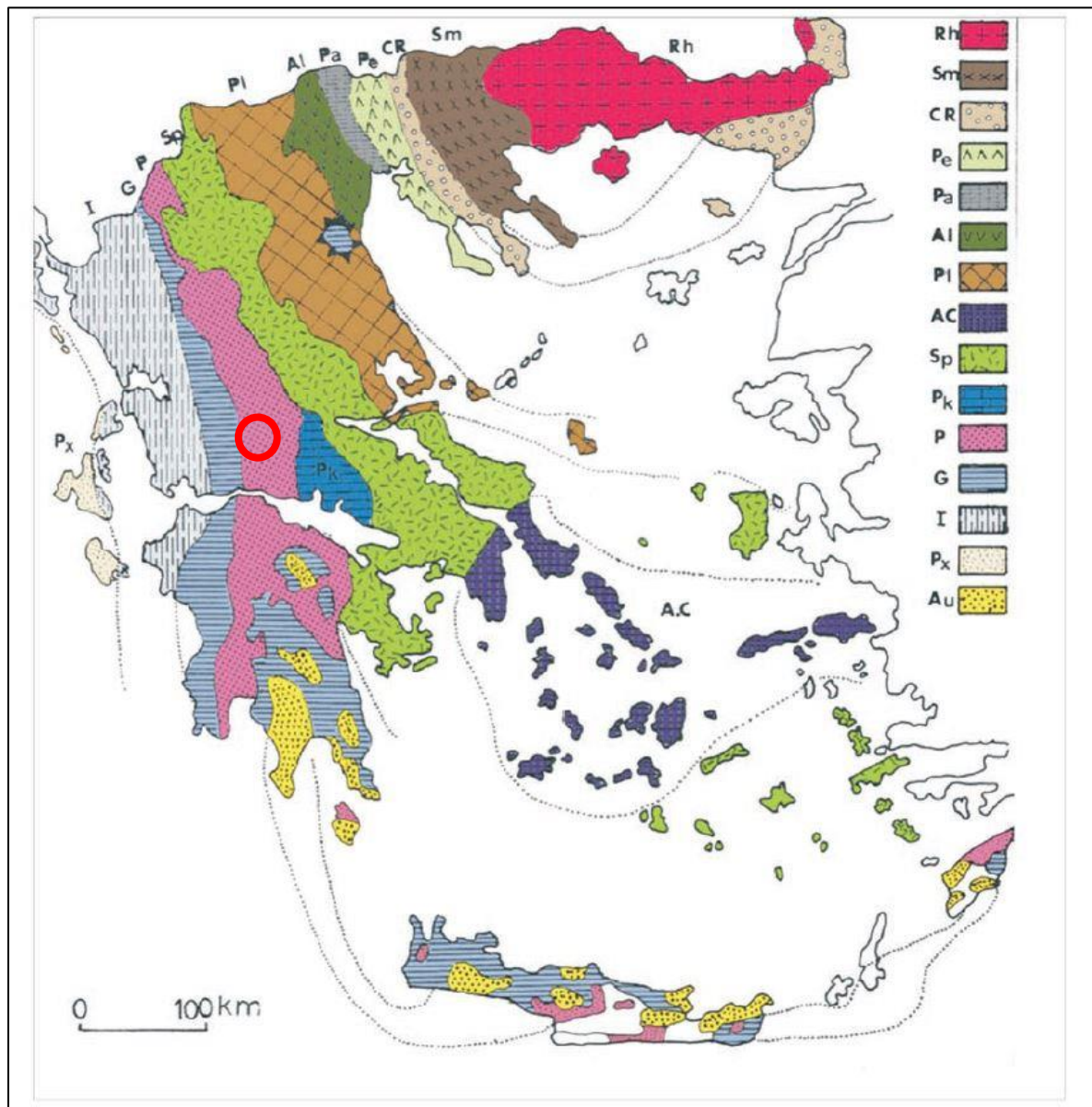
Εικόνα 11: Κατηγορίες μέτρων προστασίας βραχωδών πρανών (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

### 3. Γεωλογικές Συνθήκες

#### 3.1. Γεωλογία ευρύτερης περιοχής μελέτης

##### 3.1.1. Γεωτεκτονική θέση – στρωματογραφία

Από γεωτεκτονικής πλευράς η ευρύτερη περιοχή ανήκει στη ζώνη Ωλονού – Πίνδου.



Εικόνα 12: Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιροδοπική ζώνη, (Pe: Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου, Al: Υποζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αξιού, Pl: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Sr: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προάπουλια, Au: Ενότητα «Πλακώδεις ασβεστόλιθοι-Ταλέα όρη» πιθανόν της Ιονίου ζώνης. (Κατά Mountakis et al 1983. (Τροποποιημένο), ο κόκκινος κύκλος δείχνει που βρίσκεται η περιοχή μελέτης (Μουντρακής, 2010).

Η ζώνη Ωλονού – Πίνδου θεωρήθηκε σαν η πιο βαθιά Ελληνική αύλακα και συνήθως αναφέρεται σαν « το Ελληνικό ευγεωσύγκλινο » κατά τη διάρκεια του Μεσοζωικού. Η ζώνη αυτή ανήκει στις Εξωτερικές Ελληνίδες και αντιπροσωπεύει τον παλιό κατεστραμμένο ωκεανό της Νέο – Τηθύος (Μουντράκης, 1985).

Η ζώνη της Πίνδου διαιρέθηκε από τον Aubouin (1959) σε τρεις παλαιογεωγραφικές υποζώνες:

- Την ανατολική πλευρά της αύλακας που ονομάστηκε «Υπερπινδική υποζώνη», με ιζήματα μεταβατικά μεταξύ της ζώνης Πίνδου και της Υποπελαγονικής ζώνης. Η υποζώνη αυτή συγκροτείται από δύο ενότητες πετρωμάτων, του βουνού Κόζιακας και των Θυμιανών.
- Την αξονική υποζώνη με ιζήματα της πιο βαθιάς θάλασσας.
- Τη δυτική πλευρά, μεταβατική προς το ύψωμα Γαβρόβου που λέγεται και «Εξωτερική Πίνδος».

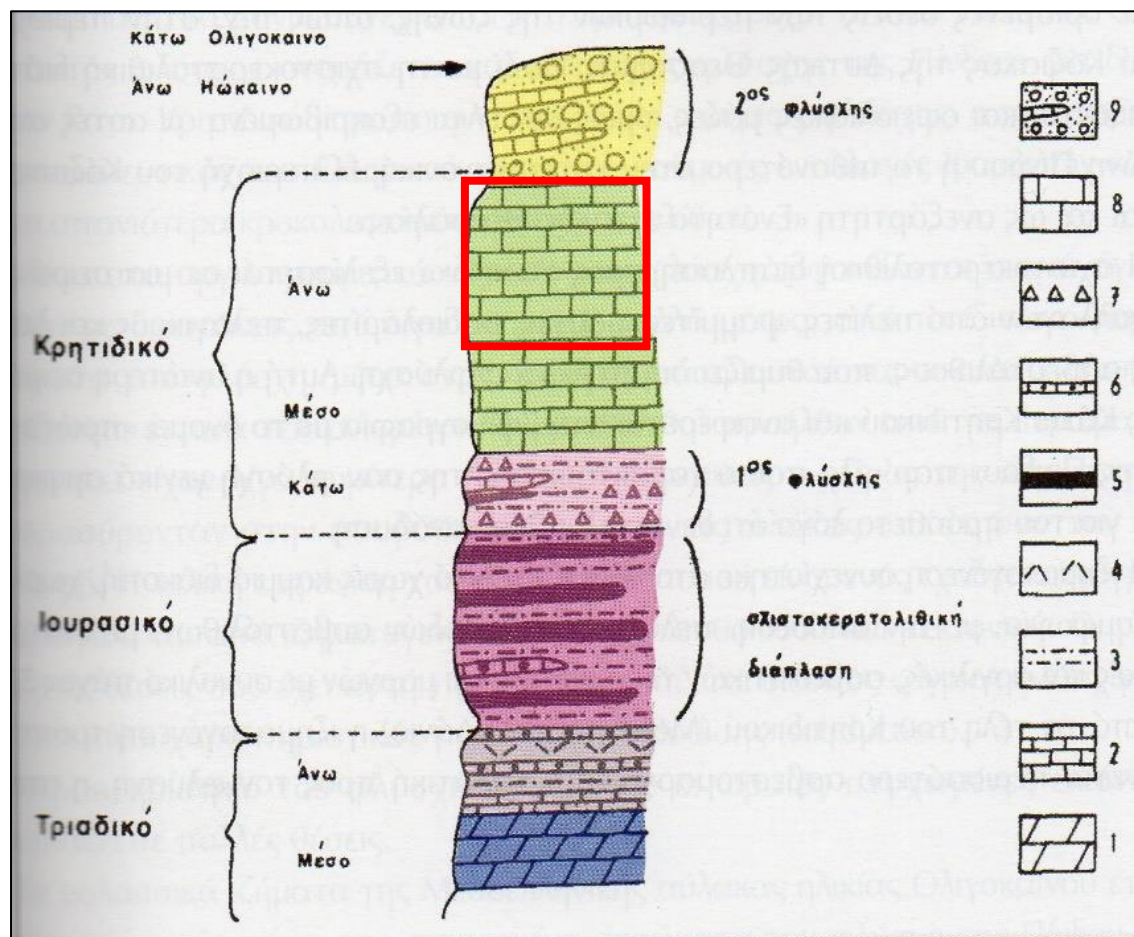
Σήμερα γίνεται γενικότερα αποδεκτό ότι οι ζώνες Πίνδου και Υποπελαγονικής συγκροτούσαν τον ωκεάνιο χώρο, αλλά οι οφειόλιθοι, με την καταστροφή και την υποβύθιση του ωκεανού, τοποθετήθηκαν με επώθηση (obduction) πάνω στο Δυτικό Πελαγονικό περιθώριο και γι' αυτό βρίσκονται συμπτυχωμένοι με τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση μόνο εκεί, δηλαδή στην Υποπελαγονική ζώνη. Αντίθετα η ζώνη Πίνδου αντιπροσώπευε το δυτικό τμήμα του ωκεανού που δεν έγινε επώθηση (obduction) των οφειολίθων, αλλά βρίσκονται μόνο τα ωκεάνια ιζήματα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης. Οι οφειολιθικές μάζες της Βόρειας Πίνδου και του Κόζιακα τοποθετήθηκαν τεκτονικά πάνω στα ιζήματα της ζώνης Πίνδου πολύ μεταγενέστερα.

Από λιθολογικής άποψης τα αλπικά ιζήματα που υπάρχουν στη ζώνη αυτή είναι ηλικίας Μέσο – Άνω Τριαδικό και είναι κυρίως ψαμμίτες, πυριτιόλιθοι, μάργες και ασβεστόλιθοι, που εξελίσσονται με το χρόνο σε ασβεστιτικούς ψαμμίτες, ασβεστόλιθους με παρεμβολές κερατολίθων και ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά. Κατά τη διάρκεια του Ιουρασικού υπήρξε συνεχή απόθεση ιζημάτων βαθιάς θάλασσας, που συνιστούν τη γνωστή «σχιστοκερατολιθική διάπλαση», με πάχος περίπου 150-200 m.

Η σχιστοκερατολιθική διάπλαση προς τα πάνω εξελίσσεται σε μία σειρά εναλλαγών από πηλίτες, ψαμμίτες, μάργες, ραδιολάριτες, πελαγικούς και λατυποπαγείς ασβεστόλιθους, που θυμίζει συμπεριφορά φλύσχη. Αυτή η ανώτερη σειρά είναι ηλικίας Κάτω Κρητιδικού και αναφέρεται με το όνομα «πρώτος φλύσχη της Πίνδου».

Η ιζηματογένεση συνεχίστηκε στο Άνω Κρητιδικό, χωρίς καμία διακοπή, με την απόθεση πελαγικών πλακωδών ασβεστόλιθων (Μουντράκης, 2010). Στη συνέχεια, από το τέλος του Κρητιδικού μέχρι το Άνω Ηώκαινο αποτίθεται φλύσχη. Ο Τριτογενής αυτός φλύσχη ονομάστηκε «δεύτερος φλύσχη της Πίνδου». Αποτελεί τον πιο αντιπροσωπευτικό φλύσχη του Ελληνικού χώρου και είναι χαρακτηριστικό του οι πολλές πτυχωμένες εμφανίσεις.

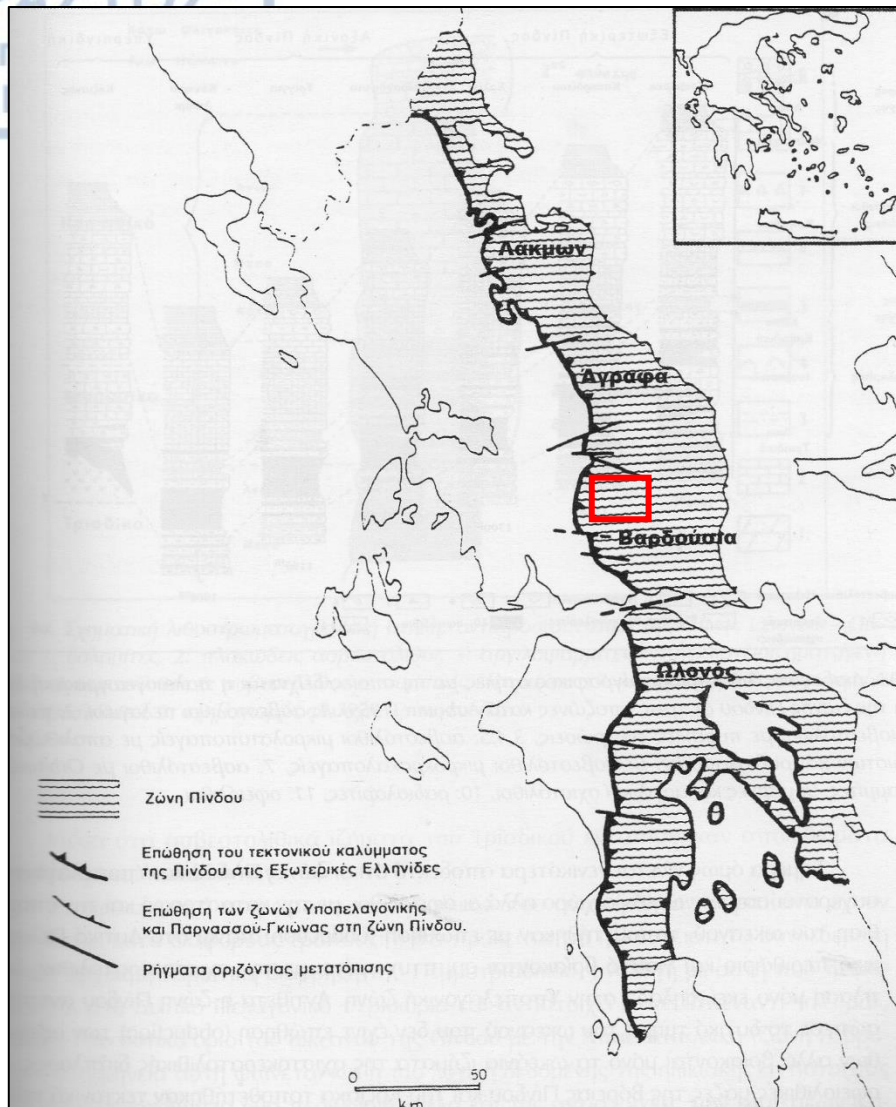
Κατά θέσεις ο φλύσχος αυτός εμφανίζεται σαν ένα «χαοτικό μίγμα», ο οποίος ονομάζεται διεθνώς «άγριος φλύσχος». Τέλος, πάνω από το φλύσχη με ασυμφωνία τοποθετήθηκαν τα μολασικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας ηλικίας Ολιγοκαίνου.



Εικόνα 13: Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη, αντιπροσωπευτική της Ζώνης Ωλονού – Πίνδου, 1: δολομίτες, 2: πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 3: αργιλοψαμμίτες, 4: ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά, 5: κερατόλιθοι, 6: ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7: λατυποπαγή, 8: ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, 9: σχηματισμός φλύσχος, Τριτογενούς (Μουντράκης, 2010), με κόκκινο πλαίσιο οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή μελέτης.

### 3.1.2. Σεισμοτεκτονική

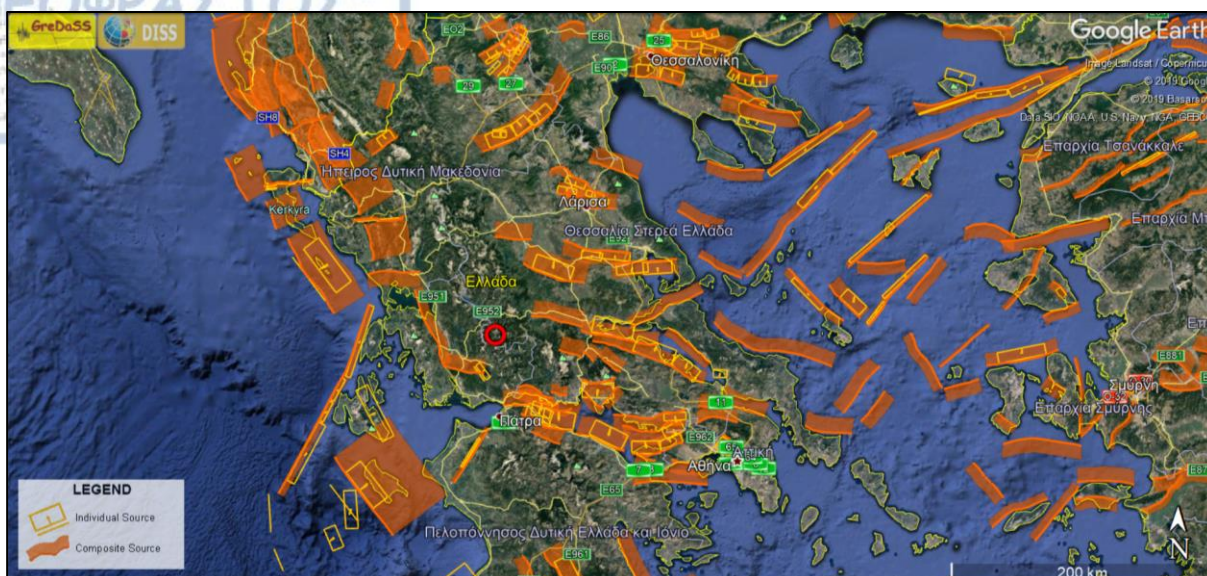
Τα στρώματα της ζώνης Ωλονού – Πίνδου αναδύθηκαν με την τελική ορογένεση και πτύχωση στο Άνω Ηώκαινο – Κάτω Ολιγόκαινο, οι οποίες προέκυψαν από την τελική ηπειρωτική σύγκρουση της Απουλίας πλάκας με την ενωμένη Ευρασία. Η σύγκρουση αυτή προκάλεσε ισχυρές συμπιεστικές τάσεις και συνέβη η επώθηση της ζώνης προς τα δυτικά υπό τη μορφή τεκτονικού καλύμματος, με ταυτόχρονη λεπίωση των στρωμάτων της. Η ζώνη Ωλονού – Πίνδου έχει επωθηθεί προς τα δυτικά πάνω στη ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης και έχει καθιερωθεί με το όνομα «Το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου», που κατά θέσεις ξεπερνά και τα 100 km.



Εικόνα 14: Χάρτης που δείχνει το χώρο επέκτασης του τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου στην ηπειρωτική Ελλάδα ( Κατά Ζούρο 1993), (Μουντράκης, 2010), με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης.

Τα τεκτονικά λείπια της Πίνδου εμφανίζονται επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο με κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά και δημιουργούν συνεχείς επαναλήψεις των στρωμάτων της ζώνης, συσσώρευση των καλυμμάτων και διόγκωση του φλοιού. Κατά τη διάρκεια της πτύχωσης δημιουργήθηκε σε όλη την έκταση της ζώνης μεγάλος αριθμός εγκάρσιων ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης τα οποία διακόπτουν την επιμήκη σειρά των λεπίων.

Πάνω στα στρώματα της ζώνης Πίνδου και πιο συγκεκριμένα στον Τριτογενή φλύσχη, βρίσκονται τεκτονικά τοποθετημένες οφιολιθικές μάζες, που το πιο πιθανό είναι να προέρχονται από το δυτικό ωκεάνιο χώρο της Υποπελαγονικής και τοποθετήθηκαν με εφελκυστική τεκτονική στο Ολιγόκαινο – Μειόκαινο (Μουντράκης, 2010). Η εφελκυστική αυτή τεκτονική κινήθηκε προς τα ΝΔ και προκάλεσε την κατάρρευση του ορογενούς. Τέλος, η ερμηνεία της επώθησης του τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου συμπίπτει με την σύγχρονη άποψη για την επώθηση των Ελληνίδων προς τα Δυτικά.



Εικόνα 15: Χάρτης με Νεοτεκτονικά ρήγματα στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, ο κόκκινος κύκλος δείχνει που βρίσκεται η περιοχή μελέτης, <http://gredass.unife.it/>

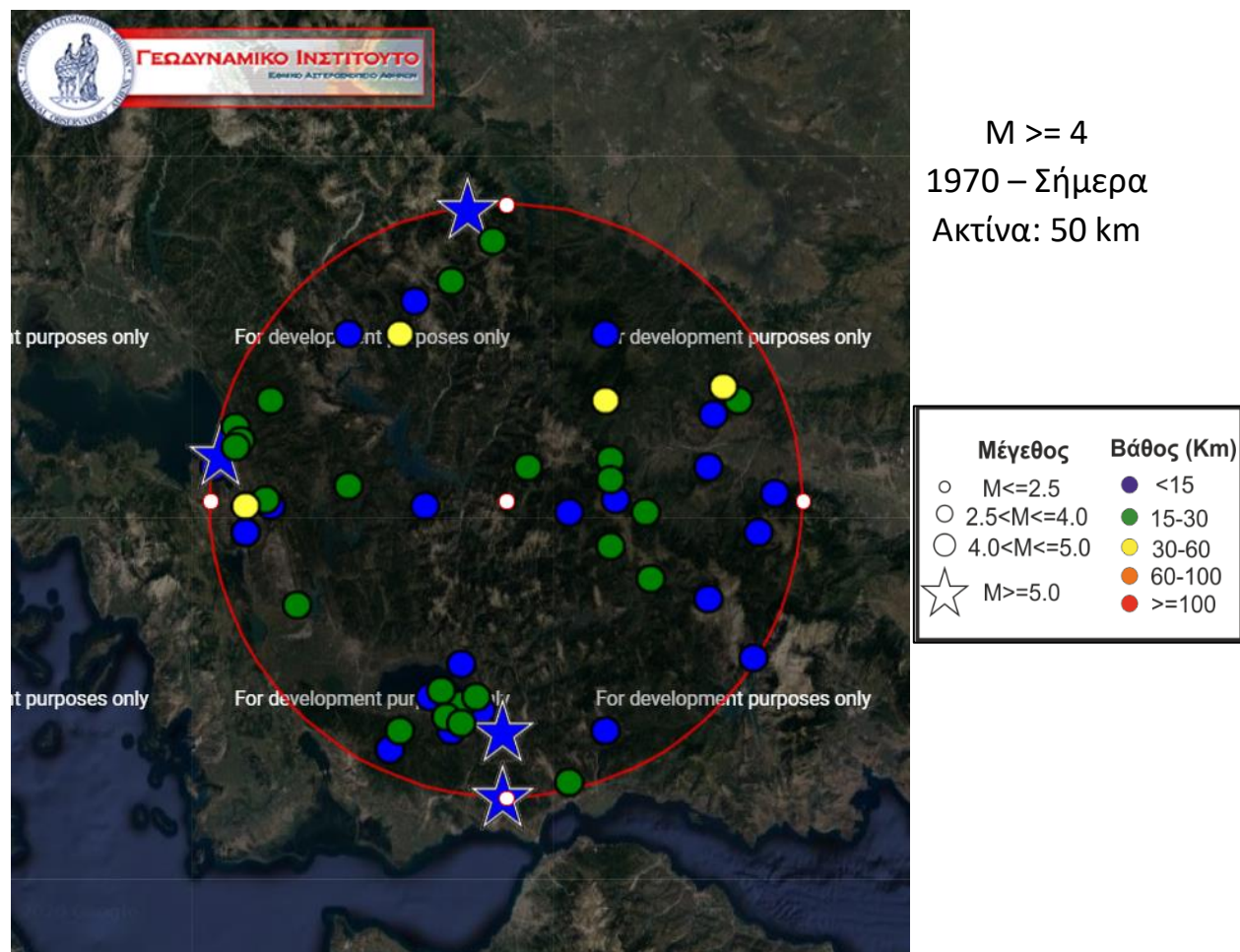


Εικόνα 16: Νέος χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας, ο κόκκινος κύκλος δείχνει που βρίσκεται η περιοχή μελέτης, <http://portal.tee.gr>.

Η περιοχή μελέτης ανήκει στη δεύτερη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας, με τιμές εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού 0,24 g.

Για την εξαγωγή του χάρτη σεισμικής δραστηριότητας για την περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ακτίνα 50 km και έλεγχος για τελευταία 50 έτη. Παρατηρείται ότι η θέση του υπό μελέτη πρανούς βρίσκεται σε περιοχή μέσης σεισμικής δραστηριότητας.

Ακολούθως οι μεγαλύτεροι σεισμοί ( $M \geq 5$ ), που συνέβησαν στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (Πίνακας 1).



Εικόνα 17: Χάρτης της σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή μελέτης τα τελευταία 50 χρόνια, [www.gein.noa.gr](http://www.gein.noa.gr).

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των μεγαλύτερων σεισμών κοντά στην περιοχή μελέτης.

| Χρόνος Γένεσης (GMT) | Επίκεντρο                   | Γεωγραφικό Πλάτος ( $^{\circ}$ B) | Γεωγραφικό Μήκος ( $^{\circ}$ A) | Βάθος (km) | Μέγεθος (ML) |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------|--------------|
| 30/6/1975            | 17.6 χμ Β της Πάτρας        | 38.40                             | 21.70                            | 10         | 5.4          |
| 31/12/1975           | 27.7 χμ ΑΒΑ του Μεσολογγίου | 38.50                             | 21.70                            | 10         | 5.1          |
| 24/10/2014           | 30.3 χμ ΝΝΑ της Άρτας       | 38.92                             | 21.15                            | 12         | 5.2          |
| 31/8/2018            | 26.5 χμ ΔΒΔ της Καρδίτσας   | 39.29                             | 21.63                            | 10         | 5            |

### 3.1.3. Υδρολογικές - Κλιματολογικές συνθήκες

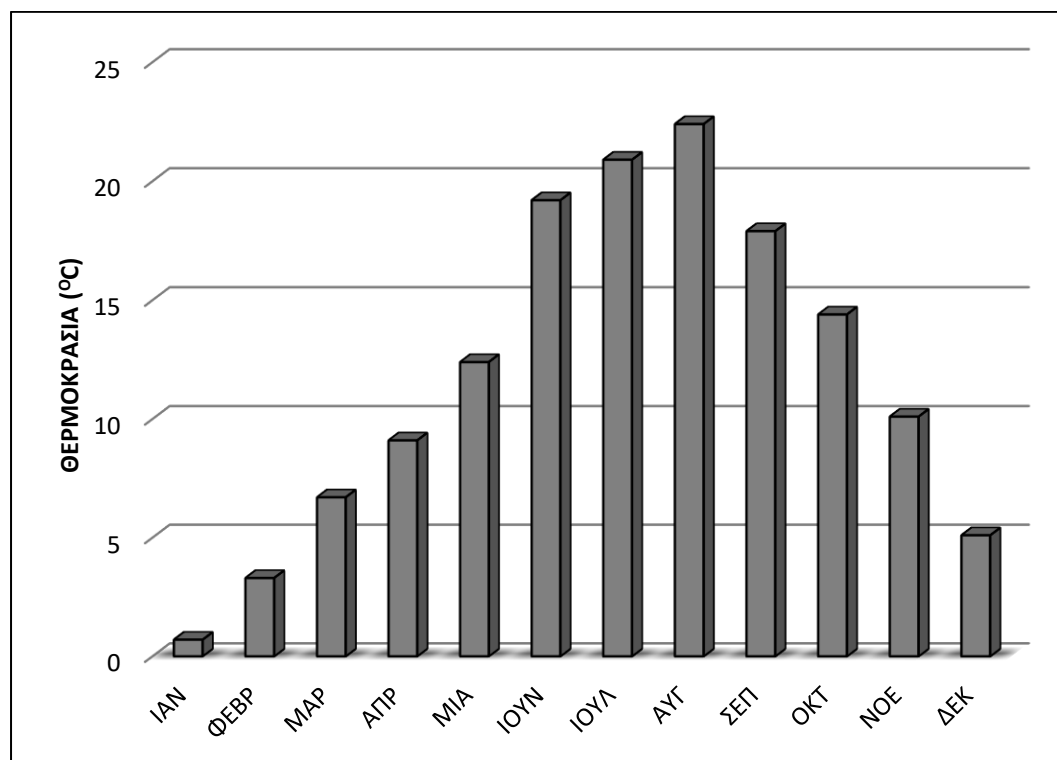
Γενικά η περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα πυκνό υδρογραφικό δίκτυο με λεκάνες απορροής.

Από πλευράς υδρολογικού καθεστώτος διαπιστώνεται ότι η ευρύτερη περιοχή, τόσο από τη γεωγραφική θέση της, όσο και υψομέτρου, χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων.

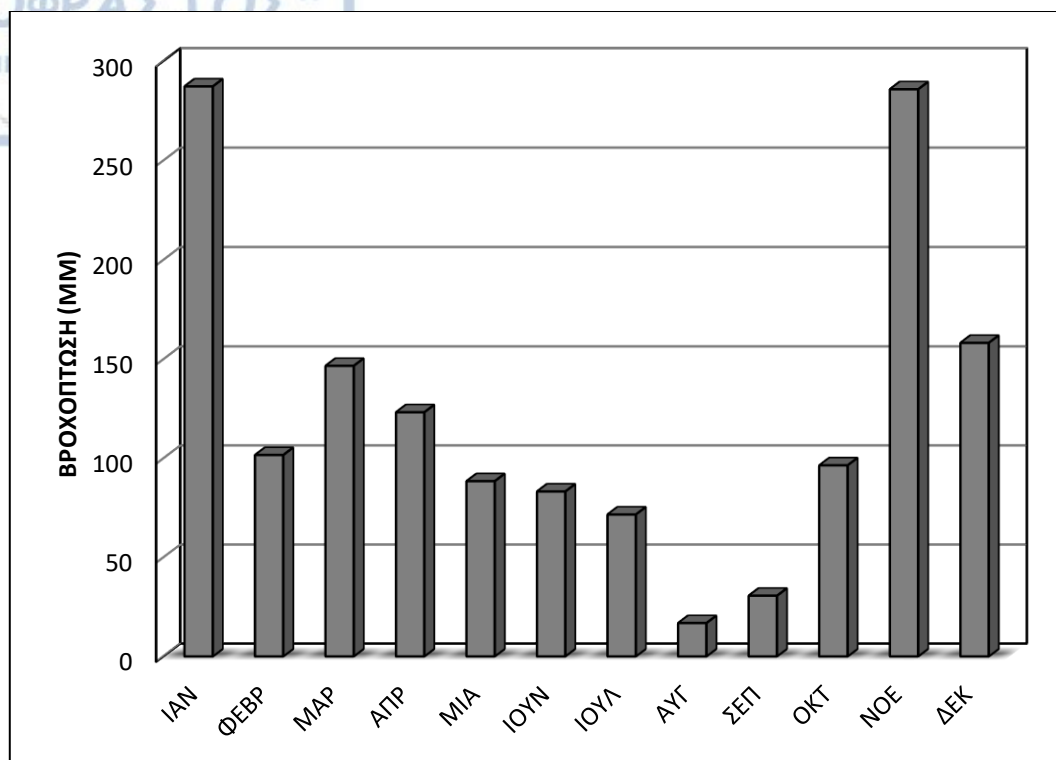
Οι συνθήκες αυτές συνδυαζόμενες με το σχετικά μεγάλο ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος, συνδράμουν στη δράση των παραγόντων διάβρωσης και αποσάθρωσης και τη γρήγορη ανάπτυξη της βλάστησης.

Οι διαδικασίες αυτές είναι σχετικά γρήγορες όσον αφορά θέσεις που υπάρχουν κερματισμένα πετρώματα, συμβάλλοντας έμμεσα στη χαλάρωση αυτών, κατά μήκος των ασυνεχειών τους.

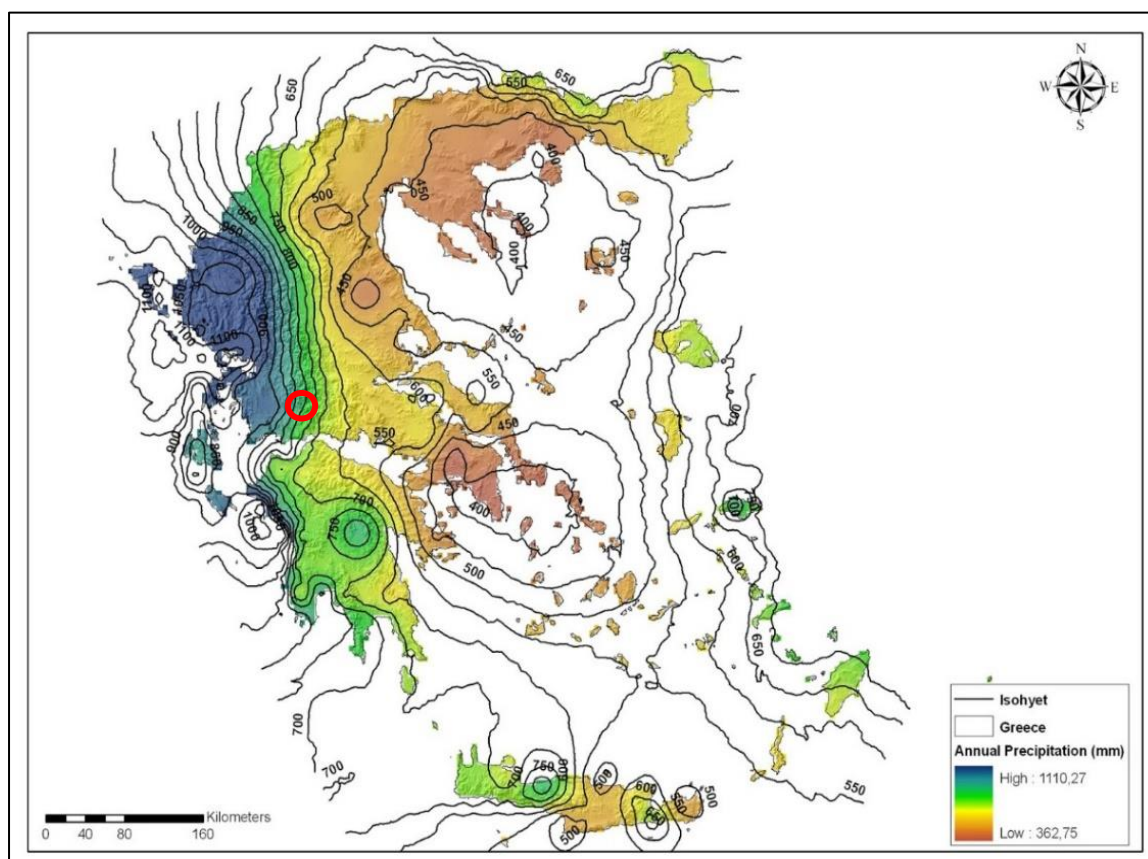
Μ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται σημαντικός όγκος κορημάτων, αλλά και διαμορφώνεται ασταθής ισορροπία σε τμήματα της βραχομάζας απότομων πρανών.



Εικόνα 18: Διάγραμμα πορείας μέσου μηνιαίου θερμοκρασιακού εύρους για το έτος 2019, <https://www.meteo.gr/>.

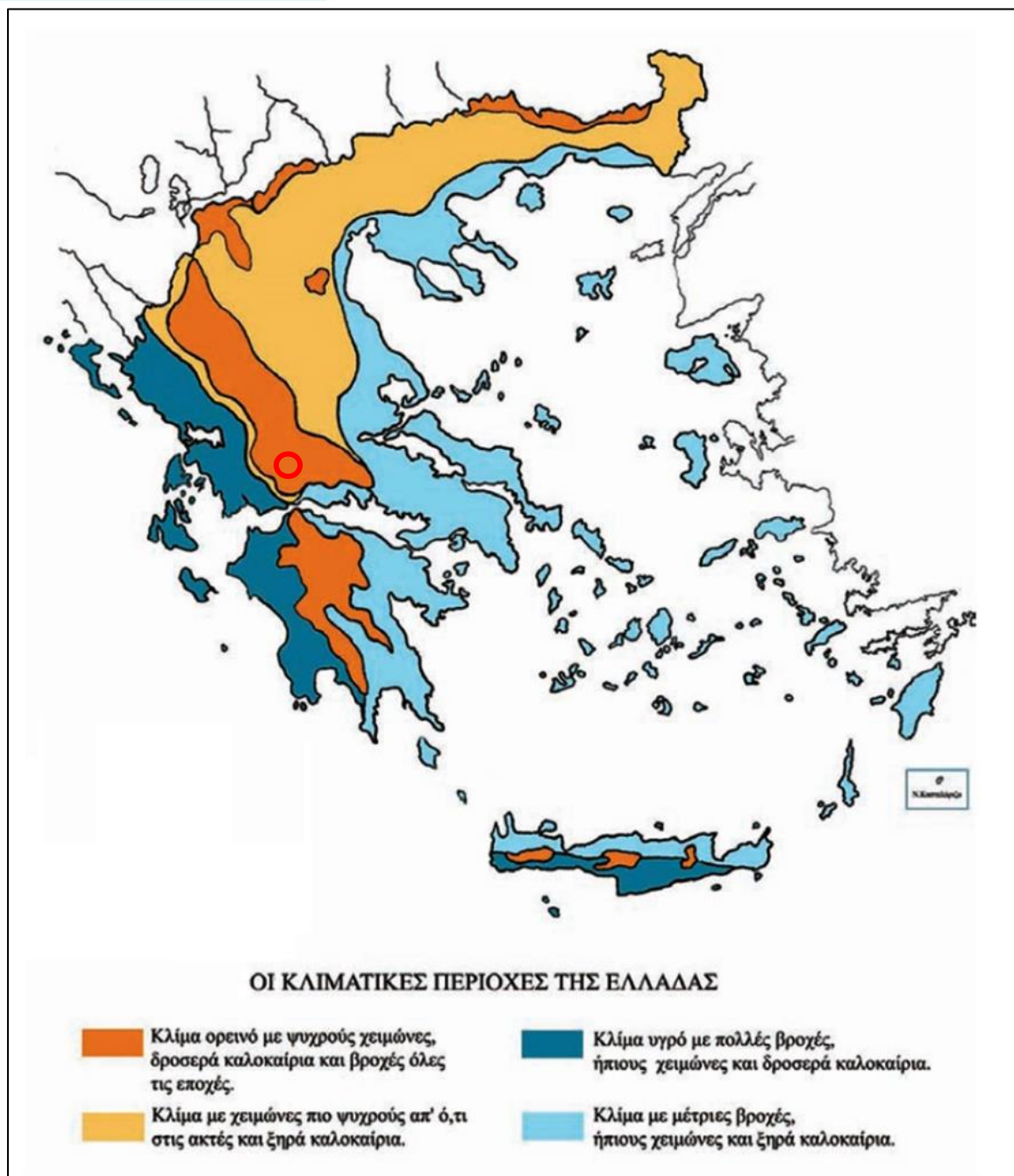


Εικόνα 19: Διάγραμμα πορείας μέσου μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων για το έτος 2019, <https://www.meteo.gr/>.



Εικόνα 20: Χάρτης με την ετήσια Βροχόπτωση (mm), ο κόκκινος κύκλος δείχνει που βρίσκεται η περιοχή μελέτης, <https://www.geogreece.gr/>.

Η κατανομή της ετήσιας βροχόπτωσης που προκύπτει από το χάρτη με την ετήσια βροχόπτωση δείχνει ότι γενικά η περιοχή έχει υψηλή ετήσια βροχόπτωση, περίπου στα 700 mm.



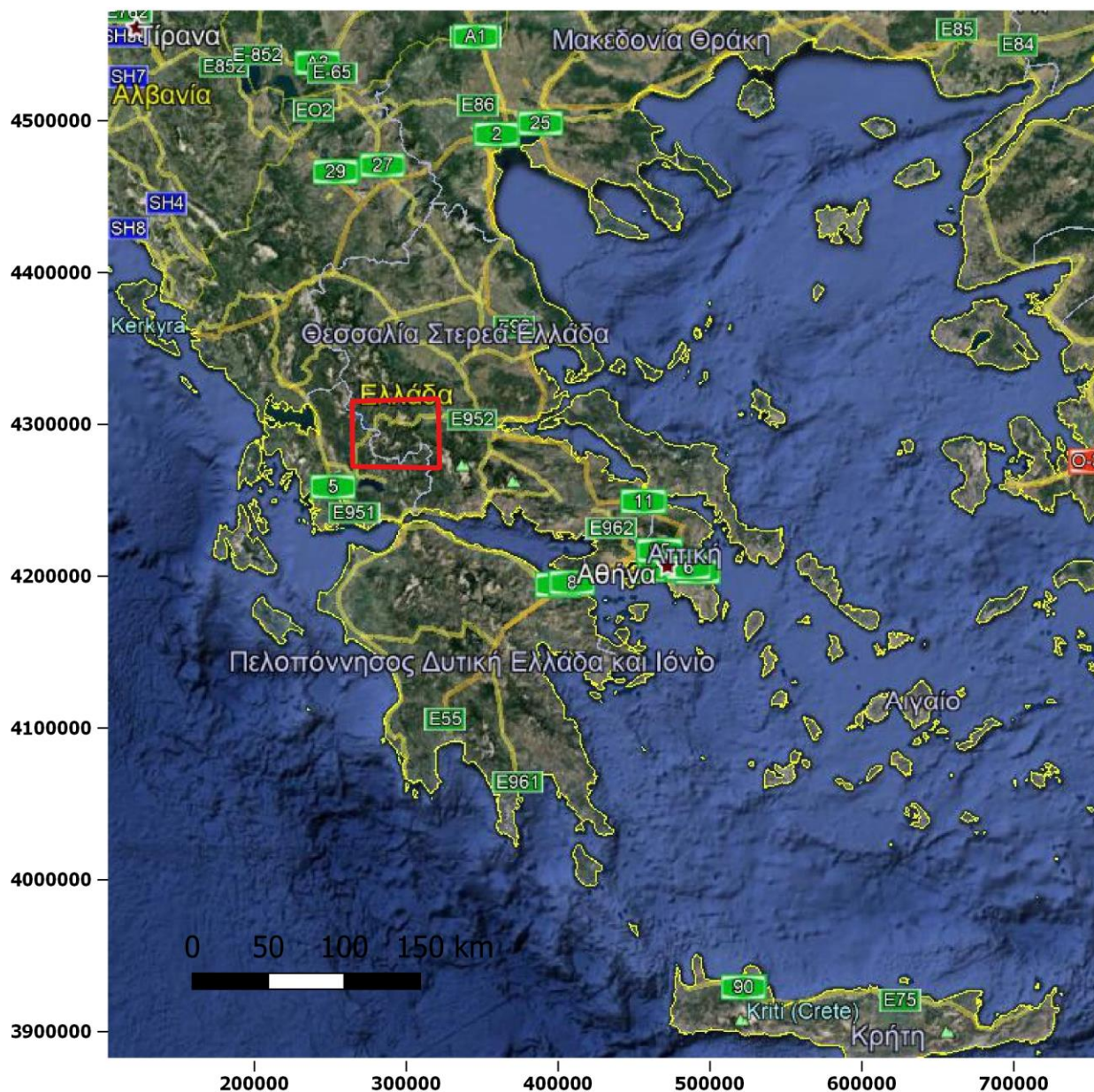
Εικόνα 21: Χάρτης με τις κλιματικές περιοχές της Ελλάδας, ο κόκκινος κύκλος δείχνει που βρίσκεται η περιοχή μελέτης, <http://ebooks.edu.gr/>.

Σύμφωνα με το χάρτη των κλιματικών περιοχών της Ελλάδας, η περιοχή μελέτης έχει κλίμα ορεινό με ψυχρούς χειμώνες δροσερά καλοκαίρια και βροχές όλες τις εποχές.

### 3.2. Γεωλογία στενής περιοχής μελέτης

#### 3.2.1. Γεωμορφολογικές συνθήκες

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται δίπλα στη γέφυρα Διπόταμα, γνωστή και ως γέφυρα Μπαλτά ( $38^{\circ}46'43.3''\text{N}$ ,  $21^{\circ}40'51.6''\text{E}$ ) (ΕΓΣΑ87) στην περιφέρεια της Ευρυτανίας.



Εικόνα 22: Χάρτης της Ελλάδας, με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης, από το Google Earth τροποποιημένος στο QGIS με γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87.

Η γέφυρα του Μπαλτά είναι χτισμένη πάνω στον Κρικελιώτη ποταμό, ο οποίος αποτελεί την ένωση των δύο ποταμών που καταλήγουν σ' αυτόν, τον Καρπενησιώτη και τον Κρικελλοπόταμο.



Εικόνα 23: Αεροφωτογραφία πιο κοντινή της στενής περιοχής μελέτης, με κόκκινο πλαίσιο το πρανές που μελετάται, από Google Earth (21/6/2016).



Εικόνα 24: Φωτογραφία του πρανούς που είναι υπό μελέτη.

Η περιοχή είναι ιδιαίτερα ορεινή με ισχυρές και απότομες κλίσεις και καλύπτεται από έντονη βλάστηση.

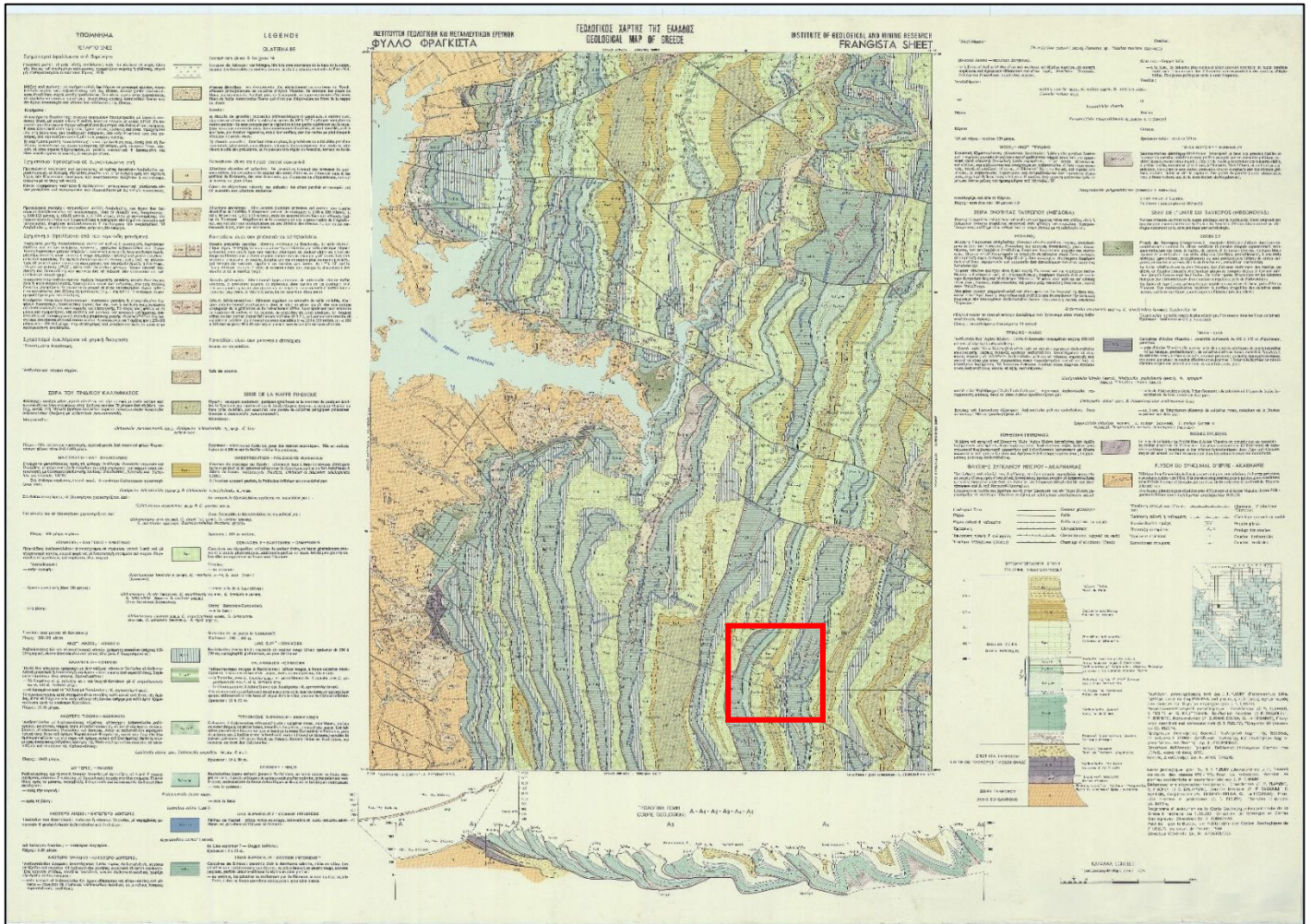
Το υπό μελέτη πρανές έχει ύψος 90 m από τον πόδα του μέχρι την κορυφή. Η πλαγιά έχει κλίση  $70^\circ$  με διεύθυνση Βορειοανατολικά και βρίσκεται σε 780 m απόλυτο υψόμετρο.



Εικόνα 25: Φωτογραφία στην οποία φαίνεται το πρανές και τα χαρακτηριστικά του (κόκκινη γραμμή - ύψος).

### 3.2.2. Γεωλογικές συνθήκες

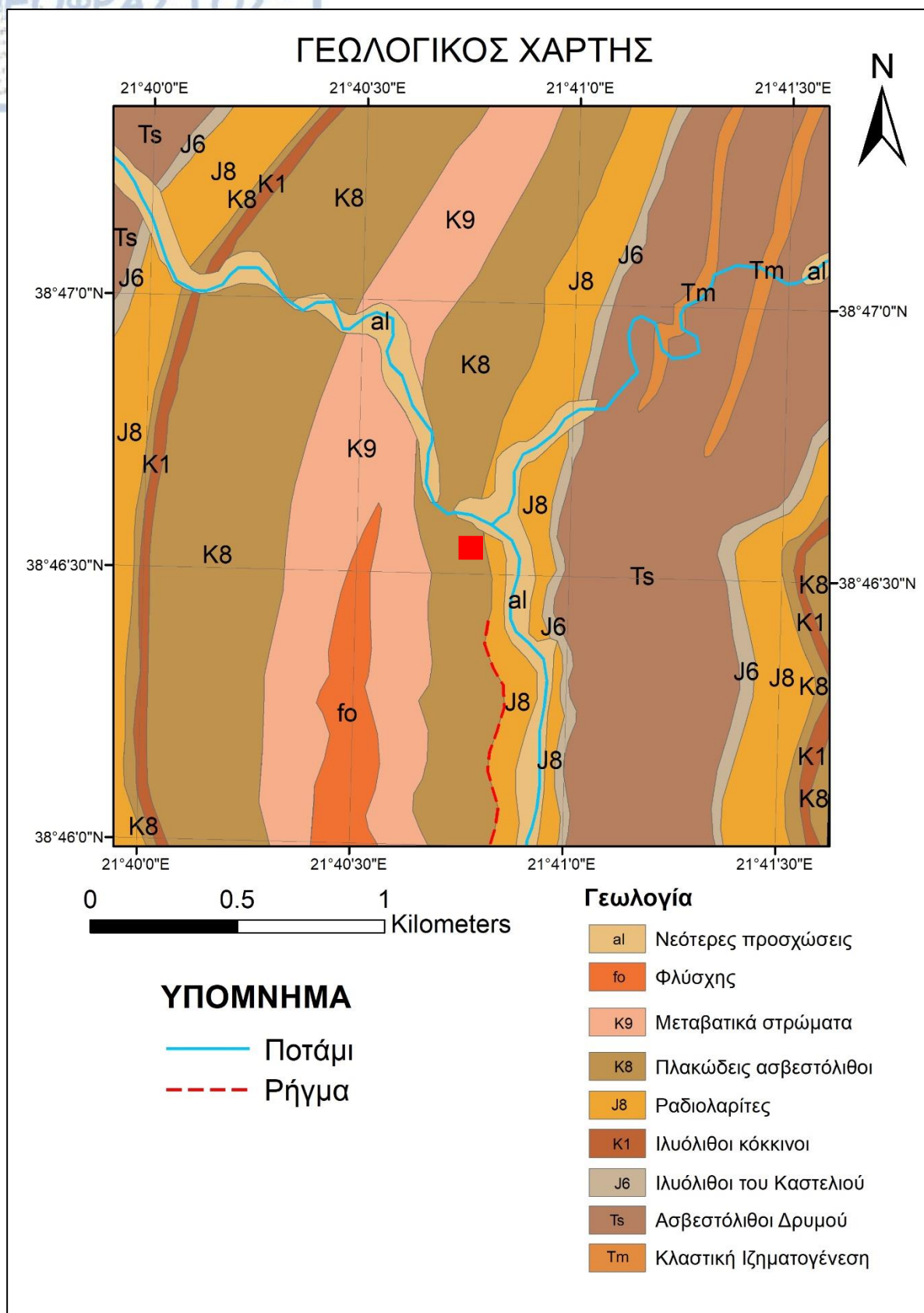
Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι σχηματισμοί της περιοχής μελέτης ανήκουν στη ζώνη Πίνδου. Χαρακτηριστικό της ζώνης αυτής όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 26) είναι η ύπαρξη πτυχών και οι εναλλαγές στρωμάτων.



Εικόνα 26: Γεωλογικός χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε 1:50.000 φύλλο Φράγκιστα, με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης.

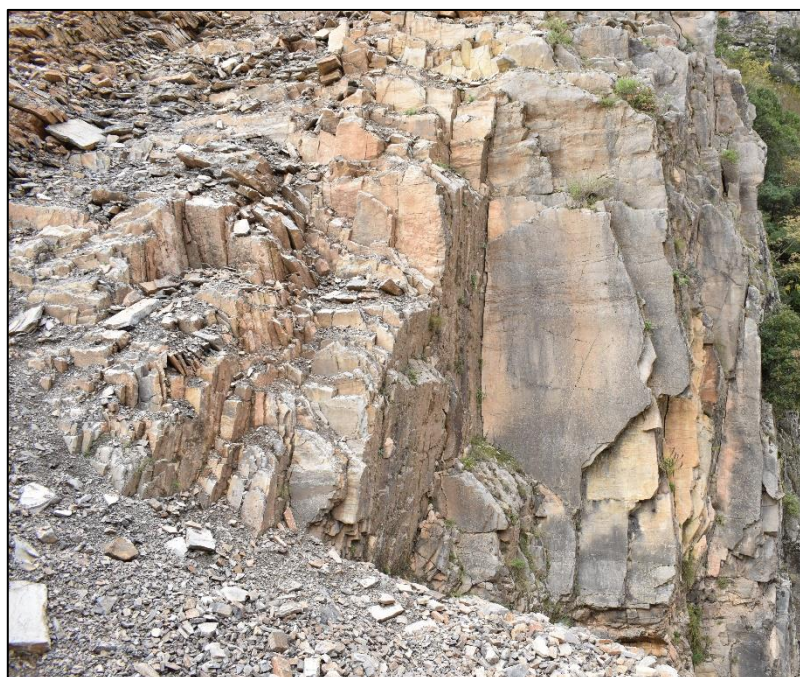
Σύμφωνα με το χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. στη στενή περιοχή μελέτης υπάρχουν:

Κ8.κ: Πλακώδεις ασβεστόλιθοι, ηλικίας Άνω Κρητιδικό, ανοικτόχρωμοι σε στρώματα γενικά λεπτά και με πλαγκτονική πανίδα, καμία φορά και με λατυποπαγή στρώματα πιο παχιά.



Εικόνα 27: Γεωλογικός χάρτης της στενής περιοχής μελέτης, με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης, χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε. τροποποιημένος στο QGIS με γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87.

Στη θέση μελέτης συναντώνται λεπτοπλακώδεις μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, με πάχος στρώσεων 5-20 cm, σε εναλλαγές με αργιλόμαργες. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι λευκότεφροι και αποτελούνται από αραιές κερατολιθικές ενστρώσεις μικρού πάχους.



Εικόνα 28: Φωτογραφίες λεπτοπλακώδων ασβεστόλιθων, από την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 29: Φωτογραφίες επιφανειακών εμφανίσεων λεπτοπλακώδων ασβεστόλιθων, στο υπό μελέτη πρανές.

Η στρώση του σχηματισμού σε όλο το μήκος της πλαγιάς εμφανίζεται με μεγάλη γωνία κλίσης. Η παρακατακόρυφη κλίση των στρωμάτων διακόπτεται στο μεσαίο τμήμα του πρανούς με μία επιπέδωση. Η επιπέδωση σε εκείνο το σημείο οφείλεται στην ύπαρξη μία ζώνης ρήγματος. Το ρήγμα αυτό είναι ανάστροφο, μικρής γωνίας κλίσης με στοιχεία προσανατολισμού  $30^{\circ}/087^{\circ}$ , που προέκυψε από επιτόπου μετρήσεις με τη γεωλογική πυξίδα.



Εικόνα 30: Υπαίθρια φωτογραφία πιθανής επιφάνειας ρήγματος (κόκκινο βέλος).

Όσον αφορά τις υδρογεωλογικές συνθήκες, οι ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται ως δευτερογενώς περατοί σχηματισμοί, λόγω κερματισμού, δηλαδή έχουν αναπτύξει δευτερογενές πορώδες. Επιπλέον, εξίσου περατοί σχηματισμοί θεωρούνται τα υλικά παλαιών κατολισθήσεων, καθώς και τα κορήματα και υλικά του μανδύα αποσάθρωσης.

Συνεπώς, διαπιστώνεται ότι το ποσοστό κατείσδυσης είναι αυξημένο στους ασβεστόλιθους και στους νεότερους υδροπερατούς σχηματισμούς.

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις υψηλές – συχνές βροχοπτώσεις έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση εποχιακών υδροφόρων οριζόντων και την απόπλυση λεπτομερών υλικών. Επίσης, συμβάλει και στη μείωση των διατμητικών αντοχών, με την εποχιακή αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, συμβάλλοντας έτσι στην αστάθεια συγκεκριμένων τμημάτων των πρανών.

#### 4. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες

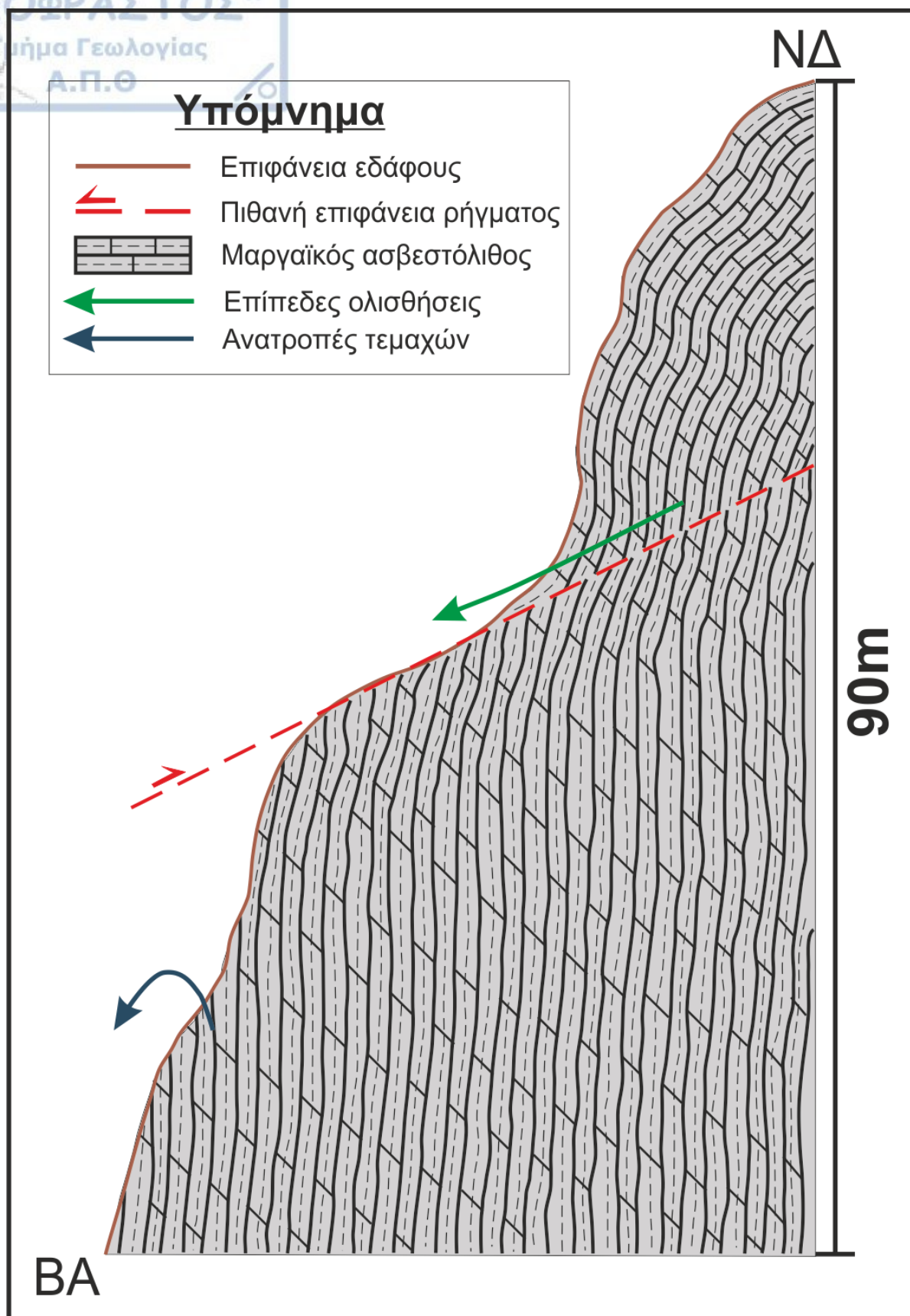
##### 4.1. Μηχανισμός αστοχίας

Το πρανές που μελετάται διαχωρίστηκε υψομετρικά σε δύο τμήματα (άνω – κάτω τμήμα πρανούς) για λόγους ακριβέστερης παρουσίασης του μέσω των σκαριφημάτων. Όριο διαχωρισμού αποτελεί ο ενδιάμεσος αναβαθμός που εμφανίζεται στην πλαγιά – μαύρη διακεκομμένη γραμμή (Εικόνα 31). Τα στρώματα συναντώνται και στα δύο τμήματα παρακατακόρυφα και πτυχωμένα κατά θέσεις. Η πτύχωση των στρωμάτων από το ένα τμήμα στο άλλο δε μεταβάλλεται ομαλά, έτσι ώστε τα πετρώματα να είναι κλειδωμένα, αλλά γίνεται πάνω σε ένα ρήγμα.

Πρόκειται για ένα ανάστροφο ρήγμα, που έχει μικρή γωνία κλίσης. Η επιπέδωση που έχει δημιουργηθεί και από την οποία λείπει αρκετή ποσότητα υλικού, δεν είναι η επιφάνεια της στρώσης, αλλά αποτελεί μία επιφάνεια ρήγματος.



Εικόνα 31: Φωτογραφία της κάτοψης όλης της πλαγιάς, η μαύρη γραμμή διαχωρίζει το πάνω από το κάτω τμήμα του πρανούς.



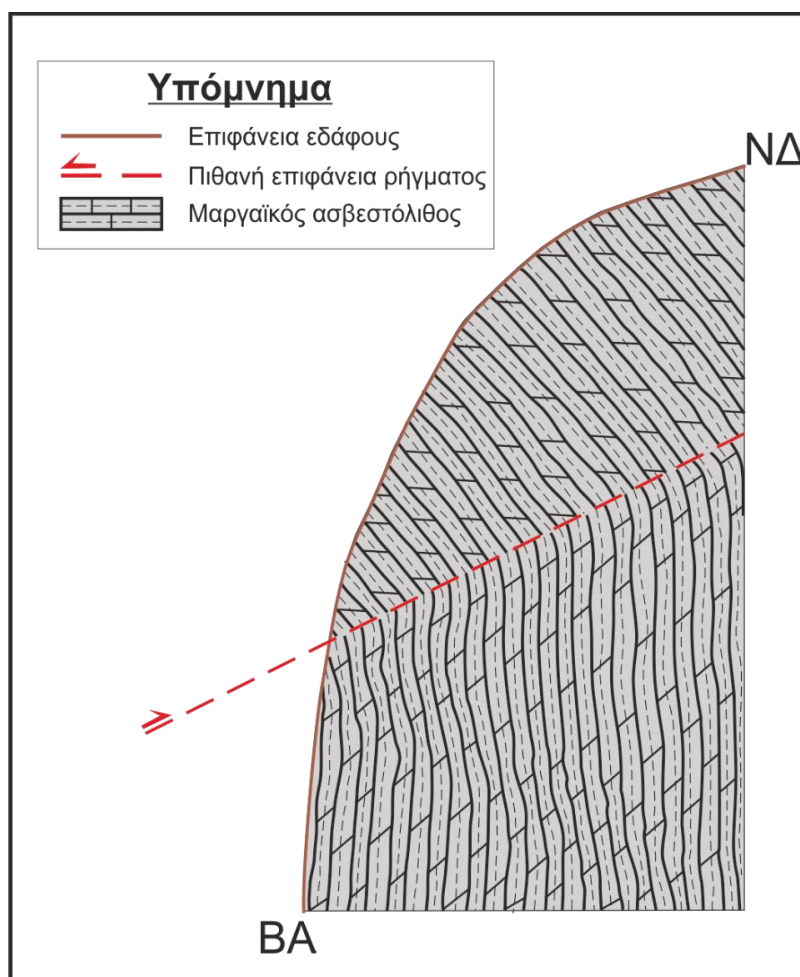
Εικόνα 32: Γεωλογικό σκαρίφημα μηχανισμού αστοχίας ολόκληρου του πρανούς.

Στο κάτω τμήμα του πρανούς υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση φερτού υλικού. Σε περίπτωση που αφαιρεθεί όλο αυτό το υλικό, θα διαπιστωθεί ότι τα στρώματα που βρίσκονται από κάτω είναι παρακατακόρυφα.

Τα υλικά σε εκείνη τη θέση ολισθαίνουν πάνω σε μία ζώνη ρήγματος και η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα να ανοίγει η δομή τους. Επομένως, υπάρχει μία επίπεδη ολίσθηση πάνω σε ζώνες ρηγμάτων, οι οποίες έχουν φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και η ολίσθηση ευνοείται γεωμετρικά, λόγω της δομής των υλικών σε εκείνες τις θέσεις.

Στο κάτω τμήμα οι σχηματισμοί έχουν αντίρροπη διεύθυνση από το πρανές και έχουν ήπιες κλίσεις, επομένως θα ήταν αναμενόμενο να είναι σταθεροί. Όμως, παρατηρήθηκε ότι ολισθαίνουν πάνω σε ζώνη ρήγματος και σταδιακά η δομή τους αλλάζει και μετακινούνται. Επιπλέον, στο κάτω μέρος του πρανούς παρατηρήθηκε ανατροπή των τεμάχων της βραχομάζας.

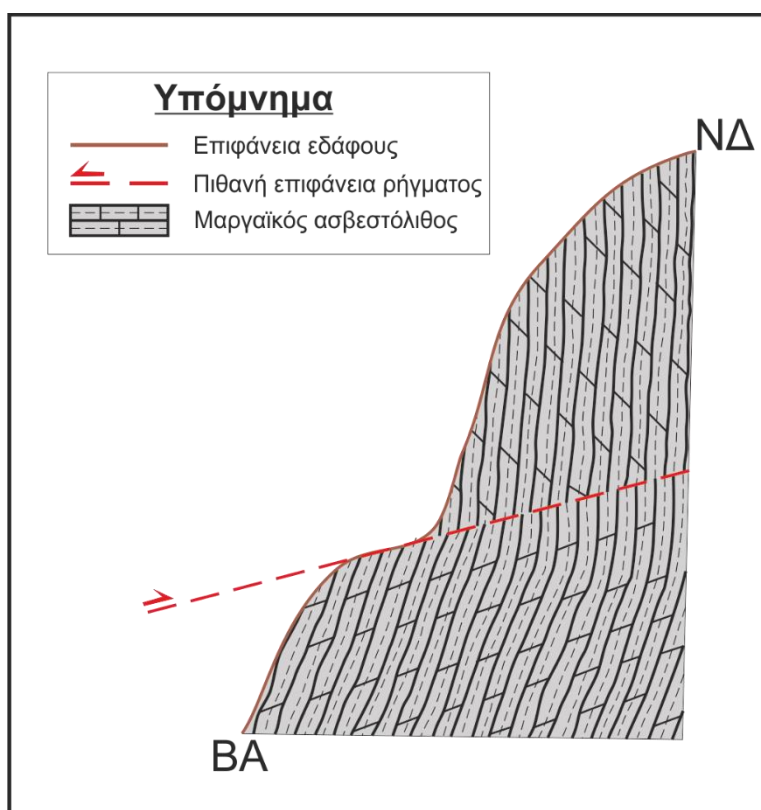
Επομένως, η συνολική εικόνα του πρανούς είναι ότι δεν υπάρχουν περιστροφικές ολισθήσεις, αλλά μία θράυση και μετακίνηση του υλικού πάνω στις ζώνες των ρηγμάτων.



Εικόνα 33: Γεωλογικό σκαρίφημα στο κάτω τμήμα του πρανούς.



Εικόνα 34: Φωτογραφία από την πλαϊνή πλευρά της πλαγιάς, με κόκκινη γραμμή πιθανό ρήγμα.



Εικόνα 35: Γεωλογικό σκαρίφημα της πλαϊνής πλευράς του πρανούς.



### Αντοχή άρρηκτου βράχου

Ο προσδιορισμός της μονοαξονικής αντοχής των πετρωμάτων έγινε μέσω της δοκιμής σημειακής φόρτισης (Point Load Index), είναι μια απλή δοκιμή που έχει σαν σκοπό την ταξινόμηση του ακέρατου πετρώματος από πλευράς αντοχής, καθώς επίσης και τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Η αλληλουχία των πράξεων για τον υπολογισμό της μονοαξονικής αντοχής έχει ως εξής:

$$De^2 = \frac{4 \cdot D \cdot W}{\pi} \rightarrow Is = \frac{P}{De^2} \rightarrow F = \left(\frac{De}{50}\right)0.45 \rightarrow Is(50) = F \cdot Is \rightarrow \sigma_c = K \cdot Is(50)$$

$P \rightarrow$  φορτίο θραύσης, (Newton)

$De \rightarrow$  ισοδύναμη διάσταση (mm)

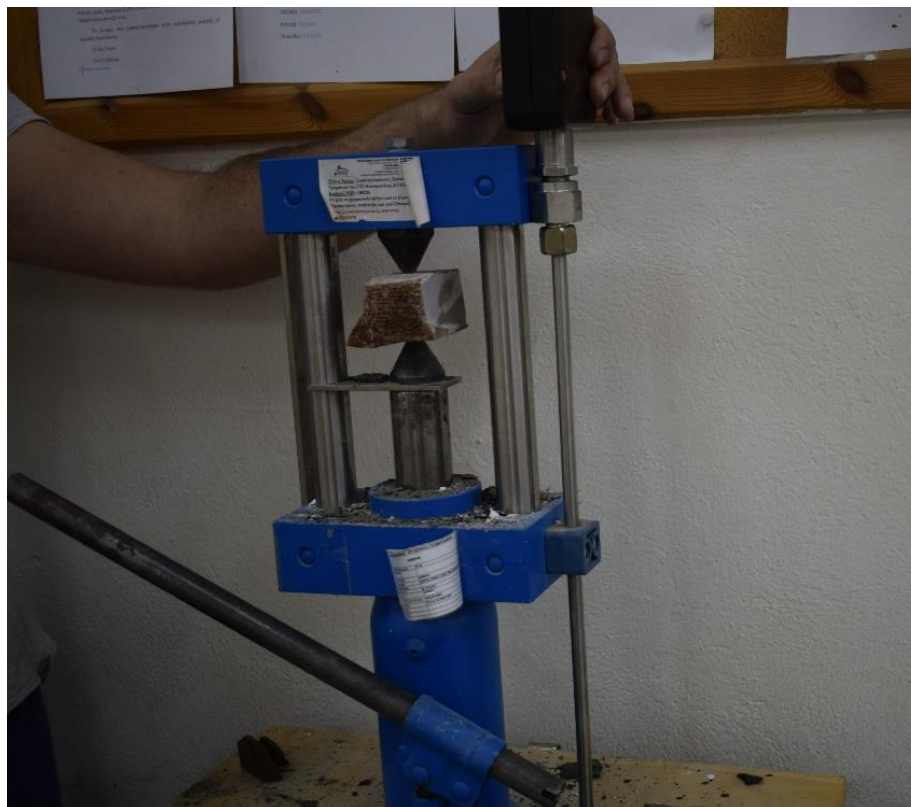
$Is \rightarrow$  δείκτης σημειακής φόρτισης (MPa)

$Is(50) \rightarrow$  ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης (MPa)

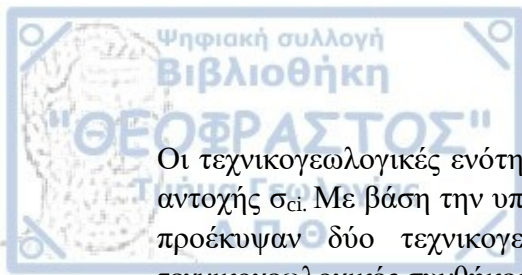
$F \rightarrow$  συντελεστής διόρθωσης

$K \rightarrow$  τιμή που εξαρτάται από τη διάμετρο και μεταβάλλεται από το πέτρωμα

$\sigma_c \rightarrow$  αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)



Εικόνα 37: Δοκιμή Point Load Test.



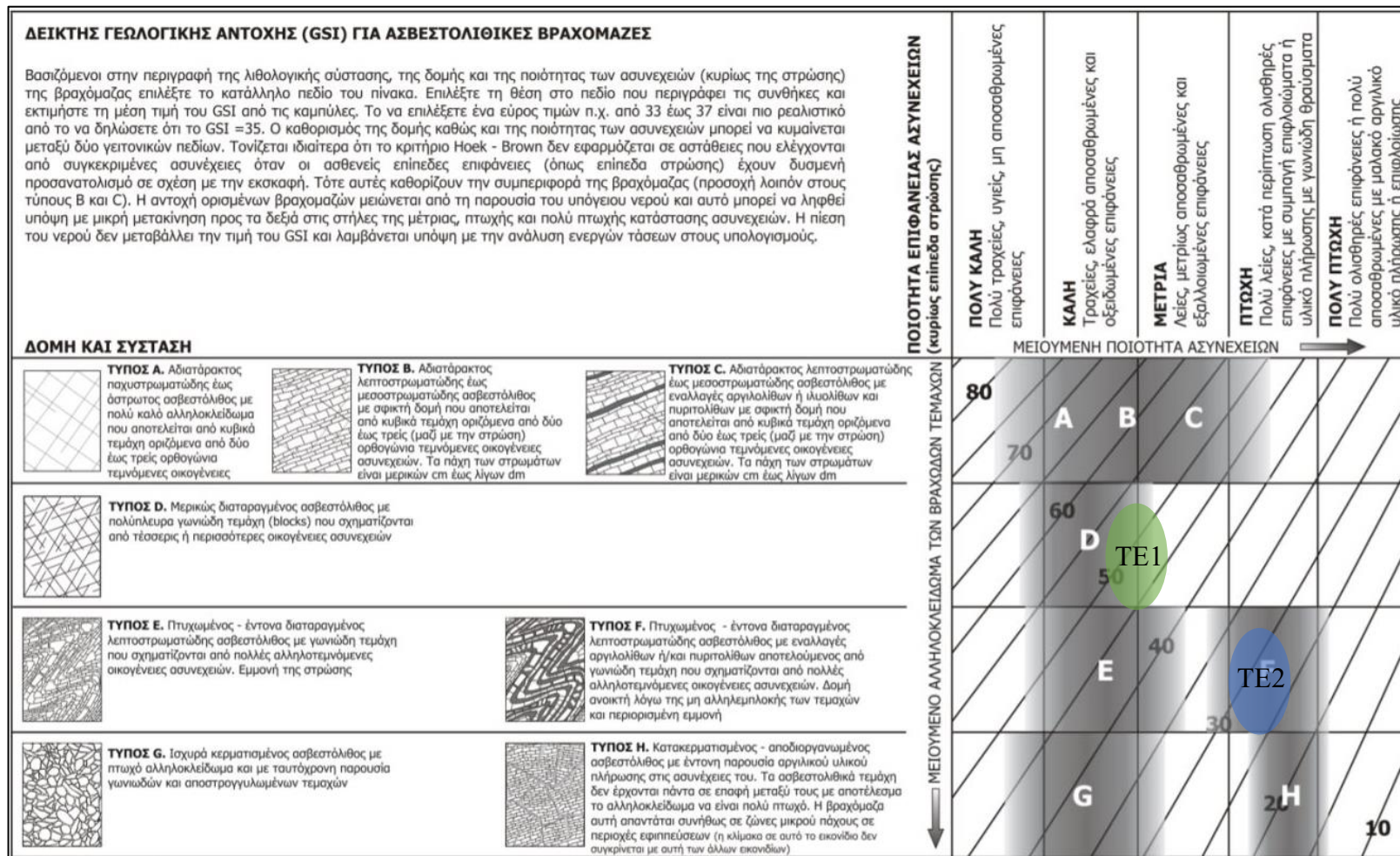
Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες διαχωρίστηκαν βάσει του GSI και της μονοαξονικής αντοχής  $\sigma_{ci}$ . Με βάση την υπαίθρια παρατήρηση και την επεξεργασία των δεδομένων, προέκυψαν δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες που απαντώνται στο πρανές.

*Πίνακας 2: Τεχνικογεωλογικές Ενότητες κατά μήκος του πρανούς και χαρακτηρισμός της βραχομάζας.*

| Τεχνικογεωλογικές Ενότητες | Περιγραφή                                                                                                                                                                                                                                              | GSI   | $\sigma_{ci}$ (MPa) |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------|
| <b>TE1</b>                 | Μερικώς διαταραγμένος ασβεστόλιθος με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από τέσσερις οικογένειες ασυνεχειών.                                                                                                                                | 50-55 | 70-80               |
| <b>TE2</b>                 | Πτυχωμένος – έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές αργιλόλιθων αποτελούμενες από γωνιώδη τεμάχια, που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Δομή ανοικτή λόγω της μη αλληλεμπλοκής των τεμαχίων. | 30-35 | 70-80               |

Στο κάτω μέρος του πρανούς, μία μεγάλη έκταση καλύπτεται από φερτό υλικό και υλικό από παλαιότερες καταπτώσεις. Το υλικό αυτό είναι πολύ κερματισμένο, χωρίς καθόλου δομή και κατά θέσεις αρκετά εδαφοποιημένο.

Για το λόγο αυτό το υλικό δεν ανήκει σε καμία τεχνικογεωλογική ενότητα και όσον αφορά τα μηχανικά του χαρακτηριστικά δεν έχει καθόλου συνοχή και συνεκτικότητα.



Εικόνα 38: Διάγραμμα Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (GSI) για ασβεστολιθικές βραχομάζες (Μαρίνος, 2010) και προβολή των οριζόμενων τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.

### Τεχνικογεωλογικές Ενότητες

ΤΕ1: Μερικώς διαταραγμένος ασβεστολίθος με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών.  
ΤΕ2: Πτυχωμένος – έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές αργιόλιθων αποτελούμενες από γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Δομή ανοικτή λόγω της μη αλληλεμπλοκής των τεμαχίων.

Υλικά βραχοκαταπτώσεων, χωρίς δομή, συνοχή και συνεκτικότητα.



Εικόνα 39: Διαχωρισμός Τεχνικογεωλογικών Ενότητων κατά μήκος του πρανούς.

### Τεχνικογεωλογική Ενότητα 1

Πρόκειται για μερικώς διαταραγμένο ασβεστόλιθο με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις οικογένειες ασυνεχειών. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικά cm.

Αποτελεί την τεχνικογεωλογική ενότητα με τα πιο υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Η βραχομάζα στο σύνολο της χαρακτηρίζεται από χαμηλό βαθμό κερματισμού, είναι πολύ συμπαγής και η αποσάθρωση εμφανίζεται σε συγκεκριμένα μικρά τμήματα επιφανειακά. Κύρια ασυνέχεια όλου του σχηματισμού, αποτελεί η επιφάνεια της στρώσης, η οποία έχει μεγάλη εμμονή.

### Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2

Πρόκειται για πτυχωμένο – έντονα διαταραγμένο λεπτοστρωματώδη ασβεστόλιθο με εναλλαγές αργιλόλιθων αποτελούμενες από γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Δομή ανοικτή λόγω της μη αλληλεμπλοκής των τεμαχίων.

Η βραχομάζα παρουσιάζεται πτυχωμένη και διακρίνεται από την παρουσία ενστρώσεων από αργιλόμαργες, οι οποίες απομειώνουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της. Εμφανίζεται μέτρια αποσαθρωμένη.



Εικόνα 40: Φωτογραφία από το UAV, που απεικονίζει την TE1 και με καφέ πλαίσιο τα υλικά βραχοκαταπτώσεων.



Εικόνα 41: Φωτογραφία από το UAV, που απεικονίζει την TE1.



Εικόνα 42: Φωτογραφία από το UAV, που απεικονίζει την TE2 και με καφέ πλαίσιο τα υλικά βραχοκαταπτώσεων.



Εικόνα 43: Φωτογραφία που απεικονίζει την TE2.

## 5. Χρήση UAV και LIDAR για την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των φαινομένων βραχοκαταπτώσεων

### 5.1. UAV

#### 5.1.1. Γενικά

Τα τελευταία χρόνια η χρήση εναλλακτικών συστημάτων αεροφωτογράφισης, όπως είναι τα αυτόματα / ημιαυτόματα Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) ή αλλιώς στα αγγλικά UAV (Unmanned Aerial Vehicle), έχει προσεγγίσει το ερευνητικό και το πρακτικό ενδιαφέρον διαφορετικών μεθοδολογιών, μεταξύ των οποίων και της Φωτογραμμετρίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχουν μεγάλη ευελιξία, ταχύτητα και οικονομία κατά τη συλλογή των δεδομένων και επιπλέον τα τελικά προϊόντα είναι αρκετά υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας με ποικίλες χρήσεις.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) είναι κάθε είδους ιπτάμενα οχήματα που δεν έχουν χειριστή στην άτρακτο τους, αλλά πραγματοποιούν πτήσεις είτε αυτόνομα είτε μέσω τηλεκατεύθυνσης. Ο όρος UAS (Unmanned Aerial Systems) περιλαμβάνει όλες τις συσκευές, το προσωπικό και τις διαδικασίες οι οποίες χρησιμοποιούνται προκειμένου το μη επανδρωμένο αεροσκάφος να θεωρείται ως ολοκληρωμένο σύστημα. Τα μη επανδρωμένα αέρια συστήματα (UAS) έχουν λάβει αρκετά ονόματα και ακρώνυμα, όπως "aerial robot", όμως τα πιο διαδεδομένα είναι το UAV και το "drone" (Colomina & Molina, 2014).

Αρχικά, αυτά τα συστήματα είχαν δημιουργηθεί για στρατιωτικούς σκοπούς, ωστόσο από τη έρευνα ορισμένων ερευνητικών ομάδων έγινε αντιληπτό στα τέλη της δεκαετίας του '70 η δυνατότητα αυτών των συστημάτων για χαρτογράφηση (Colomina & Molina, 2014).

#### 5.1.2. Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων ακολουθεί μία ροή από εργασίες. Αρχικά εισάγονται οι παράμετροι στο πρόγραμμα και γίνεται ο προγραμματισμός της πτήσης. Επιλέγεται αν θα γίνει αυτόματη ή χειροκίνητη πτήση. Έπειτα μετά την πραγματοποίηση της πτήσης γίνεται έλεγχος και τριγωνισμός των δεδομένων. Τέλος, γίνεται η παραγωγή ορθομωσαϊκού, DSM φωτογραφίας και 3D μοντέλου.

Μετά από το τέλος κάθε πτήσης η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται σε διάφορα πακέτα λογισμικών. Σ' αυτά πραγματοποιείται η γεωαναφορά των εικόνων που έχουν ληφθεί με βάση τις συντεταγμένες τους, οι οποίες προέκυψαν από το GPS που είναι εγκατεστημένο στο UAV. Το πρόγραμμα εντοπίζει τις θέσεις που υπάρχει αλληλοεπικάλυψη και χτίζεται σταδιακά η τελική συνολική εικόνα.

Τα τελικά προϊόντα από το λογισμικό είναι μία ορθοφωτογραφία ή αλλιώς ορθομωσαϊκό, ένα ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM) και το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής ή αλλιώς τρισδιάστατο νέφος σημείων (3D point cloud). Επίσης,

δημιουργείται μία τελική αναφορά που περιλαμβάνει τις λεπτομέρειες της πτήσης και την επεξεργασία των δεδομένων από το λογισμικό.

Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να επεξεργαστούν μετέπειτα σε περιβάλλον GIS (Geographic Information System – Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών) σε συνδυασμό με την αξιολόγηση της επί τόπου παρατήρησης.

Τα είδη των μη επανδρωμένων αεροσκαφών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη είναι αυτή με τις σταθερές πτέρυγες, όπως τα αεροπλάνα. Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή με τις έλικες, όπως τα ελικόπτερα.



Εικόνα 44: Μη επανδρωμένο αεροσκάφος με έλικες, Drone DJI Phantom 3 Professional, (όπου χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας) <https://www.drone-world.com/dji-phantom-3-professional>.

### 5.1.3. Πλεονεκτήματα χρήσης σε βραχοκαταπτώσεις

Κατά την τελευταία δεκαετία υπήρξε αύξηση της χρήσης της τηλεπισκόπησης για τη χαρτογράφηση και την παρακολούθηση των βραχοκαταπτώσεων και επιπλέον υπήρξε σημαντική βελτίωση της χωρικής ανάλυσης της τεχνολογίας της τηλεπισκόπησης με την εισαγωγή της σάρωσης με λέιζερ, τόσο αερομεταφερόμενα όσο και επίγεια και των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) (Lucieer et al., 2014).

Οι παλιότερες τεχνικές ανίχνευσης βραχοκαταπτώσεων και παρατήρησης της Γης δεν είναι τόσο ευέλικτες, όσο η νέα πλατφόρμα τηλεπισκόπησης των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV). Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία UAV προσφέρουν νέες δυνατότητες χαρτογράφησης και παρακολούθησης του

περιβάλλοντος με εξαιρετικά υψηλή ανάλυση (ανάλυση 1-20 cm) (Lucieer et al., 2014).

Οι αισθητήρες που φέρονται από τα UAV αποτελούν ιδανικά εργαλεία για τη χαρτογράφηση και την παρακολούθηση δυναμικών χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας. Επιπλέον, οι νέες τεχνικές επιτρέπουν τον υπολογισμό του όγκου των συσσωρευμένου υλικού από τις βραχοκαταπτώσεις και τη χαρτογράφηση τοπογραφικών αλλαγών (Lucieer et al., 2014). Οι παραπάνω στόχοι επιτυγχάνονται μέσω ειδικών προγραμμάτων φωτογραμμετρίας, η οποία ορίζεται ως μία τεχνική προσδιορισμού των διαστάσεων αντικειμένων με την αξιοποίηση φωτογραφιών.

Η τεχνολογία UAV αποτελεί μία διαδικασία χαμηλού κόστους καθώς τα εργαλεία που πραγματοποιούν τη λήψη δεδομένων είναι σχετικά οικονομικά σε σύγκριση με τη χρήση ειδικών σαρωτών λέιζερ και η διαδικασία λήψης των δεδομένων δεν είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Επομένως, με τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας δίνεται η δυνατότητα σε μία περιοχή μελέτης να πραγματοποιηθούν αρκετές λήψεις σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων της κάθε λήψης και τον υπολογισμό των ενδεχόμενων μετακινήσεων και γεωμορφολογικών αλλαγών στην τοπογραφία.

Παράλληλα, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των τεχνολογιών UAV όσον αφορά τη μελέτη βραχοκαταπτώσεων είναι ότι διαθέτουν την ικανότητα συλλογής εικόνων εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης και πτήσης κατ' απαίτηση σε περιοχές με δύσκολη πρόσβαση σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, μεταφέρουν πολλούς αισθητήρες, όπως μικρές κάμερες ελαφρού μεγέθους, GPS και αυτόματο πιλότο, με προηγμένο λογισμικό που επιτρέπει ακριβή γεωκωδικοποίηση των εικόνων.

Τέλος, η τεχνολογία UAV σε συνδυασμό με την τεχνική γνωστή ως Structure from Motion (SfM) μπορεί να προσφέρει οικονομικά και αποδοτικά μέσα για την απόκτηση πυκνών και μεγάλης ακρίβειας δεδομένων 3D της επιφάνειας της Γης (Lucieer et al., 2014). Η επεξεργασία SfM (Structure from Motion) είναι μία αυτοματοποιημένη τεχνική που χρησιμοποιείται για την ένωση, γεωμετρική ανόρθωση και ψηφιοποίηση των εικόνων, οι οποίες θα προκύψουν από τη χρήση UAV, σε ένα αντικείμενο ώστε να καλύψουν ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος.

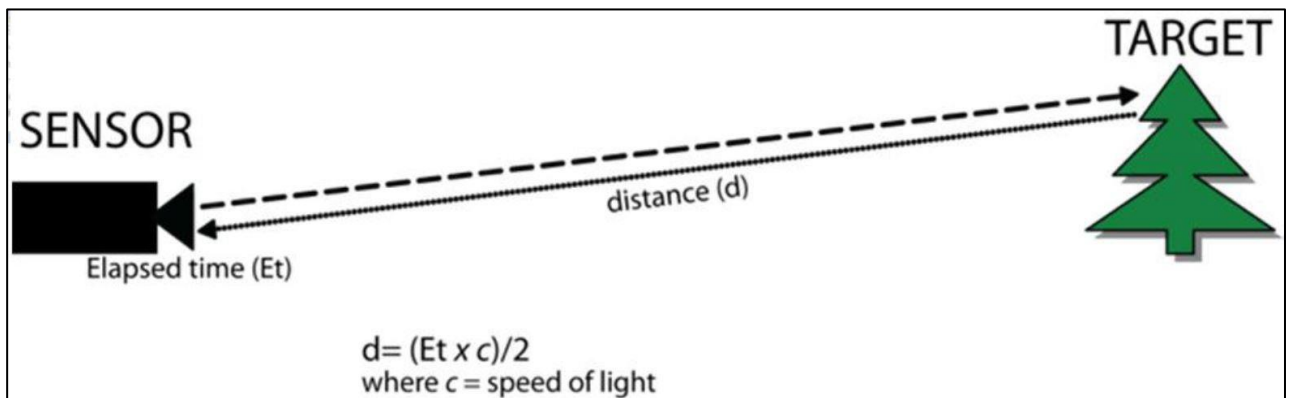
Η τεχνολογία Lidar (Light Detection and Ranging) αφορά την απεικόνιση τρισδιάστατης πληροφορίας στην ύπαιθρο από κάποια απόσταση. Ουσιαστικά χρησιμοποιεί την ανάκλαση του φωτός από ένα στόχο έτσι ώστε να προσδιοριστεί η τοποθεσία του στο τρισδιάστατο σύστημα. Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούνται οι ακτίνες laser, λόγω της μεγάλης εμβέλειας τους.

Στην τεχνολογία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως στόχο ένα μεγάλο εύρος υλικών και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως είναι η εξαγωγή μεγάλης ακρίβειας τοπογραφικών, γεωμορφολογικών, γεωλογικών και δομικών (ασυνέχειες) δεδομένων.

Στην τεχνική γεωλογία χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας, τον υπολογισμό της ευστάθειας του πρανούς και την καταγραφή οποιασδήποτε κίνησης με την εξέλιξη στο χρόνο. Επιπλέον, για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας του πρανούς με στόχο την μοντελοποίηση των συμπερασμάτων.

### 5.2.2. Μεθοδολογία χρήσης

Το Lidar βασίζεται στην τεχνολογία της οπτικής τηλεπισκόπησης. Βασικός παράγοντας στην όλη διαδικασία είναι η απόσταση που χωρίζει τον σαρωτή από τον στόχο. Η απόσταση υπολογίζεται σύμφωνα με το χρονικό διάστημα μεταξύ της εκπομπής του σήματος από το laser μέχρι την επιστροφή του σήματος (επιστρεφόμενος παλμός).



Εικόνα 45: Απεικόνιση της διαδρομής του σήματος από το Lidar στο στόχο και ο επιστρεφόμενος παλμός (Lato, 2010).

Τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από αυτήν την μέθοδο κυμαίνονται από 2.500 – 1.000.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο και δίνεται η δυνατότητα να αποτυπωθούν αντικείμενα, που απέχουν απόσταση 70-1.500m, το οποίο εξαρτάται από την ισχύ του laser και τον τύπο Lidar που χρησιμοποιείται.

Το τελικό αποτέλεσμα το οποίο προκύπτει από τη μέθοδο αυτή είναι το point cloud και αποτελείται από εκατομμύρια σημεία, τα οποία αναπαριστούν σε τρισδιάστατη μορφή την εκάστοτε επιφάνεια. Ουσιαστικά το κάθε σημείο είναι ορισμένο σε ένα XYZ σύστημα συντεταγμένων. Επίσης, το κάθε σημείο φέρει και χρωματική πληροφορία RGB (Red Green Blue), που ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το ρεαλιστικό χρώμα (Lato, 2011).

Μία σημαντική παράμετρος που έχει σημασία είναι η απόσταση μεταξύ των σημείων σε ένα point cloud, όσο πιο μικρή είναι η απόσταση των σημείων τόσο πιο μεγάλη είναι η λεπτομέρεια στο παραγόμενο αποτέλεσμα. Όμως, αυτό για να γίνει απαιτεί πιο πολλές σαρώσεις ώστε να καλυφθεί όλη η επιφάνεια.

Η ανάλυση του παραγόμενου αποτελέσματος εξαρτάται από τη δυνατότητα του κάθε σαρωτή να αντιλαμβάνεται τα επίπεδα ανακλαστικότητας του στόχου, καθώς και από τη γωνία με την οποία προσπίπτει η δέσμη της ακτίνας πάνω στο στόχο. Επομένως, σημαντικό ρόλο έχει η τραχύτητα της επιφάνειας, άρα όσο πιο λεία είναι, τόσο μεγαλύτερης ανάλυσης θα είναι το point cloud.

#### Τύποι σαρωτών

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι σαρωτών Lidar, οι επίγειοι (Terrestrial Laser Scanner) και οι ιπτάμενοι (Airborne Laser Scanner). Οι επίγειοι σαρωτές χωρίζονται επιπλέον σε στατικούς και σε κινητούς. Οι σαρωτές διαφέρουν μεταξύ τους σε χαρακτηριστικά, όπως είναι η απόσταση που είναι ικανοί να λαμβάνουν τον επιστρεφόμενο παλμό, το ρυθμό συλλογής δεδομένων και την ακρίβεια και την ευαισθησία της ανάλυσης.

Στην τεχνική γεωλογία οι στατικοί σαρωτές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της βραχομάζας και για τη συλλογή δεδομένων υψηλής ακρίβειας για τη δομή της.



Εικόνα 46: Στατικός σαρωτής Optech's ILRIS-3D, (όπου χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας) <http://ritmindustry.com/>.

### Παραγόμενα δεδομένα

Τα δεδομένα τα οποία παράγονται από τους σαρωτές Lidar είναι της μορφής LAS και έχουν πολύ μεγάλο όγκο, της τάξης gigabyte. Για την επεξεργασία τους απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων λογισμικών. Ουσιαστικά η φύση των δεδομένων που θα συλλεχθούν, εξαρτάται από το μηχάνημα, ενώ η σωστή επεξεργασία τους θα καθορίσει και τα τελικά αποτελέσματα (Lato, 2010).

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες δεδομένων που εξάγονται από το Lidar:

- Σημειακά δεδομένα (XYZ), αποτελεί σημειακή πληροφορία και είναι η πιο απλή μορφή δεδομένων.
- Σημειακά δεδομένα με καταγραφή της έντασης επιστροφής (XYZI), αφορά την ισχύ του φωτός που εκπέμπεται από τον αισθητήρα και από αυτά υπολογίζεται το ποσοστό εκπεμπόμενου φωτός (ένταση), που σχετίζεται με την ανακλαστικότητα.
- Σημειακά δεδομένα σε συνδυασμό με τιμές χρωματισμού (XYZRGB), με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (εσωτερική ή εξωτερική) γίνεται η παραγωγή ψευδό-χρωματισμένων νεφών της κλίμακας (RGB).

### **5.2.3. Πλεονεκτήματα χρήσης σε πρανή**

Η τεχνολογία Lidar χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό βραχωδών πρανών και προσφέρεται μία τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας τους.

Το Lidar δίνει τη δυνατότητα απόκτησης πιο αντιπροσωπευτικών μετρήσεων από όλη την επιφάνεια του πρανούς, χωρίς να περιορίζονται μόνο στη βάση του όπως γίνεται με τις συμβατικές μεθόδους.

Επίσης, μέσω αυτού γίνεται μείωση της διακινδύνευσης για τους ερευνητές, επειδή η σάρωση μπορεί να διεξαχθεί από ασφαλή περιοχή.

Επιπλέον, το Lidar μπορεί να συμβάλει στο χαρακτηρισμό του βραχώδους πρανούς, στην μοντελοποίηση του και στην παρακολούθηση του για τυχόν μετακινήσεις.

Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή δίνει ικανοποιητικό εύρος οπτικής γωνίας και έκτασης κάλυψης και παράγει δεδομένα με ακρίβεια χιλιοστού.

Ωστόσο, οφείλεται να λαμβάνονται υπόψη και περιορισμοί και διορθώσεις στα δεδομένα της σάρωσης σε ένα βραχώδες πρανές. Τα δύο μεγαλύτερα προβλήματα είναι ο προσανατολισμός σαρωτή ως προς τον προσανατολισμό της επιφάνειας του πρανούς και το φαινόμενο της έμφραξης (occlusion), το οποίο παρουσιάζεται σε επιφάνειες, που είναι σχεδόν παράλληλες προς το επίπεδο διεύθυνσης της σάρωσης.

### **5.3. Επεξεργασία δεδομένων**

#### **5.3.1. Εισαγωγή**

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής ήταν διαθέσιμα δεδομένα από τέσσερις πτήσεις με UAV (Απρίλιος 2017, Μάρτιος 2018, Μάιος 2019 και Νοέμβριος 2019) και ένα σκανάρισμα με Lidar (Νοέμβριος 2019). Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν συμβατικές μετρήσεις στο πεδίο με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας.

Ουσιαστικά η συλλογή των δεδομένων είτε με συμβατικές μεθόδους είτε με τη χρήση UAV και Lidar έχει ως στόχο την επεξεργασία τους με κατάλληλες μεθοδολογίες και εν τέλει την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση αυτής της μελέτης, ο στόχος σε πρώτο στάδιο είναι η εξαγωγή του προσανατολισμού των κύριων οικογενειών ασυνεχειών και ο προσδιορισμός των δυνητικών αστοχιών που θα προκύψουν. Έπειτα θα γίνει η συγκριτική ανάλυση των δεδομένων, έτσι ώστε να βρεθούν αλλαγές στη γεωμορφολογία του πρανούς τα τελευταία χρόνια και εύρεση όγκων του υλικού που έχουν προστεθεί ή έχουν αφαιρεθεί από συγκεκριμένες θέσεις.

Επομένως, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής των δεδομένων και οι μέθοδοι επεξεργασίας τους.

#### **5.3.2. Συλλογή δεδομένων**

Η επαλήθευση των δεδομένων που θα εξαχθούν από το UAV και το Lidar πραγματοποιήθηκε από επί τόπου μετρήσεις προσανατολισμού των ασυνεχειών με τη συμβατική μέθοδο της γεωλογικής πυξίδας.

Συνολικά λήφθηκαν 110 μετρήσεις με την πυξίδα σε διάφορες θέσεις της βραχομάζας.

Προβλήθηκαν στο πρόγραμμα Dips 7.0 και δημιουργήθηκε σε πρώτο στάδιο στερεοδιάγραμμα προβολής των πόλων όλων των επιφανειών που μετρήθηκαν.

Έπειτα, ανάλογα με τις πυκνότητες που προέκυψαν, παρατηρήθηκαν τέσσερις μεγάλες συγκεντρώσεις πόλων που αυτό συνάδει με την υπαίθρια παρατήρηση.

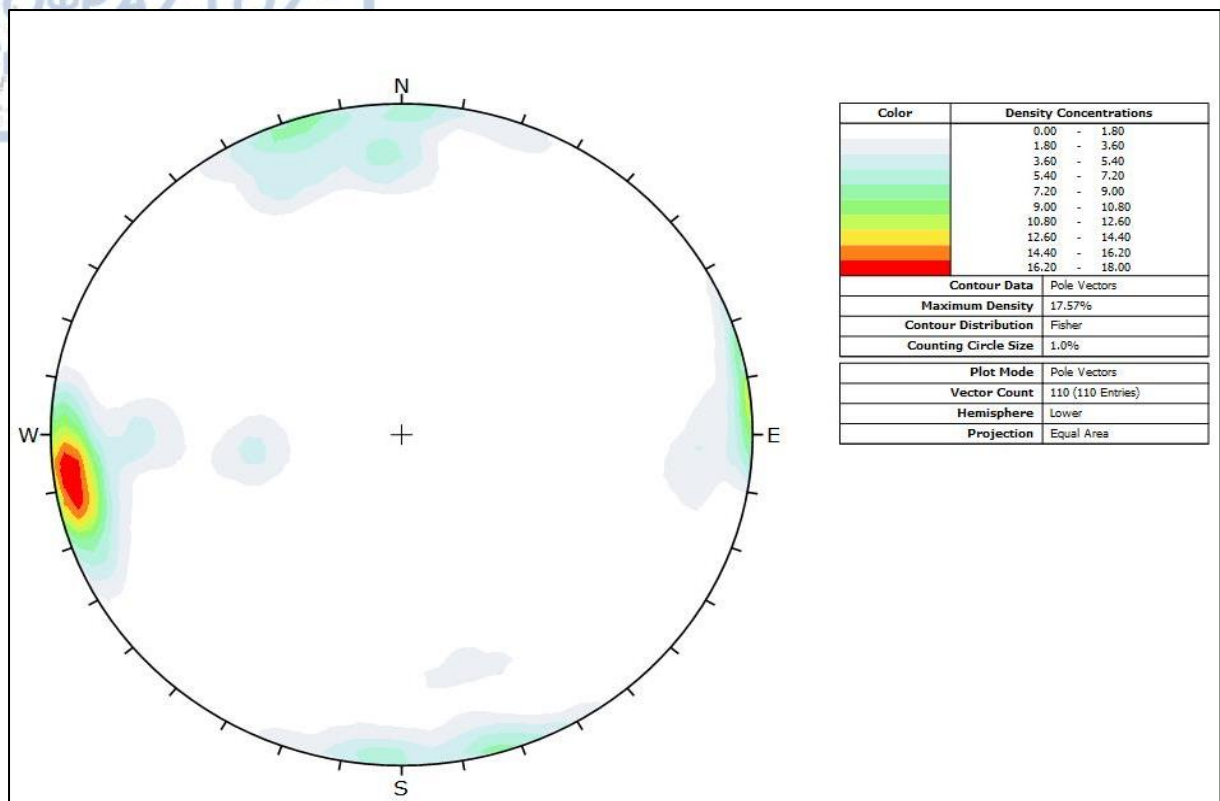
Επομένως, διακρίνονται τέσσερις ασυνέχειες και μέσα σ' αυτές ανήκει και η στρώση, η οποία είναι αυτή που επικρατεί κατά κύριο λόγο σε όλη την έκταση του πρανούς.

Επίσης, διακρίθηκε και μία ακόμα συγκέντρωση των πόλων των επιφανειών, η οποία ταιριάζει με τα στοιχεία προσανατολισμού της ρηξιγενούς ζώνης που εντοπίστηκε.

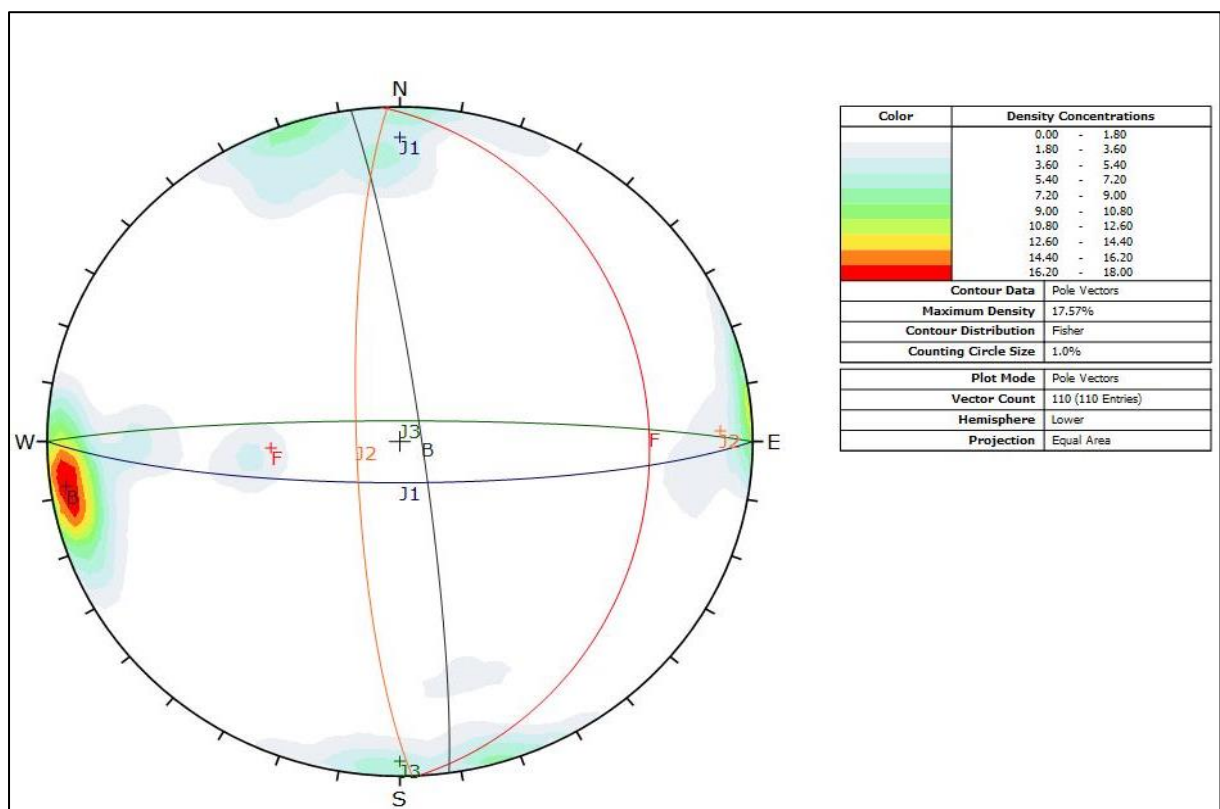
Τέλος, δημιουργήθηκε ένας συνολικός πίνακας που περιλαμβάνει τα στοιχεία προσανατολισμού των κύριων ασυνεχειών, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις με τη συμβατική μέθοδο της γεωλογικής πυξίδας.

Πίνακας 3: Συμβατικές μετρήσεις προσανατολισμού των ασυνεχειών, με τη γεωλογική πυξίδα.

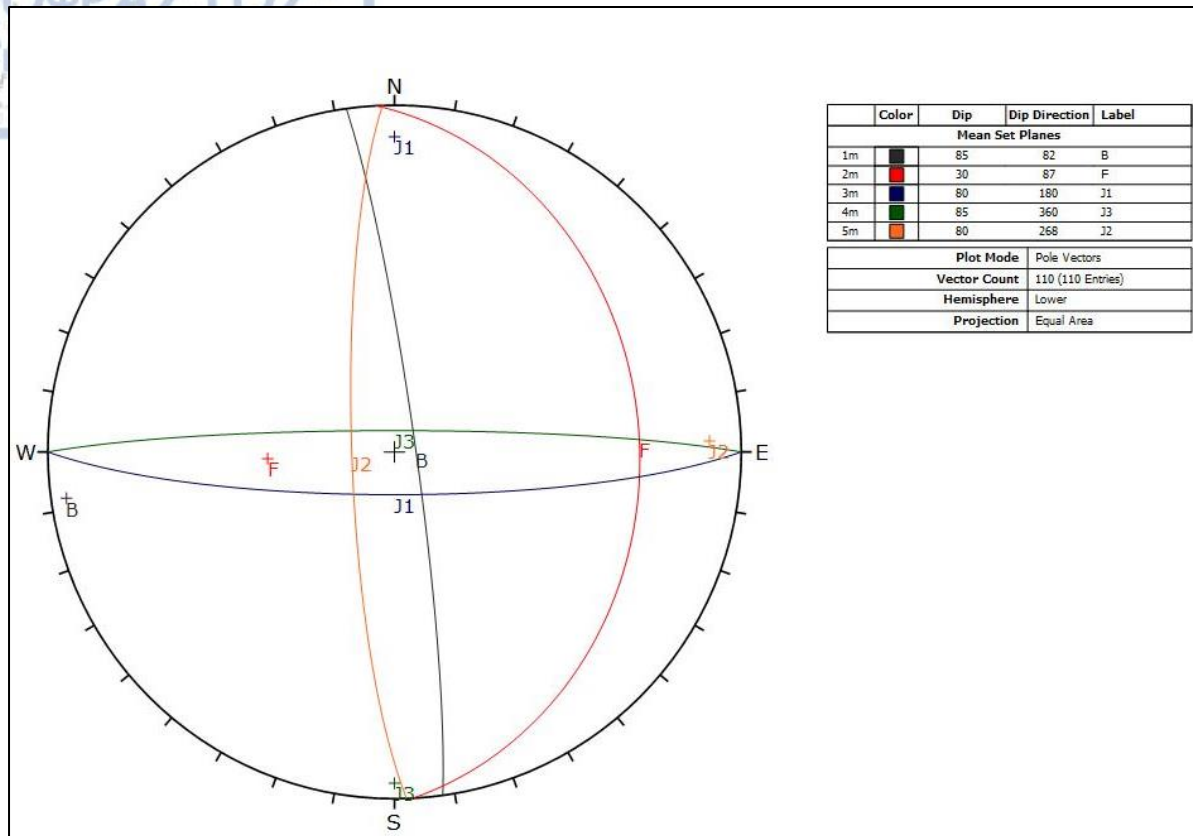
| α/α | Γωνία κλίσης (°) | Διεύθυνση Κλίσης (°) | α/α | Γωνία κλίσης (°) | Διεύθυνση Κλίσης (°) | α/α | Γωνία κλίσης (°) | Διεύθυνση Κλίσης (°) |
|-----|------------------|----------------------|-----|------------------|----------------------|-----|------------------|----------------------|
| 1   | 89               | 79                   | 37  | 70               | 250                  | 74  | 65               | 274                  |
| 2   | 70               | 89                   | 38  | 60               | 340                  | 75  | 85               | 71                   |
| 3   | 89               | 90                   | 39  | 65               | 345                  | 76  | 88               | 348                  |
| 4   | 85               | 90                   | 40  | 65               | 330                  | 77  | 80               | 270                  |
| 5   | 85               | 75                   | 41  | 88               | 197                  | 78  | 80               | 5                    |
| 6   | 87               | 85                   | 42  | 88               | 203                  | 79  | 85               | 82                   |
| 7   | 80               | 80                   | 43  | 89               | 90                   | 80  | 70               | 160                  |
| 8   | 85               | 84                   | 44  | 85               | 85                   | 81  | 78               | 291                  |
| 9   | 85               | 85                   | 45  | 89               | 95                   | 82  | 70               | 150                  |
| 10  | 85               | 90                   | 46  | 75               | 82                   | 83  | 65               | 90                   |
| 11  | 82               | 92                   | 47  | 80               | 320                  | 84  | 85               | 150                  |
| 12  | 83               | 80                   | 48  | 80               | 80                   | 85  | 60               | 90                   |
| 13  | 68               | 180                  | 49  | 70               | 70                   | 86  | 85               | 95                   |
| 14  | 89               | 164                  | 50  | 70               | 180                  | 87  | 84               | 80                   |
| 15  | 90               | 183                  | 51  | 88               | 90                   | 88  | 75               | 170                  |
| 16  | 90               | 188                  | 52  | 70               | 175                  | 89  | 80               | 180                  |
| 17  | 90               | 185                  | 53  | 90               | 80                   | 90  | 70               | 170                  |
| 18  | 89               | 181                  | 54  | 80               | 158                  | 91  | 85               | 155                  |
| 19  | 87               | 150                  | 55  | 82               | 80                   | 92  | 80               | 180                  |
| 20  | 85               | 165                  | 56  | 70               | 156                  | 93  | 85               | 250                  |
| 21  | 91               | 152                  | 57  | 85               | 16                   | 94  | 85               | 80                   |
| 22  | 70               | 180                  | 58  | 75               | 88                   | 95  | 80               | 73                   |
| 23  | 80               | 172                  | 59  | 73               | 81                   | 96  | 85               | 70                   |
| 24  | 85               | 200                  | 60  | 80               | 177                  | 97  | 85               | 165                  |
| 25  | 30               | 87                   | 61  | 72               | 158                  | 98  | 85               | 5                    |
| 26  | 40               | 78                   | 62  | 70               | 12                   | 99  | 85               | 70                   |
| 27  | 50               | 80                   | 63  | 85               | 81                   | 100 | 86               | 80                   |
| 28  | 80               | 268                  | 64  | 75               | 260                  | 101 | 80               | 350                  |
| 29  | 75               | 278                  | 65  | 85               | 360                  | 102 | 85               | 164                  |
| 30  | 75               | 275                  | 66  | 80               | 345                  | 104 | 80               | 70                   |
| 31  | 70               | 279                  | 67  | 85               | 42                   | 105 | 35               | 81                   |
| 32  | 89               | 344                  | 68  | 85               | 60                   | 106 | 37               | 90                   |
| 33  | 89               | 340                  | 69  | 75               | 157                  | 107 | 85               | 65                   |
| 34  | 85               | 346                  | 70  | 85               | 75                   | 108 | 33               | 82                   |
| 35  | 60               | 350                  | 71  | 90               | 359                  | 109 | 60               | 90                   |
| 36  | 65               | 360                  | 72  | 87               | 95                   | 110 | 86               | 80                   |
|     |                  |                      | 73  | 90               | 340                  | 111 | 60               | 91                   |



Εικόνα 47: Στερεοδιάγραμμα προβολής των πυκνοτήτων των πόλων των μετρήσεων με την πυξίδα.



Εικόνα 48: Επιλογή των κύριων επιφανειών ασυνεχειών από τις πυκνότητες.



Εικόνα 49: Προβολή των κύριων ασυνεχειών με τα στοιχεία του προσανατολισμού τους.

Πίνακας 4: Τελικός πίνακας με τα στοιχεία προσανατολισμού των κύριων ασυνεχειών, όπως προέκυψαν από μετρήσεις με τη γεωλογική πυξίδα.

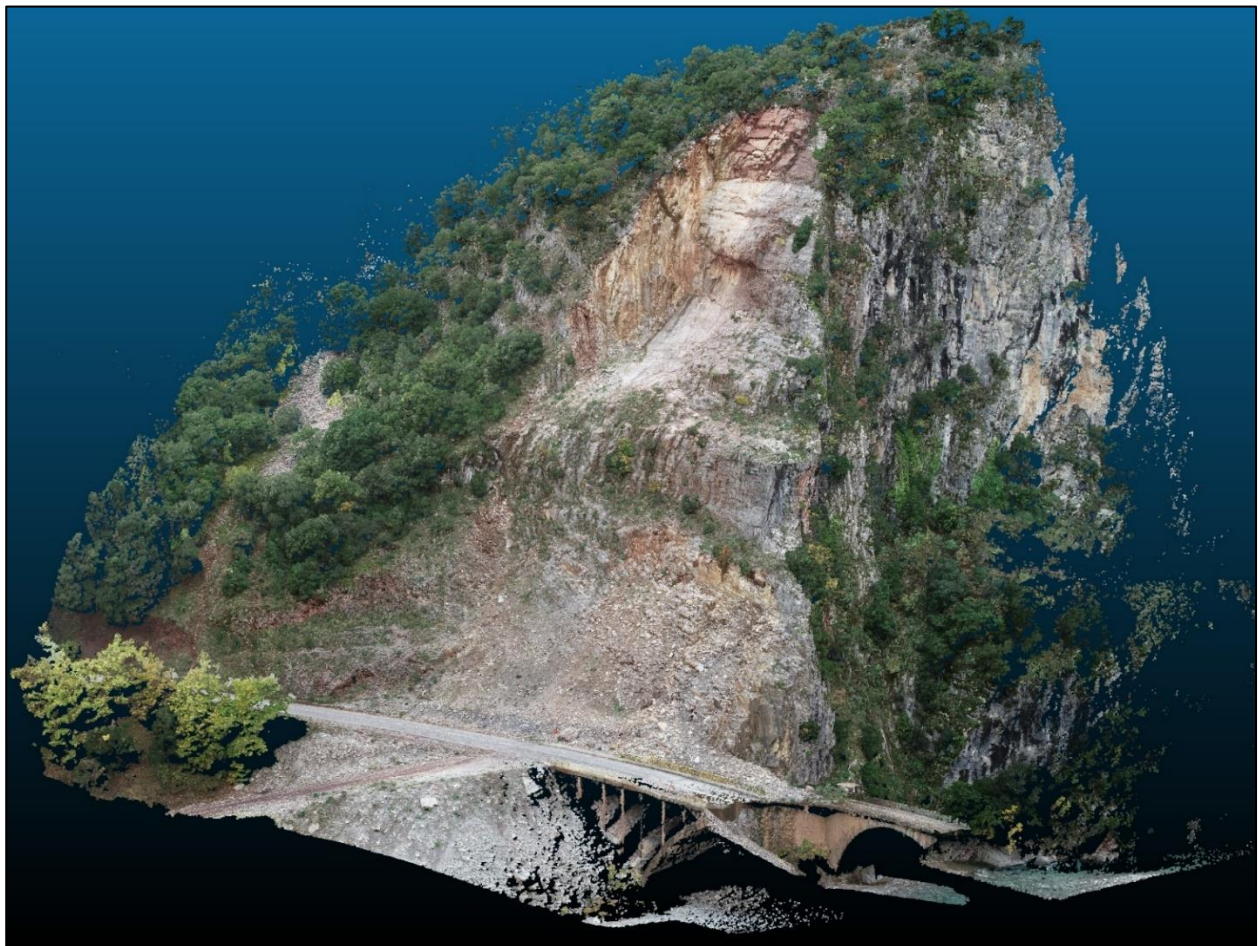
| Ασυνέχειες               | Γωνία κλίσης (°) | Διεύθυνση κλίσης (°) |
|--------------------------|------------------|----------------------|
| Στρώση (B)               | 85               | 82                   |
| Ασυνέχεια J <sub>1</sub> | 80               | 180                  |
| Ασυνέχεια J <sub>2</sub> | 80               | 268                  |
| Ασυνέχεια J <sub>3</sub> | 85               | 360                  |
| Ρήγμα (F)                | 30               | 87                   |

### 5.3.3. Μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων

#### Εύρεση ασυνεχειών

Για την επεξεργασία των δεδομένων και την εύρεση του προσανατολισμού των κύριων επιφανειών ασυνεχειών χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη σάρωση με το UAV, επειδή συγκριτικά με το Lidar που λήφθηκε, έχει περισσότερα σημεία και επομένως παραπάνω λεπτομέρεια. Τα δεδομένα από το Lidar θα χρησιμοποιηθούν ως επαλήθευση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από το UAV.

Το νέφος σημείων (point cloud) που δημιουργήθηκε είναι υψηλής ανάλυσης και καλύπτει σε όλο το μήκος το εξεταζόμενο πρηνές. Έχει συνολικό πλήθος σημείων 17.217.484, με χωρική πληροφορία (XYZ) και χρωματική (RGB) (Εικόνα 50).



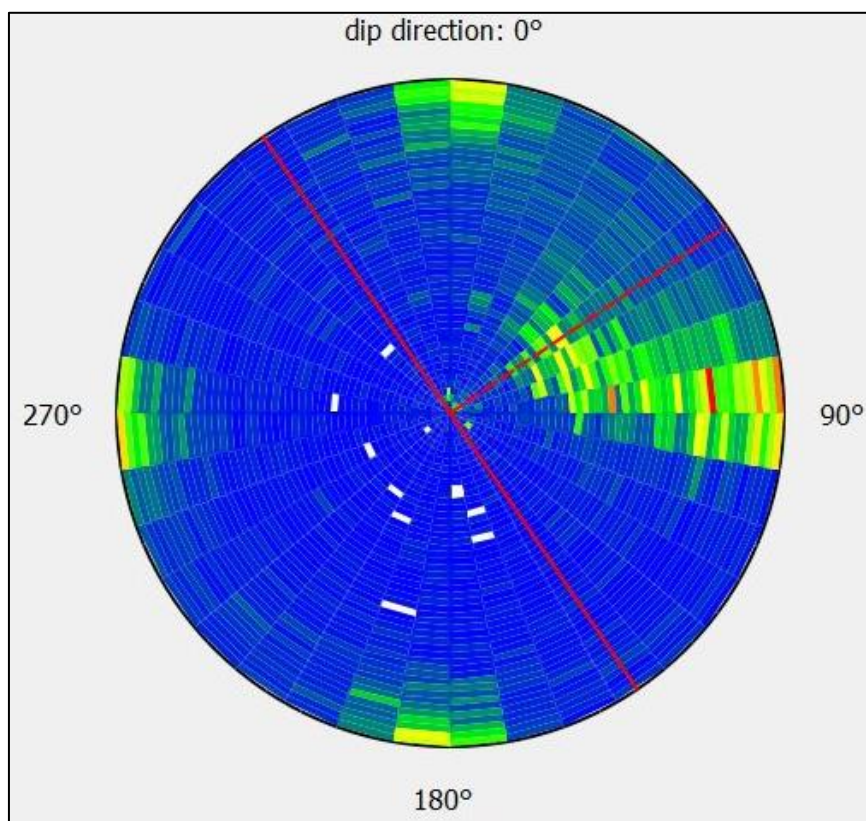
*Εικόνα 50: Το νέφος σημείων (point cloud) του Νοεμβρίου του 2019 .*

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για την επεξεργασία των δεδομένων αυτών έχει ως στόχο την εξαγωγή των απαραίτητων πληροφοριών, όπως είναι η εκτίμηση προσανατολισμού των επιφανειών των κύριων ασυνεχειών, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι δυνητικές αστοχίες.

Η υλοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας έγινε στο περιβάλλον του λογισμικού Cloud Compare και με τη χρήση του αντίστοιχου εργαλείου Compass, προσδιορίστηκαν τα στοιχεία προσανατολισμού (Κλίση /Διεύθυνση κλίσης) των κύριων επιπέδων ασυνεχειών.

Στη συνέχεια, ομαδοποιήθηκαν έτσι ώστε να φανούν με ένα ενιαίο χρώμα οι ομάδες που διαχωρίστηκαν. Λόγω φυτοκάλυψης και συγκέντρωσης φερτού υλικού σε ορισμένες θέσεις η χρωματική απεικόνιση κατά μήκος του πρानούς δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτική. Όμως σε θέσεις που υπάρχουν εμφανίσεις του βραχώδους υλικού η κάθε οικογένεια ασυνεχειών διαχωρίζεται ξεκάθαρα χρωματικά.

Για όλο το πρानές προέκυψε το παρακάτω στερεοδιάγραμμα στο οποίο προβάλλονται όλες οι επιφάνειές που αναγνωρίζει το Cloud Compare. Διακρίνονται οι συγκεντρώσεις του προσανατολισμού των επιφανειών. Μπορεί να υπάρχει και άλλη μία με μικρότερη συγκέντρωση, αλλά αυτό θα φανεί πιο ευκρινέστερα στη χρωματική διαφοροποίηση και απεικόνισή τους πάνω στο πρानές.



Εικόνα 51: Στερεοδιάγραμμα προβολής των πυκνοτήτων των επιφανειών του πρανούς, όπως προέκυψε από το Cloud Compare.

### Μετακινήσεις υλικού

Για τη εύρεση μετακινήσεων του υλικού θα χρησιμοποιηθούν οι πτήσεις με το UAV τα τελευταία χρόνια. Για να μπορούν να συγκριθούν δύο point clouds μεταξύ τους θα πρέπει να έχουν αρχικά κοντινό αριθμό σημείων και να γίνει ένας έλεγχος πυκνότητας γειτονικών σημείων σε κάθε cloud.

Από το πρώτο κριτήριο απορρίπτεται η πτήση που έγινε με το UAV το 2017 γιατί έχει συνολικά περίπου ένα εκατομμύριο σημεία που είναι συγκριτικά πάρα πολύ λίγα σε σχέση με τα άλλα που έχουν πάνω από δέκα εκατομμύρια το καθένα.

Αρχικά, ο σκοπός είναι να συγκριθεί το πιο πρόσφατο point cloud που είναι διαθέσιμο από το Νοέμβριο του 2019 με το point cloud από το Μάρτιο του 2018. Στη συνέχεια, για επαλήθευση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν θα συγκριθεί το point cloud που υπάρχει από το Μάιο του 2019. Πραγματοποιήθηκε έλεγχος μετακινήσεων για τη χρονική περίοδο από Μάιο μέχρι Νοέμβριο του 2019 και οι μετακινήσεις θεωρήθηκαν από ελάχιστες έως μηδενικές.

Επομένως, ξεκινώντας τη μεθοδολογία επεξεργασίας των point clouds, εισάγονται στο πρόγραμμα Cloud Compare και παρατηρείται ότι παρόλο που και τα δύο έχουν το ίδιο σύστημα γεωαναφοράς, έχουν μία μικρή απόκλιση και δεν έχουν χωρική ταύτιση.

Για να τα ευθυγραμμιστούν σωστά μεταξύ τους χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Align two point clouds. Σ' αυτό το εργαλείο χρησιμοποιείται ένα point cloud ως αναφορά και το άλλο ευθυγραμμισμένο με το πρώτο. Επιλέχθηκε το πιο πρόσφατο ως αναφορά. Το εργαλείο αυτό για να λειτουργήσει πρέπει να επιλεγθούν το λιγότερο 4 κοινά σημεία στο κάθε point cloud με τη σωστή σειρά και με όσο περισσότερη ακρίβεια γίνεται και με μικρό σφάλμα.

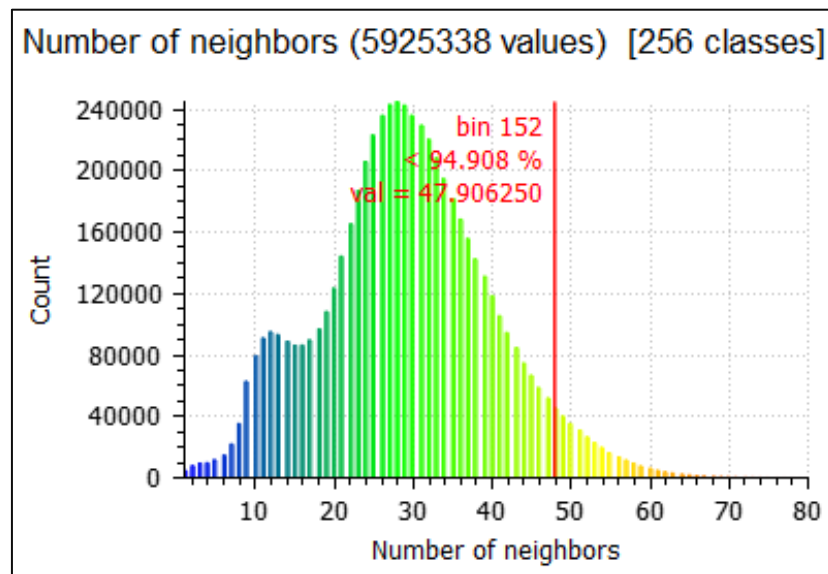
Στη συνέχεια, μετά από την ευθυγράμμιση των point clouds επιλέχθηκαν και τα δύο και κόπηκαν έτσι ώστε να αφαιρεθεί ο περαιτέρω θόρυβος, όπως είναι η βλάστηση και τα σημεία που βρίσκονται εκτός από την περιοχή έρευνας. Η διαδικασία αυτή έγινε με το εργαλείο Segment.

Μετά από αυτό το βήμα βρέθηκαν από πόσα σημεία αποτελείται το κάθε point cloud που θα χρησιμοποιηθεί. Το point cloud του Νοεμβρίου το 2019 έχει 7.228.061 σημεία και του Μάρτιου του 2018 έχει 5.935.382 σημεία. Για να μπορέσουν να συγκριθούν τα δύο point clouds ως πρώτο στάδιο απαιτείται να έχουν τον ίδιο αριθμό σημείων και γι' αυτό θα χρειαστεί να μειωθούν τα σημεία του point cloud του Νοεμβρίου. Χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Subsample a point cloud και επιλέχτηκε η μέθοδος επιλογής της μικρότερης απόστασης μεταξύ των σημείων. Μ' αυτόν τον τρόπο το point cloud του Νοεμβρίου αποτελείται πλέον από 5.925.338 σημεία.

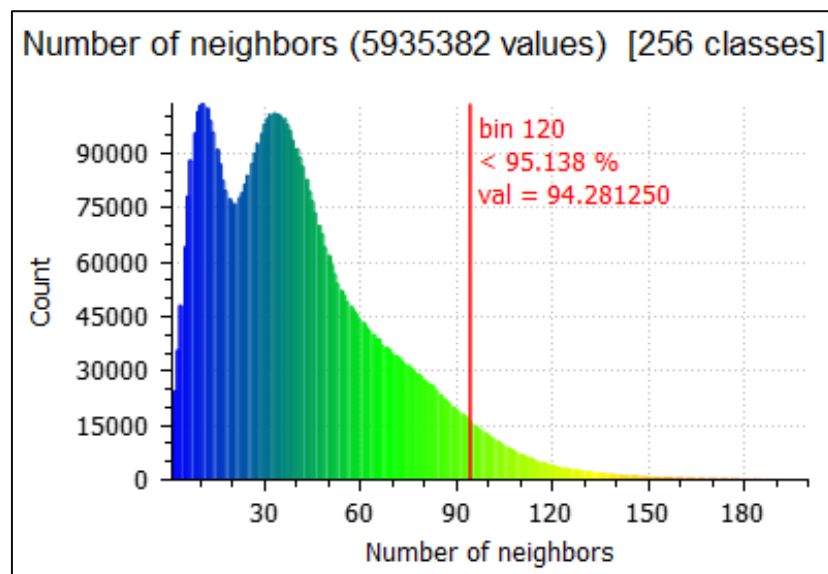
Επομένως, τώρα που και τα δύο point clouds έχουν παρόμοιο αριθμό σημείων χρειάζεται να ελεγχθεί το δεύτερο κριτήριο, που είναι η πυκνότητα των γειτονικών

σημείων για κάθε point cloud. Αυτό γίνεται με το εργαλείο Density of a point cloud και εκεί επιλέχθηκε σαν ακτίνα ελέγχου τα 12 cm.

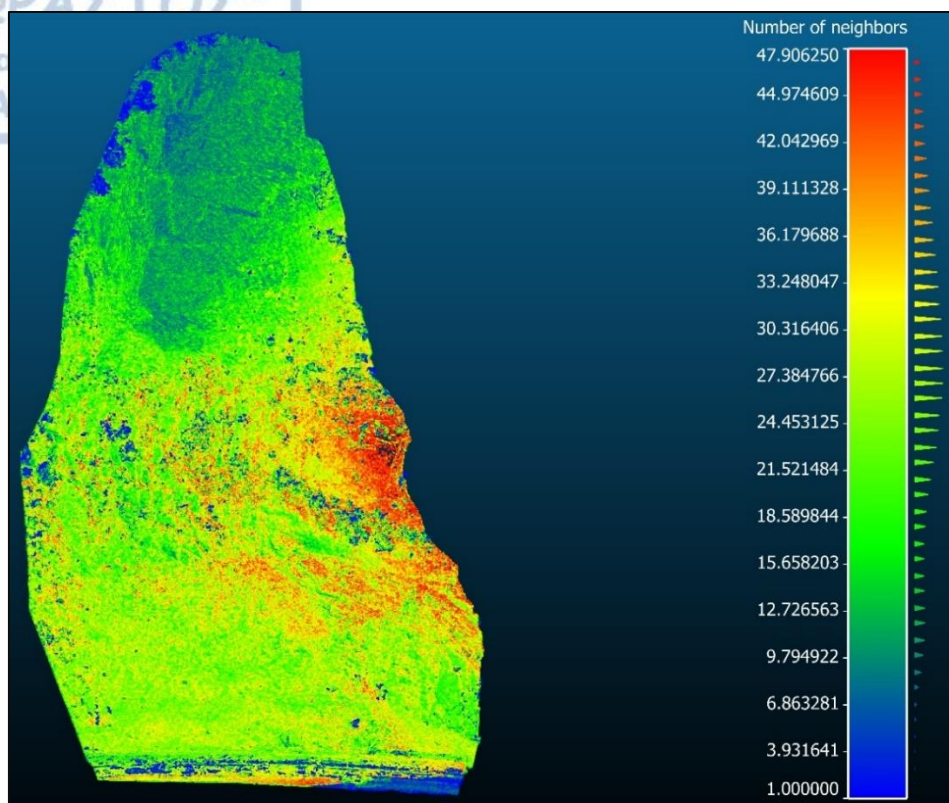
Από τη μέθοδο αυτή προκύπτει ένα ιστόγραμμα κατανομής του αριθμού των γειτονικών σημείων και μία χρωματική απεικόνιση πάνω στο πρηνές ανάλογα με το πλήθος των σημείων. Από το ιστόγραμμα βρέθηκε το 95% του πλήθους των σημείων, το οποίο αντιστοιχεί σε δύο τυπικές αποκλίσεις σύμφωνα με τους κανόνες της τυποποιημένης κανονικής κατανομής και επίσης μ' αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα είναι πιο ακριβή και το σφάλμα μειώνεται. Το ποσοστό αυτό χρησιμοποιήθηκε ως διάστημα εμπιστοσύνης και ως μέγιστο στη χρωματική απεικόνιση των σημείων.



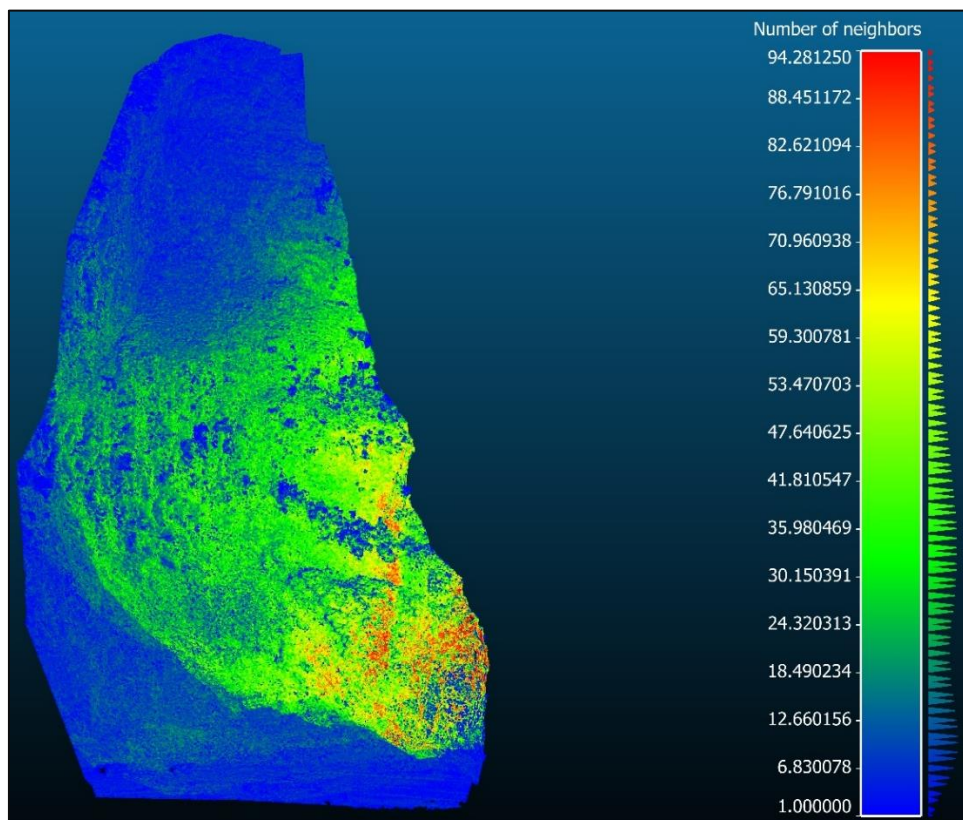
Εικόνα 52: Ιστόγραμμα του point cloud του Νοέμβριου του 2019, με προβολή της τιμής του 95%.



Εικόνα 53: Ιστόγραμμα του point cloud του Μαρτίου του 2018, με προβολή της τιμής του 95%.



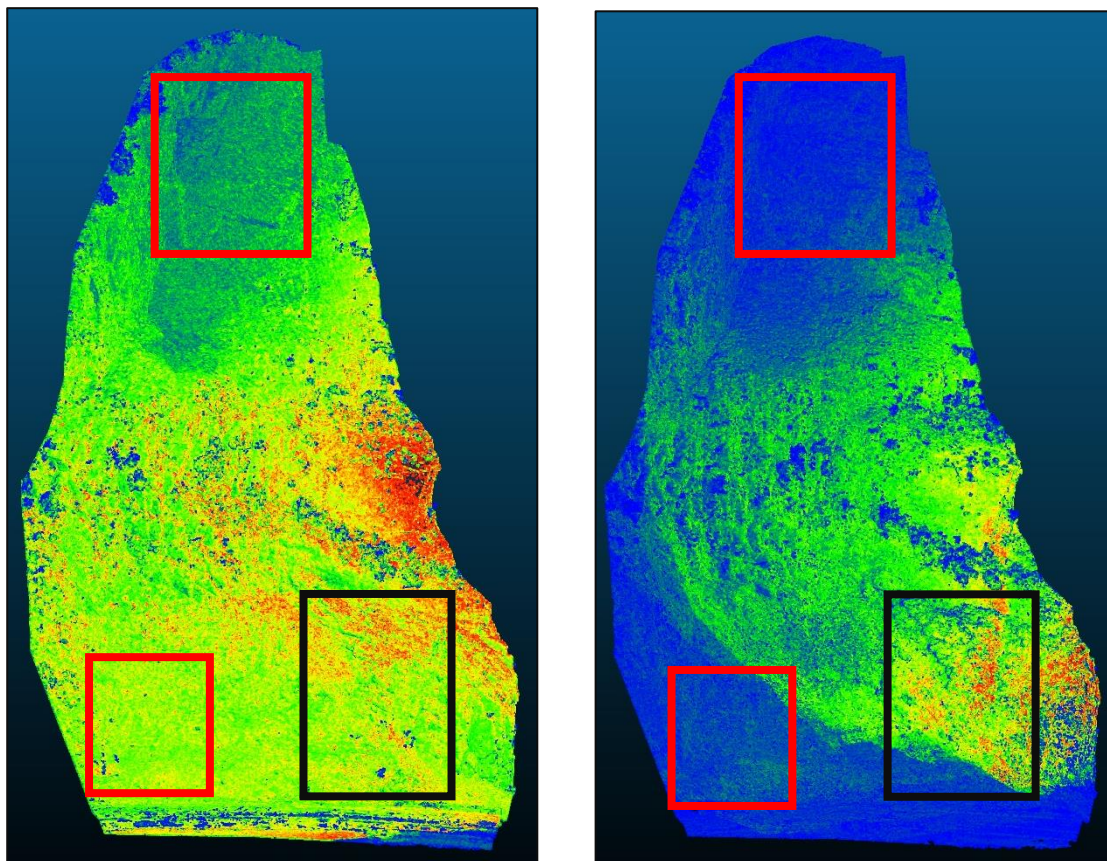
Εικόνα 54: Κατανομή της πυκνότητας των σημείων, του point cloud για το Νοέμβριον του 2019.



Εικόνα 55: Κατανομή της πυκνότητας των σημείων, του point cloud για το Μάρτιο του 2018.

Συγκρίνοντας την κατανομή του πλήθους των σημείων του κάθε point cloud, ελέγχονται περιοχές που η σύγκρισή τους να έχει όσο το δυνατόν λιγότερη απόκλιση από την πραγματικότητα. Επομένως, σε θέσεις που δεν υπάρχουν πολλά σημεία είτε στο ένα point cloud είτε στο άλλο απορρίπτονται.

Στο παράδειγμα που μελετάται, οι περιοχές που είναι με κόκκινο πλαίσιο παρακάτω δε θα ληφθούν απόλυτα υπόψη για τη σύγκριση μεταξύ των point clouds. Η περιοχή με μαύρο πλαίσιο είναι πιο κατάλληλη για να προκύψουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τη μετακίνηση του υλικού



Εικόνα 56: Με κόκκινο πλαίσιο οι περιοχές που αποκλείονται από τη σύγκριση, ενώ με μαύρο πλαίσιο η περιοχή που αποτελεί πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα.

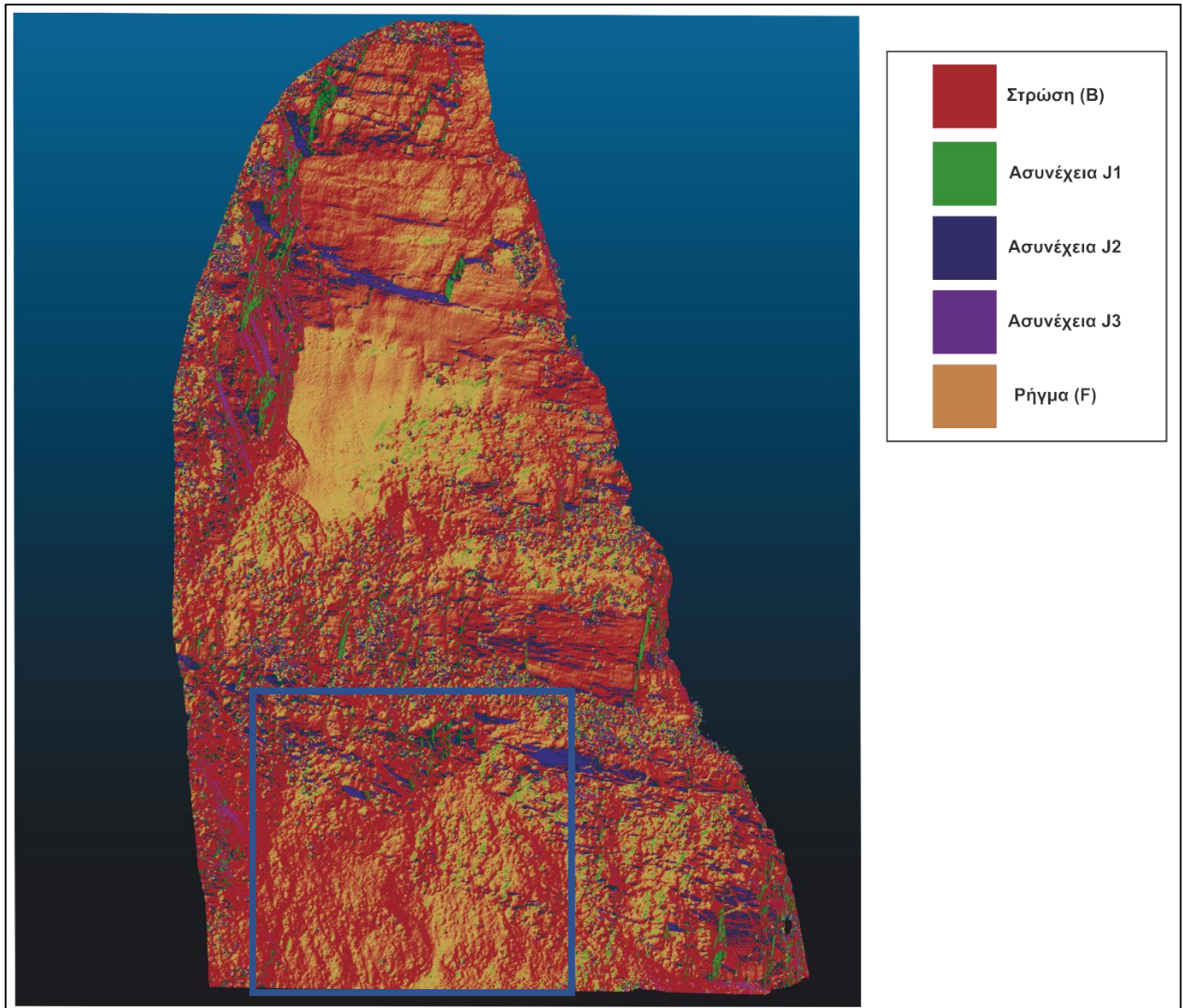
Τέλος, από τη στιγμή που βρέθηκε μία περιοχή που θα δώσει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα χρησιμοποιείται το εργαλείο M3C2 distance. Οι παράμετροι που εισάγονται για να προκύψουν τα σωστά αποτελέσματα, είναι ανάλογα με τα γεωμετρικά στοιχεία των point clouds και την κλίμακα των μετακινήσεων που αναζητείται.

Στη συγκεκριμένη έρευνα, ο στόχος είναι η εύρεση μετακινήσεων μέτρων και όχι εκατοστών. Το εργαλείο ουσιαστικά θα συγκρίνει τα δύο point clouds και θα βγάλει από ποιες θέσεις προστέθηκε ή αφαιρέθηκε υλικό.

## 6. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

### 6.1. Τεκτονική ανάλυση

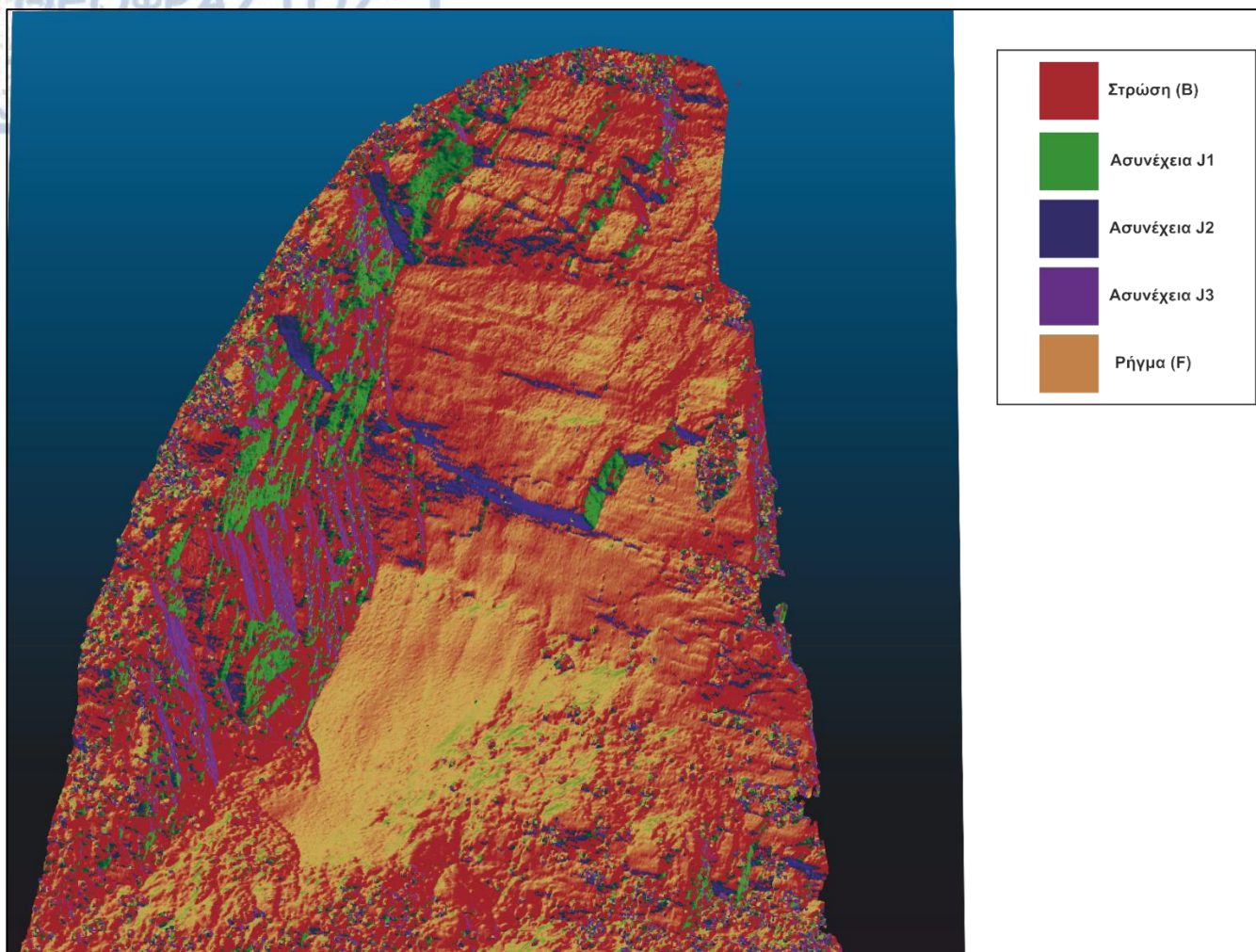
Μετά την επεξεργασία των δεδομένων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προέκυψε η παρακάτω χρωματική απεικόνιση των επιφανειών των ασυνεχειών (Εικόνα 57 & 58).



Εικόνα 57: Χρωματική απεικόνιση όλων των οικογενειών ασυνεχειών σε όλο το πρανές, όπως προέκυψε από το UAV (μπλε πλαίσιο απεικόνιση φερτού υλικού).

Σε θέσεις που υπάρχει φερτό υλικό και βλάστηση δεν είναι αντιπροσωπευτική η χρωματική απεικόνιση και γι' αυτό το λόγο δεν είναι ξεκάθαρη η εικόνα που λαμβάνεται (Εικόνα 57, μπλε πλαίσιο).

Όμως, σε θέσεις που εμφανίζεται το βραχώδες υπόβαθρο φαίνονται ξεκάθαρα όλες οι οικογένειες ασυνεχειών.



Εικόνα 58: Χρωματική απεικόνιση των οικογενειών ασυνεχειών σε θέση που εμφανίζεται το βραχώδες υπόβαθρο, όπως προέκυψε από το UAV.

Όπως, φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες είναι ξεκάθαρη η εμφάνιση της στρώσης σε όλο το πρანές και η τιμή που δίνεται στον Πίνακα 5 είναι μία μέση τιμή των στοιχείων προσανατολισμού της. Επίσης, διακρίνονται τρεις οικογένειες ασυνεχειών η J<sub>1</sub>, η J<sub>2</sub> και η J<sub>3</sub>. Επιπλέον, η ζώνη ρήγματος εμφανίζεται και με τα δεδομένα του UAV.

Επομένως, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων του UAV δεν έχουν απόκλιση από αυτά που προέκυψαν από τις συμβατικές μετρήσεις με την πυξίδα (Πίνακας 4).

Παρατηρείται ότι όλες οι ασυνέχειες παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις στα στοιχεία προσανατολισμού τους μεταξύ των δύο μεθόδων, που χρησιμοποιήθηκαν (συμβατική μέθοδος / UAV). Οι αποκλίσεις οφείλονται στη διαφορά των θέσεων μέτρησης, καθώς με το UAV προσδιορίστηκαν αντιπροσωπευτικότερα αποτελέσματα στοιχείων του προσανατολισμού των επιφανειών. Οι διαφορές αυτές βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων.



Πίνακας 5: Συνολικός πίνακας με τα στοιχεία προσανατολισμού των κύριων ασυνεχειών, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων του UAV.

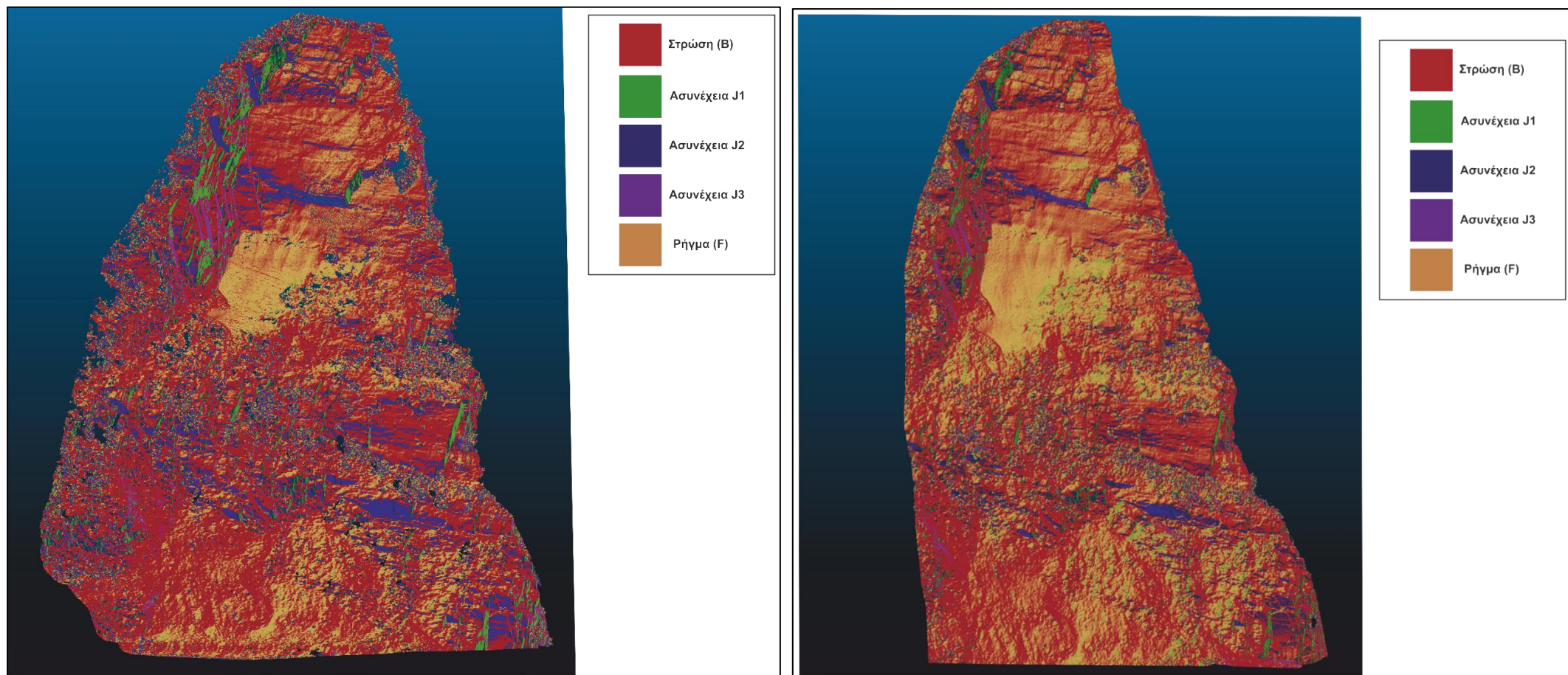
| Ασυνέχειες               | Γωνία κλίσης (°) | Διεύθυνση κλίσης (°) |
|--------------------------|------------------|----------------------|
| Στρώση (B)               | 82               | 85                   |
| Ασυνέχεια J <sub>1</sub> | 80               | 185                  |
| Ασυνέχεια J <sub>2</sub> | 75               | 270                  |
| Ασυνέχεια J <sub>3</sub> | 85               | 355                  |
| Ρήγμα (F)                | 30               | 80                   |

Επιπλέον, για περαιτέρω επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία του UAV, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του Lidar. Το Νοέμβριο του 2019 εκτός από πτήση που πραγματοποιήθηκε με το UAV, έγινε σάρωση και με το Lidar για να αποκτηθούν περισσότερες πληροφορίες για το πρηνές.

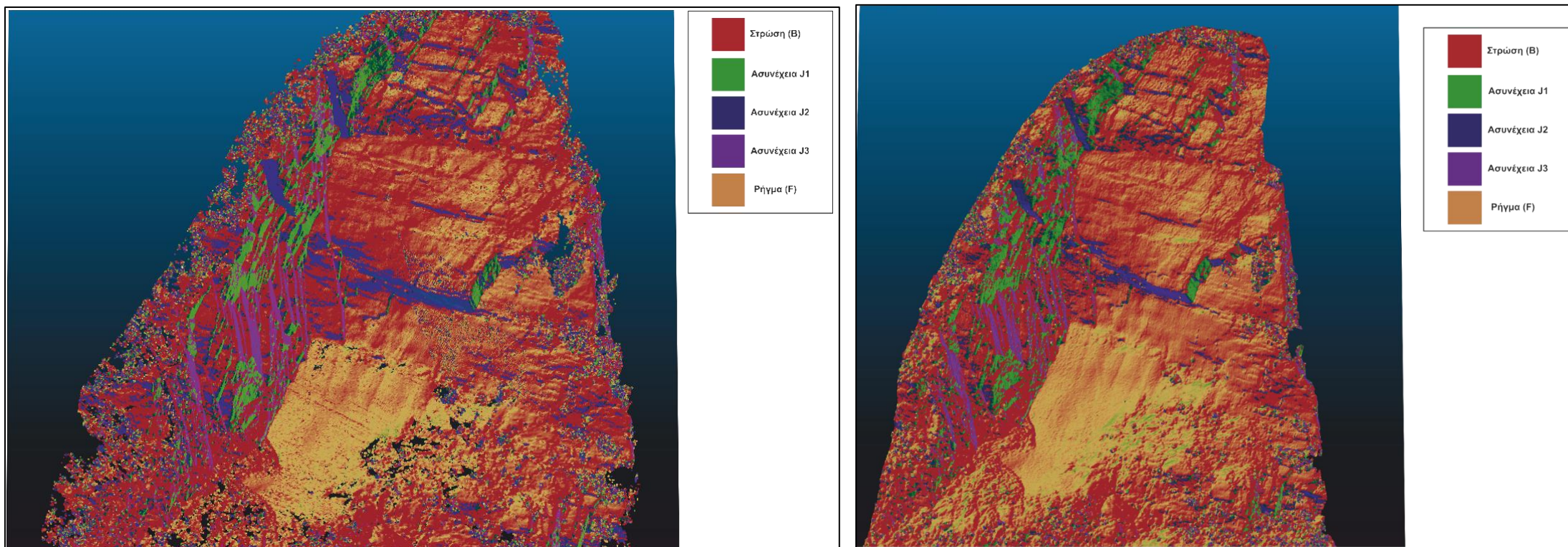
Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως και προηγουμένως για την επεξεργασία των δεδομένων. Παρακάτω υπάρχει η χρωματική απεικόνιση του πρηνούς όπως προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων του Lidar (Εικόνα 59 & Εικόνα 60).

Παρατηρείται ότι στις θέσεις που το UAV βρήκε τις οικογένειες των ασυνεχειών, στα αντίστοιχα σημεία επαληθεύει και το Lidar την παρουσία αυτών των ασυνεχειών. Επομένως, υπάρχει μία ταύτιση των θέσεων και των στοιχείων του προσανατολισμού όλων των επιφανειών.

Συμπερασματικά, τα στοιχεία των ασυνεχειών που προέκυψαν θεωρούνται σωστά, με μικρό σφάλμα, επειδή επαληθεύτηκαν με τρεις μεθόδους, με τη συμβατική μέθοδο, με το UAV και τέλος με τη σάρωση του Lidar.



Εικόνα 59: Χρωματική απεικόνιση όλων των οικογενειών ασυνεχειών σε όλο το πρανές, όπως προέκυψε από το Lidar (αριστερή εικόνα) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από το UAV (δεξιά εικόνα).



Εικόνα 60: Χρωματική απεικόνιση των οικογενειών ασυνεχειών σε θέση που εμφανίζεται το βραχώδες υπόβαθρο, όπως προέκυψε από το Lidar (αριστερή εικόνα) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από το UAV (δεξιά εικόνα).

## 6.2. Κινηματική ανάλυση ευστάθειας

Για τον προσδιορισμό των δυνητικών αστοχιών που ενδέχεται να προκύψουν, θα προβληθούν τα δεδομένα του προσανατολισμού των ασυνεχειών στο πρόγραμμα Dips 7.0 μαζί με τα στοιχεία του πρανούς. Η πλαγιά έχει 70° γωνία κλίσης και 80° διεύθυνση κλίσης.

### 6.2.1. Προσδιορισμός διατμητικής αντοχής ασυνεχειών

Επίσης, πρέπει να υπολογιστεί η γωνία τριβής με την οποία θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος, η οποία θα προκύψει από την επίλυση του κριτηρίου Barton – Bandis (1990).

Η εξίσωση του κριτηρίου Barton – Bandis είναι η εξής:

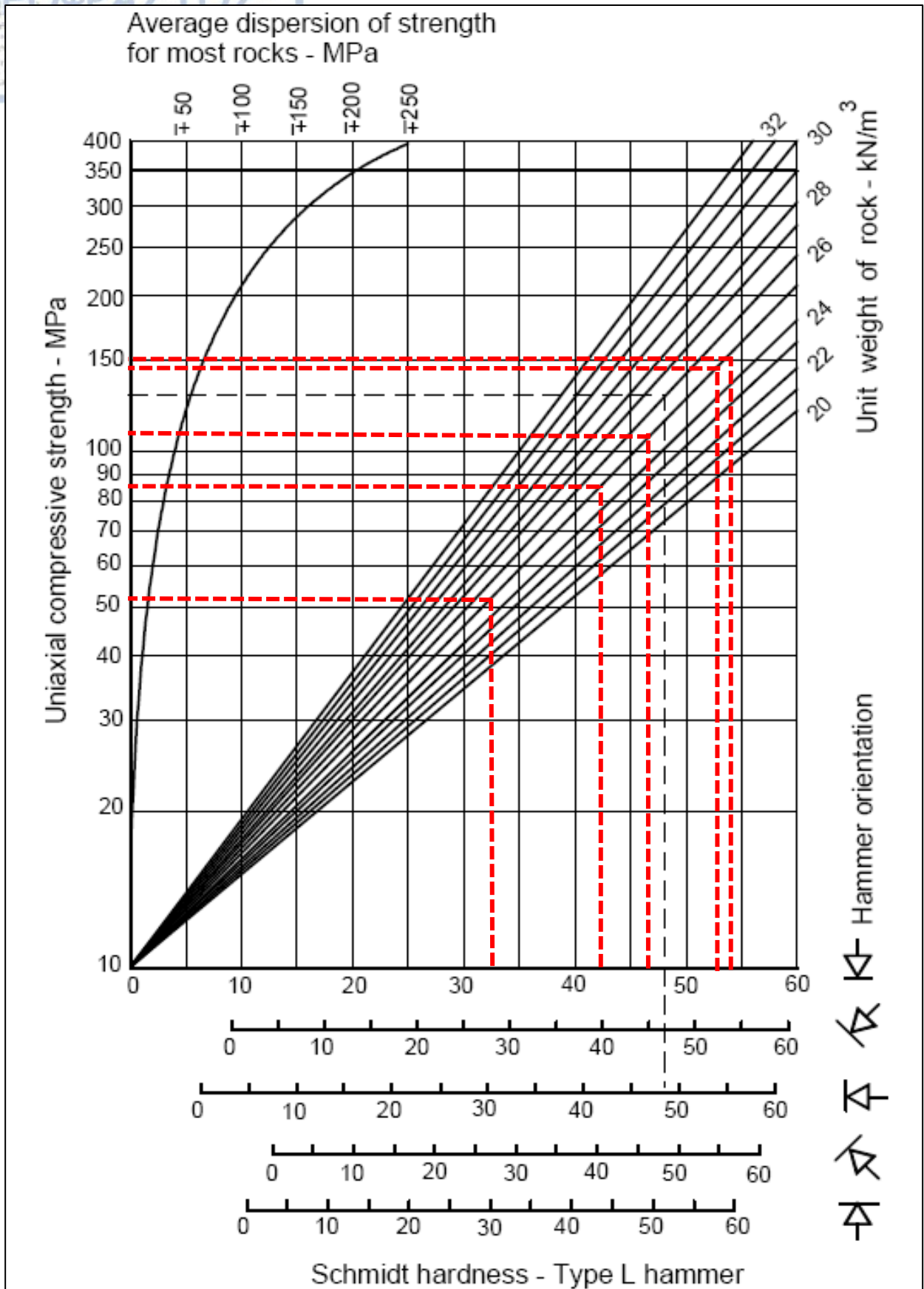
$$\tau = \sigma' \cdot \tan(\varphi_b + JRC \log \frac{JCS}{\sigma'})$$

Οι παράμετροι JRC και JCS υπολογίστηκαν έπειτα από δεδομένα που μετρήθηκαν στην ύπαιθρο από επιτόπου εργασία με τη σφύρα Schmidt και το προφیلόμετρο. Η γωνία εσωτερικής τριβής  $\varphi_b$  λήφθηκε βιβλιογραφικά 35° (Barton and Choubey, 1977).

Επίσης, η μέγιστη ορθή τάση  $\sigma'$  (MPa) υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το ύψος του πρανούς 90 m και το φαινόμενο βάρος του υλικού  $\gamma = 0.025$  (MN/m<sup>3</sup>). Επομένως, υπολογίστηκε η μέγιστη  $\sigma' = 2.25$  MPa.



Εικόνα 61: Φωτογραφία από το πεδίο, μετρήσεις με τη σφύρα Schmidt.





Πίνακας 6: Συνολικός πίνακας με τα δεδομένα που εισήχθησαν στο κριτήριο Barton – Bandis, για κάθε ασυνέχεια.

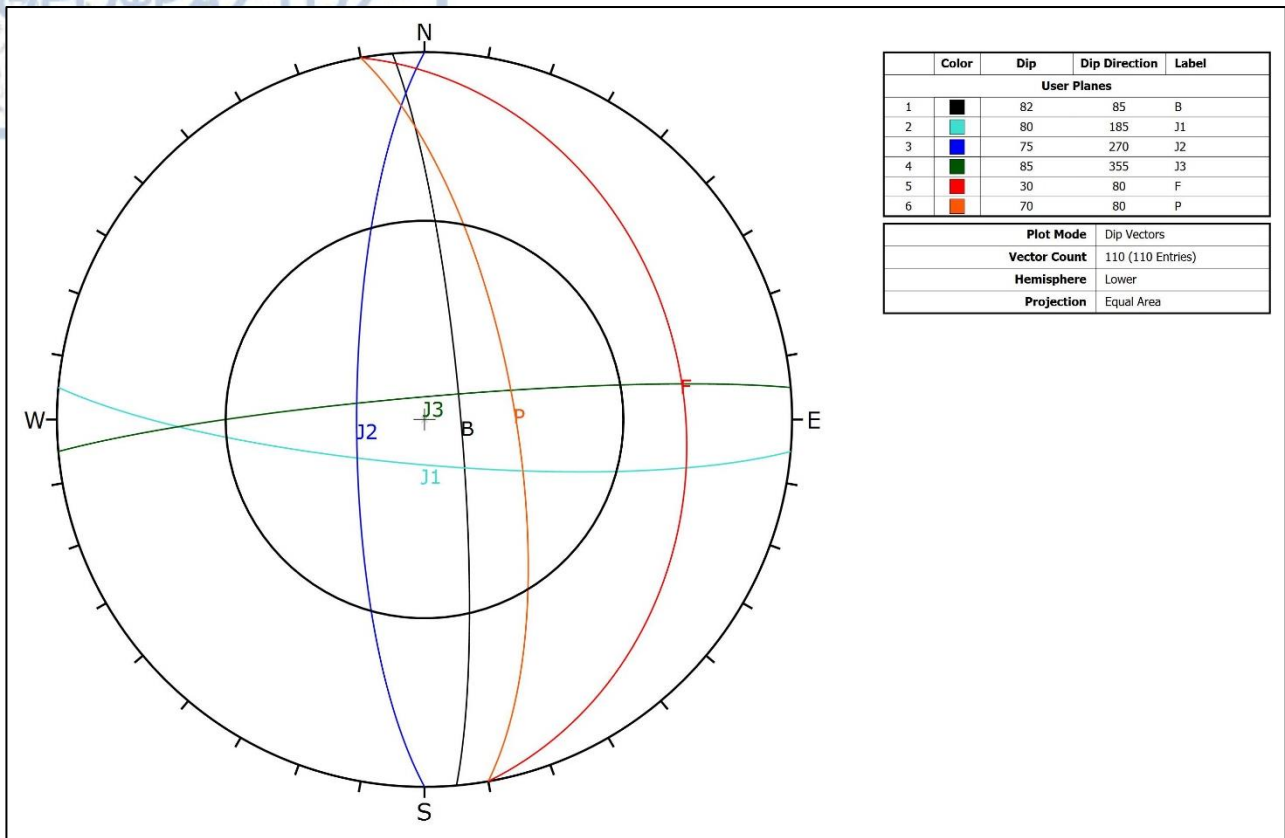
| Σύστημα<br>ασυνεχειών          | <b>B</b>     | <b>J<sub>1</sub></b> | <b>J<sub>2</sub></b> | <b>J<sub>3</sub></b> |
|--------------------------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b><math>\phi_b</math> (°)</b> | 35           | 35                   | 35                   | 35                   |
| <b>JRC</b>                     | 6            | 8                    | 8                    | 6                    |
| <b>JCS</b>                     | 110          | 150                  | 145                  | 86                   |
| <b><math>\phi</math> (°)</b>   | <b>45.79</b> | <b>50.47</b>         | <b>50.35</b>         | <b>45.14</b>         |

Από το διάγραμμα και την επίλυση του κριτηρίου Barton – Bandis προέκυψε για κάθε ασυνέχεια η γωνία τριβής της.

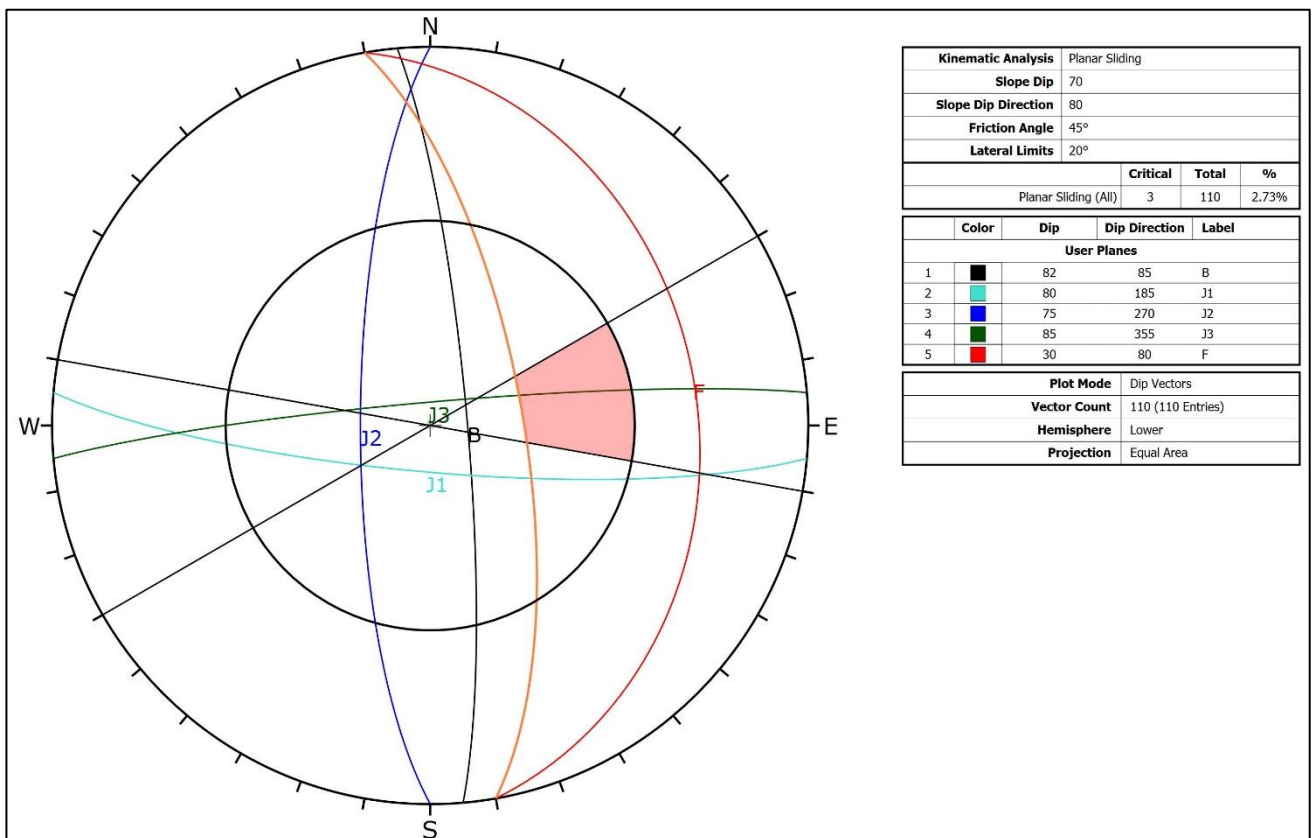
Έπειτα θα προβληθούν όλες οι ασυνέχειες και το ρήγμα μαζί με το πρανές και τη γωνία τριβής στο πρόγραμμα Dip 7.0.

Η γωνία τριβής που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο αστοχιών όσο αφορά τις ασυνέχειες είναι 45°, η οποία είναι η μικρότερη από τις γωνίες τριβής που προέκυψαν και αποτελεί την πιο συντηρητική προσέγγιση.

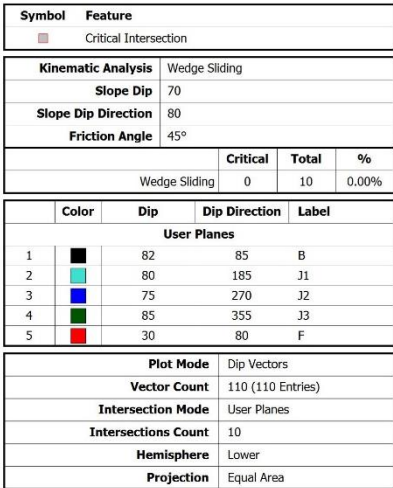
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται όλες οι κινηματικές αναλύσεις σε σχέση με τις επίπεδες ολισθήσεις, τις σφηνοειδείς ολισθήσεις και ολισθήσεις από ανατροπή.



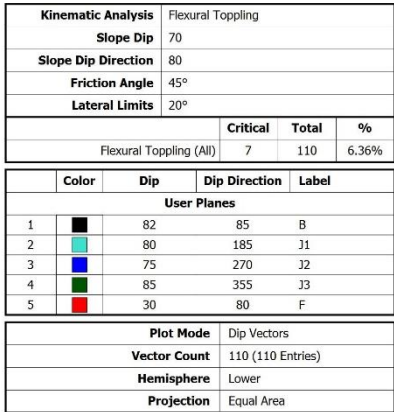
Εικόνα 63: Προβολή των κύριων ασυνεχειών, του πρανούς (με πορτοκαλί χρώμα).



Εικόνα 64: Κινηματική ανάλυση επίπεδης ολίσθησης, του πρανούς.



Εικόνα 65: Κινηματική ανάλυση σφηνοειδούς ολίσθησης, του πρανούς.



Εικόνα 66: Κινηματική ανάλυση ολίσθησης από ανατροπή, του πρανούς.

Από την κινηματική ανάλυση προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα όσον αφορά τις δυνητικές αστοχίες:

#### Επίπεδες ολισθήσεις

Όσον αφορά τις ασυνέχειες δεν αναμένονται επίπεδες ολισθήσεις στο πρανές (Εικόνα 64).

#### Σφηνοειδείς ολισθήσεις

Δεν αναμένονται σφηνοειδείς ολισθήσεις, γιατί κανένα ζεύγος ασυνεχειών δεν πληρεί τα κριτήρια (Εικόνα 65).

Κατά την υπαίθρια επίσκεψη παρατηρήθηκαν πτώσεις τεμαχών προς το ποτάμι, στη βόρεια πλευρά της πλαγιάς (Εικόνα 67). Αυτές οι πτώσεις οφείλονται στην τομή του ζεύγους των ασυνεχειών  $J_1 - J_3$ , η οποία εμφανίζεται στην κινηματική ανάλυση για σφηνοειδείς ολισθήσεις, απλά δε θεωρείται κρίσιμη για τα στοιχεία προσανατολισμού του πρανούς που αφορούν την πρόσοψη του (παράλληλη στο δρόμο).



Εικόνα 67: Φωτογραφία από την υπαίθρο, με μπλε χρώμα η στρώση (B), με πράσινο χρώμα η  $J_3$  και με κόκκινο η  $J_1$ .

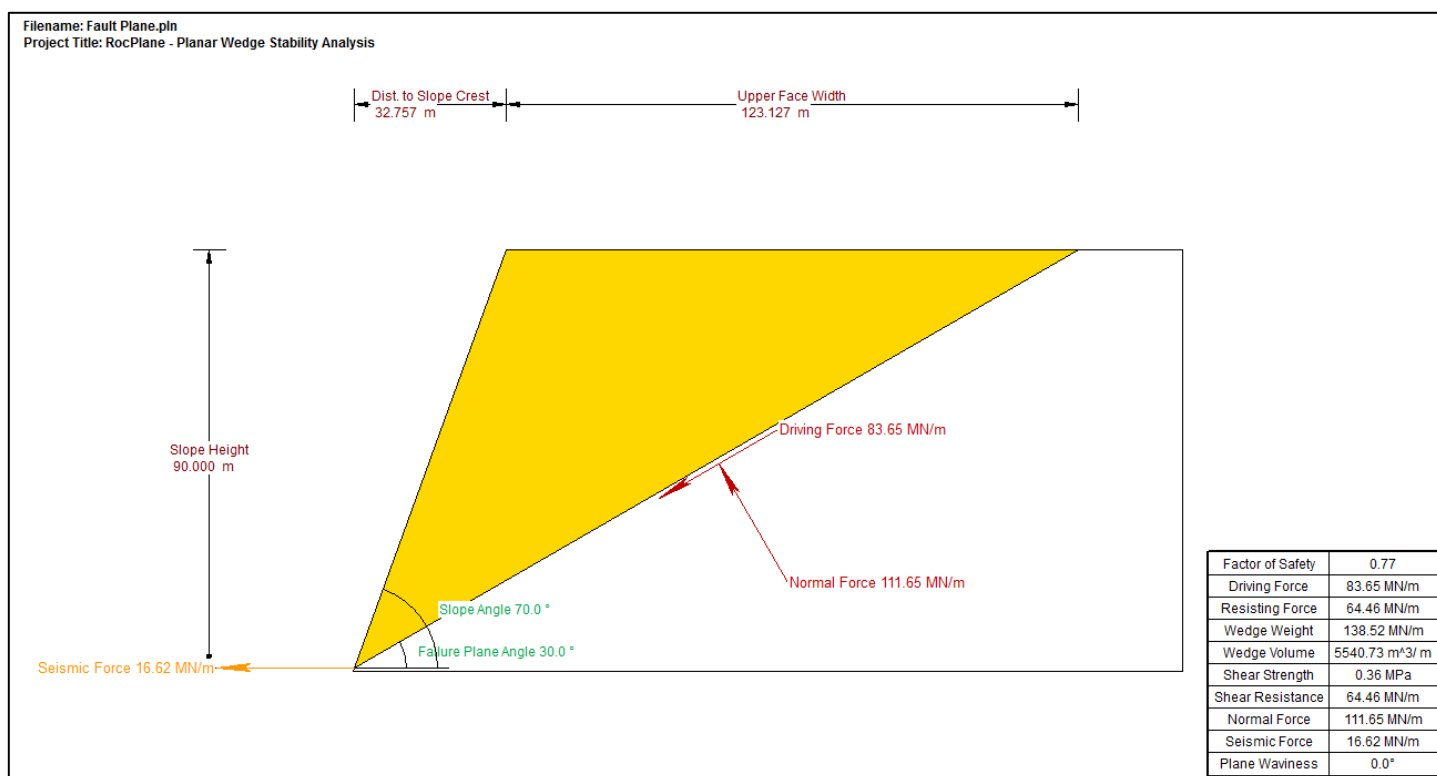
#### Ολισθήσεις από ανατροπή

Σε όλη την έκταση της πλαγιάς αναμένονται εφελκυστικές ανατροπές από τη  $J_2$  (Εικόνα 66). Η  $J_2$  είναι αντίρροπη με το πρανές και έχει πολύ μεγάλη κλίση ( $>70^\circ$ ).

Όπως φαίνεται από τη γεωμορφολογία της πλαγιάς και μελετώντας το μηχανισμό αστοχίας του πρανούς, στο παρελθόν είχαν πραγματοποιηθεί μεγάλης έκτασης επίπεδες ολισθήσεις κατά μήκος ρηγμάτων. Για να συμβούν οι επίπεδες ολισθήσεις κατά μήκος του ρήγματος, θα πρέπει η γωνία τριβής του να είναι μικρότερη από τη γωνία κλίσης του και στη συνέχεια και οι δύο να είναι μικρότερες από τη γωνία κλίσης του πρανούς ( $\varphi_{\pi} > \varphi_{\alpha} > \varphi_{\tau}$ , κριτήριο για επίπεδες ολισθήσεις).

Η γωνία κλίση του πρανούς είναι  $70^{\circ}$  και η γωνία κλίσης του ρήγματος είναι  $30^{\circ}$ . Επομένως, από τη στιγμή που λαμβάνουν χώρα επίπεδες ολισθήσεις κατά μήκος των ζωνών του ρήγματος η γωνία τριβής του ρήγματος πρέπει να είναι μικρότερη από  $30^{\circ}$  (back analysis).

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε έλεγχος συντελεστή ασφάλειας για την παραπάνω επίπεδη ολίσθηση μέσω του προγράμματος RocPlane 3.0 (Εικόνα 68). Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ήταν η γωνία κλίσης και το ύψος του πρανούς, η γωνία κλίσης του ρήγματος και η γωνία τριβής ( $30^{\circ}$ ). Προέκυψε ότι ο συντελεστής ασφάλειας για τη συγκεκριμένη επίπεδη ολίσθηση δεν είναι αποδεκτός, επειδή είναι πολύ χαμηλός ( $F=0,77$ ). Στον έλεγχο θεωρήθηκε ότι η ρωγμή δεν είναι γεμάτη με νερό και παρόλα αυτά ο συντελεστής ήταν μικρότερος της μονάδας.

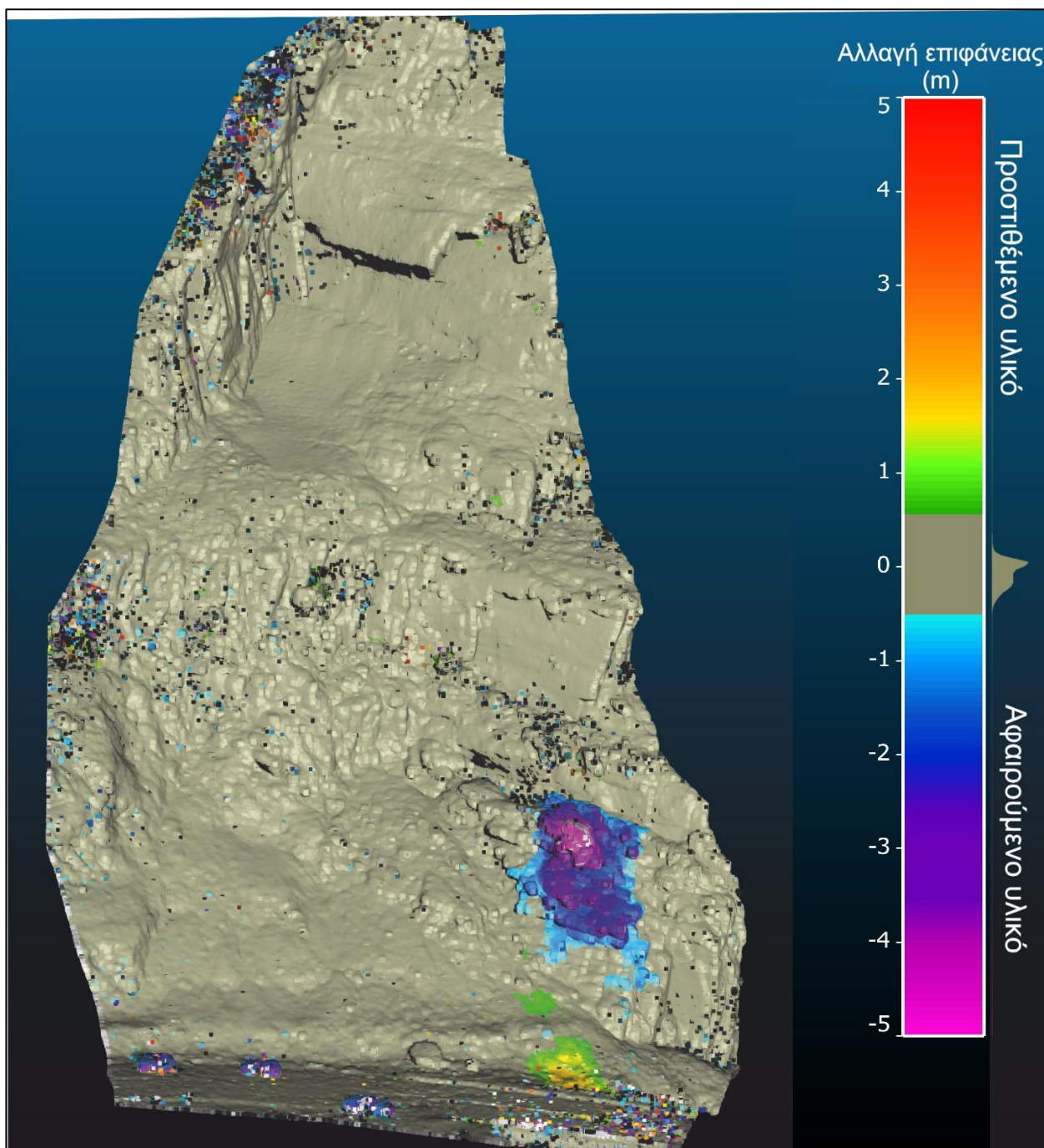


Εικόνα 68: Προσδιορισμός συντελεστή ασφαλείας μέσω του προγράμματος RocPlane.

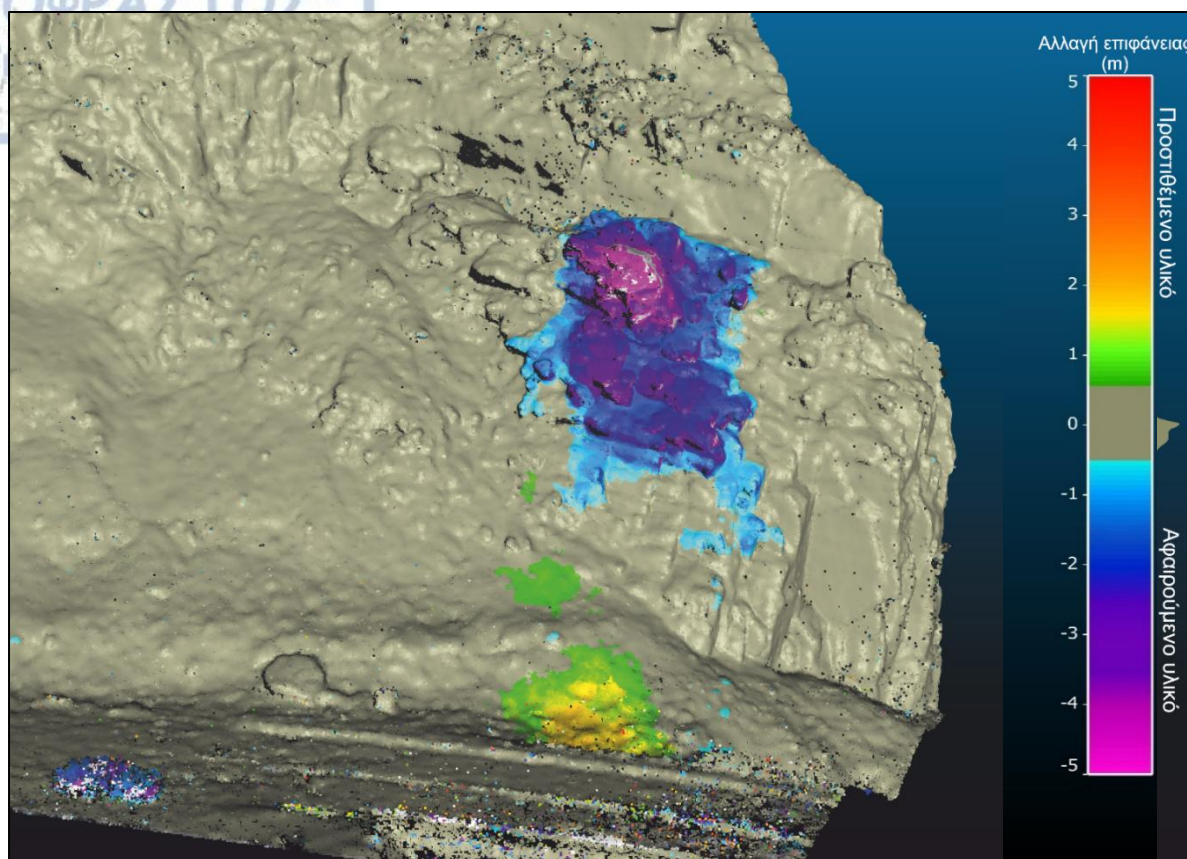
### 6.3. Ανίχνευση μετακινήσεων

Ο όρος change detection ουσιαστικά είναι η ανίχνευση οποιασδήποτε αλλαγής στη γεωμορφολογία μίας περιοχής. Επομένως, ο στόχος σ' αυτό το στάδιο είναι να βρεθούν οι θέσεις στις οποίες υπήρξε μία τέτοια μεταβολή, είτε με την προσθήκη υλικού, είτε με την αφαίρεση του.

Μετά τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, συγκρίθηκαν τα point clouds του Νοεμβρίου του 2019 και του Μαρτίου του 2018.



Εικόνα 69: Αποτέλεσμα σύγκρισης των δύο point clouds (Μάρτιος 2018 – Νοέμβριος 2019).



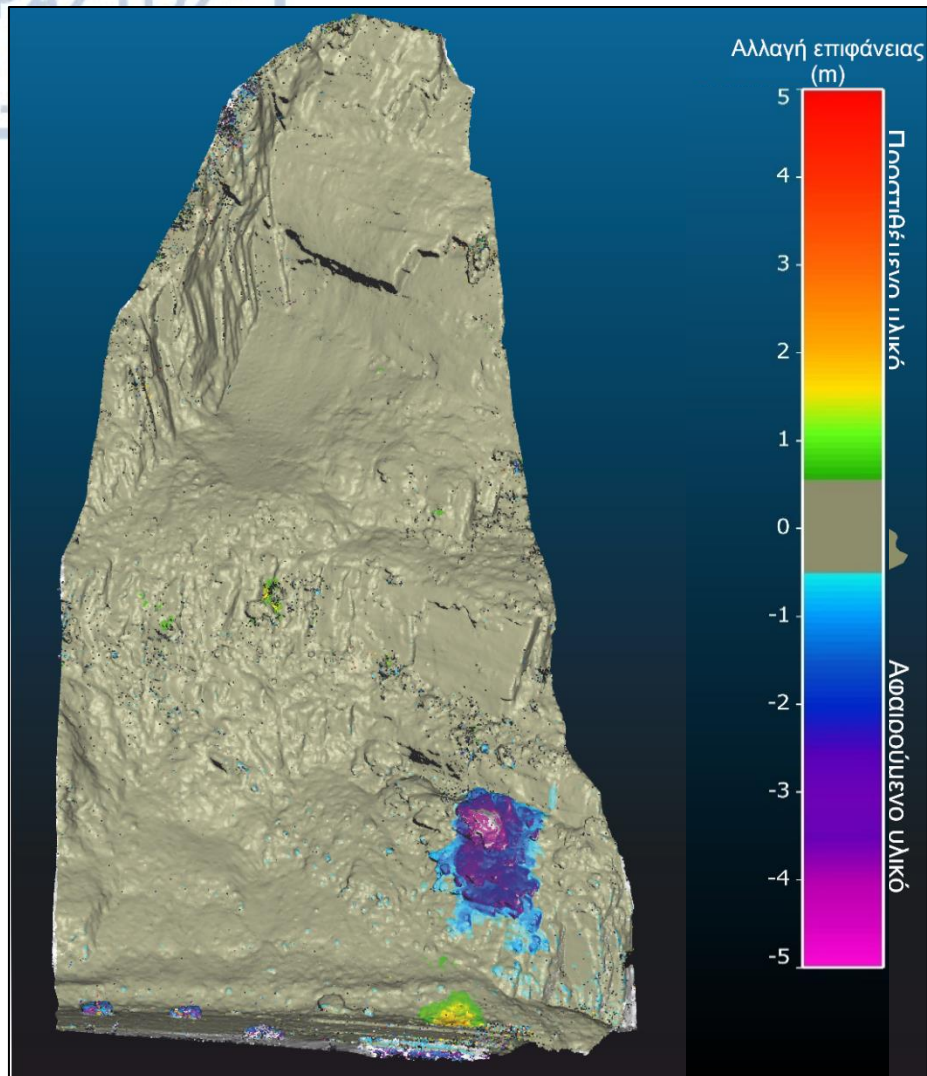
Εικόνα 70: Κοντινή εικόνα του αποτελέσματος της σύγκρισης των δύο point clouds (Μάρτιος 2018 – Νοέμβριος 2019).

Γενικά, οι εικόνες αυτές που προέκυψαν από την επεξεργασία των point clouds απεικονίζουν τις αλλαγές της επιφάνειας του εδάφους και ως μονάδες χρησιμοποιούνται τα μέτρα. Όσον αφορά την κλίμακα χρωμάτων που υπάρχει, με αποχρώσεις μπλε και μωβ συμβολίζονται οι θέσεις από τις οποίες αφαιρέθηκε υλικό, ενώ οι αποχρώσεις από πράσινο μέχρι κίτρινο συμβολίζουν θέσεις στις οποίες προστέθηκε υλικό.

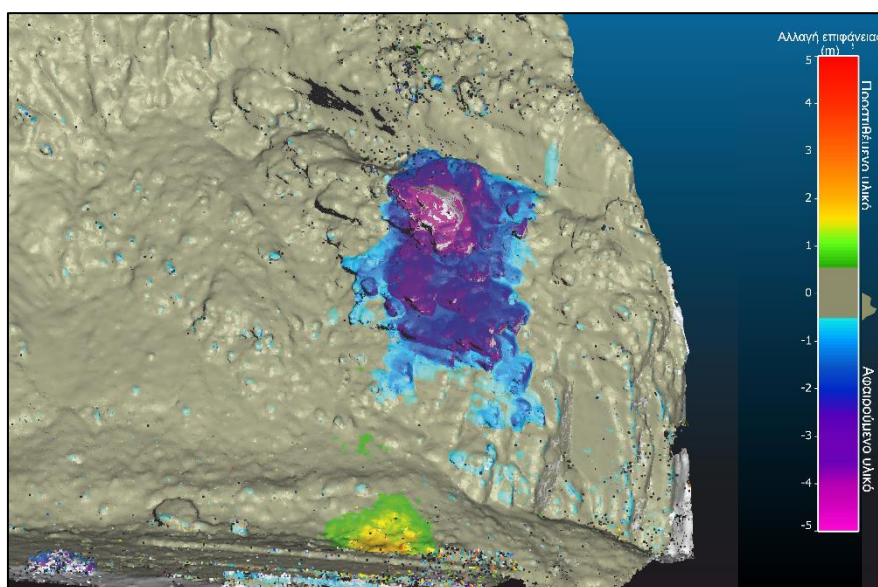
Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και τη μείωση του σφάλματος πραγματοποιήθηκε επιπλέον η σύγκριση των point clouds μεταξύ του Μάϊου του 2019 με του Μαρτίου του 2018. Η σύγκριση αυτή έδωσε αποτελέσματα ίδιας τάξης μεγέθους στις αντίστοιχες θέσεις ελέγχου.

Επομένως, προέκυψαν οι τελικές τιμές σχετικά με την μετακίνηση του υλικού. Οι θέσεις που είναι με αποχρώσεις του μωβ δείχνουν μία αφαίρεση υλικού γύρω στα 2 – 3 m και σε μεμονωμένες θέσεις με μικρή έκταση φτάνει και σε μεγαλύτερη τάξη έως και τα 5 m. Ενώ στις περιοχές με πράσινο και κίτρινο χρώμα, η προσθήκη υλικού είναι πιο μικρής τάξης, δηλαδή 1 – 2 m.

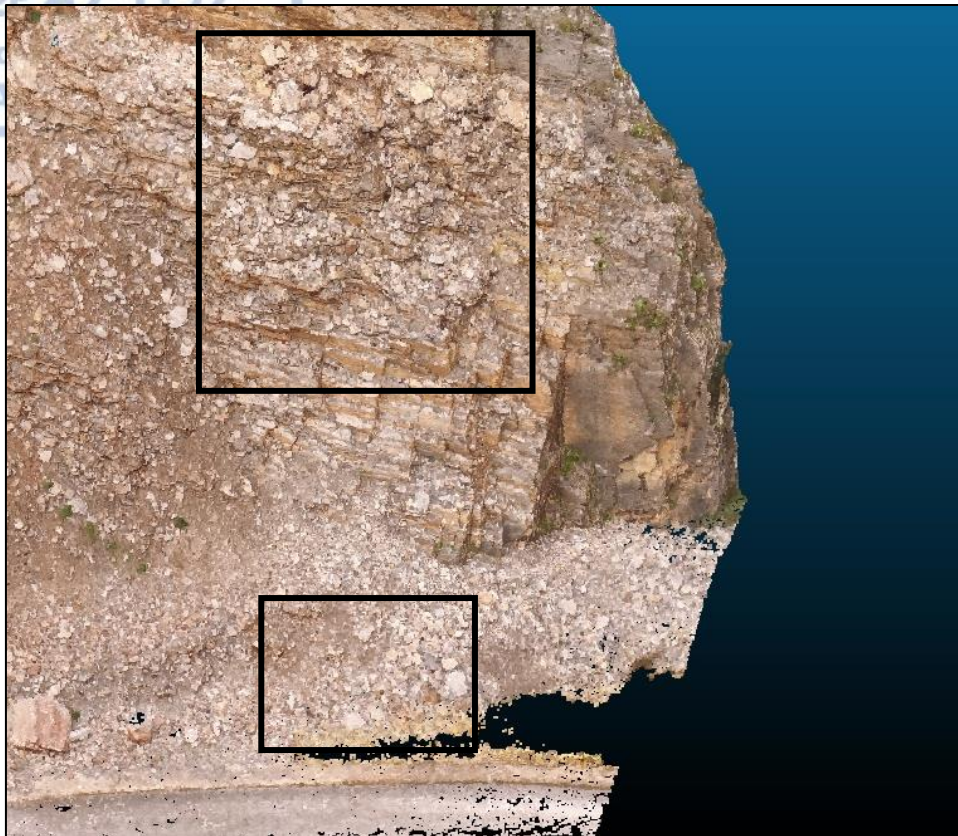
Η μετακίνηση του υλικού στη θέση όπου έγινε ο έλεγχος του change detection, οφείλεται σε αστοχία από ανατροπή, λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας J<sub>2</sub> (75° / 270°).



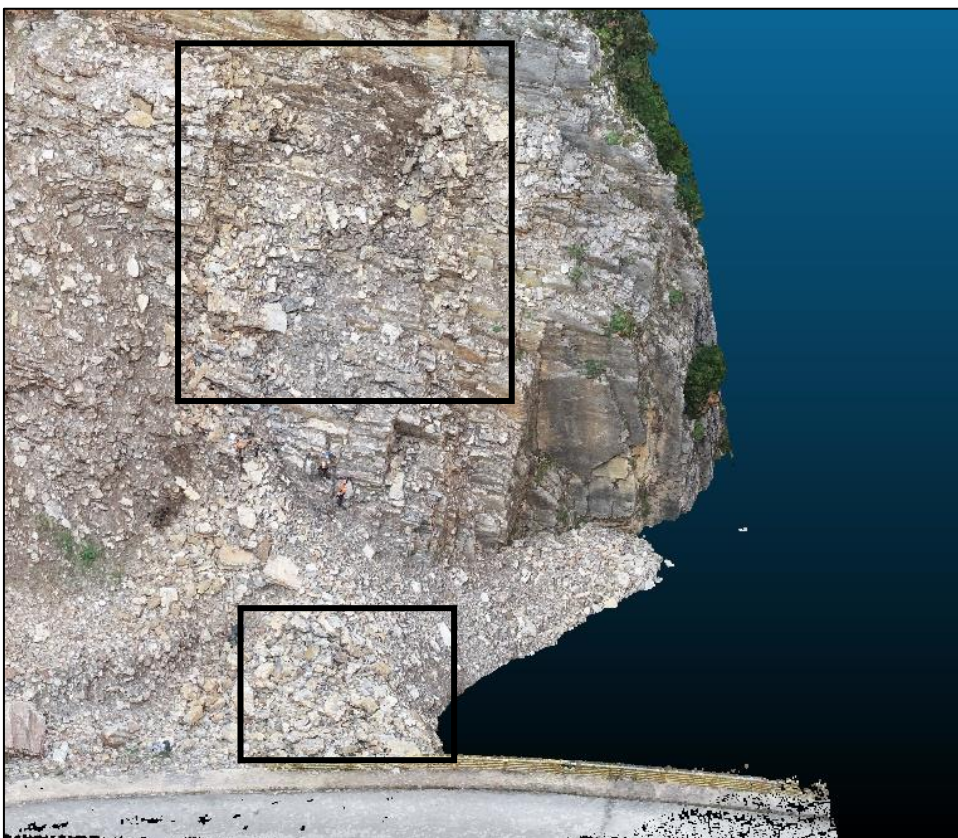
Εικόνα 71: Αποτέλεσμα σύγκρισης των δύο point clouds (Μάρτιος 2018 – Μάϊος 2019).



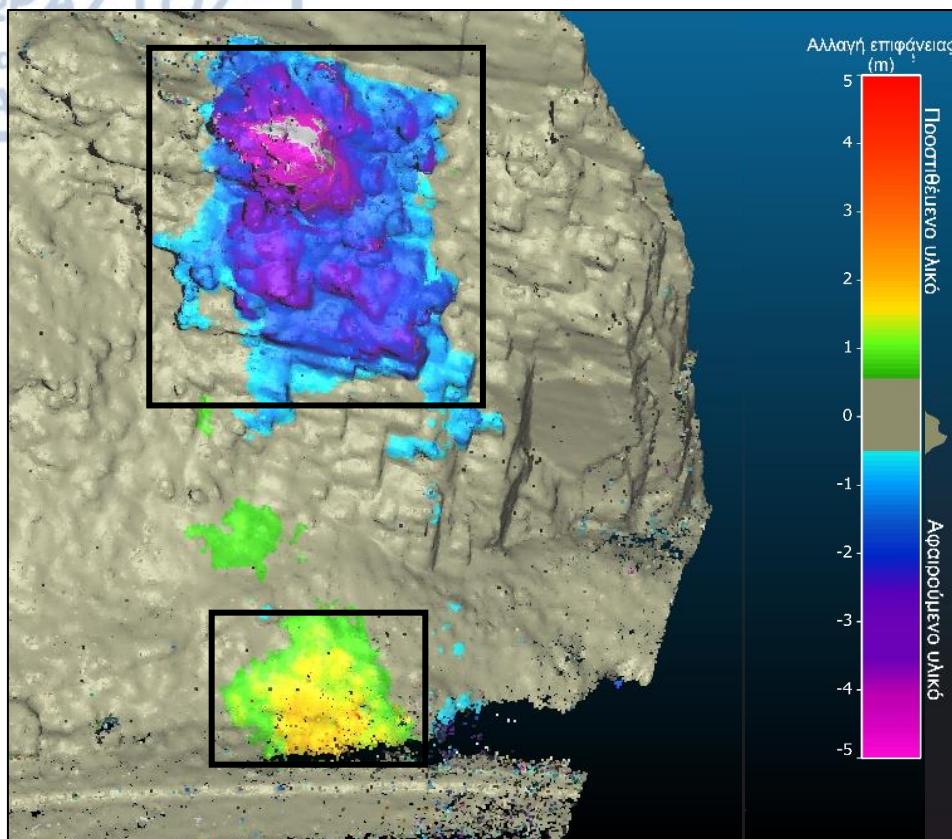
Εικόνα 72: Κοντινή εικόνα του αποτελέσματος της σύγκρισης των δύο point clouds, (Μάρτιος 2018 – Μάϊος 2019).



Εικόνα 73: Απεικόνιση της περιοχής που μετακινήθηκε, Μάρτιος του 2018.



Εικόνα 74: Απεικόνιση της περιοχής που μετακινήθηκε, Νοέμβριος του 2019.



Εικόνα 75: Απεικόνιση της σύγκρισης μεταξύ Μαρτίου 2018 – Νοεμβρίου 2019.

Τέλος, από το πρόγραμμα Cloud Compare και το εργαλείο Compute 2.5D Volume υπολογίστηκε ο όγκος των υλικών που προστέθηκε και αφαιρέθηκε από τις παραπάνω θέσεις.

Ο όγκος του υλικού που αφαιρέθηκε (μωβ αποχρώσεις) είναι  $280 \text{ m}^3$  και ο όγκος του υλικού που προστέθηκε (πράσινες αποχρώσεις) είναι  $90 \text{ m}^3$ .

Οι δυο όγκοι δεν ταυτίζονται διότι ο όγκος που παρουσιάζεται ως προστιθέμενος δεν είναι ο συνολικός λόγω αφαίρεσης του από το οδικό δίκτυο για την λειτουργία του δρόμου και λόγω της εξάπλωσης του προς τα κατάντη, κάτω από την γέφυρα και κοντά στην κοίτη του ποταμού, περιοχή η οποία δεν καλύφθηκε από τη πτήση με το UAV.

## 7. Αξιολόγηση Επικινδυνότητας Βραχοκαταπτώσεων

### 7.1. Γενικά στοιχεία

Η διακινδύνευση (Risk) μίας περιοχής είναι οι συνέπειες της εκδήλωσης ενός καταστροφικού φυσικού φαινομένου και εξαρτάται από την πιθανότητα εκδήλωσης του, η οποία είναι η επικινδυνότητα.

Με τον όρο επικινδυνότητα (Hazard) εκφράζεται η χωρική πιθανότητα εκδήλωσης ενός καταστροφικού φαινομένου σε ορισμένο τόπο και σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Σύμφωνα με το Varnes (1984) ο τύπος που ισχύει για την επικινδυνότητα είναι:

$$H_L = P_{AL} * P_N * S$$

όπου:

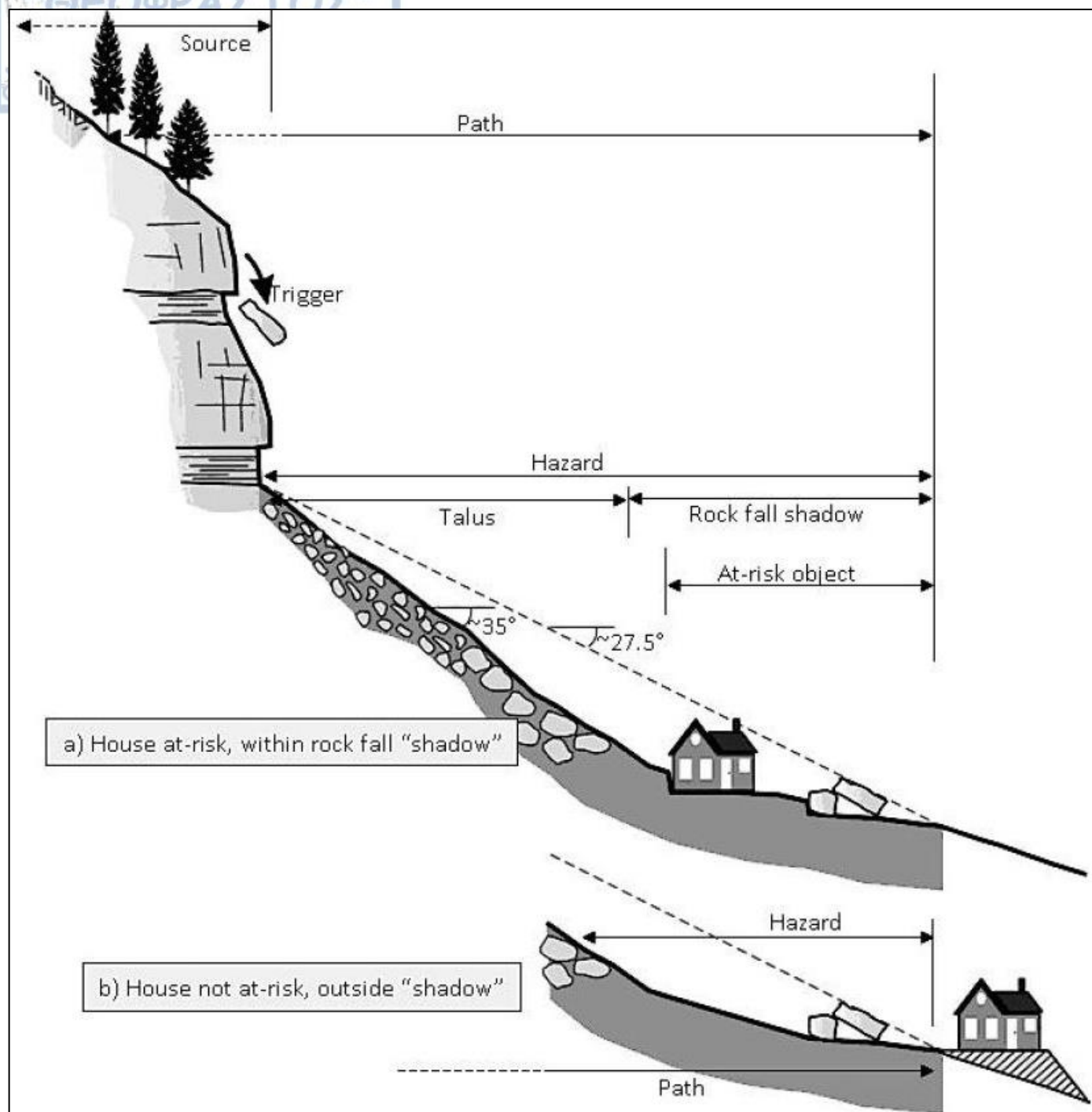
$P_{AL}$  = η πιθανότητα μεγέθους, η οποία περιλαμβάνει την περιοχή, την έκταση, τον τύπο ολίσθησης και την ταχύτητα.

$P_N$  = η χρονική πιθανότητα, «δυναμικοί» παράγοντες εκδήλωσης (βροχοπτώσεις, σεισμοί κ.α.), καθώς και η πιθανότητα εμφάνισης, εντός δεδομένης χρονικής περιόδου.

$S$  = η χωρική πιθανότητα (επιδεκτικότητα), η οποία έχει σχέση με τους «στατικούς» παράγοντες εκδήλωσης (κλίση πρανούς, αντοχή εδάφους κτλ).

Σύμφωνα με το Fell (2008), για την περιγραφή της επικινδυνότητας για βραχοκαταπτώσεις πρέπει επίσης να συμπεριληφθεί η τοποθεσία του γεγονότος, ο όγκος των αποκολλημένων τεμαχών, καθώς και αν είναι εφικτό και η ταχύτητα τους.

Επιπλέον, για τις βραχοκαταπτώσεις η επικινδυνότητα, ενός επιδεκτικού πρανούς, εκτιμάται ως συνάρτηση της ετήσιας συχνότητας εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων, της μέγιστης κινητικής ενέργειας των τεμαχών και του μέγιστου ύψους διαδρομής που δύναται να διανύσουν τα τεμάχια (Valagussa, Frattini & Crosta , 2014).



Εικόνα 76: Απεικόνιση της διακινδύνευσης του σπιτιού στη βάση της πλαγιάς έναντι βραχοκαταπτώσεων (Wyllie, 2015).

## 7.2. Αξιολόγηση επικινδυνότητας κατά μήκος του πρανούς

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων του πρανούς στην περιοχή Διπόταμα – Προυσό στο νομό Ευρυτανίας, θα γίνει με βάση ένα ποιοτικό σύστημα εκτίμησης. Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας προϋποθέτει τον ποιοτικό προσδιορισμό της επιδεκτικότητας της περιοχής, αυτό είχε ως αποτέλεσμα να οριστούν οι παράμετροι στις οποίες θα βασιστεί η επιδεκτικότητα. Επίσης η ποιοτική αξιολόγηση χρήζει ορισμού παραμέτρων για την επικινδυνότητα του πρανούς ως προς το δρόμο, που βρίσκεται κατάντη της πλαγιάς. Οι παράμετροι της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες 7 – 8.

Πίνακας 7: Παράμετροι Επιδεκτικότητας.

| Παράμετροι Επιδεκτικότητας |
|----------------------------|
| Ποιότητα βραχομάζας        |
| Κλίση πρανούς              |
| Όγκος βραχοτεμαχών         |

Πίνακας 8. Παράμετροι Επικινδυνότητας.

| Παράμετροι Επικινδυνότητας                 |
|--------------------------------------------|
| Συχνότητα εκδήλωσης                        |
| Μέγιστη τροχιά – Κινητική ενέργεια τεμαχών |
| Πιθανότητα βροχόπτωσης                     |

Αναφορικά με τις παραμέτρους της επιδεκτικότητας, η κλίση του πρανούς παρόλο που εμφανίζεται με μια μέση κλίση  $70^\circ$  σε όλο το πρανές, θα γίνει περαιτέρω ανάλυση και διαχωρισμός της κλίσης ανά θέσεις. Η ποιότητα της βραχομάζας θα διακριθεί όπως διαχωρίστηκαν και οι τεχνικογεωλογικές ενότητες των σχηματισμών και ο όγκος του αποσπώμενου τεμάχους εξαρτάται από τον βαθμό κερματισμού της βραχομάζας.

Σημαντική παράμετρος της επικινδυνότητας αποτελεί η συχνότητα εκδήλωσης και σε αυτό θα συνδράμει η μελέτη που ήδη έγινε σχετικά με την ανίχνευση μετακινήσεων στο πρανές. Όπως προαναφέρθηκε, η αξιολόγηση της επικινδυνότητας σχετίζεται με το οδικό δίκτυο στο κατάντη μέρος, οπότε θα αξιολογηθεί η απόσταση της κάθε ζώνης και η αναμενόμενη κινητική ενέργεια που μπορεί να αναπτύξει ένα αποσπώμενο τέμαχος από την αντίστοιχη θέση. Τέλος, η βροχόπτωση αποτελεί καθοριστική παράμετρο για την εκδήλωση βραχοκαταπτώσεων και ειδικά στην περιοχή μελέτης, αφού αποτέλεσε το κύριο έναυσμα για την εκδήλωση της μεγάλης κατάπτωσης που συνέβη το 2015.

### Ζώνη I

Στη Ζώνη I ο σχηματισμός αποτελείται από συχνές εναλλαγές λεπτοπλακώδους μαργαϊκού ασβεστόλιθου με συχνές εναλλαγές με αργιλόμαργες. Η περιοχή αποτελεί τμήμα της 2<sup>ης</sup> τεχνικογεωλογικής ενότητας από άποψη των μηχανικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού. Η βραχομάζα φέρει έντονο κερματισμό, οπότε σε περίπτωση απόσπασης τεμάχους, το τέμαχος θα είναι μικρού όγκου. Η κλίση της βάσης του πρανούς είναι μέση (~50°). Η ζώνη I χαρακτηρίζεται από χαμηλή επιδεκτικότητα.

Στην συγκεκριμένη θέση δεν έχουν εντοπιστεί πρόσφατες μετακινήσεις (change detection). Η ζώνη I βρίσκεται κοντά στο οδικό δίκτυο όμως λόγω της κλίσης του πρανούς ένα αποσπώμενο τέμαχος θα έχει μικρό ύψος διαδρομής και χαμηλή κινητική ενέργεια. Συνεπώς, η Ζώνη I χαρακτηρίζεται από χαμηλή επικινδυνότητα.

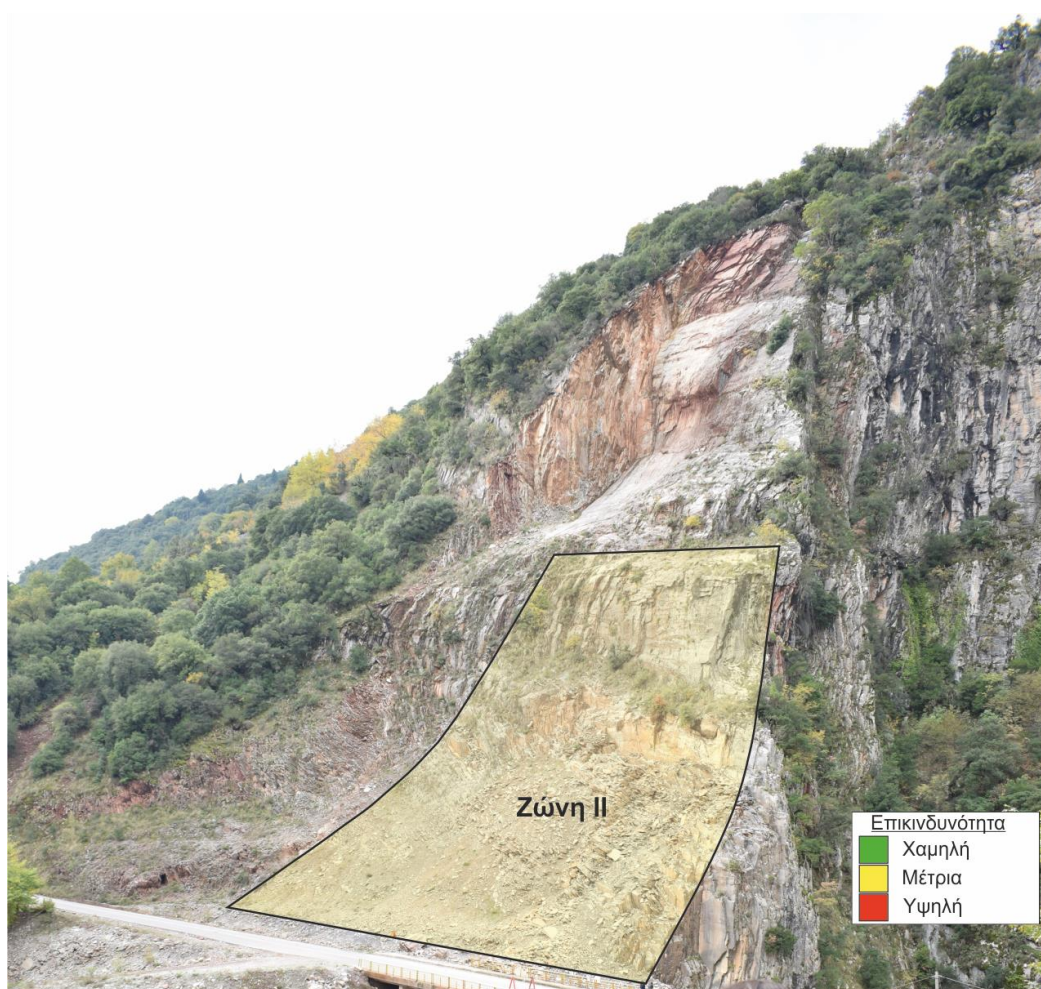


Εικόνα 77: Εμφάνιση Ζώνης I στο πρανές.

## Ζώνη II

Η Ζώνη II περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο υλικό το οποίο έχει κατολισθήσει από προηγούμενες καταπτώσεις. Επομένως, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού σε εκείνη τη θέση είναι πτωχά. Η κλίση του πρανούς είναι μέτρια προς μεγάλη ανά θέσεις ( $\sim 60^\circ - 70^\circ$ ). Η ζώνη χαρακτηρίζεται από μέτρια επιδεκτικότητα.

Επίσης, με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, στη θέση αυτή παρατηρήθηκε μετακίνηση τα τελευταία χρόνια. Βρίσκεται σε άμεση επαφή με το οδικό δίκτυο, όμως τμήμα της ζώνης II δεν συνδέεται με τον δρόμο, οπότε το κατολισθημένο υλικό φτάνει στα κατάντη τμήμα του πρανούς, όπου βρίσκεται η κοίτη του ποταμού. Τα αποσπόμενα τεμάχια έχουν μικρό ύψος διαδρομής και δεν μπορούν να αναπτύξουν υψηλή κινητική ενέργεια. Συνεπώς, η Ζώνη II χαρακτηρίζεται από μέτρια επικινδυνότητα.



Εικόνα 78. Εμφάνιση Ζώνης II στο πρανές.

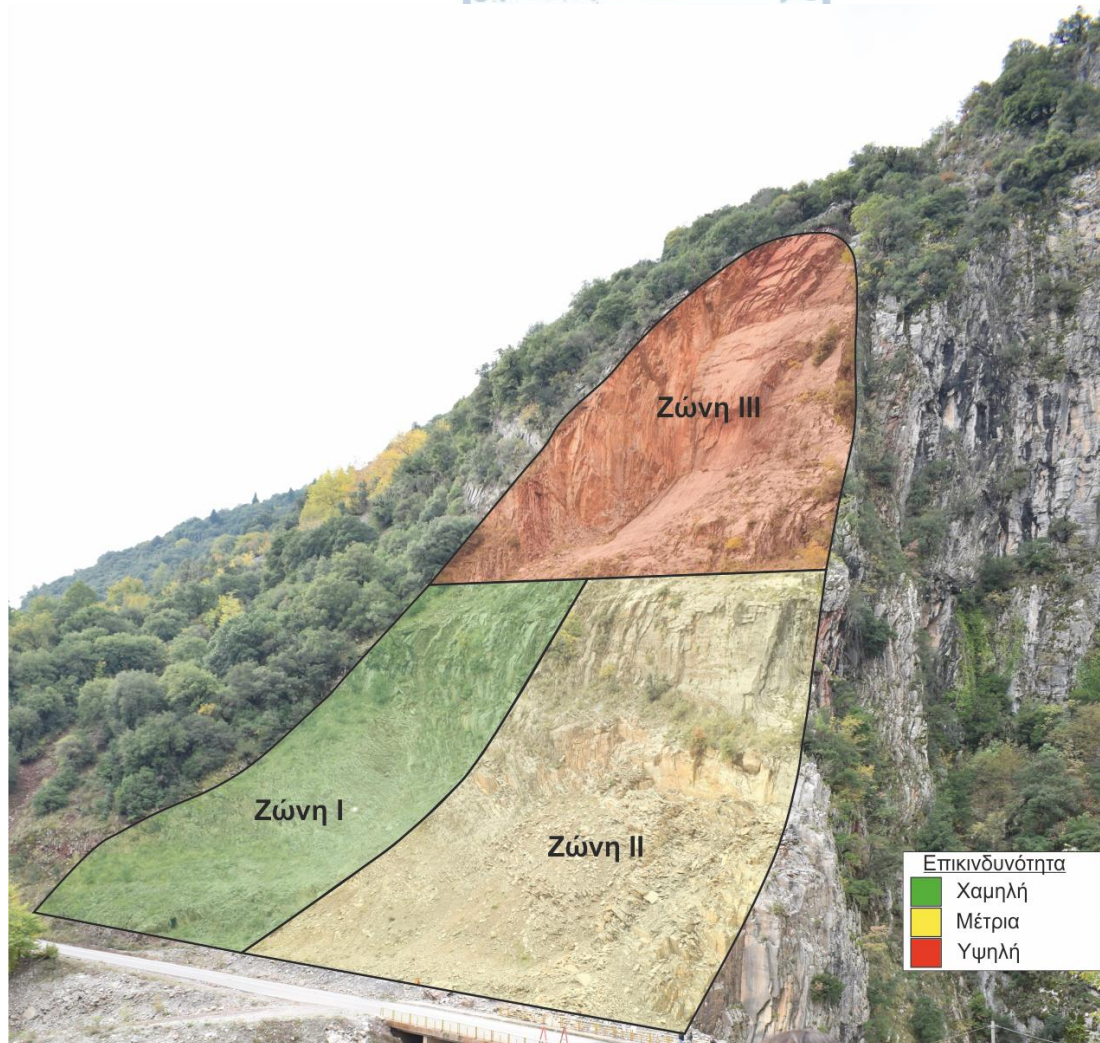
### Ζώνη III

Η Ζώνη III καλύπτει το πάνω τμήμα του πρανούς. Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται δομές του βραχώδους υποβάθρου που αποτελούνται από μερικώς διαταραγμένο ασβεστόλιθο. Η αποσάθρωση είναι επιφανειακή ανά θέσεις και δεν έχει επηρεάσει τη δομή της βραχομάζας. Το πρανές στη θέση αυτή συναντάται με μεγάλη κλίση ( $\sim 70^\circ$ ). Ο χαμηλός βαθμός κερματισμού της βραχομάζας, έχει ως αποτέλεσμα τα επικρεμάμενα τεμάχια της ζώνης III να έχουν μεγάλο όγκο και σε περίπτωση απόσπασής τους από το πρανές θα δημιουργήσουν πρόβλημα στο οδικό δίκτυο. Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν, οδηγούν στο συμπέρασμα πως η ζώνη III χαρακτηρίζεται από υψηλή επιδεκτικότητα.

Η οριοθετημένη ζώνη δεν βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το οδικό δίκτυο σε σχέση με τις άλλες ζώνες. Όμως, λόγω της υψομετρικής διαφοράς που έχει, η ζώνη III εκπροσωπεί το υψηλότερο τμήμα του πρανούς, ένα αποσπώμενο τέμαχος από αυτή τη ζώνη λόγω μεγάλου ύψους διαδρομής θα μπορέσει να αναπτύξει υψηλή κινητική ενέργεια, άρα να φτάσει αρκετά κοντά ή και πάνω στο οδικό δίκτυο. Τέλος, η ζώνη χαρακτηρίζεται από επίπεδες ολισθήσεις κατά μήκος ζωνών ρηγμάτων και έχει ιστορικό μεγάλων βραχοκαταπτώσεων σε συνδυασμό με τις καιρικές συνθήκες που έλαβαν χώρα. Συνοψίζοντας όλες τις παραμέτρους, η ζώνη III έχει υψηλή επικινδυνότητα.



Εικόνα 79. Εμφάνιση Ζώνης III στο πρανές.



Εικόνα 80: Αξιολόγηση της επικινδυνότητας κατά μήκος της πλαγιάς, ανά ζώνες.

Πίνακας 9: Ζώνες επικινδυνότητας στο πρανές.

| Ζώνες | Αξιολόγηση Επικινδυνότητας |
|-------|----------------------------|
| I     | Χαμηλή                     |
| II    | Μέτρια                     |
| III   | Υψηλή                      |

### **7.3. Προτεινόμενα μέτρα προστασίας**

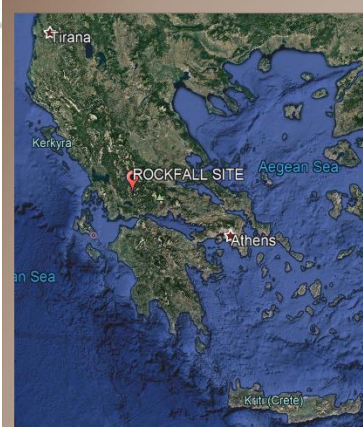
Η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της υπό μελέτη περιοχής και η αξιολόγηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων έχει ως απώτερο στόχο τη μείωση των συνεπειών ενδεχόμενων αστοχιών. Για τον περιορισμό της επικινδυνότητας προτάθηκαν μέτρα προστασίας έναντι βραχοκαταπτώσεων.

Γενικά, τα μέτρα προστασίας, όπως έχει αναφερθεί, διαχωρίζονται σε ενεργητικά και σε παθητικά. Όσον αφορά τις βραχοκαταπτώσεις η εφαρμογή παθητικών μέτρων προστασίας θεωρείται ως η πιο κατάλληλη μέθοδος, σε σχέση με τα ενεργητικά μέτρα, επειδή παρέχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και ευκολία στην κατασκευή – τοποθέτηση τους.

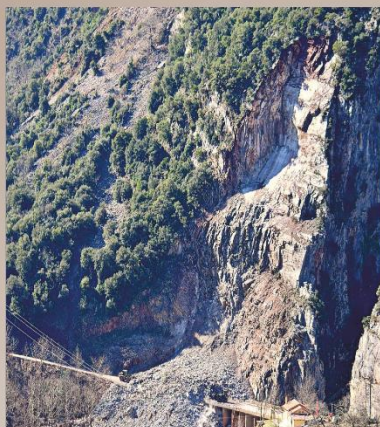
Στην περιοχή μελέτης, προτείνεται η κατασκευή φράχτη ανάσχεσης στη βάση του πρανούς. Η κατασκευή αυτή θα έχει ως στόχο τη συγκράτηση τεμαχών που αστοχούν από το πρανές, έτσι ώστε να μην προκαλέσουν καταστροφές στο οδικό δίκτυο.



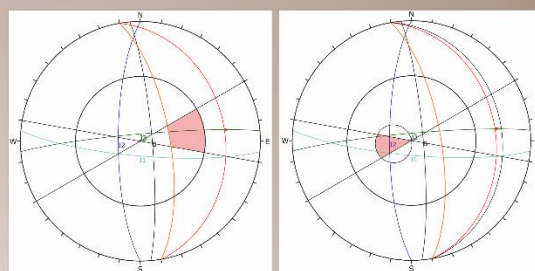
*Εικόνα 81: Ενδεικτική θέση φράχτη ανάσχεσης στη βάση του πρανούς.*



Με κόκκινο χρώμα η περιοχή μελέτης Προύσσοις - Διπόταμα.

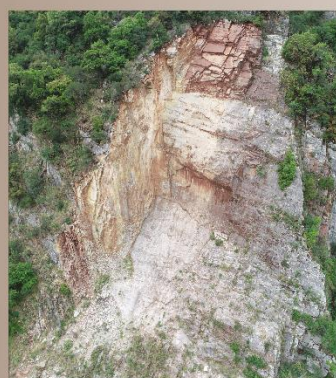


Μεγάλη βραχοκατάπτωση, που συνέβη στις 19 Φεβρουαρίου του 2015.



Επίπεδες ολισθήσεις

Ανατροπές



Πτυχωμένος - έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος, με εναλλαγές αργιλόλιθων αποτελούμενες από γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεταγμένες οικογένειες ασυνεχειών. Δομή ανοικτή λόγω της μη αλληλεμπλοκής των τεμαχίων. GSI = 30 - 35

Τα στρώματα βρίσκονται με μεγάλη γωνία κλίσης ( $82^\circ$ ) και είναι ελαφρώς πτυχωμένα. Η πύκνωση μεταβάλλεται πάνω σε ρήγμα, όπου είναι εμφανής η επιφάνεια του. Το ρήγμα είναι ανώτροφο, με μικρή γωνία κλίσης ( $30^\circ$ ), είναι ομόρροπο με το πριανές και πραγματοποιείται θραύση του υλικού πάνω στις ζώνες του.

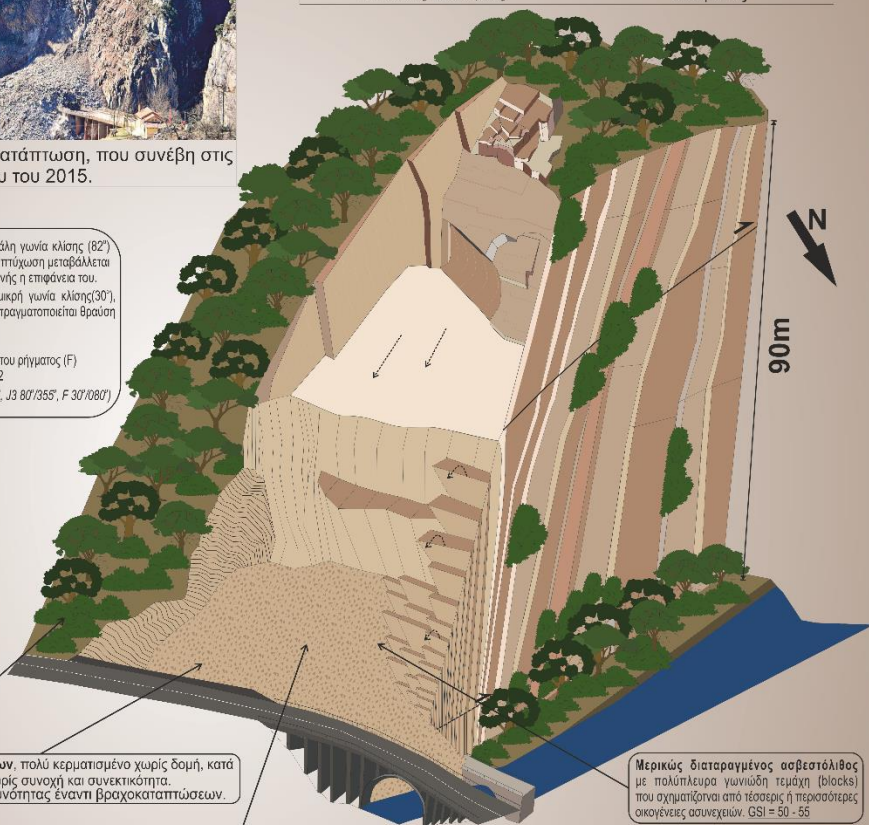
**Δυναμικές αστοχίες**

- Επίπεδες ολισθήσεις κατά μήκος του ρήγματος (F)
- Ερεκλυτικές ανατροπές από τη J2

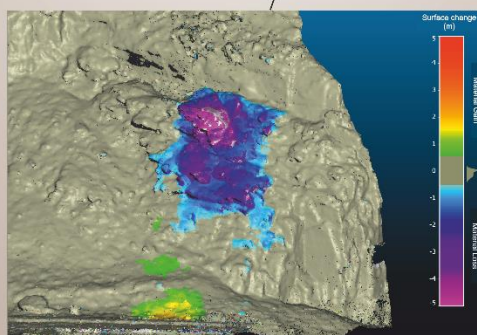
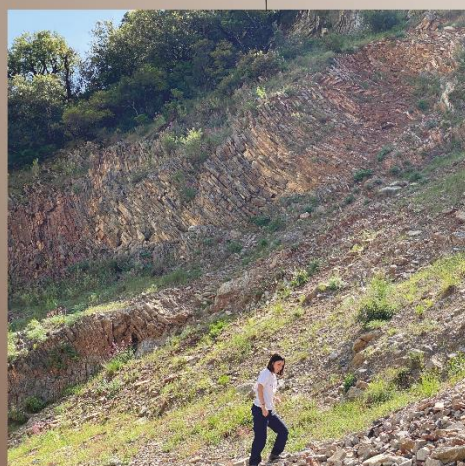
(B  $82^\circ/085^\circ$ , J1  $80^\circ/185^\circ$ , J2  $80^\circ/270^\circ$ , J3  $80^\circ/355^\circ$ , F  $30^\circ/080^\circ$ )

Υλικό βραχοκαταπτώσεων, πολύ κερματισμένο χωρίς δομή, κατά θέσεις εξοφωποιημένο, χωρίς συνοχή και συνεκτικότητα.

- Ζώνη υψηλής επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων.



Μερικώς διαταραγμένος ασβεστόλιθος με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών. GSI = 50 - 55



Change Detection (Μάρτιος 2018 - Νοέμβριος 2020)

- Περιοχές με πράσινο & κίτρινο χρώμα: προσθήκη υλικού ~ 1 έως 2 m.
- Περιοχές με μπλε & μωβ χρώμα: αφαίρεση υλικού ~ 2 έως 5 m.



Πλαϊνή πρόσοψη του πριανούς με κόκκινη γραμμή η πιθανή επιφάνεια ρήγματος.

Εικόνα 82: Conceptual model της περιοχής μελέτης.

## 8. Συμπεράσματα

Το αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή Διπόταμα – Προυσσό Ευρυτανίας, με τη χρήση επίγειου σαρωτή Lidar (Light Detection and Ranging) και της τεχνολογίας UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Η χρήση αυτών των τεχνολογιών διευκόλυνε την μελέτη του φαινομένου καθώς και τη χρονική παρακολούθηση του τα τελευταία έτη (2017 – 2019). Λήφθηκαν δεδομένα από όλη την έκταση του πρανούς, ακόμα και από τις πιο δυσμενείς περιοχές.

Η συγκεκριμένη θέση επιλέχθηκε, επειδή έχει παρουσιάσει στο παρελθόν μεγάλου όγκου καταστροφικές βραχοκαταπτώσεις (Φεβρουάριος 2015) και παράλληλα οι συνέπειες των φαινομένων αυτών για τις τοπικές κοινωνίες είναι τεράστιες λόγω την ολική καταστροφή του οδικού δικτύου με αποτέλεσμα τη μερική αποξένωση τους.

Η περιοχή μελέτης αποτελείται γεωλογικά από λεπτοπλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, σε εναλλαγές με αργιλόμαργες, που ανήκουν στη ζώνη Πίνδου. Η στρώση του σχηματισμού σε όλο το μήκος της πλαγιάς εμφανίζεται παρακατακόρυφη ( $\sim 82^\circ$ ) και αποτελεί την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχομάζας. Επιπλέον, η περιοχή επηρεάζεται από ζώνες ανάστροφων ρηγμάτων με μικρή γωνία κλίσης ( $30^\circ$ ) και ομόρροπες με το πρανές.

Η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε βασίστηκε στην ταξινόμηση της ασβεστολιθικής βραχομάζας με το σύστημα GSI (Marinos, 2010) και στη μονοαξονική αντοχή του πετρώματος βάση εργαστηριακών δοκιμών (point load).

Όσον αφορά το μηχανισμό αστοχίας του πρανούς, το συμπέρασμα είναι ότι υπάρχει μία επίπεδη ολίσθηση των μαργαϊκών ασβεστόλιθων πάνω σε ζώνες ρηγμάτων. Παράλληλα, στο κάτω τμήμα του πρανούς εντοπίστηκε και ένας ακόμα μηχανισμός αστοχίας από εφελκυστικές ανατροπές του πετρώματος εξαιτίας της δράσης διακλάσεων.

Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που προέκυψαν ήταν δύο και ο διαχωρισμός τους βασίστηκε στη δομή της βραχομάζας, στην κατάσταση της ποιότητας των ασυνεχειών και στις εναλλαγές ασθενών και συμπαγών μελών. Η πρώτη τεχνικογεωλογική ενότητα, η οποία αποτελεί και την ενότητα με τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, πρόκειται για μερικώς διαταραγμένο ασβεστόλιθο, με GSI 50-55. Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει πτυχωμένο – έντονα διαταραγμένο λεπτοστρωματώδη ασβεστόλιθο με εναλλαγές αργιλόλιθων, με GSI 30-35.

Στη συνέχεια, από την επεξεργασία των δεδομένων από το Lidar και UAV προσδιορίστηκαν οι προσανατολισμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών (στρώση, 3 οικογένειες διακλάσεων και ρήγμα) και προσδιορίστηκαν οι αναμενόμενες αστοχίες. Προέκυψε ότι η βραχομάζα συμπεριφέρεται ανισότροπα και πιο συγκεκριμένα αναμένονται εφελκυστικές ανατροπές από την ασυνέχεια  $J_2$  ( $75^\circ/270^\circ$ ).

Μέσω της μεθοδολογίας του back analysis προέκυψε ότι η γωνία τριβής του ρήγματος είναι μικρότερη από τις  $30^\circ$ , στοιχείο το οποίο επαληθεύεται λόγω της ύπαρξης επίπεδων ολισθήσεων κατά μήκος του ρήγματος στο πρανές.

Επιπρόσθετα, τα δεδομένα του UAV χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό των γεωμορφολογικών αλλαγών, που έχει υποστεί το πρανές. Για το change detection χρησιμοποιήθηκαν πτήσεις με το UAV, που έγιναν τα τελευταία έτη (Μάρτιος 2018 – Νοέμβριο 2019). Το συμπέρασμα, που προέκυψε από την διαδικασία, είναι ότι τα τελευταία έτη οι μετακινήσεις και οι καταπτώσεις υλικού είναι μικρότερης κλίμακας, συγκριτικά με τη μεγάλη κατάπτωση που συνέβη το 2015. Συμπερασματικά, σε θέσεις όπου εντοπίστηκε αφαίρεση υλικού, ο μηχανισμός αστοχίας ο οποίος λειτούργησε ήταν από ανατροπή από την ασυνέχεια  $J_2$ .

Τέλος, μετά τη συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών πραγματοποιήθηκε ποιοτική αξιολόγηση της επικινδυνότητας, έναντι βραχοκαταπτώσεων. Όλη η έκταση του πρανούς διαχωρίστηκε σε τρεις ζώνες επικινδυνότητας (χαμηλή, μέτρια, υψηλή). Η διαφοροποίηση βασίστηκε κατά κύριο λόγο στην ποιότητα της βραχομάζας, στην κλίση του πρανούς, στον όγκο βραχοτεμαχών, στη συχνότητα εκδήλωσης και στην απόσταση από το οδικό δίκτυο. Οι παράμετροι αυτοί αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας στην περιοχή.

Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης των συνθηκών (conceptual model) περιλαμβάνει όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων ως προς τη μελέτη βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή Διπόταμα – Προυσό.



#### Αγγλική βιβλιογραφία

Colomina, I., Molina, P. (2014). "Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92 (2014): 79–97.

Farmakis I, Marinos V, Vlachopoulos N (2019) Assessment of the GSI along rock slopes based on LiDAR and photogrammetry point clouds. In: 53rd US rock mechanics/geomechanics symposium held in New York, NY, USA, 23–26 June.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk.

James, M.R., Robson, S., & Smith M.W. (2017). "3-D uncertainly-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys". Earth Surface Processes and Landforms.

Karantanellis, E., Marinos, V. & Vassilakis, E. (2019). "3D Hazard Analysis and Object-Based Characterization of Landslide Motion Mechanism using UAV Imagery".

Lato, M. J. (2010). "Applications of Lidar Pertaining to Geomechanical Evaluation and Hazard".

Lato, M. J., Diederichs, M. S., & Hutchinson, D. J. (2010). "Bias correction for view-limited lidar scanning of rock outcrops for structural characterization". Rock Mechanics and Rock Engineering.

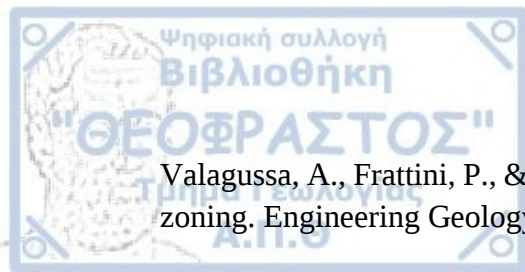
Lato, M. J., Harrap, R., Hutchinson, J., Diederichs, M., & Martin, D. (n.d.). "Assessing Geometry of Rock Masses using Static and Mobile LiDAR Scanning". Network.

Lucieer, A, Steven M.J. and Darren T. (2014). "Mapping Landslide Displacements Using Structure from Motion (SfM) and Image Correlation of Multi-Temporal UAV Photography". Progress in Physical Geography 2014, Vol. 38(1): 97–116.

Marinos, V. (2010). "New proposed GSI classification charts for weak or complex rock masses. Bull Geol Soc Greece 4(3):1248-1258.

Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). "The geological strength index: Applications and limitations". Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

Niederheiser, R., Mokros, M., Lange, J., Petschko, H., Prasicek, G., & Elberink, S.O. (2016). "Deriving 3D points clouds from terrestrial photographs comparison of different sensors and software".



Valagussa, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2014). Earthquake-induced rockfall hazard zoning. *Engineering Geology*, 182(PB), 213–225.

Varnes, D.J. (1978). “Slopes Movement Types and Processes”. In *Special Report 176 Landslides: Analysis and Control* (R.L Schuster and R.J Krizek, edss.), TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 12-33.

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.

#### Ελληνική βιβλιογραφία

Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν. (2007). "Γεωλογία Τεχνικών Έργων". Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Μουντράκης, Δ. (2010). "Γεωλογία και Γεωτεχνική εξέλιξη της Ελλάδας". Εκδόσεις University Studio Press.