



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΑΖΑΣ Κ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣμηΕΑ (UAV) ΚΑΙ
LiDAR ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΟΛΙ ΓΡΕΒΕΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΑΡΙΝΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020



Στη μνήμη του πατέρα μου Αζά Α. Κωνσταντίνου



ΑΖΑΣ Κ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5227

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣμηΕΑ (UAV) ΚΑΙ LiDAR ΣΤΟ
ΠΕΡΙΒΟΛΙ ΓΡΕΒΕΝΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας &
Υδρογεωλογίας

Επιβλέπων:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΑΡΙΝΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Συνεπιβλέπων:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ



© Απόστολος Κ. Αζάς, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ, Τομέας Γεωλογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣμηΕΑ (UAV) ΚΑΙ LiDAR ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΟΛΙ ΓΡΕΒΕΝΩΝ – *Διπλωματική Εργασία*

© Apostolos K. Azas, School Of Geology, Dept. of Geology, 2020

All rights reserved.

ENGINEERING GEOLOGICAL APPRECIATION AND MONITORING ON LANDSLIDE AND ROCKFALL PHENOMENA USING LiDAR AND UAV PLATFORMS IN PERIVOLI VILLAGE, GREECE – *Bachelor Thesis*

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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αντικείμενο της έρευνας αποτελεί η μελέτη κατολισθητικού φαινομένου στο Περιβόλι Γρεβενών με χρήση συμβατικής γεωλογικής και τεχνικογεωλογικής υπαίθριας εργασίας σε συνδυασμό με χρήση τεχνολογίας Συστήματος Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΣμηΕΑ – UAV) αλλά και ενός συστήματος επίγειας σάρωσης LiDAR. Το Περιβόλι Γρεβενών τοποθετείται εντός της Ζώνης Ωλονού-Πίνδου, εμφανίζοντας σχηματισμούς με πολύ πτωχής ποιότητας βραχομάζες όπως ο φλύσχης της Πίνδου και το τεκτονικό μείγμα (Melange) της Αβδέλλας, λόγω της έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης της ευρύτερης περιοχής. Σε συνδυασμό με τις κλιματολογικές και τις μορφολογικές συνθήκες, εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας κατολισθητικά φαινόμενα και συστηματικές βραχοκαταπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, προκαλώντας κυκλοφοριακά προβλήματα και αποτελώντας κίνδυνο για τα διερχόμενα οχήματα. Η εν λόγω κατολίσθηση μελετήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με σκοπό τη γεωλογική και τεχνικογεωλογική θεώρηση, δηλαδή την ποιότητα των σχηματισμών και αξιολόγηση του μηχανισμού αστοχίας, την αποτύπωση αλλά και την παρακολούθηση του φαινομένου για διάστημα τριών ετών.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κ. Βασίλειο Μαρίνο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας, για την ανάθεση της εργασίας, την εμπιστοσύνη που έδειξε στην προσπάθειά μου από την πρώτη ημέρα συνεργασίας, την έμπνευση, τη συνεχή καθοδήγηση και τη στήριξη σε όλο το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ευστράτιο Καραντανέλλη, για τη συνολική βοήθεια, τις απεριόριστες συμβουλές και τη στήριξή του σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας.

Καταληκτικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Παπαθανασίου, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης και τον κ. Τριαντάφυλλο Κακλή, μέλος ΕΔΙΠ του Τμήματος Γεωλογίας, για τη συμβολή τους στη λήψη των δεδομένων κατά την υπαίθρια εργασία αλλά και την επεξεργασία σημαντικού τμήματος των δεδομένων.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνώνται τα κατολισθητικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο Περιβόλι Γρεβενών. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με το συνδυασμό συμβατικών μεθόδων μελέτης κατολισθήσεων, όπως βιβλιογραφική μελέτη, υπαίθριο γεωλογική και τεχνικογεωλογική εργασία σε συνδυασμό με σύγχρονες τηλεπισκοπικές μεθόδους, όπως η χρήση τεχνολογίας LiDAR και η χρήση Συστήματος Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΣμηΕΑ – UAV), με σκοπό την τεχνικογεωλογική θεώρηση, την εκτίμηση των ορίων, την αποτύπωση και την προσομοίωση της κατολίσθησης.

Αρχικά γίνεται εισαγωγή στις γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής, περιγράφοντας τα λιθοστρωματογραφικά, τεκτονικά, σεισμικά και κλιματικά χαρακτηριστικά της. Ακολουθεί περιγραφή και ταξινόμηση των κατολισθητικών φαινομένων αλλά και τεχνικογεωλογική ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας. Αξίζει να σημειωθεί πως η περιοχή έρευνας αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους, παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους, το Δεύτερο φλύσχη της Πίνδου αλλά και τα τεκτονικά μείγματα (melange) της Αβδέλλας, σχηματισμοί με έντονη τεκτονική καταπόνηση και συνεπώς ασθενείς βραχομάζες.

Από την έρευνα πεδίου και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων των ΣμηΕΑ (UAV) και LiDAR αναλύθηκαν οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες υπό τις οποίες λαμβάνει χώρα το συγκεκριμένο κατολισθητικό φαινόμενο, με αποτέλεσμα την κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας. Η παρουσία αργιλικών ζωνών που προέρχεται από τα στρώματα του φλύσχη εντός αυτού του τεκτονικού μείγματος και η έντονη διάτμηση σε ολόκληρη τη βραχομάζα, δημιουργούν δυσμενείς συνθήκες για τη συνολική ευστάθεια του πρανούς. Τα στρώματα του ιλυολίθου αποσαθρώνονται και διαβρώνονται εύκολα, με αποτέλεσμα να ξεκρεμώνται τα ψαμμιτικά και ασβεστολιθικά τεμάχια. Λόγω της απότομης κλίσης του πρανούς, τα βραχώδη τεμάχια φτάνουν εύκολα στο οδικό δίκτυο δημιουργώντας προβλήματα στην κυκλοφορία και αποτελώντας μεγάλο κίνδυνο για τα διερχόμενα οχήματα.

Από τη βιβλιογραφική έρευνα σε συνδυασμό με την εργασία πεδίου και την λήψη και επεξεργασία των δεδομένων έγινε αξιολόγηση των γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών της στενής περιοχής έρευνας. Τα δεδομένα που λήφθηκαν με τη χρήση ΣμηΕΑ (UAV) και τεχνολογίας LiDAR, επεξεργάστηκαν σε κατάλληλα λογισμικά και οδήγησαν στη δημιουργία χαρτών, τρισδιάστατων μοντέλων και στον υπολογισμό του όγκου των κατολισθέντων υλικών σε διάστημα τριών διαδοχικών ετών.



ABSTRACT

The current thesis deals with the investigation of landslide phenomena in the region of Perivoli, Grevena, Greece. The research was carried out by combining conventional methods of studying landslides, such as a bibliographical study, geological and geotechnical field work in conjunction with modern Remote Sensing methods, such as the use of LiDAR technology and the use of a Unmanned Aircraft System (UAV), for the purpose of engineering geological appreciation and monitoring of the specific landslide.

Geological conditions of the wider region are introduced in Chapter 2, such as lithostratographic, tectonic activity, seismic activity and climatic characteristics. A description and classification of landslides phenomena and an engineering geological classification of the geological formations of the research area are presented in Chapter 3. It is worth noting that the research area consists of thin-layered limestones, thick limestones, the Second Flysch of Pindos and ophiolites, tectonic mixtures well known as “Avdella Melange”, intense tectonic stressed formations with weak rockmasses.

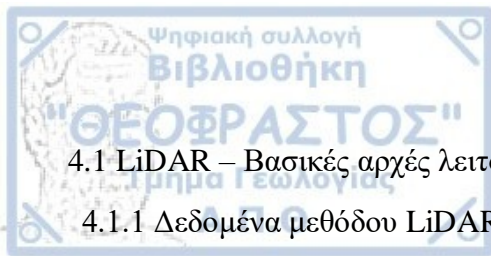
Results from field research and processing of the UAV and LiDAR data analysed the conditions under these the landslide occurs, leading to better understanding of the failure mechanism. The presence of the clayey zones, originated from the lensified flysch formations that have been taken from this melange, and the intense shearing along the whole rock mass, create unfavorable conditions for the overall stability of the slope. The softer silty-clayey bands are easily weathered and eroded and can lead to the undermining of the competent limestone and sandstone blocks. Due to the steep nature of the slope, the rock blocks easily reach the road network, causing problems at the traffic network.

Combining the bibliographical survey with field work and the reception and processing of the data, an assessment of the geological and engineering geological conditions of the research area was carried out. The data obtained using UAV and LiDAR technology, was processed into appropriate software and led to the creation of maps, 3D models and the calculation of the total volume of fallen debris and blocks, over three consecutive years.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|----|
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 10 |
| 1.1 Σκοπός..... | 10 |
| 1.2 Περιοχή Έρευνας..... | 10 |
| 1.3 Μεθοδολογία..... | 10 |
| 2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ..... | 15 |
| 2.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά ευρύτερης περιοχής..... | 14 |
| 2.1.1 Λιθοστρωματογραφία περιοχής..... | 14 |
| 2.1.2 Τεκτονική ευρύτερης περιοχής..... | 17 |
| 2.1.3 Σεισμική επικινδυνότητα ευρύτερης περιοχής..... | 18 |
| 2.1.4 Μέση ετήσια θερμοκρασία περιοχής έρευνας..... | 19 |
| 2.1.5 Μέση ετήσια βροχόπτωση περιοχής έρευνας..... | 21 |
| 3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ..... | 24 |
| 3.1 Γενικά για τις κατολισθήσεις..... | 23 |
| 3.1.1 Ορισμοί και συστήματα ταξινόμησης κατολισθήσεων..... | 23 |
| 3.1.1.1 Ορισμοί κατολισθήσεων..... | 23 |
| 3.1.1.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων..... | 25 |
| 3.1.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)..... | 26 |
| 3.2 Τεχνικογεωλογική ταξινόμηση των κυριότερων γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας..... | 30 |
| 3.2.1 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη..... | 30 |
| 3.2.1.1 Κατηγορίες του φλύσχη και τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά..... | 30 |
| 3.2.2 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά κατακερματισμένων ασβεστολίθων..... | 34 |
| 3.2.2.1 Ταξινόμηση ανά τύπο ασβεστολιθικής βραχομάζας..... | 36 |
| 4. Η ΧΡΗΣΗ LiDAR ΚΑΙ ΣμηΕΑ (UAV) ΣΤΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ..... | 38 |



| | |
|---|----|
| 4.1 LiDAR – Βασικές αρχές λειτουργίας..... | 38 |
| 4.1.1 Δεδομένα μεθόδου LiDAR..... | 38 |
| 4.1.1.1 Δεδομένα XYZ..... | 39 |
| 4.1.1.2 Δεδομένα XYZI..... | 39 |
| 4.1.1.3 Δεδομένα XYZRGB..... | 39 |
| 4.1.2 LiDAR και μελέτη κατολισθήσεων..... | 38 |
| 4.1.2.1 Ανίχνευση και χαρακτηρισμός κατολισθήσεων και βραχοκαταπτώσεων..... | 40 |
| 4.1.2.2 Χαρτογράφηση κατολισθήσεων και εκτίμηση κινδύνου..... | 40 |
| 4.1.2.3 Μοντελοποίηση κατολισθήσεων..... | 40 |
| 4.1.2.4 Παρακολούθηση κατολισθήσεων..... | 40 |
| 4.2 Βασικές αρχές λειτουργίας ΣμηΕΑ (UAV) και μελέτη κατολισθήσεων..... | 40 |
| 4.2.1 Οργανόγραμμα εργασιών κατά τη χρήση ΣμηΕΑ (UAV)..... | 41 |
| 4.2.2 Επεξεργασία δεδομένων ΣμηΕΑ (UAV)..... | 42 |
| 4.2.3 Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στη διαχρονική ανάλυση κατολίσθησης..... | 43 |
| 5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ..... | 47 |
| 5.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής έρευνας..... | 47 |
| 5.2 Συμπεράσμα υπαίθριας παρατήρησης – Ταξινόμηση GSI – Μετρήσεις πυξίδας..... | 51 |
| 5.3 Αξιολόγηση μηχανισμού αστοχίας..... | 56 |
| 5.4 Αποτελέσματα από τη χρήση ΣμηΕΑ (UAV) στην περιοχή έρευνας..... | 61 |
| 5.5 Μοντέλο κατολίσθησης..... | 64 |
| 6. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ..... | 66 |
| 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΝΟΨΗ..... | 78 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 80 |



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΚΟΠΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αποτύπωση κατολισθητικού φαινομένου το οποίο λαμβάνει χώρα επάνω στην Επαρχιακή Οδό Γρεβενών-Βοβούσας και την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση σε περιβάλλον τεκτονισμένων ασβεστολίθων και του τεκτονικού μείγματος (melange) της Πίνδου, στο Περιβόλι Γρεβενών. Κατά τη διάνοιξη της Επαρχιακής Οδού προέκυψε η ανάγκη διαμόρφωσης τεχνητού ορύγματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 1.3. Λόγω της φύσης των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής, μετά την ολοκλήρωση της οδοποιίας, υλικά μικρού έως και μεγάλου όγκου κατολισθαίνουν, αυξάνοντας τον κίνδυνο κατά τη διέλευση των οχημάτων. Έτσι, μέρος της έρευνας για την αποτύπωση της κατολίσθησης αλλά και για την τεχνικογεωλογική της αξιολόγηση παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική διατριβή. Τα κατολισθητικά φαινόμενα σε τεχνητά ορύγματα μπορεί να οδηγήσουν στην πλήρη διακοπή της κυκλοφορίας στο συγκεκριμένο σημείο και αν τα κατολισθέντα τεμάχια χαρακτηρίζονται από μεγάλο όγκο, μπορεί να απειλήσουν ακόμη και ανθρώπινες ζωές. Επομένως, στο συγκεκριμένο σημείο είναι επιτακτική η ανάγκη αναλυτικότερης έρευνας και συστηματικότερης παρακολούθησης του φαινομένου με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για το μηχανισμό αστοχίας του πρανούς.

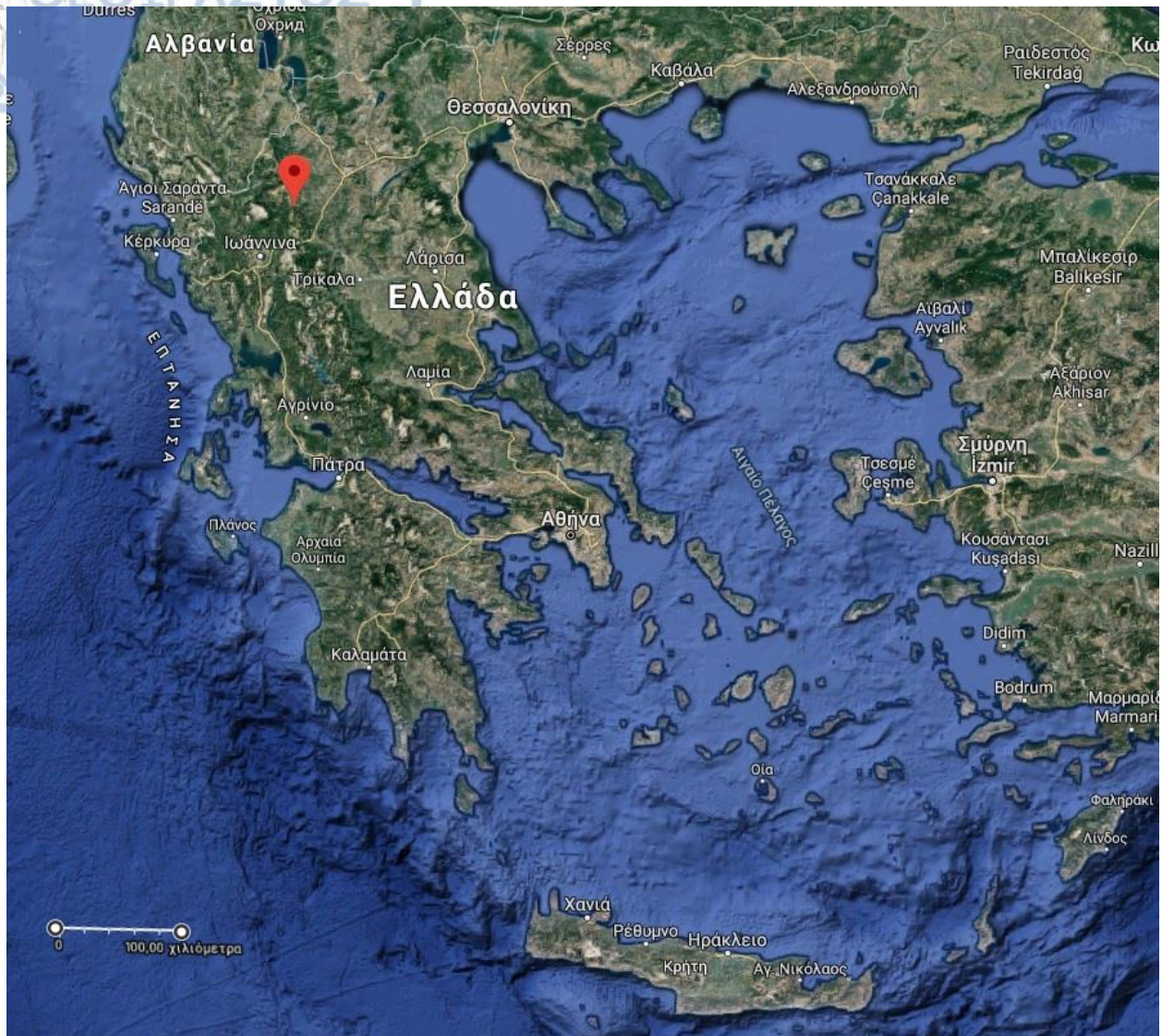
1.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας τοποθετείται γεωγραφικά ακριβώς έξω από το Περιβόλι Γρεβενών, στην Επαρχιακή Οδό Γρεβενών-Βοβούσας, 42,8 χλμ. (29 χλμ. σε ευθεία) δυτικά της πόλης των Γρεβενών. Το χωριό βρίσκεται σε υψόμετρο 1260μ.-1370μ. και είναι κτισμένο στις οροσειρές της Βόρειας Πίνδου, στο Όρος Λύγκος, στα όρια των γεωγραφικών διαμερισμάτων της Μακεδονίας και της Ηπείρου. Τα αποτελέσματα καταγραφής πληθυσμού το 2011 έδειξαν 21 κατοίκους, ενώ το 2001 οι μόνιμοι κάτοικοι ήταν 547. Τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης του Οικοτουρισμού, στο διάστημα των μηνών Μαΐου-Οκτωβρίου επιστρέφει για θερινές διακοπές πληθυσμός ο οποίος κατάγεται από το χωριό που αγγίζει κατά το μήνα Άυγουστο τις 5000, μετατρέποντάς το σε μικρή πολιτεία.

1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αναλυτικότερη έρευνα επάνω στο κατολισθητικό φαινόμενο στο συγκεκριμένο τεχνητό όρυγμα αποτελείται αρχικά από μελέτη των γεωλογικών συνθηκών της ευρύτερης περιοχής καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες της (Μέση Ετήσια Θερμοκρασία, Μέση Ετήσια Βροχόπτωση). Ακολούθησε η επί τόπου τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της λιθολογίας και οι μετρήσεις των γεωμετρικών στοιχείων των σχηματισμών με πυξίδα CLAR σε καθορισμένες θέσεις. Αμέσως μετά ακολούθησε η χρήση UAV (Unmanned

Aerial Vehicle – Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος) το οποίο είναι εξοπλισμένο με φωτογραφική μηχανή υψηλής ανάλυσης και με προκαθορισμένη πτήση επάνω από την περιοχή έρευνας τράβηξε φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης. Επίσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία LiDAR, η οποία έδωσε συγκεκριμένα χρήσιμα δεδομένα προς επεξεργασία, όπως νέφη σημείων (point clouds) με πληροφορία XYZRGBI, που απεικονίζουν με μεγάλη ακρίβεια την περιοχή έρευνας. Τα δεδομένα αυτά (UAV, LiDAR) επεξεργάστηκαν με κατάλληλες μεθόδους και παρήχθησαν ψηφιακά μοντέλα εδάφους και μωσαϊκά, που αποτελούν μοντέλα που απεικονίζουν και αυτά με μεγάλη λεπτομέρεια την περιοχή έρευνας. Τα μοντέλα υψηλής ανάλυσης επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον GIS και δημιουργήθηκαν ψηφιακοί χάρτες που περιλαμβάνουν την χωρική αποτύπωση του φαινομένου αλλά και γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές διαφοροποιήσεις σε κλίμακα περιοχής έρευνας. Από τη σύγκριση των παραχθέντων ψηφιακών μοντέλων εδάφους εξήχθησαν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με το συνολικό όγκο των κατολισθόντων υλικών σε διάστημα τριών ετών, μέσω της χρήσης. Ο συνδυασμός της επί τόπου παρατήρησης με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων του UAV και LiDAR αποσκοπεί στην εξαγωγή πληρέστερων συμπερασμάτων για το μηχανισμό αστοχίας. Στην περιοχή έρευνας απαντώνται γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης που έχουν δεχθεί έχουν χάσει μεγάλο μέρος των μηχανικών τους αντοχών και σε συνδυασμό με την έντονη βροχόπτωση, τις μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα στο έτος και φυσικά τη βαρύτητα, εμφανίζουν κατολισθητικά φαινόμενα. Καθώς υπάρχουν σχηματισμοί με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά στο σύνολο του πρανούς, άρα και διαφορετική συμπεριφορά, η έρευνα αποσκοπεί και στην εξαγωγή συμπεράσματος επάνω στην συνολική ευστάθεια του πρανούς. Η χρήση UAV και LiDAR αποσκοπεί στην ασφαλέστερη διεκπεραίωση της μελέτης ενός κατολισθητικού φαινομένου, καθώς υπάρχει τεράστιος κίνδυνος εκδήλωσης του φαινομένου κατά την ώρα της φυσικής παρουσίας του μελετητή στην περιοχή. Έτσι, σε συνδυασμό με τα ακριβέστατα και λεπτομερέστατα δεδομένα που παρέχει, αποτελεί την ασφαλέστερη και λεπτομερέστερη μέθοδο για την αποτύπωση και την εκτενέστερη μελέτη κατολισθητικών φαινομένων.



Εικόνα 1.1: Χάρτης της Ελλάδας. Με κόκκινο σημάδι ορίζεται το Περιβόλι Γρεβενών (Google Earth).



Εικόνα 1.2: Με κόκκινο βέλος παρουσιάζεται η θέση του χωριού Περιβόλι. Η θέση έρευνας παρουσιάζεται κυκλωμένη με πράσινο χρώμα (Google Earth).



Εικόνα 1.3: Η περιοχή έρευνας ακριβώς έξω από το Περιβόλι Γρεβενών.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

2.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά ευρύτερης περιοχής

Η περιοχή έρευνας γεωτεκτονικώς ανήκει στις Εξωτερικές Ελληνίδες και πιο συγκεκριμένα στη ζώνη Ωλονού-Πίνδου. Η συγκεκριμένη ζώνη έχει προσανατολισμό ΒΒΔ-ΝΝΑ και επεκτείνεται από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα έως και την Κρήτη. Τμήματά της αποτελούν η Οροσειρά της Πίνδου, τα Αθαμανικά Όρη, τα Άγραφα, το Αιτωλικό και τα Βαρδούσια της Στερεάς Ελλάδας καθώς και το Παναχαϊκό Όρος και ο Ωλονός στην Πελοπόννησο.

Η ζώνη της Πίνδου χωρίστηκε από τον κυριότερο ερευνητή της σε τρεις (3) υποζώνες:

- Το ανατολικό τμήμα της, την «Υπερπινδική Υποζώνη»
- Την Αξονική Υποζώνη
- Το δυτικό τμήμα της, που ονομάζεται «Εξωτερική Πίνδος»

Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός (Aubouin, 1959) αφορά στην ιζηματολογική διαφοροποίηση μεταξύ των τριών υποζωνών.

2.1.1 Λιθοστρωματογραφία περιοχής

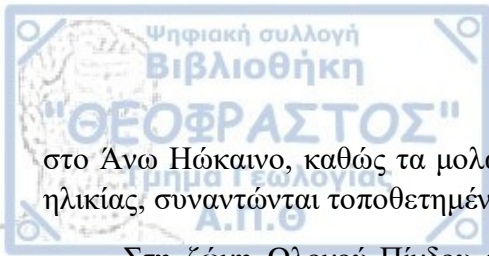
Στη ζώνη Ωλονού-Πίνδου τα πρώτα Αλπικά ιζήματα είναι ψαμμίτες, πυριτιόλιθοι, ασβεστόλιθοι και μάργες ηλικίας Μέσου Τριαδικού. Η ιζηματογένεση εξελίσσεται προς το Άνω Τριαδικό σε ασβεστιτικούς τουρβιδίτες, κερατολιθικούς ασβεστόλιθους, Ammonitico Rosso αλλά και ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά με βασάλτες, ανδεδίτες και τόφφους.

Καθ' όλη τη διάρκεια του Ιουρασικού λαμβάνει χώρα ωκεάνια ιζηματογένεση με προϊόντα αργίλους, ψαμμίτες, πελαγικούς πυριτικούς ασβεστόλιθους και ιάσπιδες που αποτελούν την «Σχιστοκερατολιθική Διάπλαση», κοκκινοπράσινου χρώματος και πάχους 150-200 μέτρων.

Κατά το Κάτω Κρητιδικό η Σχιστοκερατολιθική Διάπλαση εξελίσσεται σε εναλλαγές ψαμμιτών, μαργών, πελαγικών και λατυποπαγών ασβεστολίθων, που θυμίζουν συμπεριφορά φλύσχη. Η σειρά αυτή ονομάζεται «Πρώτος Φλύσχη της Πίνδου» αλλά ο χαρακτηρισμός αμφισβητείται καθώς δεν ακολουθεί ανάδυση του σχηματισμού.

Η συνέχεια της ιζηματογένεσης μέχρι και το Άνω Κρητιδικό δεν διακόπτεται, με τη δημιουργία πελαγικών ασβεστολίθων με πυριτικές και αργλικές ενστρώσεις, μαργών και τουρβιδιτών πάχους έως 500 μέτρων.

Στα τέλη του Κρητιδικού παρατηρείται τροποποίηση της ιζηματογένεσης, η οποία γίνεται περισσότερο ασβεστομαργαϊκή μεταβατική προς τον φλύσχη, που ξεκινά και αποτίθεται από το Δάνιο μέχρι και το Άνω Ηώκαινο. Πρόκειται για τον «Δεύτερο Φλύσχη της Πίνδου» ο οποίος είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός του ελληνικού χώρου και χαρακτηρίζεται από εναλλαγές ψαμμιτών, μαργών και σπανίως ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών. Εντός της αργιλικής φάσης του, συχνά συναντώνται ολισθόλιθοι, έντονα τεκτονισμένοι. Έτσι σε αρκετά σημεία εμφανίζεται με χαώδη δομή και ονομάζεται «Άγριος Φλύσχη». Το τέλος της ιζηματογένεσης ολοκληρώνεται



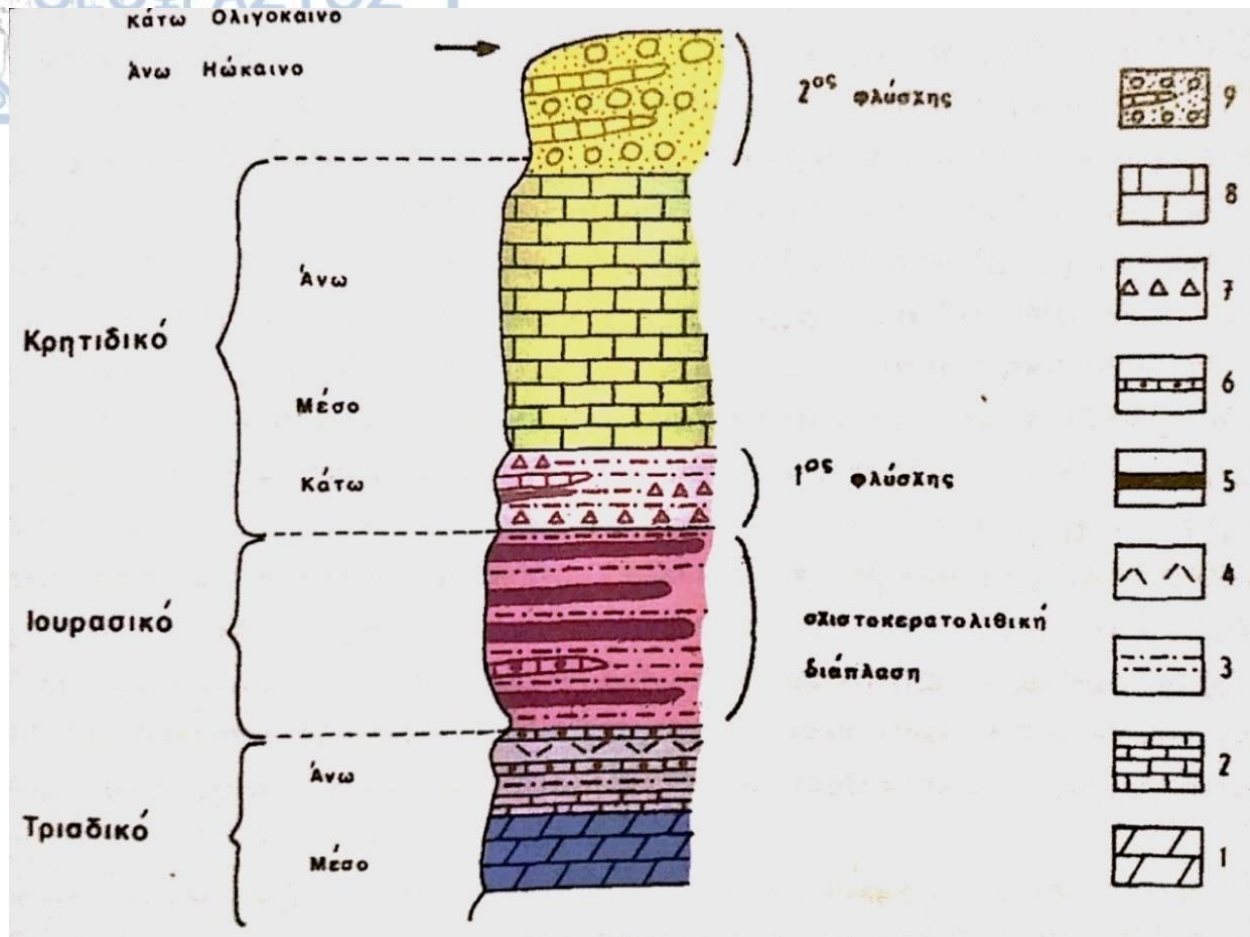
στο Άνω Ηώκαινο, καθώς τα μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας, Ολιγοκαινικής ηλικίας, συναντώνται τοποθετημένα με ασυμφωνία επάνω στον πτυχωμένο Φλύσχη.

Στη ζώνη Ωλονού-Πίνδου υπάρχουν δύο οφειολιθικές μάζες οι οποίες τοποθετήθηκαν τεκτονικά από την Υποπελαγονική ζώνη επάνω στο Φλύσχη της Πίνδου και οι Jones & Robertson (1991) διέκριναν τις εξής ομάδες πετρωμάτων:

- Την ομάδα Δράμαλας με σερπεντινωμένα υπερβασικά πετρώματα, δουνίτες, πυροξενίτες και χαρτσβουργίτες Μεσο Ιουρασικής ηλικίας.
- Την ομάδα Ασπροποτάμου με πλουτωνίτες και ηφαιστίτες συμπτυχωμένους με ωκεάνια ιζήματα.
- Την ομάδα Λουμνίτσας που περιέχει τους οφειόλιθους της «Μεταμορφικής Σόλας» μαζί με τα ωκεάνια ιζήματα της.
- Το mélange της Αβδέλλας που αποτελεί τεκτονικό μίγμα οφειολίθων της «Μεταμορφικής Σόλας», ωκεάνιων ιζημάτων και μεταμορφωμένων πετρωμάτων.
- Την ομάδα του Όρλιακα που περιέχει ανθρακικά ιζήματα ηλικίας Άνω Κρητιδικού.
- Την ομάδα «Δύο Δέντρα» που περιέχει «λέπια» ιζηματογενών πετρωμάτων και ασβεστολίθων με απολιθώματα (Calpionelles).

Η περιοχή έρευνας αποτελείται από τμήμα του «Δεύτερου Φλύσχη της Πίνδου» σε επαφή με τεφρούς ασβεστόλιθους και το Melange. Πιο συγκεκριμένα, στο αριστερό τμήμα του πρηνούς μελέτης, εμφανίζονται οι φάσεις του Φλύσχη, όπως εναλλαγές ψαμμιτικών πάγκων με ερυθρούς έως τεφρούς αργιλικούς σχιστόλιθους έως ιλυόλιθους. Σε πολλές θέσεις υπάρχουν οι Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι σε επαφή και με τον Φλύσχη αλλά και με το Melange.

Η λιθοστρωματογραφία της ζώνης Ωλονού-Πίνδου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (2.1):



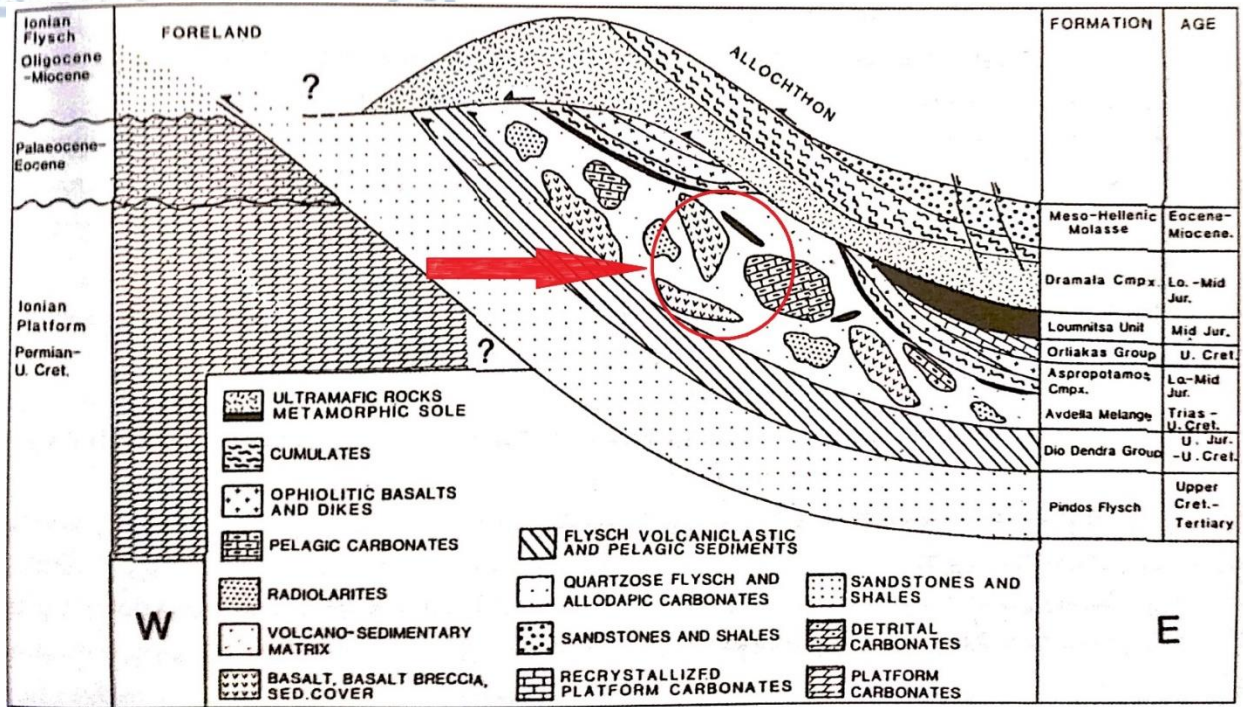
Εικόνα 2.1: Αντιπροσωπευτική λιθοστρωματογραφική στήλη της ζώνης Πίνδου με: 1) δολομίτες, 2) πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 3) αργιλοσαμμίτες, 4) ηφαιστειοϊζηματογενή, 5) κερατόλιθοι, 6) ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7) λατυποπαγή, 8) Ασβεστόλιθοι, 9) Φλύσχης Πίνδου (Μουντράκης, 2010)

2.1.2 Τεκτονική ευρύτερης περιοχής

Η ανάδυση των στρωμάτων της Πίνδου ολοκληρώθηκε κατά την τελική ορογένεση και πτύχωσή τους κατά το Ανώτερο Ηώκαινο-Κάτω Ολιγόκαινο, με την τελική σύγκρουση της Απουλίας πλάκας με την Ευρασία, από την οποία προέκυψαν ισχυρές συμπιεστικές τάσεις. Έτσι, η ζώνη της Πίνδου επωθήθηκε με τη μορφή τεκτονικού καλύμματος προς τα Δυτικά, επάνω στη ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης και εμφανίζει σε πολλά σημεία πάχος που ξεπερνά τα 100km. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της ζώνης της Πίνδου αποτελούν τα «Τεκτονικά Λέπια» της, τα οποία εμφανίζονται τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο με κατεύθυνση από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά δημιουργώντας συνεχείς επαναλήψεις και συσσώρευση του φλοιού.

Επάνω στα στρώματα της Πίνδου βρίσκονται τοποθετημένες οφειολιθικές μάζες, των οποίων η προέλευση αποτελεί ακόμη και σήμερα αναπάντητο ερώτημα. Πιθανολογείται πως προήλθαν από τον Δυτικό ωκεάνιο χώρο της Υποπελαγονικής και επωθήθηκαν επάνω στον δεύτερο φλύσχη της Πίνδου, μετά το τέλος της ιζηματογένεσής του, κατά τη διάρκεια της Τριτογενούς πτύχωσης.

Παρακάτω παρατίθεται σκαριφηματική τομή στην οποία φαίνεται η τοποθέτηση των οφειολιθικών μαζών επάνω στο δεύτερο φλύσχη της Πίνδου:

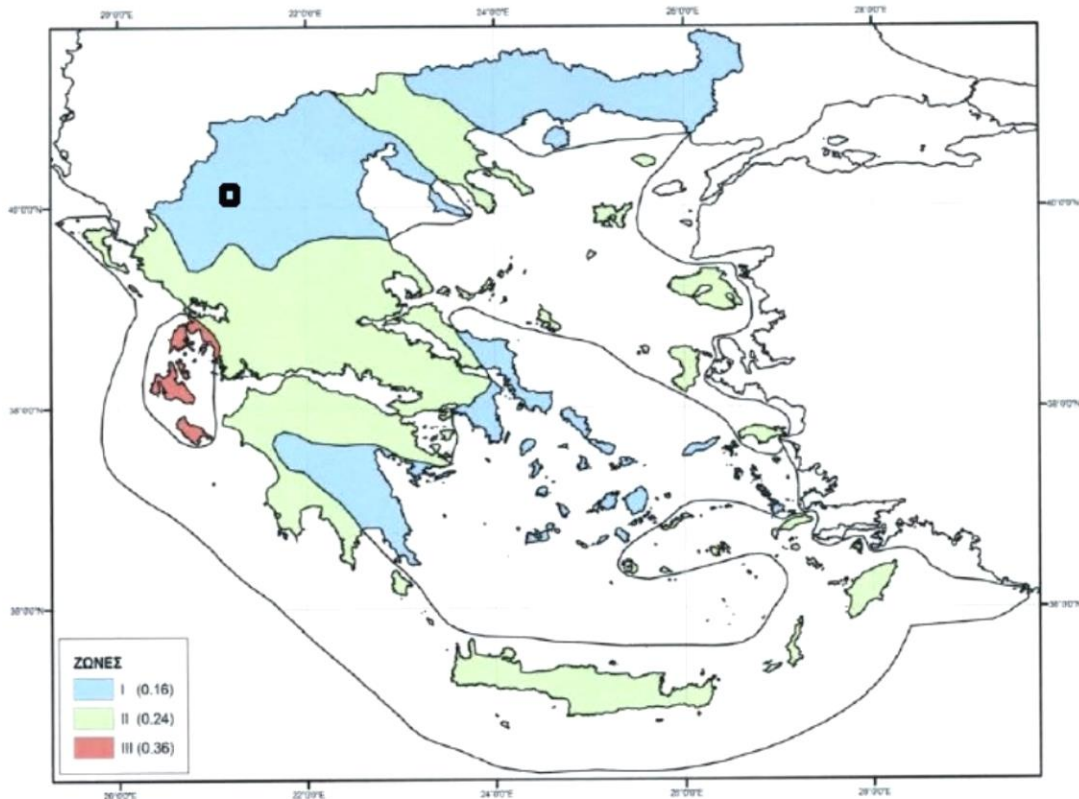


Εικόνα 2.2: Σκαριφηματική γεωλογική τομή στην οποία παρουσιάζεται η τοποθέτηση των οφειολιθικών μαζών επάνω στο δεύτερο φλύσχη της Πίνδου (Jones & Robertson, 1991).

2.1.3 Σεισμική επικινδυνότητα ευρύτερης περιοχής

Σύμφωνα με τον Ο.Α.Σ.Π (Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας) η Ελλάδα από το 2003 διαιρείται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας με τιμές ενεργής επιτάχυνσης 0.16g, 0.24g και 0.36g αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη, το Περιβόλι Γρεβενών ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας με συντελεστή 0.16g.

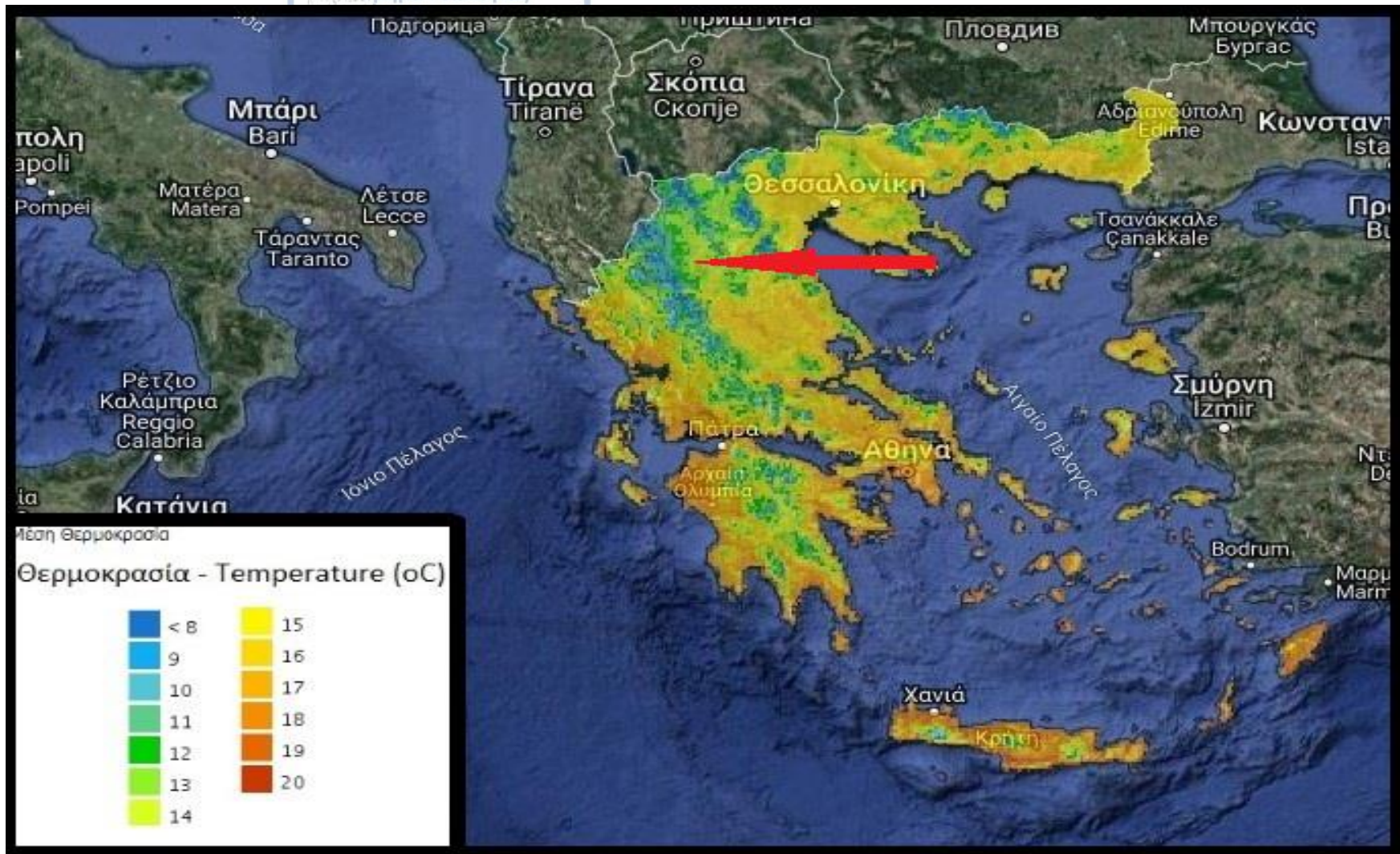
ΝΕΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ



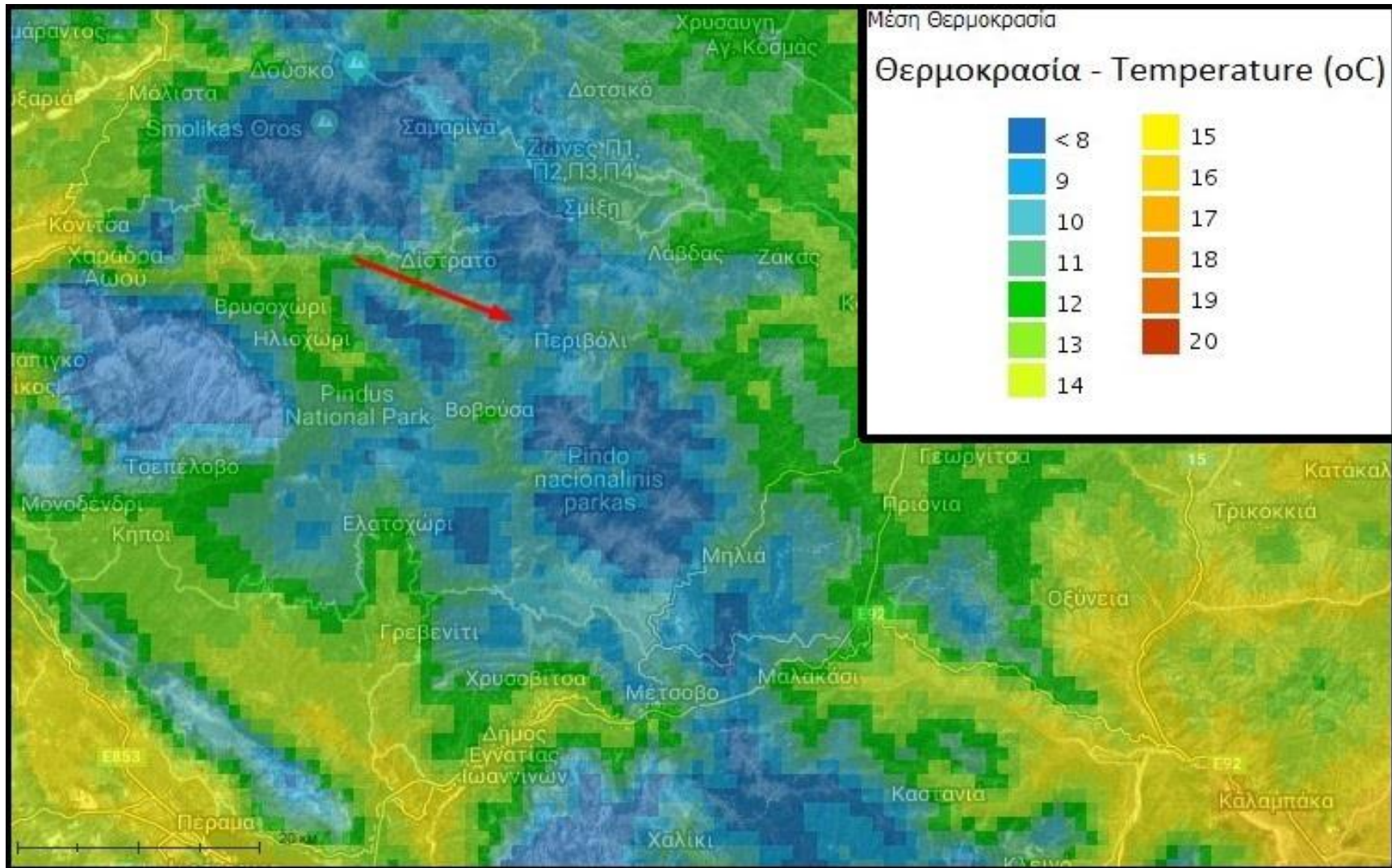
Εικόνα 2.3: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΟΑΣΠ, 2003). Το σημάδι που έχει τοποθετηθεί αποτελεί τη μελετούμενη περιοχή με συντελεστή ενεργής επιτάχυνσης 0.16g.

2.1.4 Μέση ετήσια θερμοκρασία περιοχής έρευνας

Μέσω της διαδραστικής εφαρμογής «Ατλαντας» της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας προκύπτει χάρτης ο οποίος παρουσιάζει τη μέση ετήσια θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου. Πιο συγκεκριμένα για το Περιβόλι Γρεβενών που αποτελεί την περιοχή μελέτης, η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 11 βαθμοί Κελσίου, όπως φαίνεται παρακάτω:



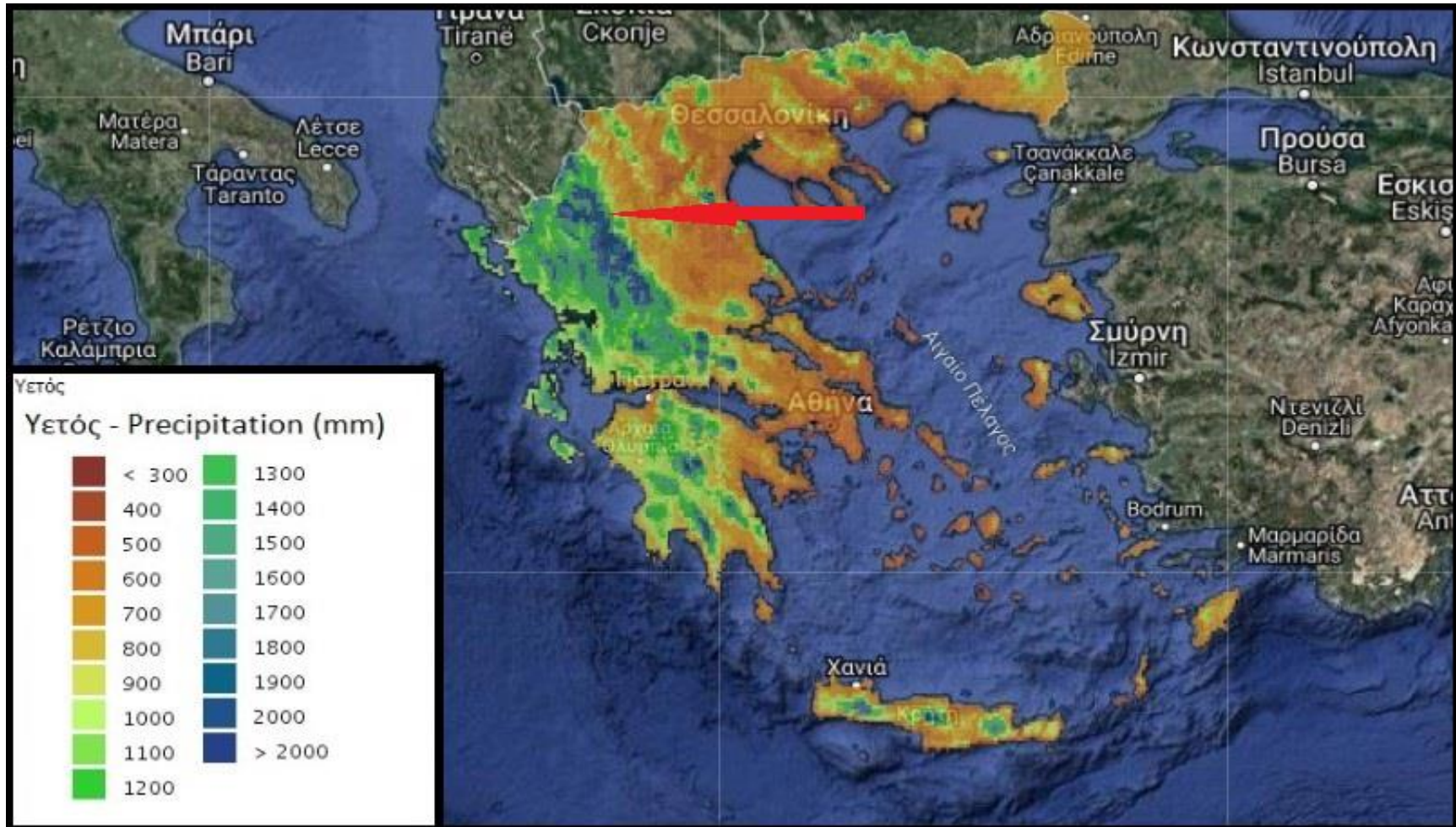
Εικόνα 2.4: Χάρτης μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Ελλάδα σε βαθμούς Κελσίου (Διαδραστική εφαρμογή «Ατλαντας», Ε.Μ.Υ).



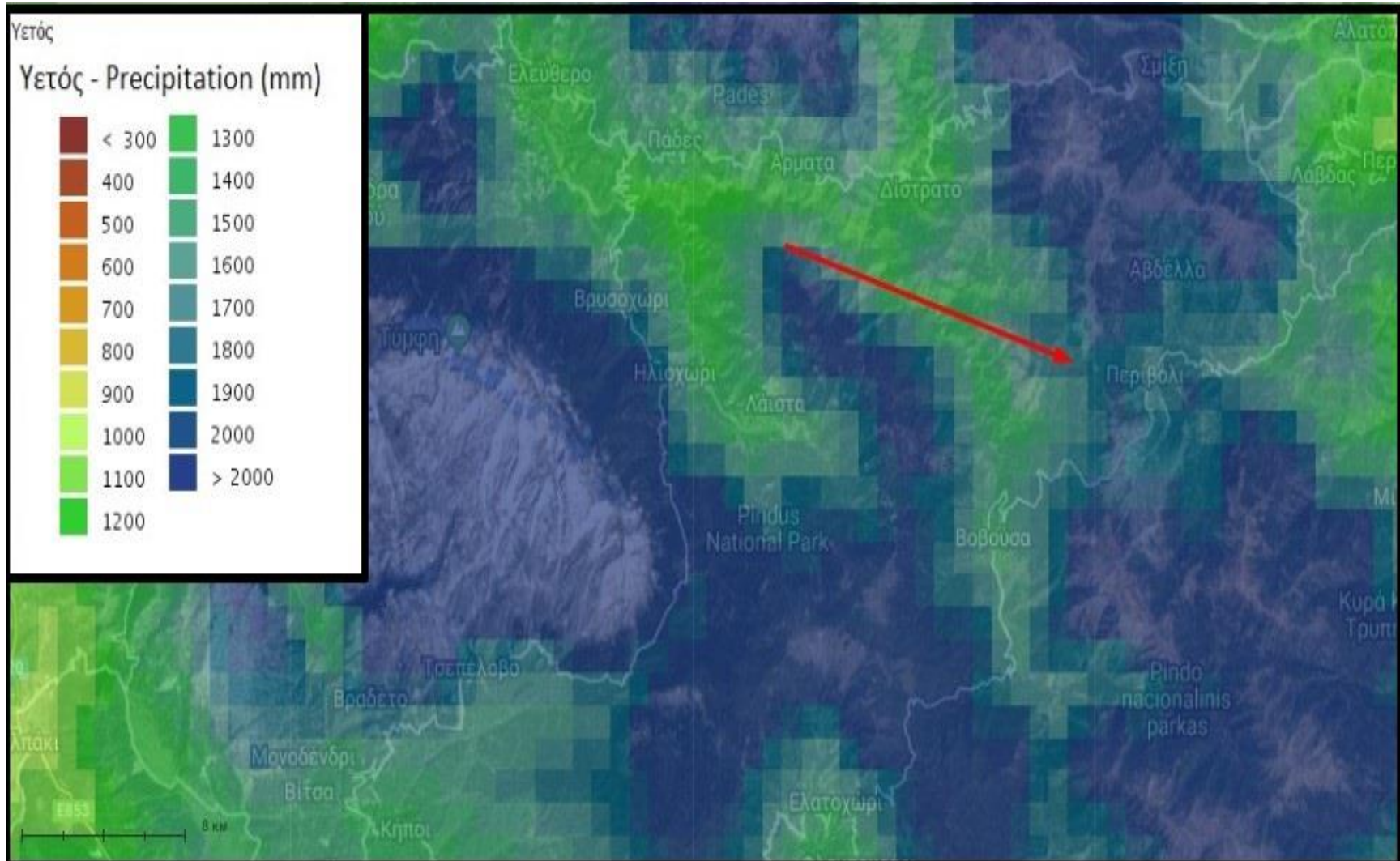
Εικόνα 2.5: Τμήμα της διαδραστικής εφαρμογής «Ατλαντας» όπου διακρίνεται το Περιβόλι Γρεβενών στο κόκκινο σημάδι, με μέση ετήσια θερμοκρασία τους 11 βαθμούς Κελσίου.

2.1.5 Μέση ετήσια βροχόπτωση περιοχής έρευνας

Οι διακυμάνσεις του νετού που αφορούν στην Ελλάδα παρακάτω. Για την περιοχή έρευνας προκύπτει από την εφαρμογή «Ατλαντας» της Ε.Μ.Υ., πως ο μέσος ετήσιος νετός στο Περιβόλι Γρεβενών είναι 1600-1700mm, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.6: Μέσος ετήσιος νετός στην Ελλάδα (Εφαρμογή «Ατλαντας», Ε.Μ.Υ.)



Εικόνα 2.7: Ο μέσος ετήσιος νετός στο Περιβόλι Γρεβενών (κόκκινο σημάδι) είναι 1600-1700mm (Εφαρμογή «Ατλαντας», Ε.Μ.Υ.).

3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

3.1 Γενικά για τις κατολισθήσεις

Στον όρο «κατολισθήσεις» (landslides) εμπεριέχονται οι ολισθήσεις, οι καταπτώσεις, οι ανατροπές και οι ροές εδαφών και βράχων, οι οποίες αποτελούν φαινόμενα που επηρεάζουν το ανάγλυφο της Γης και αποτελούν φυσικές καταστροφές. Διάφοροι εξωτερικοί παράγοντες όπως οι βροχοπτώσεις, οι σεισμοί αλλά και οι ηφαιστειακές εκρήξεις σε συνδυασμό πολλές φορές και με την αποσάθρωση και τη μείωση των μηχανικών αντοχών των σχηματισμών είναι οι λόγοι εκδήλωσης των κατολισθήσεων. Τα μεγέθη των κατολισθήσεων καθώς και η χρονική τους διάρκεια ποικίλλουν, από μεγάλης έντασης ραγδαία φαινόμενα έως μικρότερης έντασης και μεγαλύτερης διάρκειας.

3.1.1 Ορισμοί και συστήματα ταξινόμησης κατολισθήσεων

3.1.1.1 Ορισμοί κατολισθήσεων

Στην πάροδο του χρόνου πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με τις κατολισθήσεις και προσπάθησαν να δώσουν τον ορισμό του συγκεκριμένου φαινομένου. Παρακάτω παραθέτονται ορισμένοι από τους ορισμούς που έχουν προταθεί:

- Από τον Terzaghi (1950) η κατολίσθηση ορίζεται ως «μία γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και έξω»
- Από τους Zaruba και Mencl (1969) η κατολίσθηση ορίζεται ως «μία γρήγορη κίνηση πετρωμάτων που οφείλεται στην ολίσθηση ενός τμήματος πρανούς, το οποίο είναι διαχωρισμένο από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα, επάνω σε μία καθορισμένη επιφάνεια».
- Από τον Varnes (1978) η κατολίσθηση ορίζεται ως μία «μετακίνηση μαζών» ενός πρανούς, οι οποίες είναι είτε βράχος, είτε έδαφος ή συνδυασμός αυτών, που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Οι καθιζήσεις, οι χιονοστιβάδες και οι μετακινήσεις του πάγου δεν συμπεριλαμβάνονται στην έννοια αυτή.
- Από τον Cruden (1991) η κατολίσθηση ορίζεται ως «κίνηση μιας μάζας βράχου, εδάφους ή κορημάτων προς τα κατόντη του πρανούς».

Από το 1978 μέχρι σήμερα ισχύει ο ορισμός του Varnes περί των κατολισθήσεων αφού αποδίδει μία ευρύτερη έννοια από αυτή όπου η λέξη η ίδια υποδηλώνει (ΚΟΥΚΗΣ – ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ, 2007).

3.1.1.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Κατά καιρούς διάφοροι ερευνητές πρότειναν συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων με βάση ορισμένους παράγοντες που επιδρούν πριν, αλλά και κατά τη διάρκεια μιας κατολίσθησης. Ορισμένοι από τους παραπάνω παράγοντες είναι το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής, το είδος του υλικού που κατολισθαίνει, η περιεχόμενη υγρασία των σχηματισμών αλλά και του κατολισθαίνοντος υλικού, ο τύπος (κατάπτωση, ολίσθηση, ροή) και η ταχύτητα κίνησης, η μορφολογία του εδάφους, οι κλιματικές συνθήκες. Επομένως οι κατολισθήσεις αποτελούν ιδιαίτερα πολύπλοκα συστήματα και η πληρέστερη ταξινόμησή τους απαιτεί το συνδυασμό όσο το δυνατόν περισσότερων παραγόντων που την χαρακτηρίζουν.

Τα πρώτα συστήματα ταξινόμησης προτάθηκαν από τους Sharpe (1939) και Varnes (1958) τα οποία είχαν ως βασικές παραμέτρους τις εξής:

- Τον τύπο της μετακίνησης
- Την ταχύτητα της μετακίνησης
- Το είδος του υλικού
- Την περιεχόμενη υγρασία

Οι Zaruba (1969) και Mencl (1976) στη συνέχεια διέκριναν τέσσερις κατηγορίες μετακίνησης πρανών ανάλογα με τη σύνθεση των κατολισθέντων υλικών αλλά και τον τύπο κίνησης, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (3.1):

| ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ | ΕΙΔΟΣ |
|---|---|
| Μετακινήσεις επιφανειακών αποθέσεων | Ερπυσμός κορημάτων και κάμψη της κεφαλής των στρωμάτων |
| | Ολισθήσεις κορημάτων και μανδύα αποσάθρωσης |
| | Ροές γαιών |
| Μετακινήσεις στα αργιλικά εδάφη και πετρώματα | Ολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης |
| | Ολισθήσεις κατά μήκος σύνθετων επιφανειών ολίσθησης |
| | Μετακίνηση πρανών από σύνθλιψη μαλακών πετρωμάτων |
| Μετακινήσεις συμπαγών πετρωμάτων | Ολισθήσεις βράχων κατά μήκος προκαθορισμένων επιφανειών |
| | Ολισθήσεις βαρύτητας |
| | Πτώσεις βράχων |
| Ειδικοί τύποι μετακίνησης | Εδαφική ροή λόγω παγετού |
| | Ολισθήσεις σε ευαίσθητες αργίλους |
| | Υποθαλάσσιες ολισθήσεις |

Πίνακας 3.1: Η ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Zaruba και Mencl (1976). (ΚΟΥΚΗΣ – ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ, 2007).

Ο Erskine (1973) ταξινομήσε τις κατολισθήσεις με βάση την ενεργότητά τους και τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν σε τεχνικά έργα. Έτσι προέκυψαν οι εξής κατηγορίες:

- Σταθεροποιημένες κατολισθήσεις
- Πρόσφατα ενεργές κατολισθήσεις
- Κατολισθήσεις που έδρασαν πρόσφατα
- Ενεργές κατολισθήσεις

3.1.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)

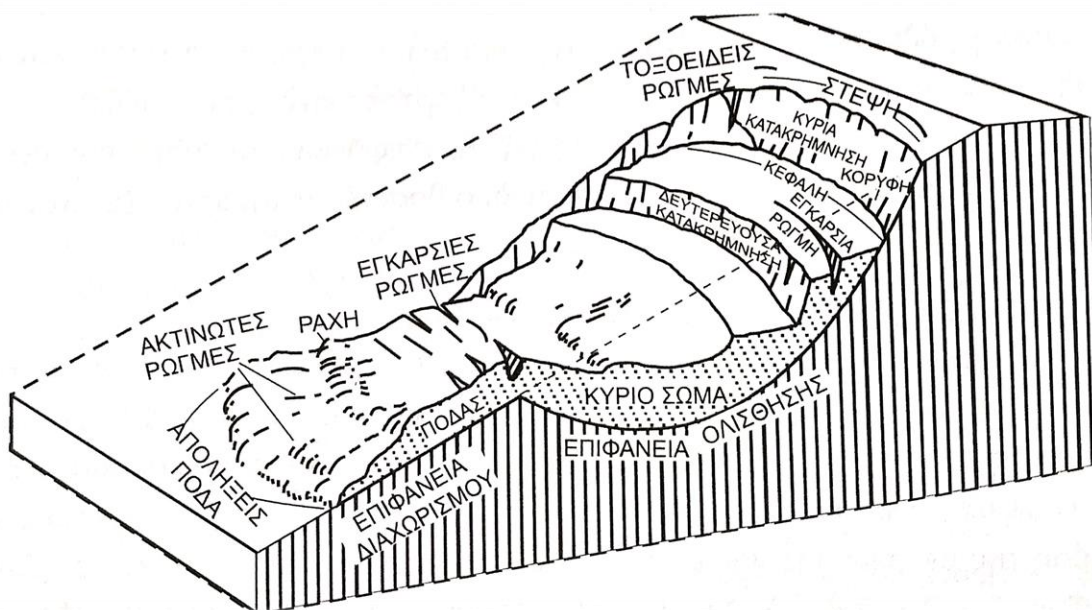
Η ταξινόμηση κατολισθήσεων που πρότείνει ο Varnes (1978) αποτελεί το πλέον πιο αποδεκτό και διαδεδομένο σύστημα σε διεθνές επίπεδο, χρησιμοποιώντας ως βασικές παραμέτρους ταξινόμησης αρχικά τον τύπο της μετακίνησης και στη συνέχεια το είδος του μετακινούμενου υλικού. Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά το σύστημα ταξινόμησης στον Πίνακα 3.2.

| Τύπος Κίνησης | | Τύπος Μετακινούμενου Υλικού | | |
|-------------------|--------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| | | Βραχώδες Υποβάθρο | Μηχανικά Εδάφη | |
| | | | Αδρόκοκκα | Λεπτόκοκκα |
| Κατάπτωση | | Κατάπτωση βράχων | Κατάπτωση κορημάτων | Κατάπτωση γαιών |
| Ανατροπή | | Ανατροπή βράχων | Ανατροπή κορημάτων | Ανατροπή γαιών |
| Ολίσθηση | Περιστροφική | Περιστροφική ολίσθηση υποβάθρου | Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων | Περιστροφική ολίσθηση γαιών |
| | Μεταθετική | Μεταθετική ολίσθηση υποβάθρου | Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων | Μεταθετική ολίσθηση γαιών |
| Πλευρική Εξάπλωση | | Πλευρική εξάπλωση υποβάθρου | Πλευρική εξάπλωση κορημάτων | Πλευρική εξάπλωση γαιών |
| Ροή | | Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός) | Ροή κορημάτων | Ροή γαιών |
| | | | Ερπυσμός εδάφους | |
| Σύνθετη | | Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων | | |

Πίνακας 3.2: Το σύστημα ταξινόμησης κατά Varnes (1978).

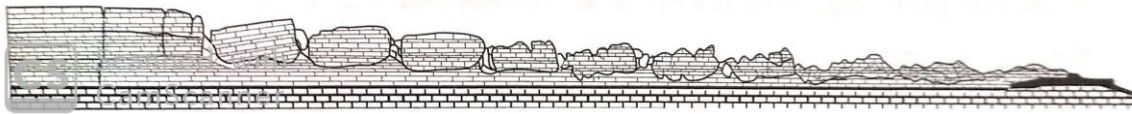
Παρακάτω ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση της κάθε κατηγορίας κατολίσθησης που προκύπτει από την ταξινόμηση κατά Varnes (1978) με παράλληλη σχηματική απεικόνιση στο Σχήμα 1:

- Καταπτώσεις (Falls): Πρόκειται για κινήσεις βραχωδών ή συνεκτικών εδαφικών μαζών κατά μήκος απότομου πρानούς, με μικρή ή καθόλου διατμητική μετατόπιση και μεγάλη ταχύτητα μετακίνησης. Η πτώση των μαζών γίνεται ελεύθερα, με αναπήδηση ή κύλιση.
- Ανατροπές (Topples): Πρόκειται για κινήσεις συνήθως βραχωδών μαζών προς τα έξω, γύρω από ένα σημείο ή έναν άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα του κέντρου βάρους τους. Η βαρύτητα και η γεωμετρία του πρानούς έχουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη τους και η ταχύτητα μετακίνησης μπορεί να είναι μικρή στα πρώτα στάδια εκδήλωσης και να εξελιχθεί σε εξαιρετικά γρήγορη.
- Περιστροφικές Ολισθήσεις (Rotational Slides): Πρόκειται για κινήσεις κατά μήκος κοίλων επιφανειών. Το ανώτερο τμήμα της κατολισθαίνουσας μάζας κινείται σχεδόν κατακόρυφα προς τα κάτω. Στο κατώτερο τμήμα της συνήθως παρατηρείται ανύψωση (Σχήμα 2).



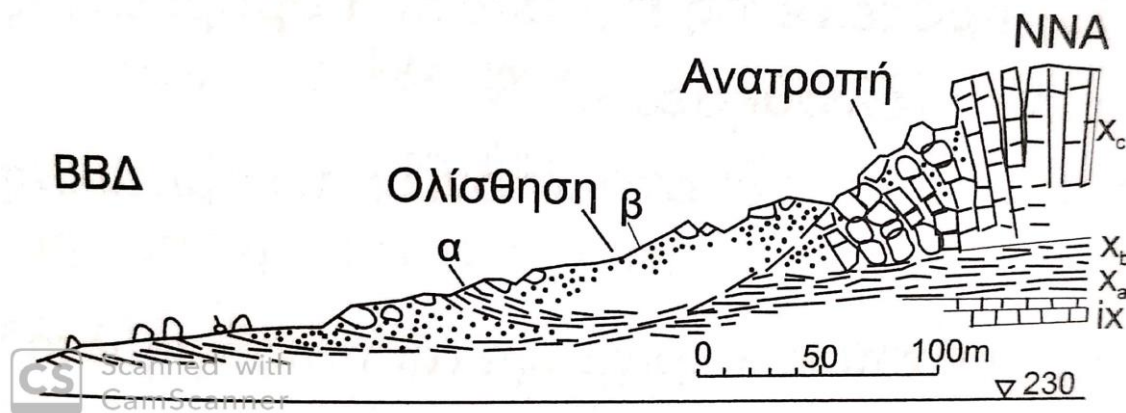
Σχήμα 3.1: Ιδεατό μοντέλο μιας περιστροφικής ολίσθησης κατά Varnes (1978) (Από ΚΟΥΚΗΣ – ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ, 2007)

- Μεταθετικές Ολισθήσεις (Translation Slides): Πρόκειται για κίνηση μαζών σε επιφάνειες παράλληλες ή υποπαράλληλες με αυτή του πρानούς, ομαλής ή κυματοειδούς μορφής.
- Πλευρικές Εξαπλώσεις (Lateral Spreads): Πρόκειται για πλευρική εξάπλωση βραχωδών ή εδαφικών υλικών λόγω διατμητικών ρωγμών και ρευστοποίησης του υποκείμενου υλικού (Σχήμα 3).




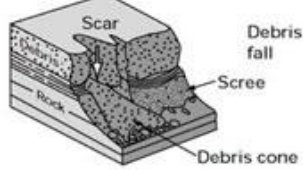
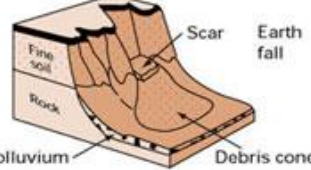

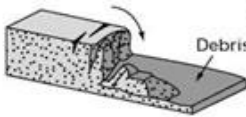
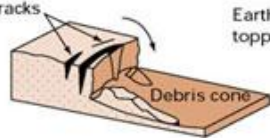

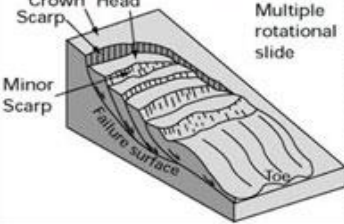

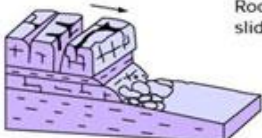
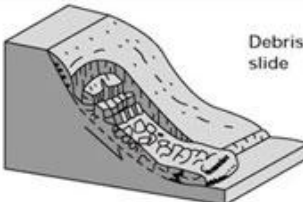
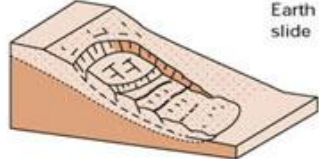
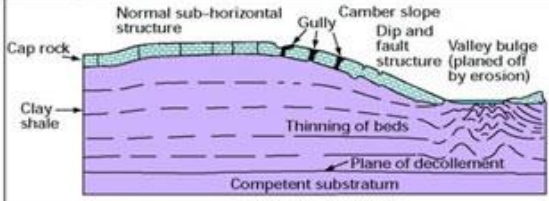

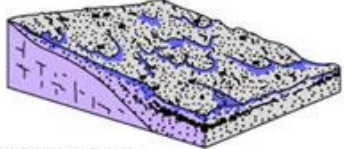



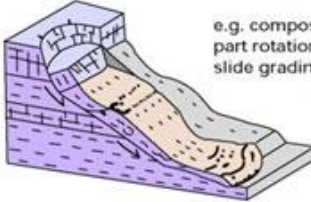
Σχήμα 3.2: Πλευρική εξάπλωση διαρρηγμένων ασβεστολίθων με υποκείμενους μαλακότερους σχηματισμούς (Varnes 1978).

- Ροές (Flows): Πρόκειται για κινήσεις που συναντώνται συνήθως σε εδαφικούς σχηματισμούς, με ή χωρίς περιεχόμενη υγρασία. Ο τρόπος και ο ρυθμός μετακίνησης θυμίζει την κίνηση ρευστών υψηλού ιξώδους και η κατολισθαίνουσα μάζα υφίσταται έντονες παραμορφώσεις.
- Σύνθετες Μετακινήσεις Πρανών (Composite Slides): Πρόκειται για ολίσθηση μαζών η οποία είναι αποτέλεσμα της παράλληλης δράσης δύο ή περισσότερων τύπων κατολίσθησης είτε στις ίδιες κατολισθαίνουσες μάζες, είτε σε διαφορετικά σημεία αυτών.



Σχήμα 3.3: Περίπτωση σύνθετης ολίσθησης με περιστροφική ολίσθηση και ανατροπές βραχωδών τεμαχών (Από ΚΟΥΚΗΣ – ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ, 2007).

Στο σχήμα 1 που ακολουθεί απεικονίζονται όλες οι κατηγορίες κατολίσθησης κατα Varnes (1978):

| Material | | ROCK | DEBRIS | EARTH |
|---------------|------------------------|---|--|--|
| Movement type | | | | |
| FALLS | |  Rock fall |  Debris fall Scree Debris cone |  Earth fall Scar Colluvium Debris cone |
| | |  Rock topple |  Debris topple Debris cone |  Earth topple Cracks Debris cone |
| SLIDES | Rotational |  Single rotational slide (slump) Failure surface |  Multiple rotational slide Crown Scarp Head Minor Scarp Failure surface Toe |  Successive rotational slides |
| | Translational (Planar) |  Rock slide |  Debris slide |  Earth slide |
| SPREADS | |  Normal sub-horizontal structure Cap rock Clay shale Thinning of beds Plane of decollement Competent substratum Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planed off by erosion) | e.g. cambering and valley bulging |  Earth spread |
| FLOWS | |  Solifluction flows (Periglacial debris flows) |  Debris flow |  Earth flow (mud flow) |
| COMPLEX | |  e.g. Slump-earthflow with rockfall debris |  e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe | |

Σχήμα 3.4 : Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ταξινόμησης κατολισθήσεων κατά Varnes (1978), (Πηγή: www.bgs.ac.uk)

3.2 Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των κυριότερων γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας

3.2.1 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη

Ο φλύσχη αποτελείται από κλαστικά ιζήματα που αποθέτονται τελευταία σε μία ιζηματογενή λεκάνη πριν την έναρξη της ορογένεσής της, διαδικασία που περιλαμβάνει έντονη πτύχωση και ρωγμάτωση του, μειώνοντας έτσι τις μηχανικές αντοχές του ίδιου του σχηματισμού. Αποτελείται κυρίως από εναλλαγές στρώσεων ψαμμίτη και λεπτόκοκκων πηλιτικών υλικών καθώς και κροκαλοπαγών ή και ασβεστολιθικών στρώσεων. Οι αναλογίες ψαμμιτικών και πηλιτικών οριζόντων διαφοροποιούνται ανάλογα με τις τουρβιδιτικές ροές κατά την περίοδο σχηματισμού του. Το πάχος των φλυσχικών σχηματισμών μπορεί να είναι από μερικές εκατοντάδες έως και χιλιάδες μέτρα και οι λιθολογικοί τύποι να ποικίλλουν. Στον Ελλαδικό χώρο φλύσχη συναντάται σε πολλές γεωλογικές ενότητες όπως η Ιόνιος ζώνη, η ζώνη Παρνασσού, Γαβρόβου-Τρίπολης και φυσικά η Πίνδος, στην οποία βρίσκεται η περιοχή μελέτης.

3.2.1.1 Κατηγορίες φλύσχη

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση του φλύσχη σε σχέση με την αναλογία ψαμμίτη-ιλυόλιθου (B.Μαρίνος, 2007):

- **Ιλυόλιθοι:** Τύπος φλύσχη αποτελούμενου κατά 80% έως 90% από ιλυόλιθους σε στρώματα μικρού έως μεσαίου πάχους (5cm έως 30cm) με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών μικρού πάχους και σπάνιες ενστρώσεις κροκαλοπαγών. Σε περιοχές με έντονη τεκτονική δράση οι ιλυόλιθοι εμφανίζονται καταπονημένοι και εύθρυπτοι καθώς αποτελούν την πιο ασθενή φάση του φλύσχη και σε επιφανειακές συνθήκες είναι ευαίσθητοι στην αποσάθρωση και τη διάβρωση καθώς μεταπίπτουν σε χαλαρή μάζα από μικρά επιμήκη γωνιώδη θραύσματα (απόσχιση σε φυλλάρια – slaking). Οι υγιείς ιλυόλιθοι μπορεί να μην εμφανίζουν στρωσιγένεια, η οποία γίνεται ορατή και εκτονώνεται σε επιφανειακές συνθήκες.
- **Ιλυόλιθοι με ενστρώσεις ψαμμιτών:** Τύπος φλύσχη που αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων με ποσοστό ιλυολίθων 60% έως 80%. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι ιλυόλιθοι αναπτύσσονται σε στρώσεις μικρού πάχους στις οποίες παρεμβάλλονται οι ψαμμιτικοί οριζόντες των οποίων το πάχος είναι συνήθως 5cm με 15cm.
- **Εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών:** Τύπος φλύσχη στον οποίο εμφανίζονται σε ίσες αναλογίες οι ιλυολιθικοί και ψαμμιτικοί οριζόντες πάχους από 5cm έως 50cm σε εναλλαγές. Πιθανή είναι και η ύπαρξη κροκαλοπαγών ως μεμονωμένες ενστρώσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως στο συγκεκριμένο λιθολογικό τύπο παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις στις αντοχές των μελών του φλύσχη, καθώς ο ψαμμίτης ως πιο ψαθυρό υλικό εμφανίζει διατμήσεις ενώ ο ιλυόλιθος συμπεριφέρεται πιο πλαστικά. Έτσι, ανάλογα με το βαθμό καταπόνησης του εκάστοτε σχηματισμού, διαφοροποιείται και η συμπεριφορά των μελών.



- Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων: Τύπος φλύσχη αποτελούμενου κατά 50% έως 80% από ψαμμιτικούς ορίζοντες πάχους από 5cm έως 50cm. Οι ιλυόλιθοι είναι λεπτοστρωματώδεις και μαζί με τους ψαμμίτες παρουσιάζουν καλά διαμορφωμένες επιφάνειες στρώσης και μεγάλη ανάπτυξη.

- Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με αραιές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων: Τύπος φλύσχη αποτελούμενου κατά 80% με 90% από ψαμμίτες μεσαίου έως μεγάλου πάχους και τοπικά άστρωτους. Το πάχος τους μπορεί να φτάσει έως και τα 10m. Οι ιλυόλιθοι εμφανίζονται με τη μορφή λεπτών ενστρώσεων που δεν ξεπερνούν τα 20cm. Αξίζει να σημειωθεί πως σε αυτό το λιθολογικό τύπο υπάρχει πιθανότητα ύπαρξης μεμονωμένων ιλυολιθικών ζωνών πάχους από 1m έως 8m. Οι ψαμμίτες μέσω της κίνησης ή και απλώς της ύπαρξης νερού εντός των ασυνεχειών τους αποσαθρώνονται σφαιρικά, αποκολλώνται από τους ιλυόλιθους και μετατρέπονται σε ασύνδετους ογκόλιθους σε επιφανειακές συνθήκες (3m έως 5m) οι οποίοι μπορεί να γλιστρήσουν επάνω στα λεπτά ιλυολιθικά στρώματα.

- Κροκαλοπαγείς – μικροκροκαλοπαγείς σχηματισμοί: Τύπος φλύσχη που αποτελείται από άστρωτους σχηματισμούς που περιέχουν κροκάλες μεγέθους από 10cm έως και αδρόκοκκη άμμο. Λόγω διαφοροποίησης του συγκολλητικού υλικού μπορεί να είναι από χαλαροί σχηματισμοί έως και πολύ σκληροί. Δεν εμφανίζουν στρώση και η ύπαρξη ασυνεχειών είναι περιορισμένη.

Παρακάτω παραθέτονται πίνακες με τους λιθότυπους του φλύσχη συγκεντρωτικά (Πίνακας 3.5) και τον δείκτη τιμών GSI για τους συγκεκριμένους λιθότυπους σε συνάρτηση με την ποιότητα των ασυνεχειών τους (Πίνακας 3.6).



Τύπος I. Αδιατάρακτος μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου



Τύπος II. Αδιατάρακτος ιλυόλιθος με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη



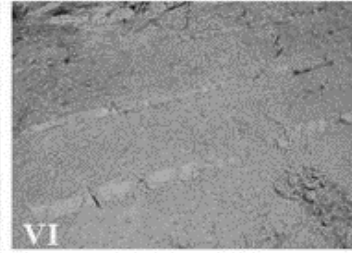
Τύπος III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου



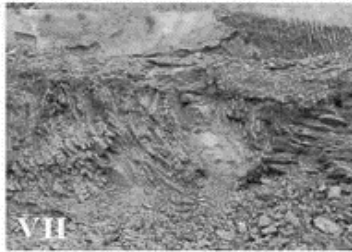
Τύπος IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαζα αποτελούμενη από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες



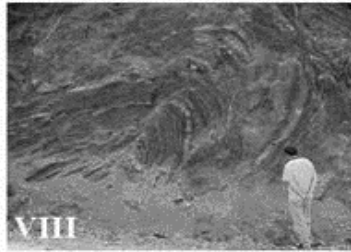
Τύπος V. Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαζα αποτελούμενη από ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη



Τύπος VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραιές λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη



Τύπος VII. Έντονα διαταραγμένη – πτυχωμένη βραχώμαζα η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη – ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες



Τύπος VIII. Έντονα διαταραγμένη – πτυχωμένη βραχώμαζα η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί – διατηρείται σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται κυρίως από ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη



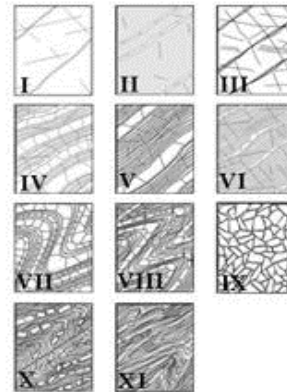
Τύπος IX. Αποδιοργανωμένη – Κατακερματισμένη βραχώμαζα



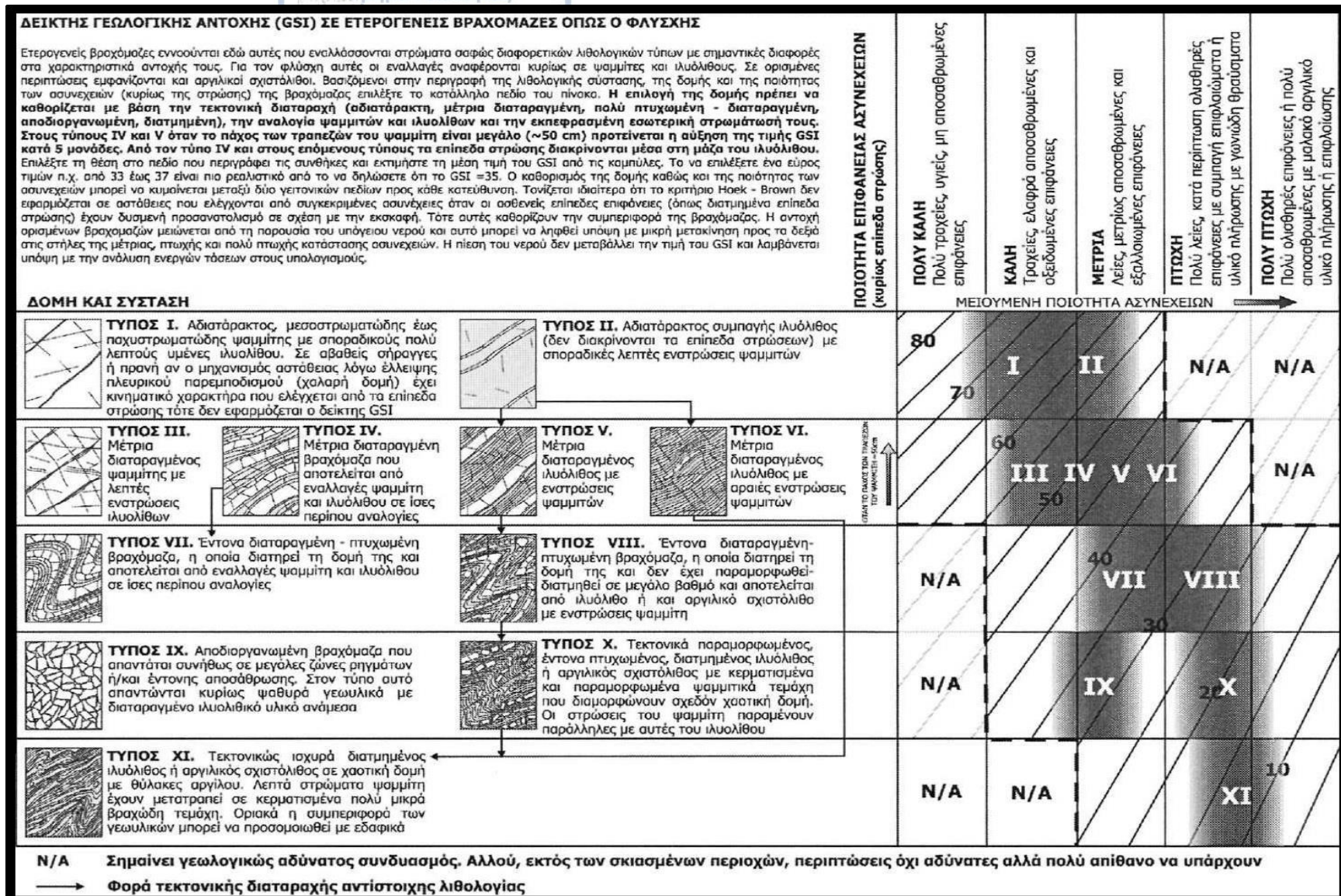
Τύπος X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, ρηγματωμένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια τα οποία διαμορφώνουν σχεδόν χαστική δομή



Τύπος XI. Τεκτονικώς έντονα διατηρημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαστική δομή με θύλακες αργίλου



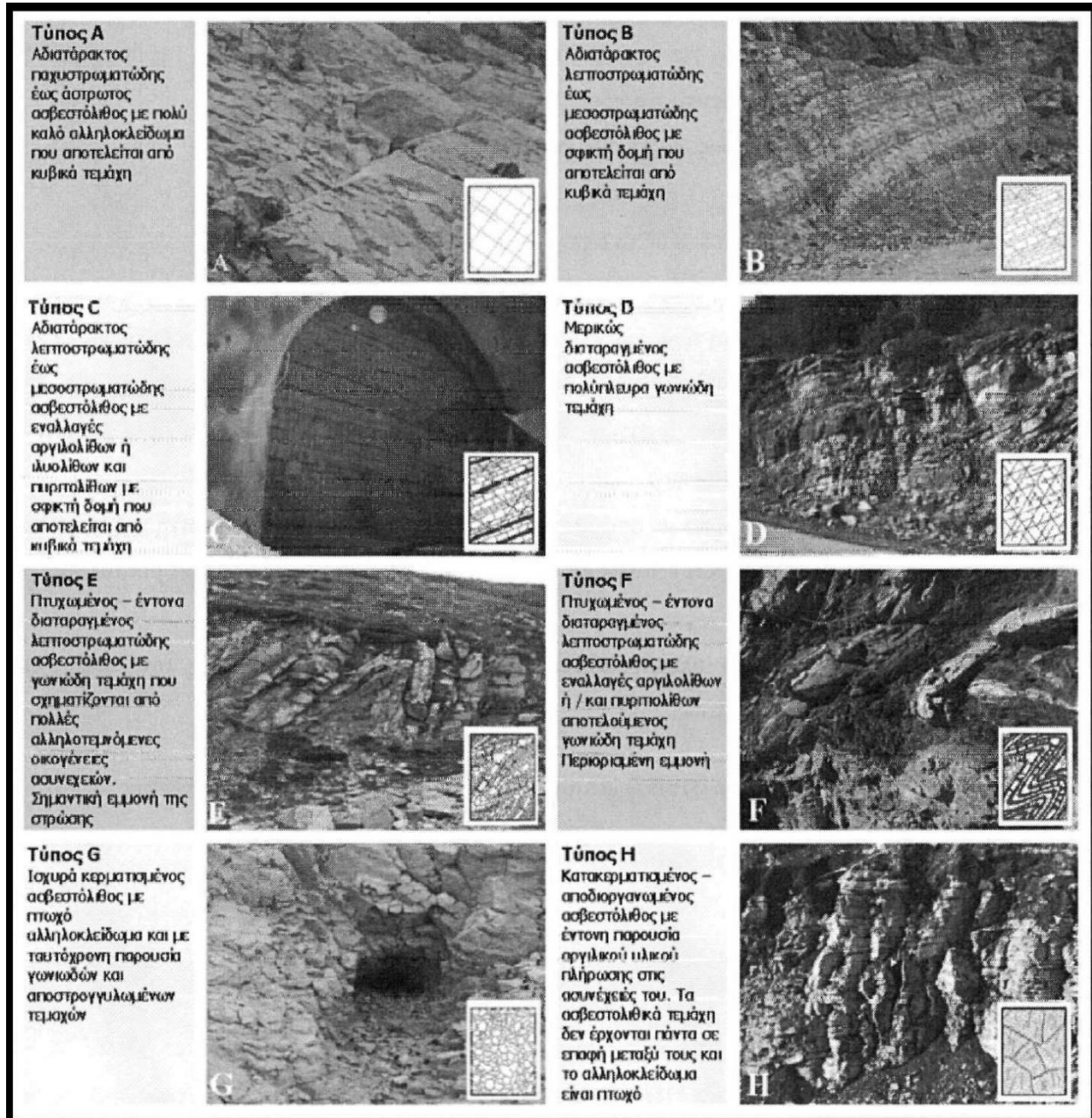
Πίνακας 3.5: Οι λιθότυποι στους οποίους διακρίνεται ο φλύσχος (B.Μαρίνος, 2007).



Πίνακας 3.6: Δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI σε ετερογενείς βραχομάζες όπως ο φλύσχος (B.Μαρίνος, 2007). Ο τύπος VI συναντάται στην περιοχή έρευνας.

3.2.2 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά κατακερματισμένων ασβεστολίθων

Οι κατακερματισμένοι ασβεστόλιθοι συναντώνται σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονο τεκτονισμό και δράση ρηγμάτων. Αποτελούν αποδιοργανωμένες δομές των αρχικών ασβεστολίθων οι οποίοι μετά από την έντονη τεκτονική καταπόνηση μεταπίπτουν σε σχηματισμούς με μειωμένες μηχανικές αντοχές. Συχνά παρατηρείται παρουσία ιλσοαργιλικών υλικών εντός των ασυνεχειών των ασβεστολίθων, τα οποία ταπεινώνουν τη γωνία τριβής και οδηγούν σε ολισθήσεις. Παρακάτω παραθέτονται πίνακες με την τεχνικογεωλογική ταξινόμηση των ασβεστολίθων (Πίνακας 3.7) και ο Πίνακας 3.8 που περιλαμβάνει το διάγραμμα GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες με ή χωρίς εναλλαγές ιλυολίθων και αργιολίθων (B.Μαρίνος, 2007).


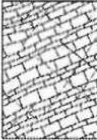
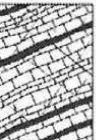







Πίνακας 3.7: Τεχνικογεωλογικοί τύποι ασβεστολιθικής βραχομάζας (B.Μαρίνος, 2007).

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΓΙΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ

Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώμαζας επιλέξτε το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Επιλέξτε τη θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών π.χ. από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας (προσοχή λοιπόν στους τύπους B και C). Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.

ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ

| | | |
|---|---|--|
|  <p>ΤΥΠΟΣ Α. Αδιατάρακτος παχυστρωματώδης έως άστρωτος ασβεστόλιθος με πολύ καλό αλληλοκλειδώμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες</p> |  <p>ΤΥΠΟΣ Β. Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης έως μεσοστρωματώδης ασβεστόλιθος με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις (μια με την στρώση) ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm έως λίγων dm</p> |  <p>ΤΥΠΟΣ C. Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης έως μεσοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές αργιολιθών ή ιλιολιθών και πυριτολιθών με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις (μια με την στρώση) ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm έως λίγων dm</p> |
|  <p>ΤΥΠΟΣ D. Μερικώς διαταραγμένος ασβεστόλιθος με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p> | | |
|  <p>ΤΥΠΟΣ Ε. Πτυχωμένος - έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή της στρώσης</p> |  <p>ΤΥΠΟΣ F. Πτυχωμένος - έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές αργιολιθών ή/και πυριτολιθών αποτελούμενος από γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Δομή ανοικτή λόγω της μη αλληλεμπλοκής των τεμαχίων και περιορισμένη εμμονή</p> | |
|  <p>ΤΥΠΟΣ Γ. Ισχυρά κερματισμένος ασβεστόλιθος με πτωχό αλληλοκλειδώμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγγυλωμένων τεμαχίων</p> |  <p>ΤΥΠΟΣ Η. Κατακερματισμένος - αποδιοργανωμένος ασβεστόλιθος με έντονη παρουσία αργιλικού υλικού πλήρωσης στις ασυνέχειες του. Τα ασβεστολιθικά τεμάχια δεν έρχονται πάντα σε επαφή μεταξύ τους με αποτέλεσμα το αλληλοκλειδώμα να είναι πολύ πτωχό. Η βραχώμαζα αυτή απαντάται συνήθως σε ζώνες μικρού πάχους σε περιοχές επιπτώσεων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)</p> | |

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ
(κυρίως επίπεδα στρώσης)

ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες

ΚΑΛΗ
Τραχιές, ελαφρώς αποσπασθαιμένες και οξειδωμένες επιφάνειες

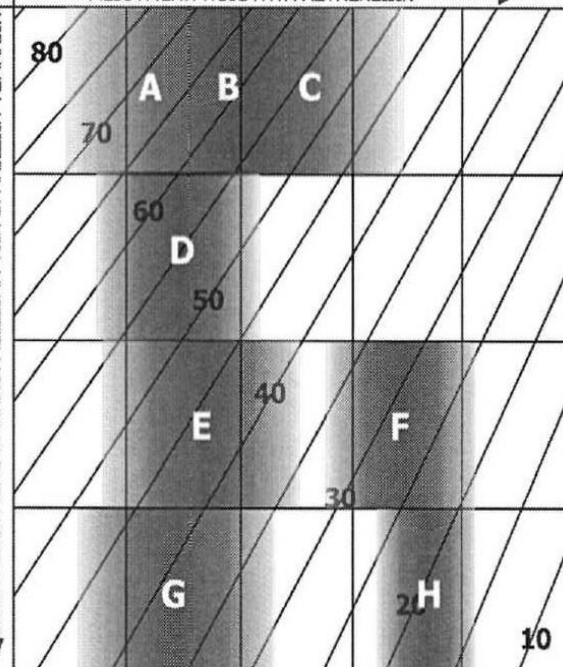
ΜΕΤΡΙΑ
Λείες, μετρίως αποσπασθαιμένες και εξηλωμένες επιφάνειες

ΠΤΩΧΗ
Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα

ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοιώσης

ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →

ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΝΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ↓



Πίνακας 3.8: Διάγραμμα GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες με ή χωρίς εναλλαγές ιλυολιθών ή αργιολιθών (B.Μαρίνος, 2007). Οι τύποι D και F συναντώνται στην περιοχή έρευνας.

3.2.2.1 Ταξινόμηση ανά τύπο ασβεστολιθικής βραχομάζας

Οι ασβεστόλιθοι χωρίζονται σε λιθότυπους με βάση τα τεχνικογεωλογικά τους χαρακτηριστικά (Β.Μαρίνος, 2007). Παρακάτω γίνεται περιγραφή ανά τύπο ασβεστολιθικής βραχομάζας:

- Τύπος Α: Αποτελείται από αδιατάρακτους παχυστρωματώδεις έως άστρωτους ασβεστόλιθους με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα. Οι ασυνέχειες που διατρέχουν τους σχηματισμούς ορίζουν κυβικά τεμάχη. Οι τιμές GSI καθορίζονται και από την ποιότητα των ασυνεχειών αλλά διατηρούνται σε σχετικά υψηλά επίπεδα ($GSI > 60$).
- Τύπος Β: Αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθους αποτελούμενος από κυβικά τεμάχη που ορίζονται από οικογένειες ασυνεχειών που τέμνονται κάθετα (στρώση και δύο ακόμη). Οι λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι οι οποίοι δεν έχουν υποστεί τεκτονισμό εμφανίζονται συνήθως με πολύ σφιχτή δομή ειδικά σε μεγάλο βάθος αλλά και μετά τα πρώτα μέτρα της επιφανειακής χαλάρωσης. Οι τιμές GSI κυμαίνονται από 55 έως και 65.
- Τύπος C: Πρόκειται για αδιατάρακτους λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθους με εναλλαγές ιλυολίθων ή αργιολίθων πυριτολίθων. Αποτελούνται από κυβικά τεμάχη που ορίζονται από οικογένειες ασυνεχειών ορθογωνίως τεμνόμενες. Λόγω της παρουσίας των αργιολίθων ή ιλυολίθων και των πυριτολίθων τα ασβεστολιθικά τεμάχη μπορεί να ολισθαίνουν ευκολότερα επάνω στις ασυνέχειες, των οποίων η ποιότητα χαρακτηρίζεται «Μέτρια» έως «Πτωχή» λόγω της λείας και ολισθηρής φύσης των ιλυοαργιλικών στρωμάτων. Οι τιμές του GSI στον συγκεκριμένο λιθότυπο κυμαίνονται από 40 έως και 55.
- Τύπος D: Πρόκειται για μερικώς διαταραγμένους ασβεστόλιθους οι οποίοι αποτελούνται από πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχη που σχηματίζουν τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών, τεμνόμενες μεταξύ τους. Τα βραχώδη τεμάχη εμφανίζουν συνήθως σχετικά καλό αλληλοκλείδωμα και η ποιότητα των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται «Μέτρια» έως «Καλή». Οι τιμές GSI κυμαίνονται από 50 έως 60.
- Τύπος E: Στο συγκεκριμένο λιθότυπο ανήκουν οι πτυχωμένοι και έντονα διαταραγμένοι λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι με γωνιώδη τεμάχη τα οποία δημιουργούνται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Η στρώση εμφανίζει εμμόνη, η ποιότητα των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται από «Μέτρια» έως «Καλή» και οι τιμές GSI κυμαίνονται από 35 έως 50.



- Τύπος F: Αποτελείται από πτυχωμένους και έντονα διαταραγμένους λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους με εναλλαγές αργιολίθων ή/και πυριτολίθων. Λόγω των πολλών αλληλοτεμνόμενων οικογενειών ασυνεχειών σχηματίζονται γωνιώδη τεμάχη. Η στρώση των σχηματισμών δεν παρουσιάζει μεγάλη εμμονή και οι ασυνέχειες είναι λείες και ολισθηρές κατά περίπτωση λόγω της παρουσίας των ιλυοαργιλικών υλικών που χαρακτηρίζονται από μεγάλη πλαστικότητα και ταπεινώνουν τη γωνία τριβής. Οι τιμές GSI για το συγκεκριμένο λιθότυπο κυμαίνονται από 20 έως 35.

- Τύπος G: Πρόκειται για ισχυρά κερματισμένους και αποδιοργανωμένους ασβεστόλιθους με πάρα πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών οι οποίες δημιουργούν μικρά γωνιώδη και αποστρογγυλεμένα τεμάχη με σχετικά πτωχό αλληλοκλείδωμα. Ανάλογα με την ποιότητα των ασυνεχειών οι οποία μπορεί να χαρακτηρίζεται από «Μέτρια» έως «Καλή», οι τιμές GSI κυμαίνονται από 35 έως 50.

- Τύπος H: Αποτελείται από κατακερματισμένους και αποδιοργανωμένους ασβεστόλιθους οι οποίοι στις ασυνέχειες τους περιέχουν αργιλικό υλικό πλήρωσης. Ο συγκεκριμένος λιθότυπος χαρακτηρίζεται από πολύ πτωχό αλληλοκλείδωμα και συναντάται σε ζώνες ρηγμάτων και εφφιπέυσεων. Πρόκειται για πολύ αποδιοργανωμένες βραχομάζες των οποίων το GSI κυμαίνεται από 15 έως 30.

4. Η ΧΡΗΣΗ LiDAR ΚΑΙ ΣμηΕΑ (UAV) ΣΤΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

4.1 LiDAR – Βασικές αρχές λειτουργίας

Η μέθοδος LiDAR (Light Detection And Ranging) χρησιμοποιεί την ανάκλαση του φωτός από ένα στόχο έτσι ώστε να προσδιοριστεί η θέση του στις τρεις διαστάσεις. Πρόκειται για μια συσκευή που παράγει και εκπέμπει δέσμη ακτινών (ή παλμική σειρά) ευθυγραμμισμένης, συγκεκριμένης κατεύθυνσης και φάσης, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (λείζερ) και αποτελεί μέθοδο τηλεπισκόπησης η οποία βασίζεται στην εκπομπή ακτινοβολίας λέιζερ και στην καταγραφή του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Ο όγκος των δεδομένων που συλλέγονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι μεγάλος και είναι δυνατή η αποτύπωση αντικειμένων σε απόσταση μέχρι και 1.500μ., ανάλογα φυσικά με την ισχύ του εκάστοτε σαρωτή που χρησιμοποιείται.

Οι σαρωτές LiDAR αναπτύχθηκαν με δύο τρόπους, ανάλογα με τη θέση του αισθητήρα. Έτσι προέκυψαν οι εξής τύποι συστημάτων (Lato M., 2010):

- Επίγειοι Σαρωτές - TLS (Terrestrial Laser Scanners)
- Εναέριοι Σαρωτές - ALS (Airborne-based Laser Scanners)

Οι Σαρωτές LiDAR χωρίζονται σε Στατικούς και Κινητούς, ανάλογα με τη μέθοδο σάρωσης που ακολουθείται.

- Στατικοί Επίγειοι Σαρωτές: Οι συγκεκριμένοι σαρωτές LiDAR τοποθετούνται επάνω σε τρίποδα και παραμένουν σταθεροί μέχρι την ολοκλήρωση της σάρωσης. Πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δίνουν τη δυνατότητα τοποθέτησης τους και σε άλλες θέσεις με σκοπό τη σάρωση της ίδιας επιφάνειας από διαφορετική οπτική γωνία, κάτι που οδηγεί σε δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης και στη δημιουργία πολύ ρεαλιστικών μοντέλων της φυσικής επιφάνειας. Αυτά τα στατικά συστήματα μπορεί να είναι εξοπλισμένα και με GPS, έτσι ώστε να γίνεται άμεση γεωαναφορά των παραχθέντων δεδομένων.

- Κινητοί Σαρωτές: Οι κινητοί σαρωτές τοποθετούνται σε όχημα το οποίο μπορεί να είναι επίγειο, ιπτάμενο αλλά και πλωτό. Τα παραχθέντα δεδομένα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ακρίβεια αφού όλοι οι κινητοί σαρωτές περιλαμβάνουν σύστημα GPS και INS με αποτέλεσμα την άμεση γεωαναφορά των δεδομένων.

4.1.1.1 Δεδομένα μεθόδου LiDAR

Από τη χρήση της μεθόδου LiDAR προκύπτουν τα εξής δεδομένα (Lato M., 2010):

- Point Data (XYZ)
- Point Data (XYZI), όπου I η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτίνας λέιζερ
- Point Data (XYZRGB), όπου συνυπολογίζεται και η χρωματική πληροφορία και παίρνει τιμές από 0-255.

4.1.1.2 Δεδομένα XYZ

Τα σημειακά δεδομένα XYZ αποτελούν τον πιο βασικό τύπο δεδομένων. Η θέση του αισθητήρα αποτελεί το σημείο (0,0,0), μετράται η απόσταση των αντικειμένων που σαρώνονται και προβάλλονται σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων. Καθώς τα δεδομένα παρέχουν μόνο αυτού του είδους την πληροφορία, είναι δύσκολη η εξαγωγή πληροφοριών που αφορά σε αναγνώριση δομών.

4.1.1.3 Δεδομένα XYZI

Στο συγκεκριμένο τύπο δεδομένων εκτός από τις συντεταγμένες X,Y,Z συνυπολογίζεται και η ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος που προκύπτει από την ανάκλασή του στα αντικείμενα που σαρώνονται. Η ένταση I παίρνει τιμές 0-1 και εξαρτάται από την ανακλαστική ικανότητα των αντικειμένων στα οποία προσπίπτουν οι ακτίνες λέιζερ. Η ένταση I προσδίδει στην εικόνα που δημιουργείται την αίσθηση του βάθους, καθιστώντας τις δομές πιο διακριτές για το ανθρώπινο μάτι.

4.1.1.4 Δεδομένα XYZRGB

Στα σημειακά δεδομένα XYZ υπάρχει δυνατότητα προσθήκης ψευδοχρωματισμού RGB με χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής η οποία είτε βρίσκεται ενσωματωμένη στο LiDAR και συσχετίζει τα δεδομένα αυτόματα, είτε είναι εξωτερική και ο συσχετισμός των εικονοστοιχείων με τα σημειακά δεδομένα γίνεται μέσω κατάλληλου λογισμικού, χειροκίνητα. Τα δεδομένα XYZRGB παράγουν πληροφορία από την οποία είναι ευδιάκριτες και πιο κατανοητές οι δομές των αντικειμένων που σαρώνονται.

4.1.2 LiDAR και μελέτη κατολισθήσεων

Η τεχνολογία LiDAR κάθε τύπου έχει πληθώρα εφαρμογών στην οικογένεια των γεωεπιστημών και πιο συγκεκριμένα στις επιστήμες που αντλούν δεδομένα μέσω τηλεπισκόπησης. Στην εφαρμοσμένη γεωλογία και πιο συγκεκριμένα στη μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων η χρήση LiDAR συναντάται σε (Scaioni et al., 2014):

- Ανίχνευση και χαρακτηρισμό κατολισθήσεων και βραχοκαταπτώσεων
- Χαρτογράφηση κατολισθήσεων και εκτίμηση κινδύνου
- Μοντελοποίηση



4.1.2.1 Ανίχνευση και χαρακτηρισμός κατολισθήσεων και βραχοκαταπτώσεων

Με τη μέθοδο LiDAR προκύπτουν δεδομένα τα οποία δίνουν πληροφορίες για τη μορφολογία της εκάστοτε μελετούμενης περιοχής. Έτσι είναι δυνατή η εύρεση δομών που χαρακτηρίζουν μια κατολίσθηση όπως οι ρωγμές πίσω από τη στέψη ενός πρανού, τα κατολισθέντα υλικά στη βάση του πρανού αλλά και το πόδι της κατολίσθησης. Επίσης είναι δυνατή η καταγραφή των όγκων των κατολισθέντων τεμαχών και φυσικά η χαρτογράφηση των ορίων της κατολίσθησης.

4.1.2.2 Χαρτογράφηση κατολισθήσεων και εκτίμηση κινδύνου

Μέσω των Εναέριων Σαρωτών ALS είναι δυνατή η χαρτογράφηση του κατολισθητικού φαινομένου με μεγάλη ακρίβεια, ακόμη και όταν αυτό λαμβάνει δράση σε μεγάλη έκταση και δυσπρόσιτη περιοχή. Λόγω της λεπτομερέστατης ανάλυσης που προκύπτει από τη χρήση της μεθόδου, μπορεί να γίνει εκτίμηση κινδύνου του κατολισθητικού φαινομένου, σε σχέση με τη συχνότητα του και την έντασή του.

4.1.2.3 Μοντελοποίηση κατολισθήσεων

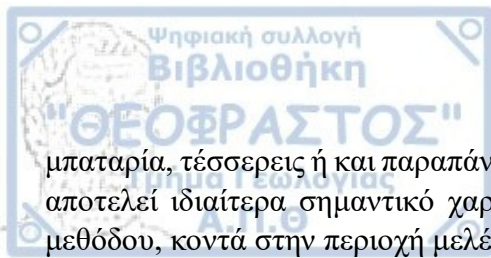
Τα δεδομένα LiDAR οδηγούν σε νέφη σημείων, από τα οποία είναι δυνατή η δημιουργία σχηματικών μοντέλων στις τρεις διαστάσεις, τα οποία περιέχουν όλη την πληροφορία που σχετίζεται με το κατολισθητικό φαινόμενο. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μοντελοποίηση της μετατόπισης που λαμβάνει χώρα στην περιοχή και για τον προσδιορισμό της απαιτούνται δύο τουλάχιστον λήψεις από διαφορετικές περιόδους (για παράδειγμα σε διάστημα ενός χρόνου η μία από την άλλη) έτσι ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των δύο «πακέτων» πληροφοριών. Μέσω της διαφοράς που προκύπτει στα δύο μοντέλα εδάφους είναι δυνατός ο υπολογισμός και του όγκου που έχει μετατοπιστεί, αφού τα δεδομένα έχουν γεωαναφερθεί.

4.1.2.4 Παρακολούθηση κατολισθήσεων

Μέσω των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σε μια περιοχή κατά ορισμένα χρονικά διαστήματα, είναι δυνατή η παρακολούθηση των κατολισθητικών φαινομένων, με την εγκατάσταση τεχνολογίας LiDAR στην περιοχή μόνιμα. Μέσω της γρήγορης επεξεργασίας των δεδομένων που προκύπτουν ακόμη και σε επίπεδο ημέρας και ώρας, είναι εφικτή η αποφυγή ατυχημάτων που μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφές αλλά και απώλεια ανθρώπινων ζωών.

4.2 Βασικές αρχές λειτουργίας ΣμηΕΑ και κατολισθήσεις

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των μη-επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles) σε εφαρμογές που σχετίζονται με επιστημονικές μελέτες γίνεται συχνότερη. Πρόκειται για τηλεκατευθυνόμενες πλατφόρμες, συνήθως μικρού μεγέθους, οι οποίες φέρουν φωτογραφική μηχανή έχουν ενσωματωμένο GPS και αρκετά μεγάλη αυτονομία, καθώς μπορούν να εκτελέσουν πτήσεις χωρίς πιλότο. Πιο συγκεκριμένα, για τη μελέτη κατολισθήσεων χρησιμοποιούνται μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα, ηλεκτροκίνητα με επαναφορτιζόμενη



μπαταρία, τέσσερις ή και παραπάνω έλικες και με δυνατότητα κατακόρυφης απογείωσης, η οποία αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό σε ορεινές περιοχές, για γρήγορη εκκίνηση της μεθόδου, κοντά στην περιοχή μελέτης.

Η χρήση των UAV δίνει τη δυνατότητα πρόσβασης τόσο σε μη προσβάσιμες περιοχές, όσο και σε περιοχές με υψηλή επικινδυνότητα, όπως μια ενεργή κατολίσθηση. Έτσι είναι εφικτή η προσέγγιση του σημείου ενδιαφέροντος από κοντινή απόσταση χωρίς κανένα κίνδυνο, μεσκόπο την αναλυτικότερη μελέτη του. Αποτελεί επίσης μέθοδο με χαμηλό κόστος και μεγάλη ακρίβεια, καθώς τα όργανα που περιλαμβάνει μπορεί να παρέχουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Ο μικρός χρόνος συλλογής αλλά και επεξεργασίας των δεδομένων αποτελεί επίσης σημαντικό πλεονέκτημα.

Η χρήση των UAV's παρά τα πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα που εμφανίζει, παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης μπορεί να μην επιτρέψουν την εφαρμογή της μεθόδου, καθώς τα μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα είναι ευαίσθητα σε ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως δυνατοί άνεμοι, βροχές και καταιγίδες, χαλαζοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Επίσης, καθώς είναι ηλεκτροκίνητα, υπάρχει περιορισμός στο χρόνο πτήσης. Η ύπαρξη φυτοκάλυψης ή άλλων σωμάτων σε μια περιοχή μπορεί να αποτελούν εμπόδια ή να προκαλέσουν σκιάσεις οι οποίες να αλλοιώσουν το τελικό αποτέλεσμα της φωτογραφίας. Τα μειονεκτήματα που προαναφέρθηκαν είναι εφικτό να περιοριστούν σε μεγάλο βαθμό και δεν ισχύουν πάντα.

4.2.1 Οργανόγραμμα εργασιών κατά τη χρήση της μεθόδου UAV

Η ορθή χρήση των UAV απαιτεί τη χρήση οργανογράμματος εργασιών. Έτσι κατηγοριοποιούνται όλα τα βήματα της μεθόδου στις κύριες διεργασίες που πρέπει να ακολουθήσει κάποιος που θέλει να εφαρμόσει τη συγκεκριμένη μέθοδο για επιστημονική μελέτη. Η ακολουθία των εργασιών αυτών παρουσιάζεται παρακάτω:

1. Παραμετροποίηση του προγράμματος
2. Προγραμματισμός πτήσης (πλάνο πτήσης)
3. Διαδικασία πτήσης (Αυτοματοποιημένη ή Χειροκίνητα)
4. Συλλογή και έλεγχος δεδομένων
5. Τριγωνισμός δεδομένων
6. Παραγωγή μωσαϊκού, ορθομωσαϊκού, Ψηφιακού Μοντέλου Επιφάνειας και Τρισδιάστατου Νέφους Σημείων

Το ορθομωσαϊκό, το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας αλλά και το τρισδιάστατο νέφος σημείων, μέσω επεξεργασίας σε περιβάλλον GIS (Geographic Information System-Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών), σε συνδυασμό με την επί τόπου παρατήρηση στο πεδίο, χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων επάνω στο μελετούμενο κατολισθητικό φαινόμενο.

4.2.2 Επεξεργασία δεδομένων ΣμηΕΑ (UAV)

Η επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από τη χρήση των UAV πραγματοποιείται με διάφορα πακέτα λογισμικών, όπως για παράδειγμα το Pix4D και το ISDM. Στα συγκεκριμένα λογισμικά εισάγονται τα πακέτα δεδομένων που λήφθηκαν κατά την πτήση και ακολουθεί η εξής διαδικασία:

- Καθώς στο μη-επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα υπάρχει εγκατεστημένο GPS το οποίο παρέχει για κάθε φωτογραφία και τις αντίστοιχες συντεταγμένες, γίνεται γεωαναφορά των εικόνων με βάση τις εκάστοτε συντεταγμένες.
- Τη γεωαναφορά των δεδομένων ακολουθεί η αναζήτηση και ο εντοπισμός περιοχών που υπάρχει αλληλοεπικάλυψη, δημιουργώντας νέφη σημείων που εμφανίζονται σε όλες τις γεωαναφερμένες εικόνες που προέκυψαν μετά την πτήση.
- Από την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει μια ορθοφωτογραφία (ορθομωσαϊκό), ένα Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας (DSM-Digital Surface Model) και το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο δίνει μια ακριβέστατη εικόνα της περιοχής όπου φαίνονται χαρακτηριστικά οι μελετούμενες δομές και επιτρέπει την αναλυτικότερη μελέτη.
- Τα πακέτα λογισμικών για κάθε επεξεργασία δεδομένων παρέχουν αρχείο με τη συνολική αναφορά της διαδικασίας, τις λεπτομέρειες της πτήσης αλλά και τα χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.1: Dji Phantom 4 PRO, τετρακόπτερο.

4.2.3 Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στη διαχρονική ανάλυση κατολίσθησης

Η μελέτη των κατολισθήσεων με χρήση ΣμηΕΑ έχει γίνει ευρέως διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της όπως το χαμηλό κόστος, η ασφάλεια και η ακρίβεια των δεδομένων που προσφέρει στο μελετητή σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους έρευνας. Οι Lucieer et.al (2014) διεκπεραίωσαν έρευνα επάνω στην κατολίσθηση Home Hill, η οποία βρίσκεται 35km από την πόλη Hobart της Ν.Τασμανίας στην Αυστραλία. Το φαινόμενο εκδηλώθηκε πρώτη φορά το 1996 και θεωρείται μέχρι και σήμερα ενεργό (Εικόνα 4.2).

Η κατολίσθηση βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 80m και εκδηλώθηκε σε πολύ αποσπασμένα ιλυολιθικά και πηλολιθικά υπολείμματα των υποκείμενων ιλύολιθων και πηλόλιθων ηλικίας Περμίου. Στην κορυφή του πρανούς η κατολίσθηση εμφανίζεται ως τυπική περιστροφική ολίσθηση ενώ στα κατάντη εξελίσσεται σε ροή υλικού. Χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κατολίσθησης αποτελούν τα «πόδια» της, από τα οποία το μικρότερο και βορειότερο είναι περισσότερο ενεργό (Εικόνα 4.3). Για τη λήψη των εικόνων εδάφους χρησιμοποιήθηκε μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα, εξοπλισμένο με και ψηφιακή κάμερα και GPS (Εικόνα 4.4). Για την επίτευξη της διαχρονικής ανάλυσης χρειάζονται δεδομένα από διαφορετικές περιόδους προς σύγκριση. Έτσι πραγματοποιήθηκαν δύο πτήσεις σε δύο διαδοχικές επισκέψεις στην περιοχή έρευνας κατά τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν στόχοι (Σημεία Ελέγχου Εδάφους) εντός της κατολίσθησης, τα οποία είχαν συγκεκριμένες συντεταγμένες και χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωαναφορά και τον έλεγχο ακριβείας των δεδομένων κατά την επεξεργασία τους. Με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων παρήχθησαν ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DTMs) και τρισδιάστατα μοντέλα από κάθε επίσκεψη στην περιοχή.

Από τη σύγκριση των ορθομωσαϊκών της κατολίσθησης και με την παράλληλη χρήση κατάλληλων εργαλείων προέκυψαν οι πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της κατολίσθησης όπως της κύριας κατακρήμνισης, την έκταση των δύο ποδιών και περαιτέρω μετατοπίσεις στο σώμα της κατολίσθησης. Έτσι προέκυψε πως το βόρειο τμήμα της κατολίσθησης παρουσίασε μεγάλες μετατοπίσεις έως και 5.5m (D) ενώ το νότιο και ανατολικό τμήμα είχε μικρότερες μετατοπίσεις έως και 1.2m (B). Αξίζει να σημειωθεί πως υπήρξε τμήμα στο κύριο σώμα της κατολίσθησης που δεν εμφάνισε καμία μετατόπιση (A) (Εικόνα 4.5).

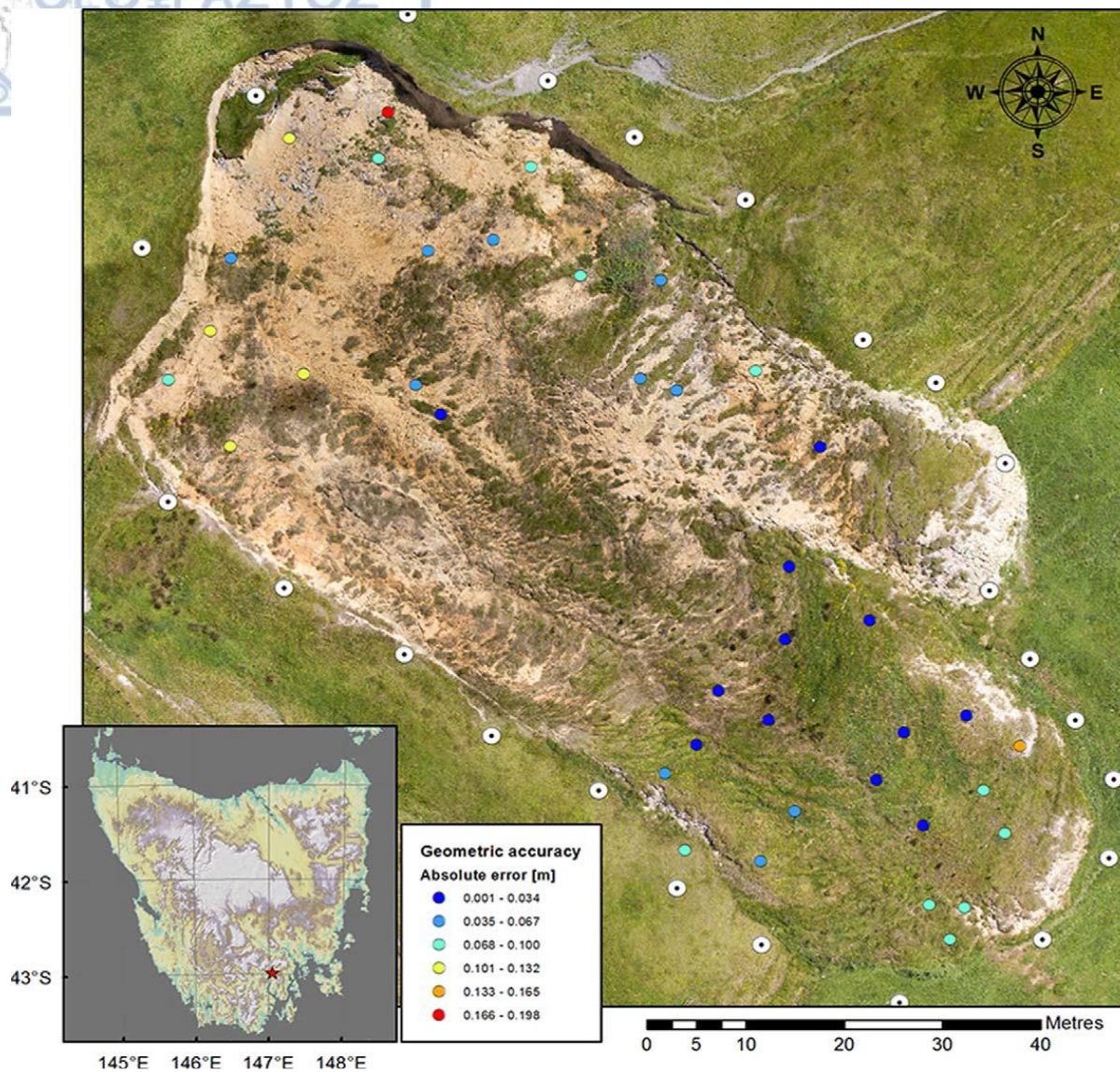
Με το παραπάνω παράδειγμα είναι εμφανής η σημαντική προσφορά των ΣμηΕΑ (UAV) στη μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων, καθώς τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι πολύ περισσότερα από τους ελάχιστους περιορισμούς χρήσης τους.



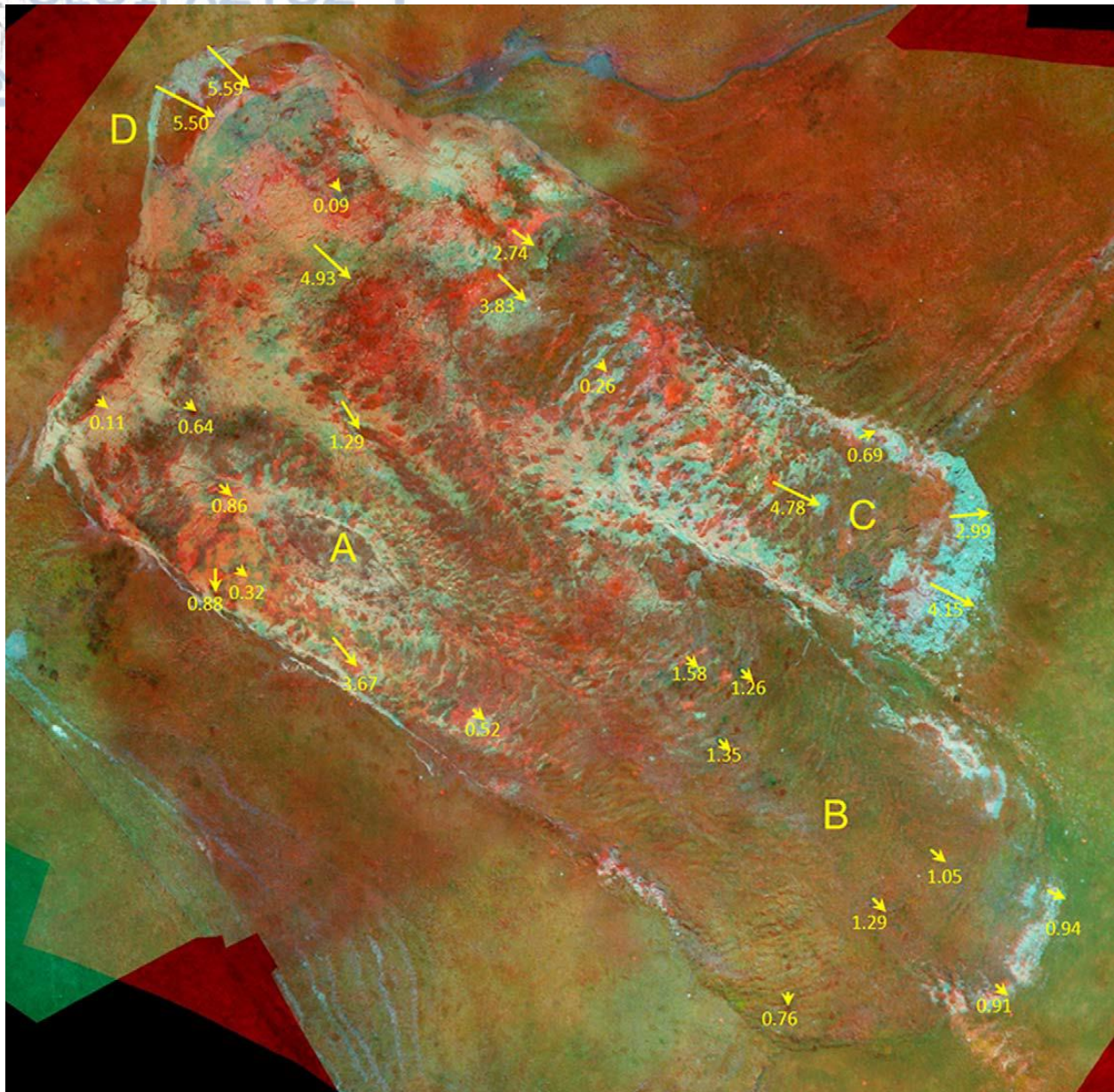
Εικόνα 4.2: Επισκόπηση της κατολίσθησης Home Hill στη Ν.Τασμανία. Το ύψος του φρυδιού της κατολίσθησης είναι 4-5m (Lucieer et.al, 2014).



Εικόνα 4.4: Τηλεκατευθυνόμενο ΣμηΕΑ (UAV) με οκτώ έλικες, ψηφιακή κάμερα και σύστημα πλοήγησης GPS (Lucieer et.al, 2014).



Εικόνα 4.3: Χάρτης της περιοχής έρευνας και ορθοφωτογραφία που προέκυψαν από τα δεδομένα του ΣμηΕΑ (UAV). Οι άσπροι δίσκοι είναι τα Σημεία Ελέγχου Εδάφους. Τα χρωματισμένα σημεία αποτελούν σημεία υπολογισμού της ακρίβειας των δεδομένων. Όσο μικρότερη η τιμή που αντιστοιχεί στο κάθε χρωματισμένο σημείο, τόσο ακριβέστερα είναι τα δεδομένα της εκάστοτε περιοχής (Lucieer et.al, 2014).



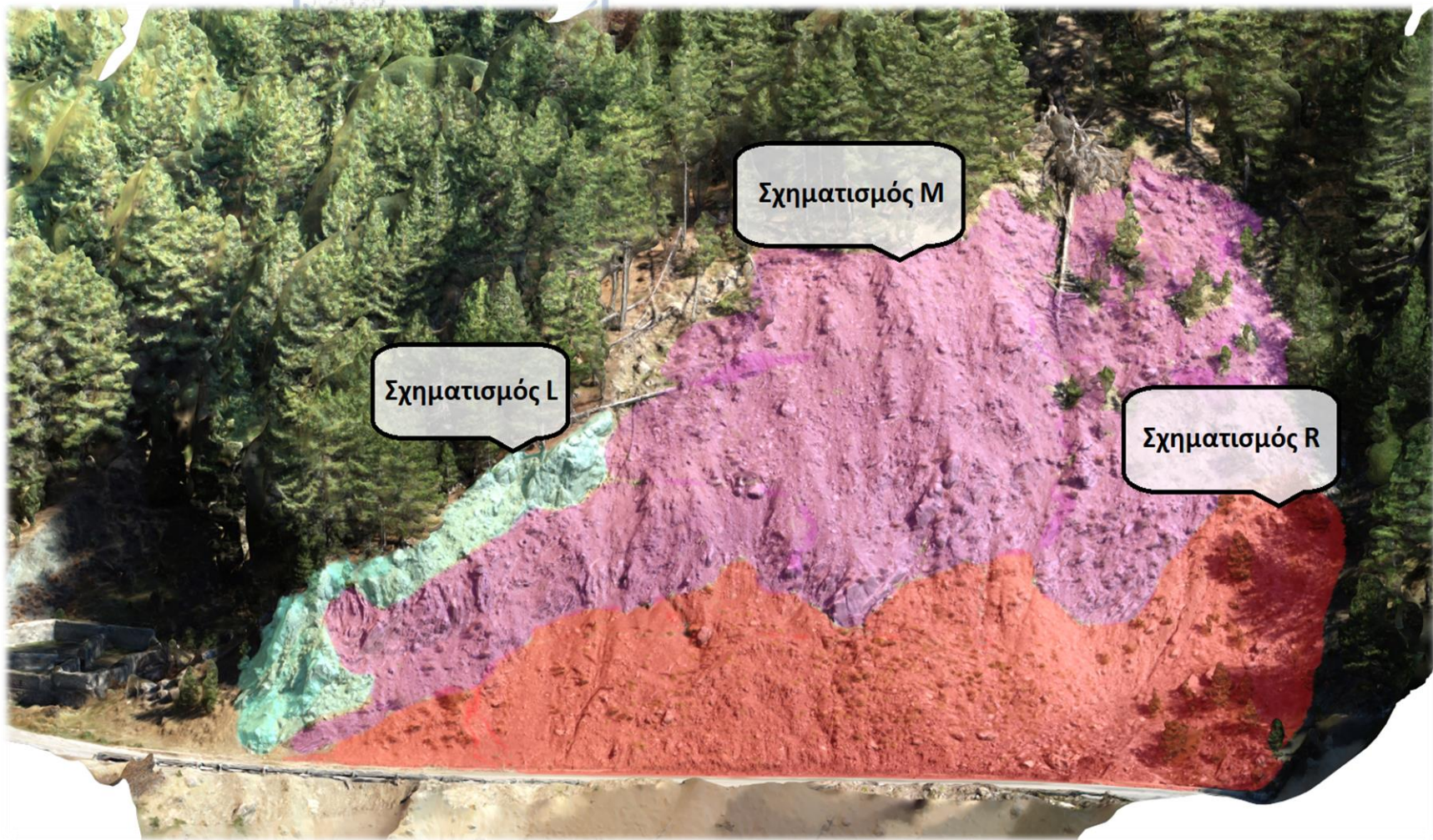
Εικόνα 4.5: Συνδυασμός των ορθομωσαϊκών που προέκυψαν από τα δεδομένα χρήσης ΣμηΕΑ στην κατολίσθηση Home Hill. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η λήψη στις 19 Ιουλίου 2011 ενώ με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται η λήψη στις 10 Νοεμβρίου 2011. Τα βέλη και οι αριθμοί με κίτρινο χρώμα υποδεικνύουν τη μετατόπιση των κατολισθέντων υλικών (Lucieer et.al, 2014).

5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

5.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής έρευνας

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται γεωλογικά στη ζώνη της Πίνδου, σε μέρος στο οποίο απαντώνται εναλλαγές των Κρητιδικών ασβεστολίθων με ιλυοαργιλικούς και πυριτολιθικούς σχηματισμούς. Λόγω της έντονης τεκτονικής της περιοχής, προκύπτει μία σχεδόν χαοτική δομή με ιδιαίτερα καταπονημένους σχηματισμούς, η οποία μετά από παρατήρηση στην ύπαιθρο κατηγοριοποιήθηκε ως εξής (Εικόνα 5):

- **ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ L:** Με γαλάζιο χρώμα αποτυπώνονται οι μαζώδεις ασβεστόλιθοι που υπάρχουν στο αριστερό άκρο του πρανούς. Η στρώση τους δεν είναι ορατή σε ορισμένα σημεία και διατρέχονται από τρεις έως τέσσερις οικογένειες ασυνεχειών οι οποίες ορίζουν τεμάχια τα οποία λόγω της δράσης της βαρύτητας απαντώνται και σε χαμηλότερα σημεία του πρανούς ως μεμονωμένα τεμάχια. Οι ασυνέχειες είναι μέτρια αποσαθρωμένες και λείες έως τραχείες.
- **ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ M:** Με μωβ χρώμα αποτυπώνονται οι λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι με εναλλαγές ιλυοαργιλικών, ψαμμιτικών και πυριτολιθικών σχηματισμών. Η στρώση είναι διακριτή και συνοδεύεται από δύο οικογένειες ασυνεχειών σχεδόν κάθετες σε αυτή. Σε ορισμένα σημεία η στρωμάτωση του σχηματισμού εμφανίζει σφιχτή δομή παρά τις επιφανειακές συνθήκες. Ο ιλύολιθος στο συγκεκριμένο σχηματισμό εμφανίζεται ιδιαίτερα διατμημένος και εύθρυπτος. Οι ασυνέχειες είναι αποσαθρωμένες και λείες σε όλη την έκτασή τους.
- **ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ R:** Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα υλικά που έχουν ήδη κατολισθήσει. Λόγω της εύκολης διάβρωσης του ιλυολίθου που λαμβάνει χώρα στους ανωτέρω σχηματισμούς, αυτά τα υλικά μεταφέρονται στη βάση του πρανούς αλλά και πάνω στους σχηματισμούς που βρίσκονται κατάντη, σχηματίζοντας αυτό το «κάλυμμα» στις συγκεκριμένες ζώνες. Πρόκειται για ιλυολιθικό υλικό το οποίο καθώς αποκολλάται με αργό ρυθμό από το αρχικό πέτρωμα, λόγω της βαρύτητας και της δράσης του μετεωρικού νερού κατολισθαίνει και συσσωρεύεται στα κατάντη του πρανούς.



Εικόνα 5: Η λιθολογική διαφοροποίηση σε επίπεδο πρανού. Ο Σχηματισμός Λ διακρίνεται με γαλάζιο χρώμα και αφορά στους μαζώδεις ασβεστολίθους, ο Σχηματισμός Μ διακρίνεται με μωβ χρώμα και αφορά στους μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθους με εναλλαγές ιλυολίθων και ο Σχηματισμός Ρ διακρίνεται με κόκκινο χρώμα και αφορά στα υλικά τα οποία έχουν ήδη κατολισθήσει.



Φωτογραφία 5: Φλυσικό τέμαχος στην περιοχή έρευνας. Διακρίνονται τα παρακατακόρυφα ιλυολιθικά στρώματα που διακόπτονται από ψαμμιτικούς, ασβεστολιθικούς και πυριτολιθικούς ορίζοντες. Το γεωλογικό σφυρί εφάπτεται επάνω στην ασυνέχεια J2 ενός ασβεστολιθικού ορίζοντα.

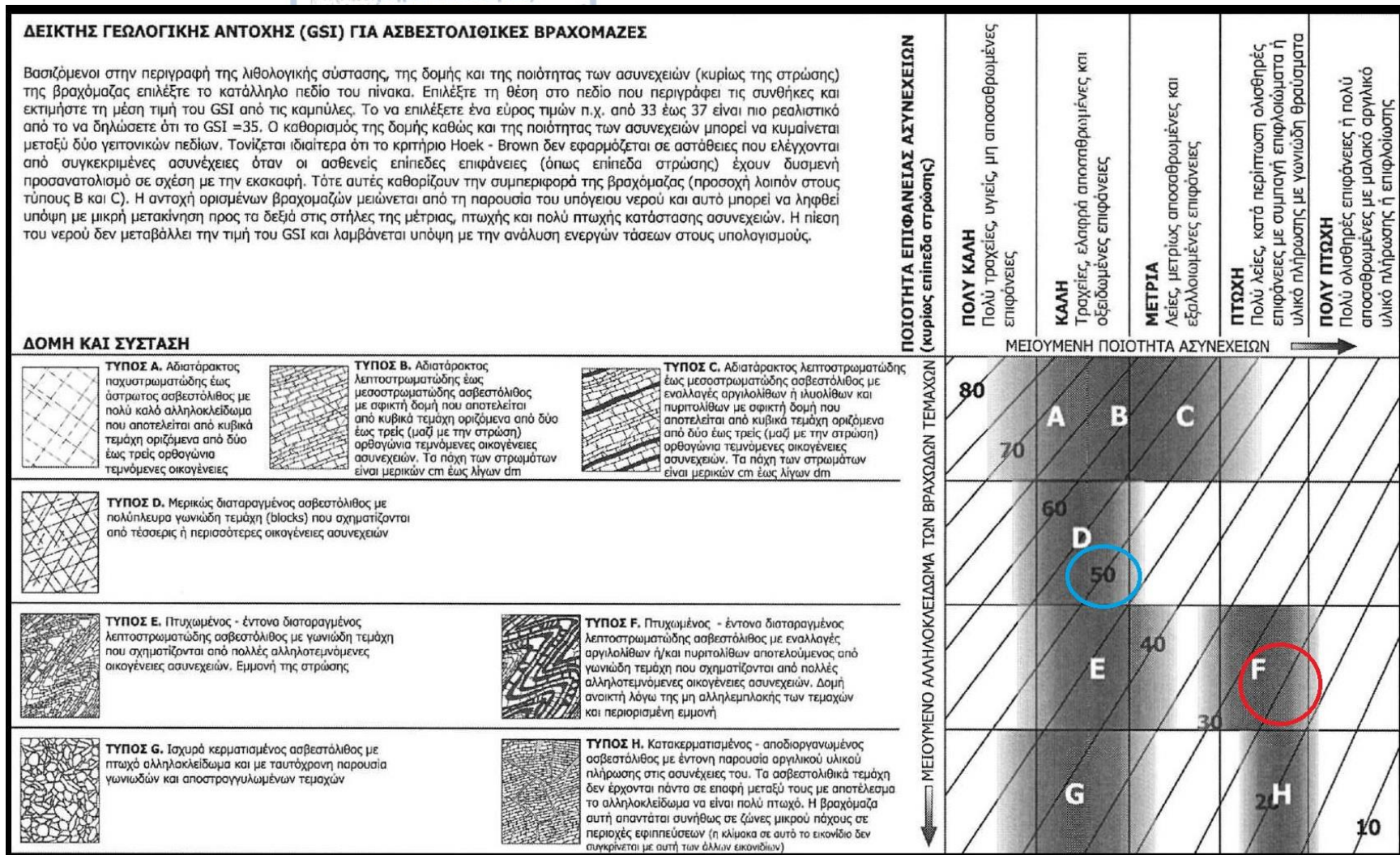


Φωτογραφία 5.1: Πανοραμική λήψη της περιοχής έρευνας. Διακρίνονται στη βάση του πρανούς τα κατολισθέντα υλικά του Σχηματισμού R (ιλυολιθικό υλικό, ασβεστολιθικά και ψαμμιτικά τεμάχια).

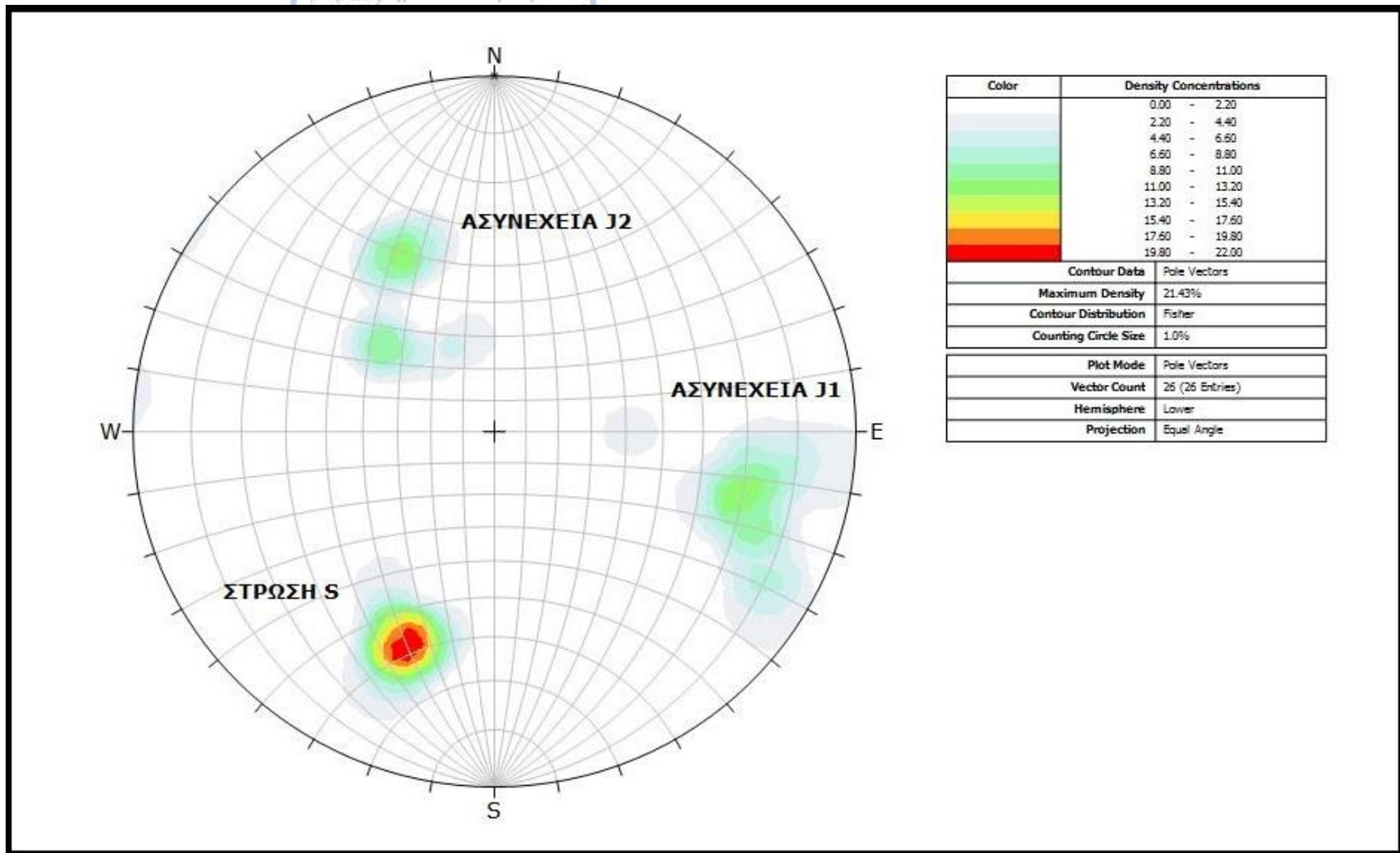
5.2 Συμπεράσματα παρατήρησης στην ύπαιθρο – Ταξινόμηση GSI – Κινηματική ανάλυση

Η χαοτική δομή που συναντάται στην περιοχή μελέτης αποτελείται από εναλλαγές πλακωδών ασβεστολίθων με ιλυοαργιλικούς και πυριτολιθικούς σχηματισμούς. Οι σχηματισμός Μ παρουσιάζεται έντονα παραμορφωμένος και καταπονημένος λόγω της τεκτονικής δράσης στην περιοχή. Στον πίνακα με τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των κατακερματισμένων ασβεστολίθων (B.Μαρίνος, 2007) τέτοιας μορφής ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται ως «Τύπος F». Συνδυάζοντας τη δομή του συγκεκριμένου τύπου ασβεστολίθων με την πολύ πτωχή ποιότητα των ασυνεχειών που τους διατρέχουν, ο σχηματισμός Μ λαμβάνει τιμή GSI=20-30 από τον πίνακα που αφορά στις ασβεστολιθικές βραχομάζες (B.Μαρίνος, 2007). Στο πρηνές υπάρχει και τμήμα το οποίο εμφανίζει διαφορετικά τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά. Πρόκειται για τον Σχηματισμό L, ο οποίος λόγω της δομής του πετρώματος, της ποιότητας των ασυνεχειών αλλά και του αλληλοκλειδώματος των τεμαχών του, λαμβάνει τιμές GSI=45-55. Παρακάτω παρουσιάζεται η προβολή των δύο σχηματισμών επάνω στο διάγραμμα GSI που αφορά στις ασβεστολιθικές βραχομάζες (B.Μαρίνος, 2007):

Σχετικά με τις ασυνέχειες που διατρέχουν τους σχηματισμούς, μετρήσεις λήφθηκαν κατά την επί τόπου έρευνα στην περιοχή, με πυξίδα CLAR, όπου ήταν δυνατή η πρόσβαση στην έκταση του πρηνούς. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχηματισμό Μ μετρήθηκαν η Στρώση Σ και οι διακλάσεις J1 και J2. Επίσης μέσω του Point Cloud που προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων των UAV και LiDAR εξήχθησαν μετρήσεις στρώσης για τον ίδιο σχηματισμό με ίδια αποτελέσματα, κάτι που αποδεικνύει και την εγκυρότητα και την ακρίβεια της χρησιμοποιούμενης μεθόδου. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο δίκτυα Schmidt στα οποία προβάλλονται οι μετρήσεις των ασυνεχειών που λήφθηκαν από επί τόπου έρευνα αλλά και από το Point Cloud:

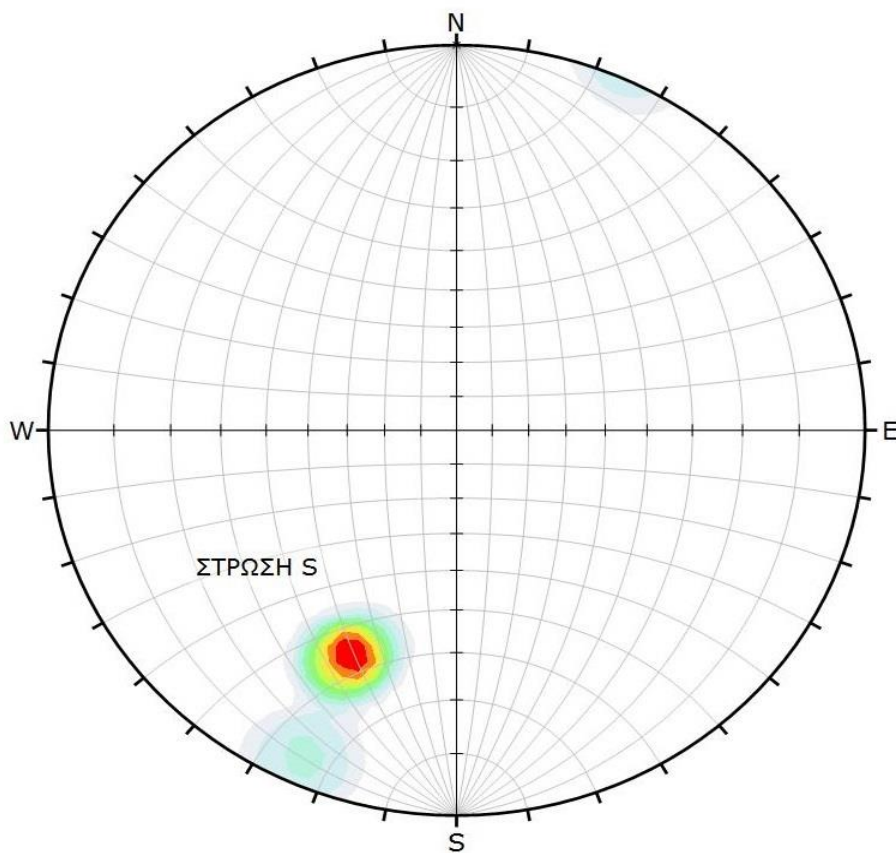


Εικόνα 5.1: Ο δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες. Στο διάγραμμα προβάλλονται με γαλάζιο χρώμα ο σχηματισμός L με τιμές GSI=45-55 και ο σχηματισμός M κόκκινο χρώμα, λαμβάνοντας τιμές GSI=20-30.



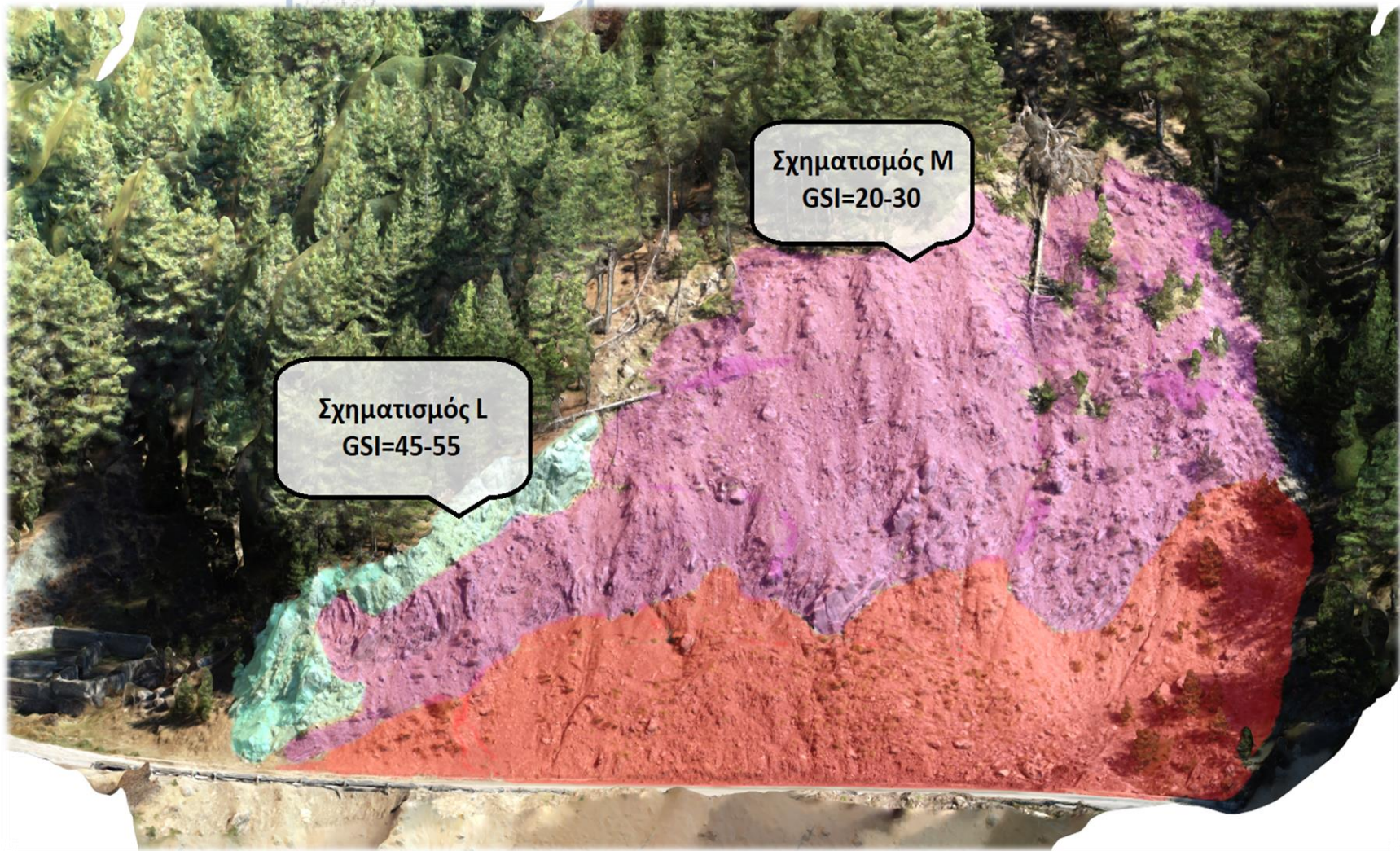
Εικόνα 5.2.: Προβολή των μετρήσεων στο σχηματισμό M κατά την επί τόπου έρευνα με πυξίδα CLAR των γεωμετρικών στοιχείων των ασυνεχειών σε διάγραμμα Schmidt. Προβάλλονται η Στρώση S και οι διακλάσεις J1 και J2 αντίστοιχα.

POINT CLOUD MEASUREMENTS POSITION no.1



| Color | Density Concentrations |
|----------------------------------|------------------------|
| | 0.00 - 7.10 |
| | 7.10 - 14.20 |
| | 14.20 - 21.30 |
| | 21.30 - 28.40 |
| | 28.40 - 35.50 |
| | 35.50 - 42.60 |
| | 42.60 - 49.70 |
| | 49.70 - 56.80 |
| | 56.80 - 63.90 |
| | 63.90 - 71.00 |
| Contour Data Pole Vectors | |
| Maximum Density | 70.75% |
| Contour Distribution | Fisher |
| Counting Circle Size | 1.0% |
| Plot Mode Pole Vectors | |
| Vector Count | 17 (17 Entries) |
| Hemisphere | Lower |
| Projection | Equal Angle |

Εικόνα 5.3.: Προβολή των μετρήσεων της στρώσης S του σχηματισμού M μέσω επεξεργασίας του Point Cloud με κατάλληλο αλγόριθμο. Οι ίδιες μετρήσεις στη Στρώση S του ίδιου σχηματισμού ανάμεσα στις επί τόπου μετρήσεις και σε αυτές του Point Cloud, αποδεικνύουν και την εγκυρότητα της μεθόδου που ακολουθήθηκε για τη διεκπεραίωση της έρευνας.



Εικόνα 5.4: Οι διαφορετικοί σχηματισμοί σε επίπεδο πρανούς λαμβάνουν διαφορετικές τιμές GSI λόγω της διαφορετικής δομής, της ποιότητας των ασυνεχειών που τους διατρέχουν αλλά και του διαφορετικού αλληλοκλειδώματος των εκάστοτε τεμαχών τους.

5.3 Αξιολόγηση μηχανισμού αστοχίας

Κατά τις διαδοχικές επισκέψεις στην περιοχή έρευνας παρατηρήθηκαν μορφολογικά στοιχεία που αποτελούν δείκτες κατολίσθησης, όπως η ανατροπή δέντρων επάνω από τη στέψη του πρανούς, η ύπαρξη εφελκυστικής ρωγμής ακριβώς πίσω από τη στέψη του πρανούς (Φωτογραφία 5.3), οι απότομες κλίσεις στα ανάντη του πρανούς και η ελάττωσή τους στα κατάντη αλλά και η περιοχή όπου τα κατολισθέντα υλικά συσσωρεύονται στον πόδα της κατολίσθησης.

Το ύψος του πρανούς είναι περίπου 35m και η μέση κλίση του είναι 36°. Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή έρευνας αποτελείται από τμήμα του «Δεύτερου Φλύσχη της Πίνδου» σε επαφή με τεφρούς ασβεστόλιθους (Φωτογραφία 5.2) και τα τεκτονικά μείγματα (melange). Πιο συγκεκριμένα, στο αριστερό τμήμα του πρανούς, εμφανίζονται οι φάσεις του Φλύσχη, όπως εναλλαγές ψαμμιτικών και ασβεστολιθικών πάγκων με ερυθρούς έως τεφρούς αργιλικούς σχιστόλιθους έως ιλυόλιθους. Σε πολλές θέσεις υπάρχουν οι Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι σε επαφή και με τον Φλύσχη αλλά και με το Melange. Οι φλυσχικοί σχηματισμοί αλλά και το Melange εμπεριέχονται στη ζώνη Ωλονού-Πίνδου, η οποία χαρακτηρίζεται από πολλές διαδοχικές επιπεύσεις, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την έντονη τεκτονική παραμόρφωση των σχηματισμών και τη δημιουργία ασθενών βραχομαζών. Ο ιλυόλιθος λόγω της ευθρυπτότητας του αποτελεί το υλικό που αποκολλάται με τη δράση του μετεωρικού νερού και της βαρύτητας και κατολισθαίνει ευκολότερα από το σύνολο του σχηματισμού, δημιουργώντας ένα στρώμα στη βάση του πρανούς που καλύπτει τον υπόλοιπο σχηματισμό. Έτσι, τα ασβεστολιθικά και ψαμμιτικά στρώματα τα οποία διατρέχονται από οικογένειες ασυνεχειών οι οποίες λόγω της γεωμετρίας τους καθορίζουν συγκεκριμένα τεμάχια, χάνουν το υλικό πλήρωσής τους (αφού πρόκειται για τους ιλυολιθικούς ορίζοντες οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ευδιάβρωτοι), αποκολλώνται και λόγω της παρακατακόρυφής τους στρώσης ανατρέπονται, δηλαδή κινούνται προς τα κατάντη είτε μαζί με το ιλυολιθικό υλικό με αργό ρυθμό, είτε ραγδαία με ελεύθερη πτώση. Καταληκτικά, λόγω της πτωχής ποιότητας οι οποία χαρακτηρίζει τις βραχομάζες στην περιοχή έρευνας σε συνδυασμό με τις μορφολογικές και κλιματικές συνθήκες της περιοχής, παρατηρήθηκαν ανισότροπες αστοχίες (πτώση ασβεστολιθικών, ψαμμιτικών τεμαχίων και ιλυολιθικού υλικού).

Αξίζει να αναφερθεί πως λόγω της ύπαρξης της εφελκυστικής ρωγμής παρατηρήθηκε μια κοινή, ισότροπη συμπεριφορά σε μεγάλο τμήμα της περιοχής έρευνας-πρανούς. Πρόκειται για μία ολίσθηση η οποία λαμβάνει χώρα επάνω στην επιφάνεια που ορίζει η συγκεκριμένη εφελκυστική ρωγμή, λόγω της πτωχής ποιότητας των σχηματισμών αλλά και της απότομης κλίσης του πρανούς.



Φωτογραφία 5.2: Τμήμα του «Δεύτερου Φλύσχη της Πίνδου» στο δεξί τμήμα της φωτογραφίας σε επαφή με τεφρούς ασβεστόλιθους στο αριστερό.



Φωτογραφία 5.3: Η εφελκυστική ρωγμή σε απόσταση 5m. πίσω από τη στέγη του πρανούς αποτελεί πολύ σημαντικό δείκτη ενεργούς κατολίσθησης.



Εικόνα 5.5: Τα όρια της κατολίσθησης με κόκκινο χρώμα. Με μπλε χρώμα διακρίνεται το «φρύδι» της κατολίσθησης.



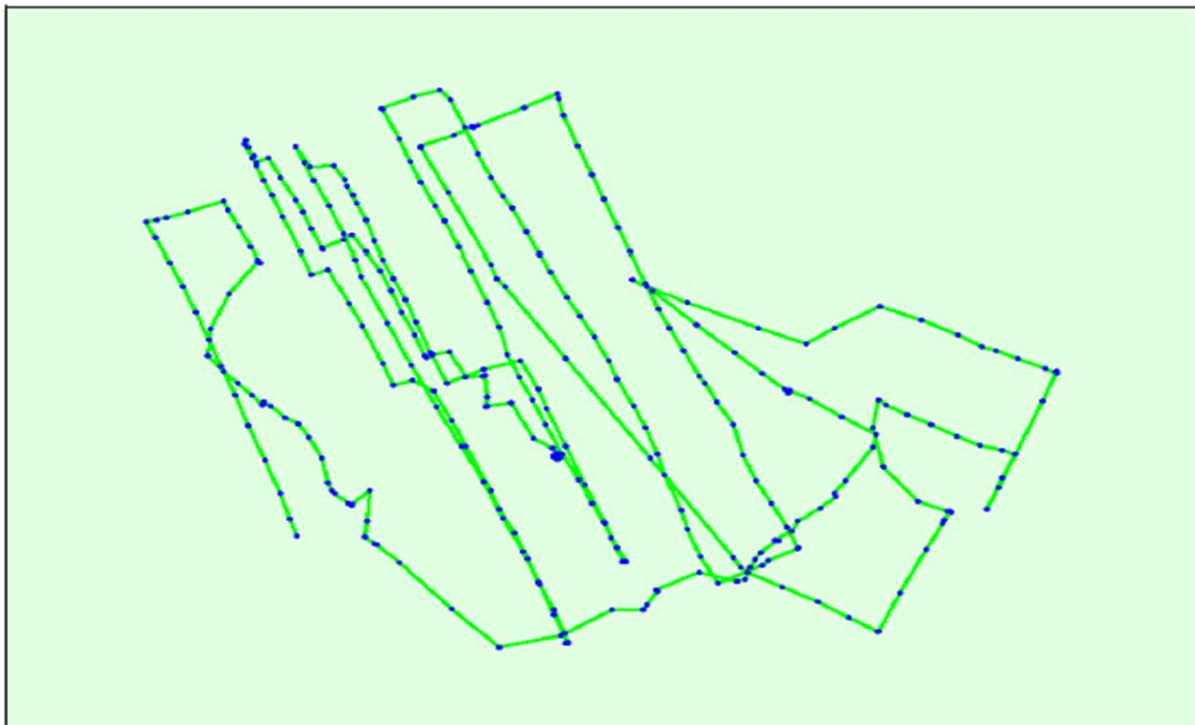
Εικόνα 5.6: Η μεγάλη κάμψη αλλά και η πτώση δέντρων αποτελεί δείκτη ύπαρξης κατολίστησης.

5.4 Αποτελέσματα από τη χρήση ΣμηΕΑ (UAV) στην περιοχή έρευνας

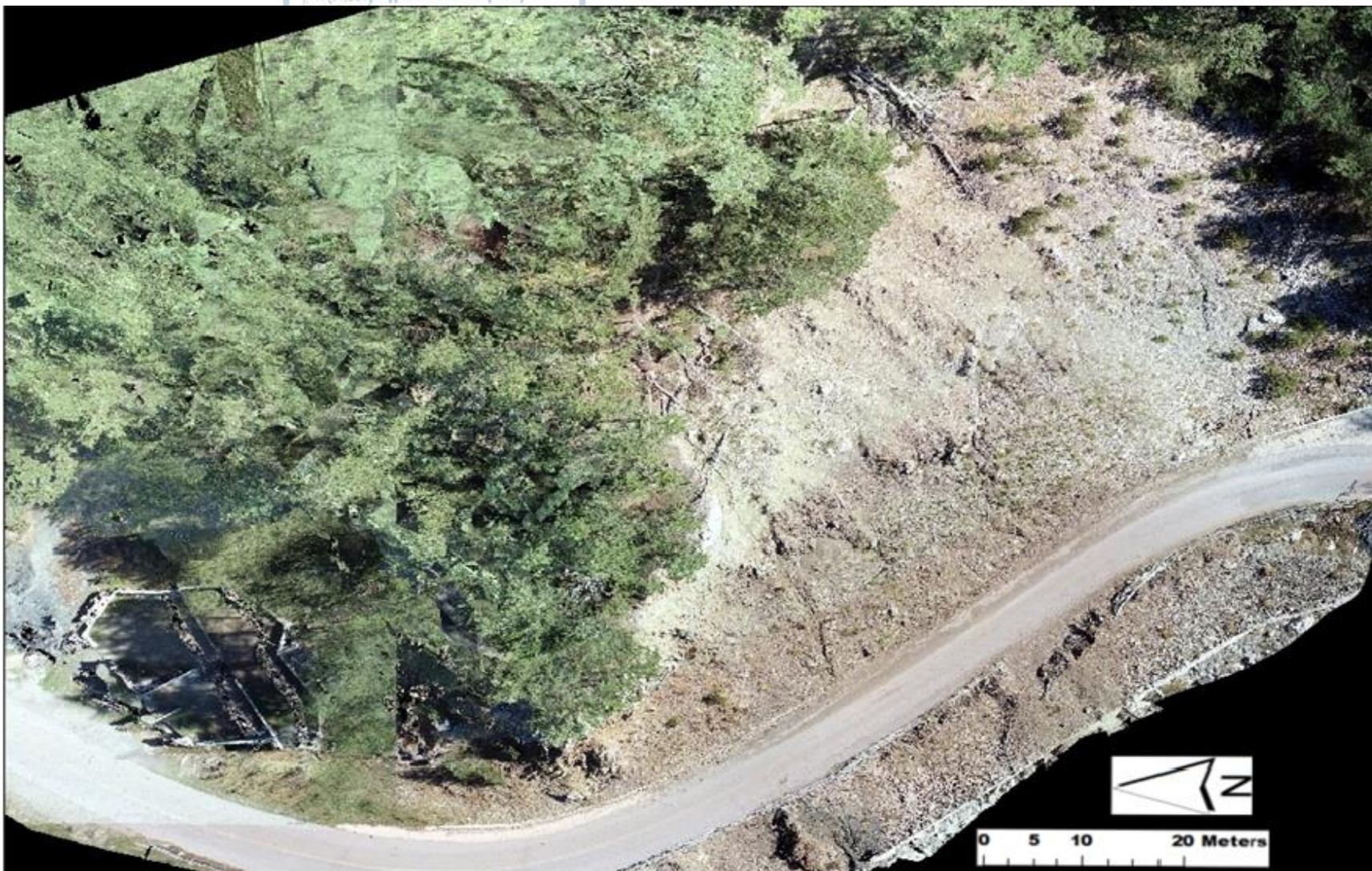
Η ανάγκη για περαιτέρω και πιο αναλυτική μελέτη του μηχανισμού της κατολίθησης στην περιοχή μελέτης οδήγησε στη χρήση UAV (Unmanned Aerial Vehicle), μέσω του οποίου καταλήγουμε σε μια καλύτερης ποιότητας αποτύπωση της περιοχής. Η συγκεκριμένη εργασία σε επόμενο κεφάλαιο πραγματεύεται τη σύγκριση των δεδομένων τριών διαφορετικών πτήσεων επάνω από την περιοχή μελέτης σε διάστημα τριών διαδοχικών ετών. Παρακάτω παραθέτονται ενδεικτικά τα στοιχεία μίας εκ των τεσσάρων πτήσεων η οποία διεξήχθη το Νοέμβριο του 2018:

| Project | Perivoli_Nov18 |
|-------------------------------|--|
| Ημερομηνία Λήψης | 7/11/2018 - 11:45:28 |
| Μοντέλο Κάμερας UAV | FC6310_8.8_5472x3648 (RGB) |
| Έκταση Περιοχής που καλύφθηκε | 0.014 km ² |
| Χρόνος Συνολικής Διαδικασίας | 1h:29m:10s |
| ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ | Μέσος όρος 71.284 σημείων ανά εικόνα |
| | Χρησιμοποιήθηκαν 331 από τις 333 εικόνες |
| Βαθμονομημένες Εικόνες | 331 από τις 333 εικόνες |
| Γεωαναφερμένες Εικόνες | 333 από τις 333 εικόνες |

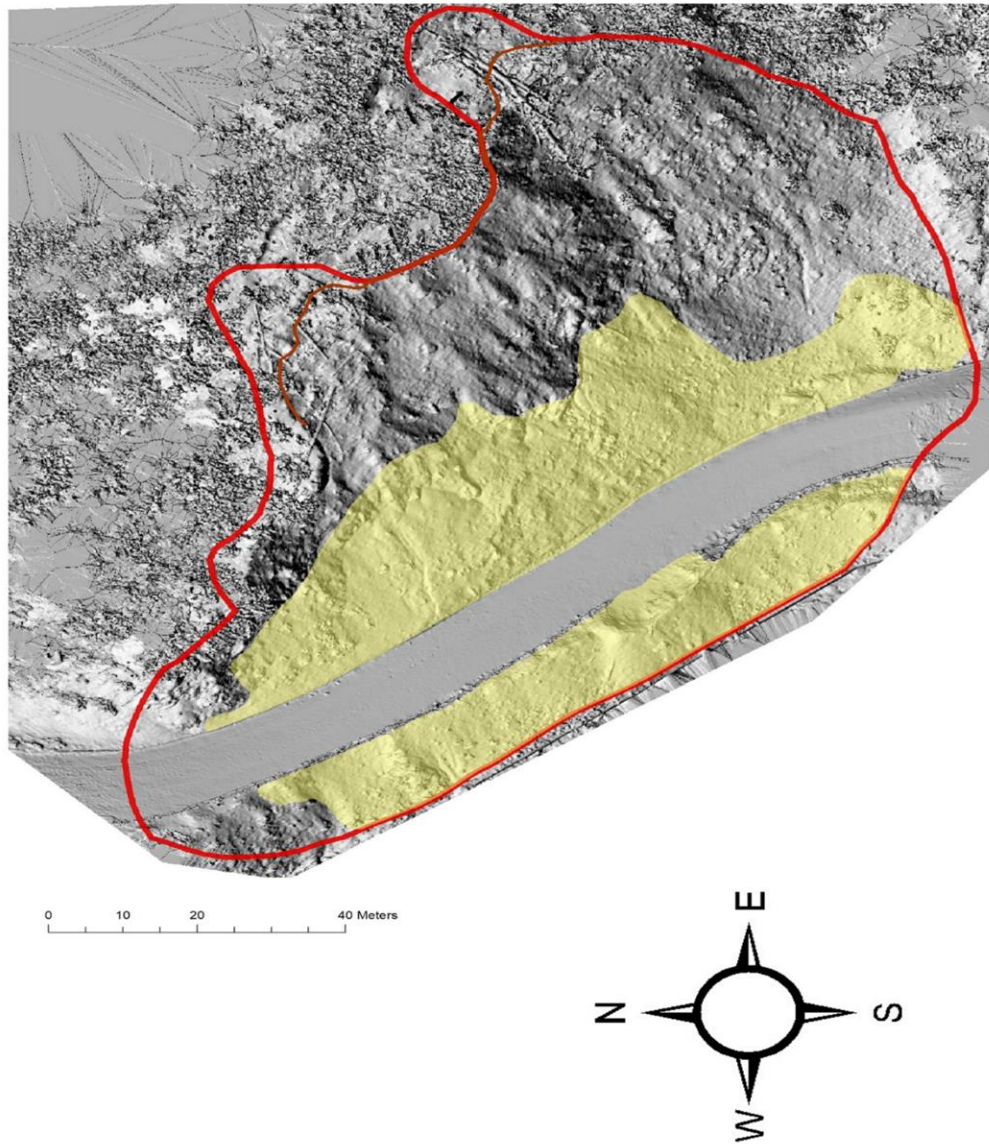
Πίνακας 5.1: Αναλυτικά τα στοιχεία πτήσης που πραγματοποιήθηκε το Νοέμβριο του 2018.



Εικόνα 5.7: Κάτοψη πορείας πτήσης. Κάθε μπλε κουκκίδα αποτελεί θέση λήψης φωτογραφίας. Η μεγαλύτερη μπλε κουκκίδα αποτελεί το σημείο εκκίνησης λήψης φωτογραφιών το οποίο προηγείται όλων των υπολοίπων.



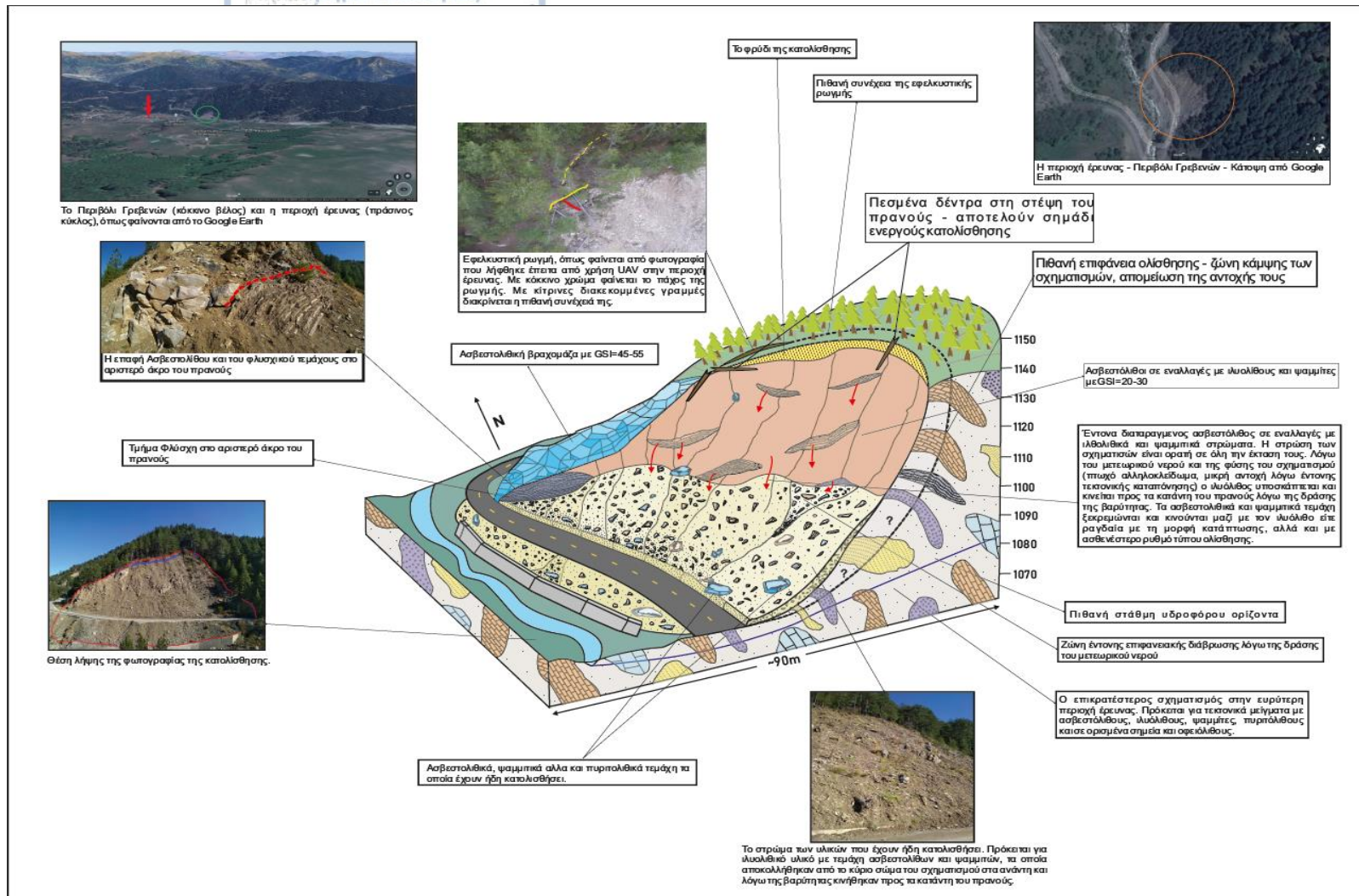
Εικόνα 5.8: Ορθομωσαϊκό της περιοχής μελέτης. Προκύπτει από τη σύνθεση των κοινών σημείων του συνόλου των φωτογραφιών που ελήφθησαν από την κάμερα του UAV μέσω λογισμικού, σε μία τελική εικόνα.



Εικόνα 5.9: Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM) της περιοχής μελέτης. Στο συγκεκριμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το οποίο προκύπτει από επεξεργασία των δεδομένων του UAV σε περιβάλλον GIS, παρουσιάζονται τα όρια της κατολίσθησης με κόκκινο χρώμα, το «φρύδι» της κατολίσθησης με καφέ χρώμα κοντά στη στέψη του πρανούς και η περιοχή με τα κατολισθέντα υλικά με κίτρινο χρώμα.

5.5 Μοντέλο κατολίσθησης

Με βάση τις υπαίθριες παρατηρήσεις αλλά και τα αποτελέσματα επεξεργασίας των δεδομένων από τη χρήση ΣμηΕΑ και τεχνολογίας LiDAR, σχεδιάστηκε ένα σχηματικό μοντέλο της περιοχής της ενεργούς κατολίσθησης στο Περιβόλι Γρεβενών, στο οποίο παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της (Σχήμα 1.1). Στο συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζονται πληροφορίες για την περιοχή έρευνας, το μηχανισμό της κατολίσθησης, φωτογραφίες της ευρύτερης περιοχής, πολλά από τα μορφολογικά, γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά στοιχεία που σχετίζονται άμεσα με την ύπαρξη και την ενεργότητα της συγκεκριμένης κατολίσθησης αλλά και μία πιθανή ζώνη κάμψης των γεωλογικών σχηματισμών. Οι ακριβείς μετρήσεις των μορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής έρευνας μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από τη χρήση ΣμηΕΑ και LiDAR οδήγησαν και στην αποτύπωσή τους με ακρίβεια.



Σχήμα 5.1: Σχηματικό μοντέλο προσομοίωσης της κατολίθησης.

6. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σε χρονικό διάστημα τριών ετών και έπειτα από τρεις επισκέψεις στην περιοχή έρευνας ανά τακτικά χρονικά διαστήματα, διεξήχθησαν τρεις διαδοχικές χρονικά πτήσεις ΣμηΕΑ από τις οποίες με κατάλληλη επεξεργασία προέκυψαν τα αντίστοιχα νέφη σημείων. Το Cloud_17 που αφορά στο έτος 2017 με τιμή GSD (Ground Sample Distance) =1.26cm, το Cloud_18 που αφορά στο έτος 2018 με τιμή GSD (Ground Sample Distance) =0.80cm και το Cloud_19 με τιμή GSD (Ground Sample Distance) =0.75cm. Ως GSD (Ground Sample Distance) ορίζεται σε μια ψηφιακή φωτογραφία του εδάφους (όπως μία ορθοφωτογραφία) η απόσταση των κέντρων των εικονοστοιχείων (pixels) που μετριοούνται στο έδαφος. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του GSD, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ανάλυση της φωτογραφίας, συνεπώς και η διακριτική της ικανότητα.

Έπειτα από εισαγωγή των παραπάνω νεφών σημείων στην εφαρμογή Cloud Compare ακολούθησαν τα εξής βήματα επεξεργασίας:

1. Καθαρισμός μη επιθυμητών σημείων. Τα νέφη σημείων ευθυγραμμίστηκαν κατά προσέγγιση με σκοπό την όμοια κατάτμησή τους και διατήρηση των κοινών τμημάτων ενδιαφέροντος-περιοχών έρευνας.

2. Μειώθηκε δραστικά το πλήθος των σημείων σε όλη την έκταση του νέφους με τυχαίο τρόπο, ώστε να διατηρηθούν κατ'αναλογία οι τιμές των πυκνοτήτων των σημείων, με σκοπό την ευκολότερη διαχείριση του όγκου δεδομένων.

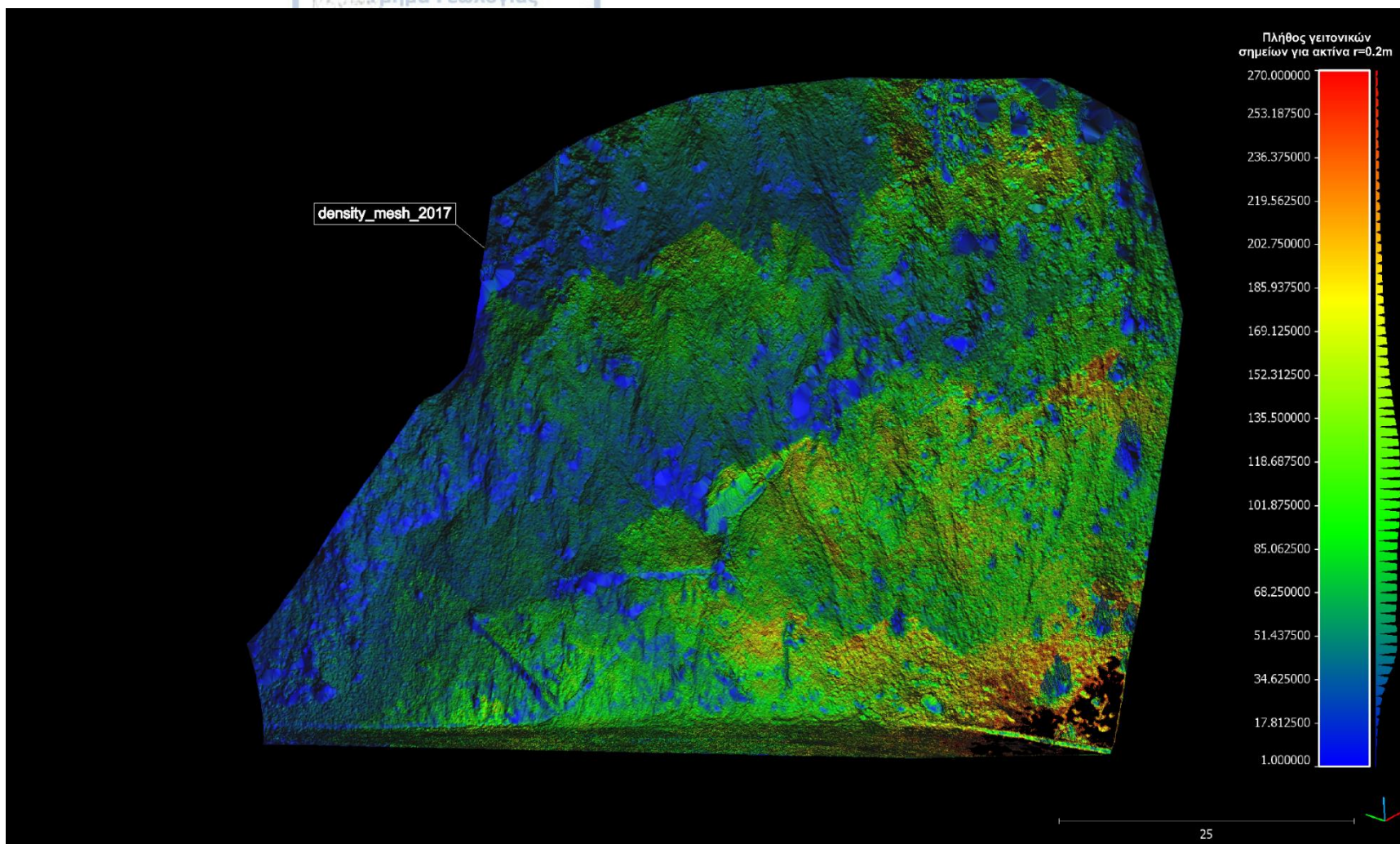
3. Τα τρία (3) νέφη σημείων γεωαναφέρθηκαν με γνωστά σημεία ελέγχου σε δύο (2) ζεύγη. Το Νέφος Σημείων Α (Cloud_17-Cloud_18) και το Νέφος Σημείων Β (Cloud_17-Cloud_19). Η ευθυγράμμιση με ακρίβεια επιτεύχθηκε μέσω σταθερών σημείων στην ευρύτερη περιοχή έρευνας και εκτός της ζώνης δράσης της ενεργούς κατολίσθησης- τσιμεντένιο τοιχίο πίσω από το αριστερό άκρο του πρανούς. Η ευθυγράμμιση έγινε με δέκα (10) κοινά σημεία σε κάθε νέφος-μέλος του εκάστοτε ζεύγους, των οποίων το σφάλμα δεν ξεπερνούσε την τιμή 0.6.

4. Ακολούθησε στατιστικός έλεγχος για την πυκνότητα των σημείων των τριών νεφών ξεχωριστά. Χρησιμοποιήθηκε διάστημα εμπιστοσύνης 95% για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς η ακρίβεια των μετρήσεων είναι μεγάλη και το σφάλμα των οργάνων μέτρησης υπολογίζεται κάτω από 5%. Παρακάτω παρουσιάζονται οι στατιστικές κατανομές της πυκνότητας των σημείων των Cloud_17, Cloud_18 και Cloud_19. Η πυκνότητα προκύπτει υπολογίζοντας για κάθε σημείο του νέφους, το πλήθος των σημείων που βρίσκονται εντός μιας σφαίρας με κέντρο το εκάστοτε σημείο και ακτίνα r.

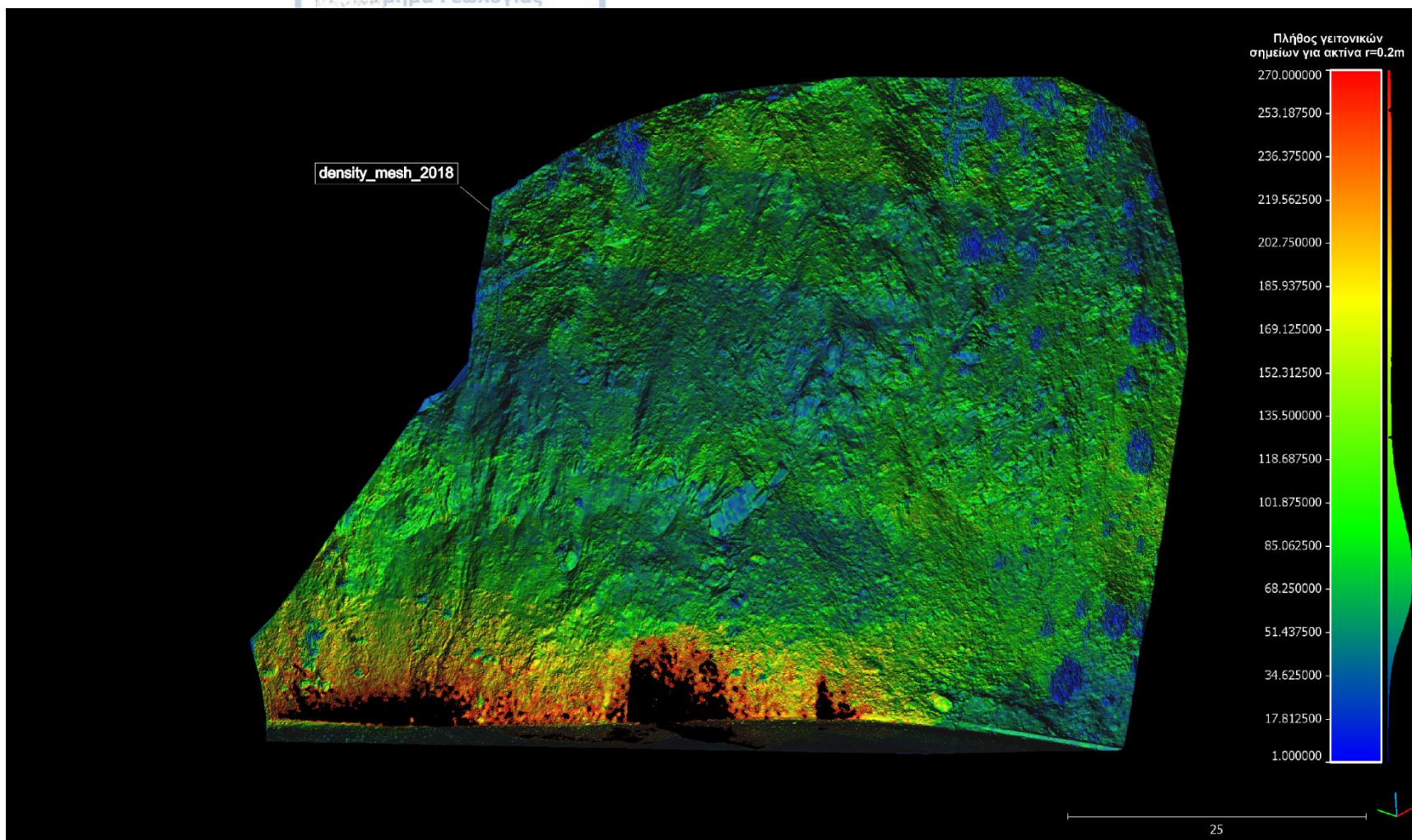


5. Χρήση του αλγόριθμου M3C2 (James et al, 2017) εντός της εφαρμογής Cloud Compare για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων για κάθε ζεύγος νεφών σημείων.

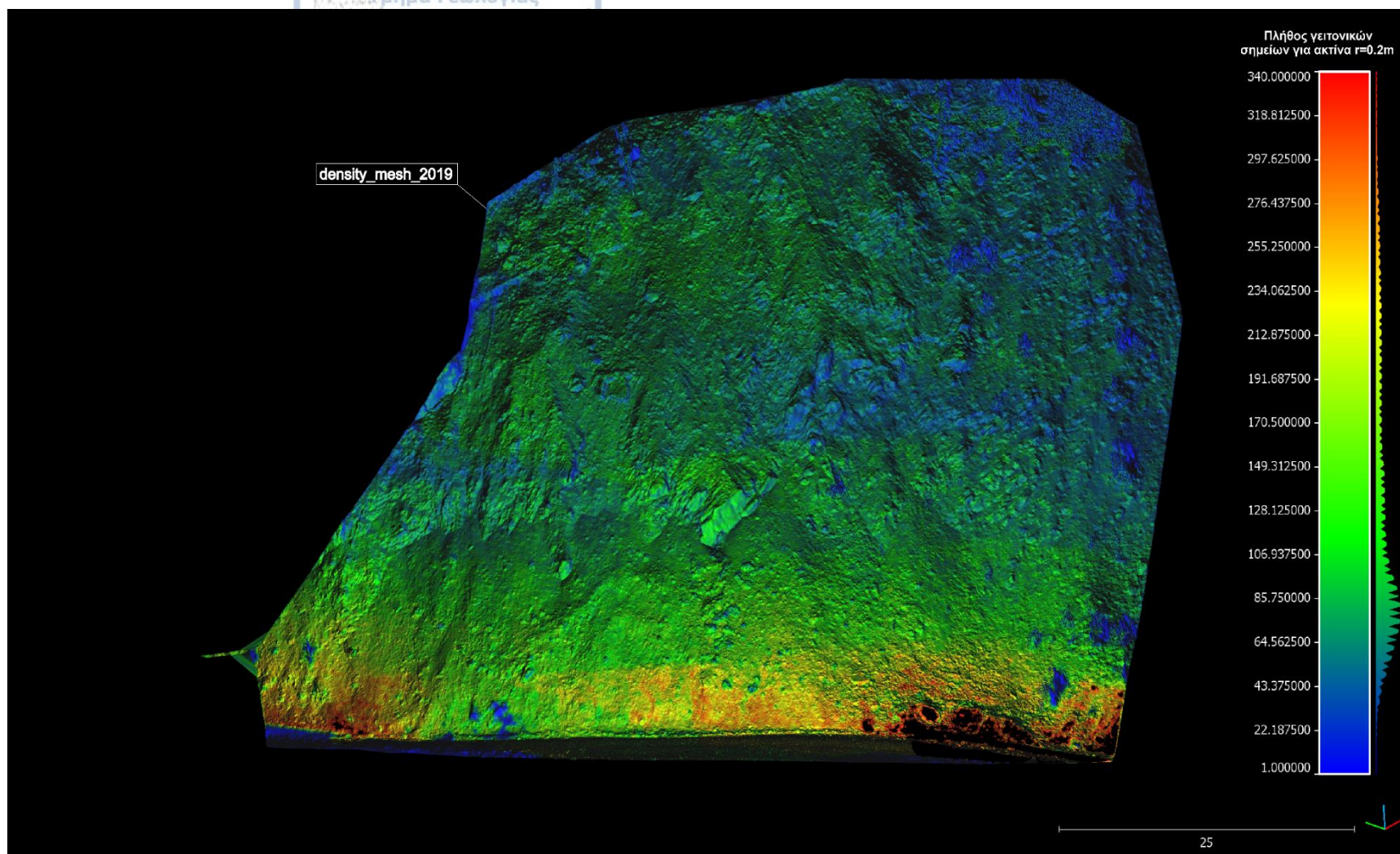
6. Υπολογισμός του όγκου των κατολισθέντων υλικών μέσω της εφαρμογής Volume 2.5D.



Εικόνα 6.1: Η κατανομή της πυκνότητας των σημείων στο νέφος σημείων Cloud_17 που αφορά στη χρονιά 2017, με ακτίνα $r=0.2m$, με χρωματική κλίμακα Μπλε-Πράσινο-Κίτρινο-Κόκκινο.



Εικόνα 6.2: Η κατανομή της πυκνότητας των σημείων στο νέφος σημείων Cloud_18 που αφορά στη χρονιά 2018, με ακτίνα $r=0.2m$, με χρωματική κλίμακα Μπλε-Πράσινο-Κίτρινο-Κόκκινο.



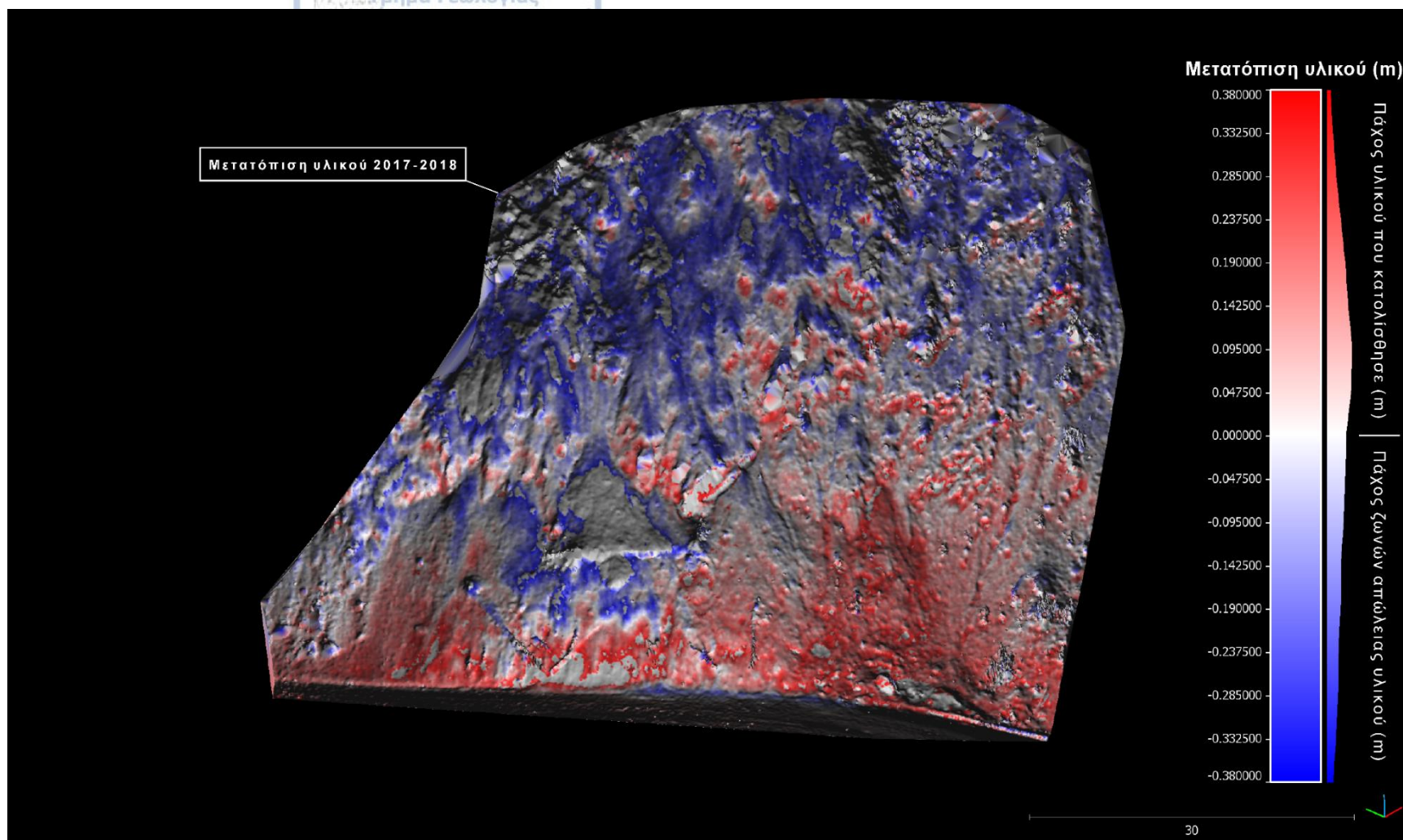
Εικόνα 6.3: Η κατανομή της πυκνότητας των σημείων στο νέφος σημείων Cloud_18 που αφορά στη χρονιά 2019, με ακτίνα $r=0.2m$, με χρωματική κλίμακα Μπλε-Πράσινο-Κίτρινο-Κόκκινο.

Από τη χρήση του αλγόριθμου M3C2 (James et al, 2017) με τον οποίο επεξεργάστηκαν τα νέφη σημείων, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα αναφορικά με την ανίχνευση μετατοπίσεων υλικού στην περιοχή έρευνας:

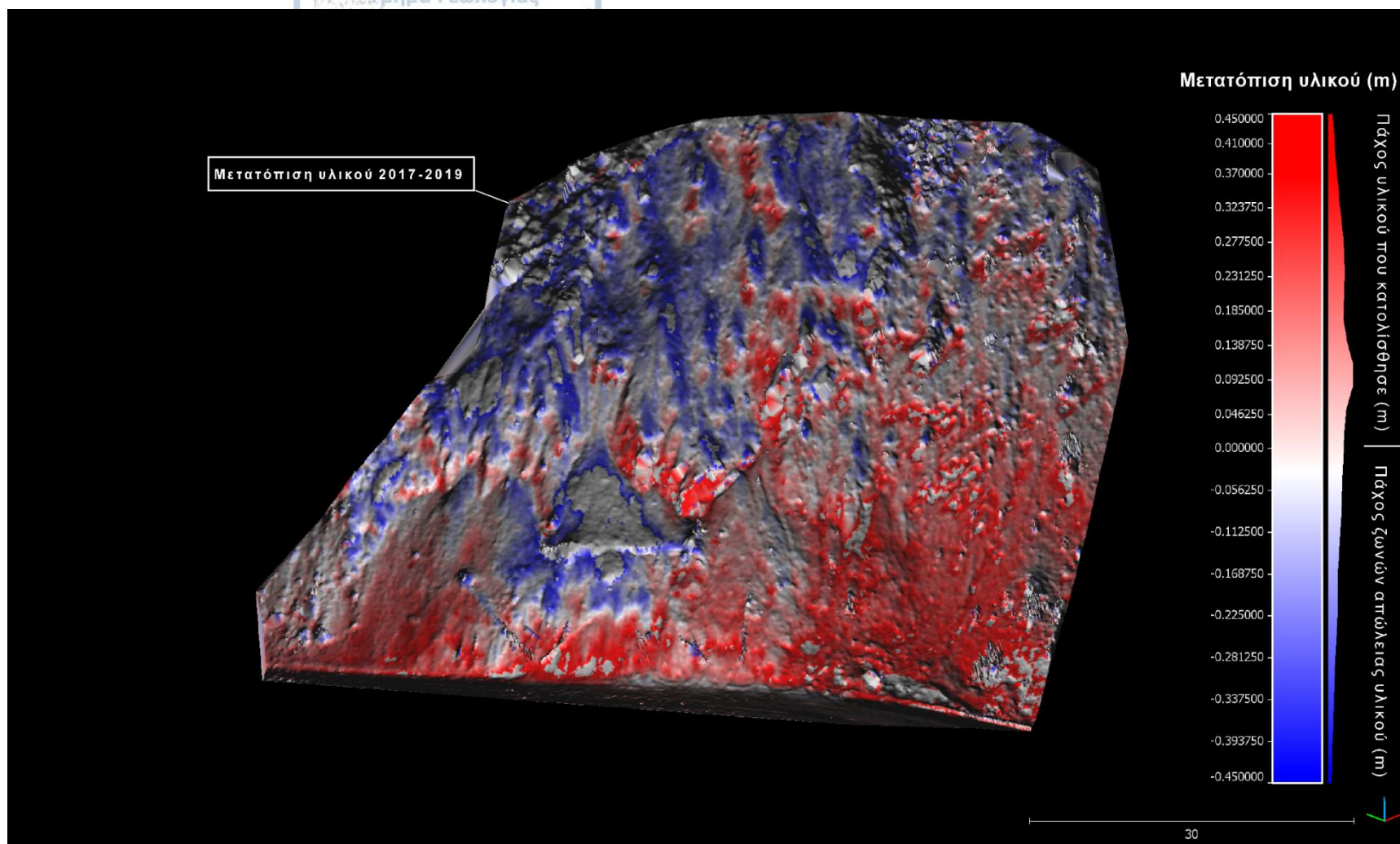
□ Σε χρονικό διάστημα ενός έτους, ανάμεσα στις χρονιές 2017 και 2018, παρατηρήθηκε αύξηση του πάχους της ζώνης των υλικών της κατολίσθησης στα κατάντη του πρανούς, με ταυτόχρονη απώλεια υλικού από τα ανάντη. Πρόκειται για τον ιλύολιθο, ο οποίος υποσκάπτεται λόγω της δράσης του μετεωρικού νερού και κατολισθαίνει. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τις μέγιστες αποδεκτές τιμές μετατοπίσεων που υπολογίστηκαν μέσω του αλγόριθμου M3C2, χρησιμοποιήθηκε διάστημα εμπιστοσύνης 95% στο σύνολο των αποτελεσμάτων. Έτσι προέκυψαν οι τελικές τιμές σχετικά με το πάχος του υλικού που υπέστη υποσκαφή στα ανάντη του πρανούς, αλλά και την αύξηση του πάχους των ζωνών στις οποίες αυτό αποτέθηκε. Η μέγιστη αποδεκτή απόθεση είναι 0.38m (κόκκινο χρώμα) και η μέγιστη αποδεκτή υποσκαφή είναι επίσης 0.38m (μπλε χρώμα). Αποδεκτές επίσης είναι και όλες οι ενδιάμεσες τιμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.4 (Νέφος Σημείων Α).

□ Για την ανίχνευση των αλλαγών σε διάστημα δύο ετών, συγκρίθηκαν τα νέφη σημείων του 2017 και του 2019. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τις μέγιστες αποδεκτές τιμές μετατοπίσεων που υπολογίστηκαν μέσω του αλγόριθμου M3C2, χρησιμοποιήθηκε διάστημα εμπιστοσύνης 95% στο σύνολο των αποτελεσμάτων. Έτσι προέκυψαν οι τελικές τιμές σχετικά με το πάχος του υλικού που υπέστη υποσκαφή στα ανάντη του πρανούς, αλλά και την αύξηση του πάχους των ζωνών στις οποίες αυτό αποτέθηκε. Η μέγιστη αποδεκτή απόθεση είναι 0.45m (κόκκινο χρώμα) και η μέγιστη αποδεκτή υποσκαφή είναι επίσης 0.45m (μπλε χρώμα). Αποδεκτές επίσης είναι και όλες οι ενδιάμεσες τιμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.5 (Νέφος Σημείων Β).

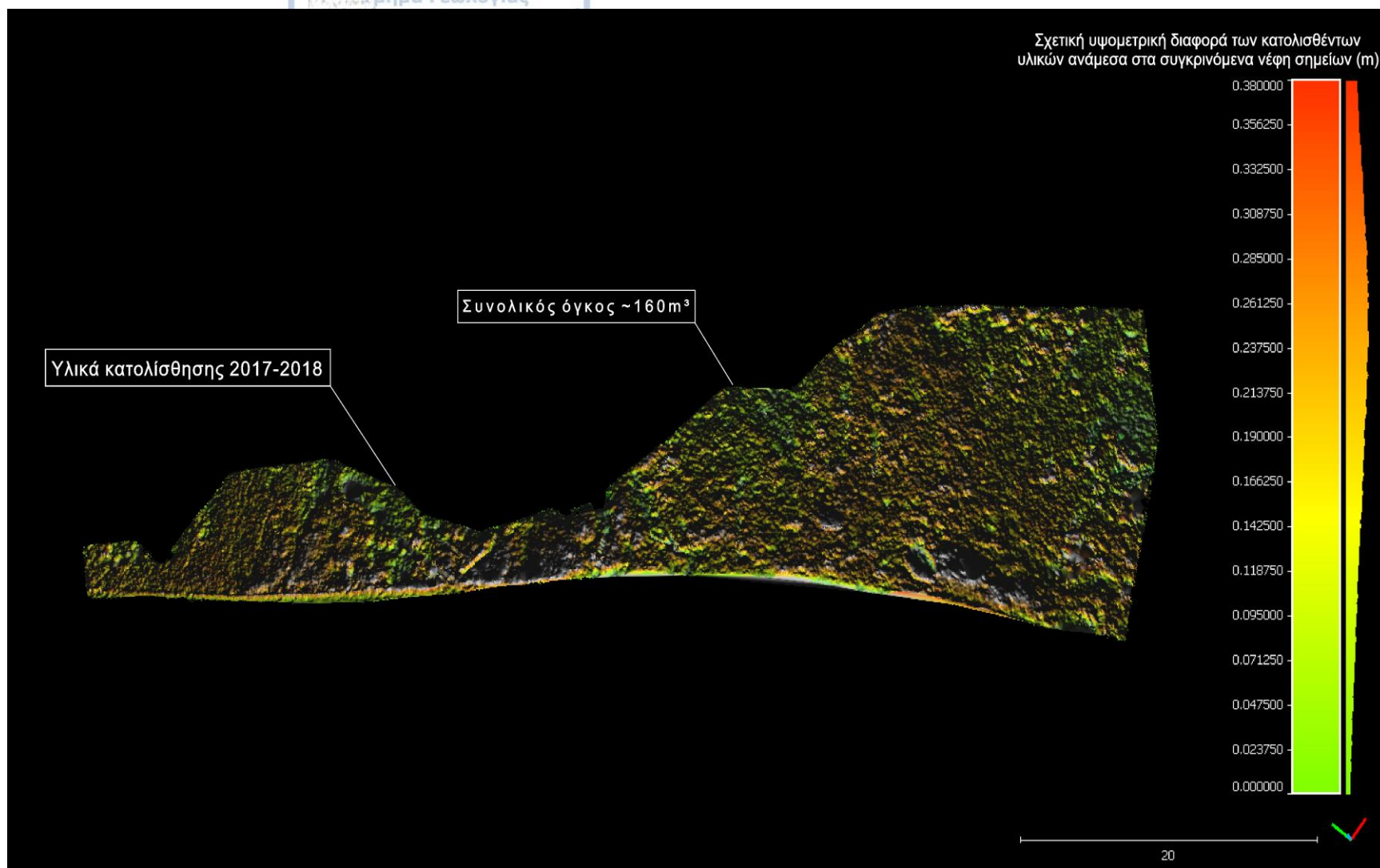
Ακολούθησε υπολογισμός του όγκου των υλικών που υπέστησαν κατολίσθηση για τα χρονικά διαστήματα 2017-2018 και 2017-2019. Οι περιοχές με τα κατολισθέντα υλικά απομονώθηκαν και μέσω της σύγκρισης των δύο νεφών σημείων 2017 και 2018, προέκυψε τρίτο νέφος σημείων το οποίο αποτελεί την προβολή της σχετικής διαφοράς ύψους τους. Για διάστημα δύο ετών, χρησιμοποιήθηκε η ίδια ακολουθία διαδικασιών, με χρήση των νεφών σημείων 2017 και 2019. Για διάστημα ενός έτους (2017-2018) ο όγκος των κατολισθέντων υλικών υπολογίστηκε στα 160m³, ενώ για το διάστημα δύο ετών (2017-2019) 220m³. Στις εικόνες 6.6 και 6.7 παρουσιάζονται τα νέφη σημείων από τα οποία υπολογίστηκαν οι όγκοι των κατολισθέντων υλικών.



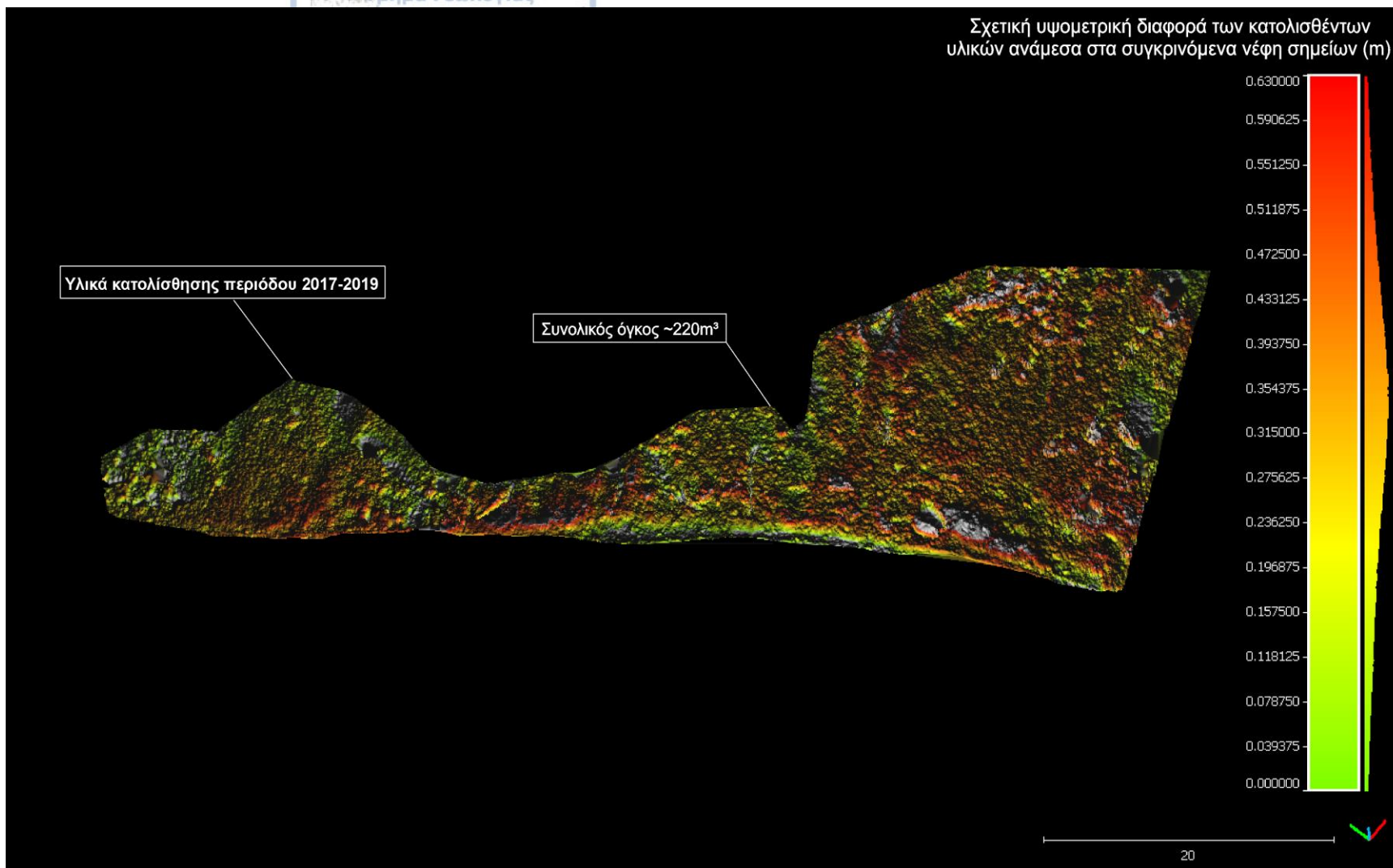
Εικόνα 6.4: Το Νέφος Α. Διακρίνονται με κόκκινο χρώμα τα υλικά όπου έχουν κατολισθήσει και έχουν αποτεθεί στη βάση του πρανούς και με μπλε χρώμα οι περιοχές όπου αυτά τα υλικά υπέστησαν υποσκαφή και κατολίθισαν, σε διάρκεια ενός έτους (2017-2018). Οι γκριζες ζώνες αποτελούν περιοχές όπου οι τιμές των μετρήσεων βρίσκονται εκτός διαστήματος εμπιστοσύνης, ενώ οι λευκές περιοχές αποτελούν μετρήσεις με τιμή 0.



Εικόνα 6.5: Το Νέφος Β. Διακρίνονται με κόκκινο χρώμα τα υλικά όπου έχουν κατολισθήσει και έχουν αποθεθεί στη βάση του πρανούς και με μπλε χρώμα οι περιοχές όπου αυτά τα υλικά υπέστησαν υποσκαφή και κατολίσθησαν, σε διάρκεια δύο ετών (2017-2019). Οι γκριζες ζώνες αποτελούν περιοχές όπου οι τιμές των μετρήσεων βρίσκονται εκτός διαστήματος εμπιστοσύνης, ενώ οι λευκές περιοχές αποτελούν μετρήσεις με τιμή 0.



Εικόνα 6.6: Η σχετική υψομετρική διαφορά των κατολισθέντων υλικών σε διάστημα ενός έτους (2017-2018). Η μέγιστη αποδεκτή διαφορά είναι 0.38m και ο όγκος των υλικών είναι περίπου 160m³.



Εικόνα 6.7: Η σχετική υψομετρική διαφορά των κατολισθέντων υλικών σε διάστημα δύο ετών (2017-2019). Η μέγιστη αποδεκτή διαφορά είναι 0.63m και ο όγκος των υλικών είναι περίπου 220m³.

2017



0m 10m 20m 30m

2018

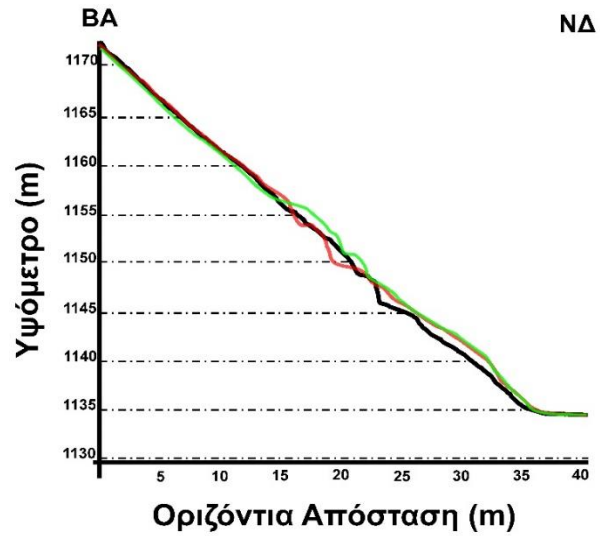


0m 10m 20m 30m

2019



0m 10m 20m 30m



Εικόνα 6.8: Σύγκριση μορφολογικών τομών της περιοχής έρευνας. Με μαύρο χρώμα διακρίνεται η μορφολογική τομή του έτους 2017, αποτελώντας τομή αναφοράς στη σύγκριση με αυτές των ετών 2018 (κόκκινο χρώμα) και 2019 (πράσινο χρώμα). Αριστερά παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα τα ίχνη των μορφολογικών τομών σε κατόψεις της περιοχής έρευνας, ενώ δεξιά διακρίνονται τα ίχνη των τομών σε φωτογραφίες του πρανούς.



Με την εισαγωγή των νεφών σημείων σε κατάλληλο λογισμικό, εξήχθησαν οι παραπάνω μορφολογικές τομές στις οποίες αποτυπώνονται οι διαφορές στη μορφολογία τμήματος της περιοχής έρευνας, έως και δύο έτη έπειτα από την πρώτη μορφολογική τομή. Κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους (2017-2018) παρατηρείται ταπείνωση του αναγλύφου στο μέσο του πρανούς, η οποία διακρίνεται μέσω του χαμηλότερου υψομέτρου της κόκκινης καμπύλης (2018) από αυτό της μαύρης καμπύλης (2017). Πρόκειται για αφαίρεση υλικού από τα ανώτερα-μέσα τμήματα του πρανούς με παράλληλη τοποθέτησή τους στο μέσο και κατώτερο τμήμα του. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου έτους (2018-2019) παρατηρείται ταπείνωση στο ανώτερο τμήμα της πράσινης μορφολογικής τομής (2019) και ανύψωση στο μέσο και κατώτερο τμήμα της, σε σχέση με την κόκκινη του 2018. Η φυσική σημασία αυτής της μεταβολής έχει σχέση με την αφαίρεση υλικών από τα ανώτερα τμήματα του πρανούς τα οποία κατολισθαίνουν και αποθέτονται στα μέσα και κατώτερα τμήματά του.

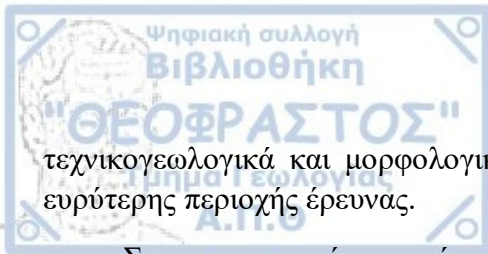
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΝΟΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η έρευνα κατολίσθησης και βραχοκαταπτώσεων στην Επαρχιακή Οδό Γρεβενών-Περιβολίου, έξω από το χωριό Περιβόλι, με συνδυασμό δεδομένων που συλλέχθηκαν με σύγχρονες τεχνικές Τηλεπισκόπησης αλλά και συμβατικές μεθόδους και εργασία υπαίθρου. Σκοπός της έρευνας ήταν η εκτίμηση του μηχανισμού αστοχίας, η αποτύπωση και η οριοθέτηση της κατολίσθησης αλλά και η γεωμηχανική παρακολούθηση του φαινομένου για τρία διαδοχικά έτη.

Η κατολίσθηση που μελετήθηκε τοποθετείται ακριβώς έξω από το Περιβόλι Γρεβενών, το οποίο ανήκει στη Ζώνη Ωλονού-Πίνδου. Στην περιοχή συναντώνται Κρητιδικοί Ασβεστόλιθοι, φλυσχικοί σχηματισμοί και το τεκτονικό μείγμα (melange) της Αβδέλλας. Λόγω της πολύ έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης που έχουν υποστεί οι γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή, οι βραχομάζες εμφανίζονται ασθενείς σε όλη σχεδόν της έκτασή τους, εμφανίζοντας κατολισθητικά φαινόμενα όχι μόνο στην περιοχή έρευνας, αλλά στην ευρύτερη περιοχή.

Η έρευνα του κατολισθητικού φαινομένου ξεκίνησε με τις εργασίες γραφείου. Ακολούθησε υπαίθρια εργασία και για τα τρία διαδοχικά έτη, στην οποία ερευνήθηκαν οι γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής και πραγματοποιήθηκαν οι πτήσεις του ΣμηΕΑ (UAV) αλλά και οι σαρώσεις της περιοχής με LiDAR. Η υπαίθρια παρατήρηση οδήγησε στο συμπέρασμα πως ο επικρατέστερος σχηματισμός στην περιοχή έρευνας είναι λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι με εναλλαγές ιλυοαργιλικών, ψαμμιτικών και πυριτολιθικών σχηματισμών. Η στρώση είναι διακριτή κατά θέσεις, όμως δεν παρουσιάζει μεγάλη εμμονή λόγω της φύσης του τεκτονικού μείγματος και συνοδεύεται από δύο οικογένειες ασυνεχειών σχεδόν κάθετες σε αυτή. Σε ορισμένα σημεία η στρωμάτωση του σχηματισμού εμφανίζει σφιχτή δομή παρά τις επιφανειακές συνθήκες. Ο ιλύολιθος στο συγκεκριμένο σχηματισμό εμφανίζεται ιδιαίτερα διατμημένος και εύθρυπτος. Οι ασυνέχειες είναι αποσαθρωμένες και λείες σε όλη την έκτασή τους. Η τιμή GSI είναι 20-30 (Τύπος F). Επίσης στην περιοχή έρευνας συναντώνται μαζώδεις ασβεστόλιθοι που υπάρχουν στο αριστερό άκρο του πρανούς. Η στρώση τους δεν είναι ορατή σε ορισμένα σημεία και διατρέχονται από τρεις έως τέσσερις οικογένειες ασυνεχειών οι οποίες ορίζουν τεμάχια τα οποία λόγω της δράσης της βαρύτητας απαντώνται και σε χαμηλότερα σημεία του πρανούς ως μεμονωμένα τεμάχια. Οι ασυνέχειες είναι μέτρια αποσαθρωμένες και λείες έως τραχείες. Η τιμή GSI είναι 45-55 (Τύπος D).

Από την ανάλυση και επεξεργασία όλων των δεδομένων προέκυψε πως ο μηχανισμός της κατολίσθησης είναι σύνθετος και αποτελείται από ανισότροπες ολισθήσεις από ανατροπή των σχηματισμών με υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά (ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι και πυριτόλιθοι) λόγω της ευδιάβρωτης φύσης των ιλυολιθικών στρωμάτων. Παράλληλα με τις ανισότροπες αστοχίες, λόγω της ύπαρξης της εφελκυστικής ρωγμής πίσω από τη στέψη του πρανούς, παρατηρήθηκε ισότροπη συμπεριφορά σε μεγάλο τμήμα της περιοχής έρευνας, το οποίο φαίνεται να ολισθαίνει επάνω σε συγκεκριμένη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Μέσω της εκτίμησης του μηχανισμού αστοχίας αλλά και την ακριβή οριοθέτηση του κατολισθητικού φαινομένου από την επεξεργασία των δεδομένων των ΣμηΕΑ (UAV) και LiDAR, δημιουργήθηκε μοντέλο προσομοίωσης της κατολίσθησης που περιλαμβάνει τα κυριότερα γεωλογικά,



τεχνικογεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του κατολισθητικού φαινομένου και της ευρύτερης περιοχής έρευνας.

Συμπερασματικά, η χρήση των δύο τηλεπισκοπικών μεθόδων προσφέρει πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα στην έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων καθώς εξοικονομείται χρόνος και η μελέτη πραγματοποιείται με ασφάλεια αλλά εμφανίζει και ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι ξεπερνώνται με το συνδυασμό των τηλεπισκοπικών μεθόδων με την υπαίθρια εργασία η οποία είναι απαραίτητη για τη σύγκριση και επαλήθευση όλων των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.



Κούκης, Γ.Χ., Σαμπατακάκης Ν. Σ., (2007). Γεωλογία Τεχνικών Έργων – Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Μαρίνος, Β., 2007. Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και συνθετων γεωλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Διδακτορική διατριβή που υποβλήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών 2007.

Μουντράκης, Δ., 2010. Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: UNIVERSITY STUDIO PRESS.

Jaboyedoff M. & Oppikofer T. & Abellán A. & Derron M.-H. & Loye A. & Metzger R. & Pedrazzini A., (2012). "Use of LIDAR in landslide investigations: a review," Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Springer; International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, vol. 61(1), March.

Lato M., (2010). Geotechnical applications of LiDAR pertaining to geomechanical evaluation and hazard identification. *Thesis (Ph.D, Geological Sciences & Geological Engineering) – Queen's University.*

Lucieer, A., de Jong, S. M., & Turner, D., (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment.*

Nex, F. and Remondino, F., (2013). UAV for 3D Mapping Applications: A Review. *Applied Geomatics*, 6, 1-15.

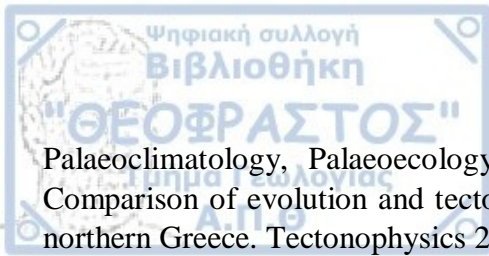
Niethammer, U., Rothmund, S., James M. R., Travelletti, J., Joswig, M., 2010. UAVbased remote sensing of landslides. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. 2010.

Novotný, J., 2013. Varnes Landslide Classification (1978). Charles University in Prague, Faculty of Science, Czech Republic, (November), p.25

Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.-H., and Metzger, R., (2009) : Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011. Uav Photogrammetry For Mapping And 3d Modeling– Current Status And Future Perspectives – . *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38(1/C22), ISPRS ICWG I/V UAV-g (unmanned aerial vehicle in geomatics) conference, Zurich, Switzerland, 2011.

Robertson, H. F. A., Clift, D. P., Degnan, J. P., Jones, J., 1991. Palaeogeographic and palaeotectonic evolution of the Eastern Mediterranean Neotethys. *Palaeogeography*,



Palaeoclimatology, Palaeoecology, 87 (1991): 289-343
Ross, V. J., Zirnmerman, J., 1996. Comparison of evolution and tectonic significance of the Pindos and Vourinos ophiolite suites, northern Greece. Tectonophysics 256 (1996) 1 – 15.

Scaioni, M.; Longoni, L.; Melillo, V.; Papini, M., (2014). Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. Remote Sens., 6, 9600-9652.

USGS, 2004. Landslide Types and Processes. Highway Research Board Special Report, (July), pp.1–4.

Varnes, D.J., (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., Landslides: Analysis and Control, National Research Council, Washington DC, Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy Press, Washington DC.

Διαδικτυακές Πηγές:

Διαδραστική εφαρμογή «Άτλαντας», Ε.Μ.Υ <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>

Google Maps, <https://www.google.gr/maps/>