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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΝΗΛΙΟΥ, Ν. ΗΠΕΙΡΟΥ, ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΜηΕΑ (UAV)

ΚΡΗΤΙΚΟΥ Φ. ΧΡΙΣΤΙΑΝΑ

<u>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ</u>:
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΑΡΙΝΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2019

ΚΡΗΤΙΚΟΥ Φ. ΧΡΙΣΤΙΑΝΑ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5322

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΝΗΛΙΟΥ, Ν. ΗΠΕΙΡΟΥ, ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΜηΕΑ (UAV)

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

<u>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ</u>:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΑΡΙΝΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΝΗΛΙΟΥ, Ν. ΗΠΕΙΡΟΥ, ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΜηΕΑ (UAV)
– Διπλωματική Εργασία

ENGINEERING GEOLOGICAL APPRECIATION AND LANDSLIDE MAPPING IN ANILIO AREA, EPIRUS PREFECTURE, USING UAV

– Bachelor Thesis

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αντικείμενο της εργασίας αποτέλεσε η έρευνα κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή του οικισμού του Ανηλίου. Τα απαραίτητα δεδομένα συλλέχθηκαν κατά την υπαίθρια γεωλογική εργασία και με την συμβολή ενός συστήματος μη επανδρωμένου αεροσκάφους (ΣμηΕΑ) και ενός επίγειου συστήματος σάρωσης LiDAR. Η περιοχή έρευνας εντοπίζεται σε ένα σύνθετο περιβάλλον πολλαπλών λεπιώσεων του φλύσχη της ζώνης Ωλονού-Πίνδου. Ως αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης που έχουν δεχθεί οι φλυσχικοί σχηματισμοί, έχουν δημιουργηθεί βραχομάζες πολύ πτωχής ποιότητας. Λόγω αυτού, σε συνδυασμό με τις μορφολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, έχει δημιουργηθεί μια περιστροφική ολίσθηση μεγάλης κλίμακας. Η εν λόγω κατολίσθηση εξετάστηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, με σκοπό την οριοθέτηση και αποτύπωσή της και την εκτίμηση του μηχανισμού αστοχίας.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής αυτής εργασίας, κύριο Βασίλειο Μαρίνο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας, για την ανάθεση της εργασίας, για τις πολύτιμες γνώσεις, την έμπνευση και τη συνεχή καθοδήγησή του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ευστράτιο Καραντανέλλη για τις συμβουλές και την βοήθεια που μου παρείχε καθ’ όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Τριαντάφυλλο Κακλή, μέλος ΕΔΙΠ, για την συμβολή του στην λήψη δεδομένων κατά την υπαίθρια εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την έρευνα κατολίσθησης, στο Ανήλιο Μετσόβου. Η απόκτηση των σχετικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε με έναν συνδυασμό συμβατικών μεθόδων, που περιλαμβάνουν την συλλογή υπάρχουσας βιβλιογραφίας, με την υπαίθρια γεωλογική εργασία, καθώς και σύγχρονων μεθόδων, με την συμβολή της τεχνολογίας LiDAR και ενός συστήματος μη επανδρωμένου αεροσκάφους (ΣμηΕΑ). Σκοπός της εργασίας ήταν η εκτίμηση των ορίων και του μηχανισμού αστοχίας του φαινομένου, καθώς και η αποτύπωση και προσομοίωσή του.

Αναφέρονται τα θεωρητικά στοιχεία σχετικά με τις κατολισθήσεις, την τεχνολογία LiDAR και την χρήση των Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών. Επίσης, αναλύονται οι γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής. Η περιοχή αποτελείται από σχηματισμούς του φλύσχη της Πίνδου και έχει επηρεαστεί από την επώθησή του προς τα Δυτικά με αποτέλεσμα στην περιοχή να εμφανίζεται μια σειρά λεπιώσεων του φλύσχη.

Στα πλαίσια της εργασίας πεδίου έγινε αξιολόγηση των γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών της περιοχής της κατολίσθησης, παράλληλα με την λήψη δεδομένων με τα δύο εργαλεία. Τα δεδομένα αυτά, μετά από επεξεργασία, χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση και αποτύπωση των κατολισθήσεων.

Αναλύονται οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες όπως προέκυψαν από την εργασία πεδίου με σκοπό την κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας. Οι βραχομάζες του ιλυολιθικού φλύσχη που εμφανίζονται στην περιοχή της κατολίσθησης έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και είναι χαμηλής ποιότητας με αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με τις επιτόπου μορφολογικές, κλιματικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, να έχουν δημιουργηθεί κυκλικού τύπου αστοχίες.

ABSTRACT

The current thesis deals with a landslide investigation in the region of Anilio. For data acquisition, a combination of methods was applied, concerning traditional methods, such as collection of existing adjacent studies, in situ geological investigation, and innovative methods, with the contribution of LiDAR technology and an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The purpose of this thesis was the delineation and mapping of the landslide, the evaluation of the failure mechanism as well as the creation of a conceptual model of the landslide in study.

The theoretical background of landslide phenomena, LiDAR technology and Unmanned Aerial Vehicles are presented. Moreover, the geological conditions of the area of interest are analyzed. The area is comprised of Pindos' flysch formations which have been affected by the overthrust of the Pindos nappe to the West, resulting in the presence of a series of minor thrusts in Pindos flysch.

A field investigation was conducted, during which the geological and engineering geological conditions of the study area were observed. Concurrently, data were collected using LiDAR technology and an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and were, later, processed and used in order to identify and map the landslide features.

The engineering geological conditions, which were observed during the in situ investigation, are analyzed, in order to conclude to a possible failure mechanism. The siltstone flysch rock masses that are present in the area of the landslide are heavily tectonically disturbed and, thus, of poor quality. This, in connection with the morphological, meteorological and hydrogeological conditions of the area, has resulted in the creation of circular failures.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο-Σκοπός

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η έρευνα κατολισθητικού φαινομένου στην περιοχή του Ανηλίου Μετσόβου, σε ένα σύνθετο περιβάλλον φλυσχικών σχηματισμών.

Η έρευνα διεξήχθη με έναν συνδυασμό συμβατικών μεθόδων και σύγχρονων τεχνικών Τηλεπισκόπησης για την απόκτηση των σχετικών δεδομένων. Συγκεκριμένα, οι πηγές πληροφοριών και τα εργαλεία συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, παρατίθενται παρακάτω:

- Σχετική βιβλιογραφία, επιστημονικές εργασίες και διαδικτυακές πηγές πληροφοριών
- Εργασία υπαίθρου για αξιολόγηση των επιφανειακών διαρρήξεων του εδάφους, του οικισμού και της ποιότητας εδάφους
- Ένα Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΣμηΕΑ)
- Ένα Επίγειο Σύστημα Σάρωσης LiDAR

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η κατανόηση και εξήγηση του κατολισθητικού φαινομένου με την πρόταση ενός μηχανισμού αστοχίας, καθώς και η οριοθέτηση και αποτύπωση αυτού.

1.2 Περιοχή έρευνας

Η περιοχή έρευνας εντοπίζεται στην περιοχή του χωριού Ανηλίου. Το Ανήλιο βρίσκεται στην Βόρεια Πίνδο και εντάσσεται στον δήμο Μετσόβου του Νομού Ιωαννίνων (Σχήμα 1.1). Το ανάγλυφο της περιοχής είναι ορεινό, με το χωριό του Ανηλίου να εντοπίζεται σε υψόμετρο περίπου 1.050 μέτρα, απέναντι από το Μέτσοβο (Εικόνα 1.1). Η υπό μελέτη περιοχή εντάσσεται στην Γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου και συγκροτείται από σχηματισμούς του φλύσχη της Πίνδου. Χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η έντονη τεκτονική λόγω των πολλαπλών λεπιώσεων, που σε συνδυασμό με τις μορφολογικές, κλιματικές και υδρογεωλογικές συνθήκες καθιστά την περιοχή επιρρεπή σε φαινόμενα αστάθειας.

Σχήμα 1.1 Χάρτης Ελλάδος που απεικονίζει την θέση της περιοχής έρευνας. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η θέση του δήμου Μετσόβου (Wikipedia)

Εικόνα 1.1 Εικόνα περιοχής του Ανηλίου. Με γαλάζιο πλαίσιο επισημαίνεται η περιοχή έρευνας (Google Earth)

1.3 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας είναι η εξής:

- Συλλογή υπάρχουσας βιβλιογραφίας, σχετικής με τα κατολισθητικά φαινόμενα, την τεχνολογία LiDAR και τα συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ), καθώς και πληροφορίες για τις γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του Ανηλίου
- Επίσκεψη στην περιοχή έρευνας για την πραγματοποίηση εργασίας πεδίου. Στο στάδιο αυτό έγινε η συλλογή πληροφοριών από παρατηρήσεις, καθώς και η απόκτηση δεδομένων με τα δύο εργαλεία (σύστημα σάρωσης LiDAR και σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους).
- Επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν με τις δύο τεχνικές Τηλεπισκόπησης, για την παραγωγή των τελικών προϊόντων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση της κατολίσθησης
- Αξιολόγηση των γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών από παρατηρήσεις κατά την εργασία πεδίου με σκοπό την κατανόηση του φαινομένου και την πρόταση ενός μηχανισμού αστοχίας
- Σύνθεση των υπαίθριων παρατηρήσεων και των παραγώγων επεξεργασίας των δεδομένων LiDAR και ΣμηΕΑ με σκοπό τη δημιουργία ενός μοντέλου της κατολίσθησης

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΕΡΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Οι κατολισθήσεις υπάγονται, μαζί με τις ηφαιστειακές εκρήξεις, τους σεισμούς, τις πλημμύρες κ.α., στους φυσικούς κινδύνους. Ένα κατολισθητικό φαινόμενο δεν οφείλεται σε έναν μόνο παράγοντα, αλλά σε έναν συνδυασμό παραγόντων, γεγονός που καθιστά το φαινόμενο αυτό πολύπλοκο. Τέτοια φαινόμενα συνοδεύονται πολλές φορές από σοβαρές κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Λόγω αυτού, κρίνεται αναγκαία η γνώση των συνθηκών και αιτιών που προκαλούν τις κατολισθήσεις, ώστε να είναι επιτυχής η αποκατάσταση ή και η πρόβλεψή τους.

2.1 Ορισμοί

Για την λέξη «κατολίσθηση» έχουν προταθεί πολλοί ορισμοί, κατά καιρούς, από διάφορους ερευνητές. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιοι από τους ορισμούς:

- Ο Terzaghi (1950) χαρακτηρίζει μια κατολίσθηση ως «μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω».
- Ο Varnes (1978) χρησιμοποιεί τον όρο «μετακίνηση μαζών» για να περιγράψει τις κατολισθήσεις θεωρώντας ότι είναι πιο πλήρης καθώς δεν αφορά μόνο τη διαδικασία της ολίσθησης (slide). Με τον όρο «μετακίνηση μαζών» περιλαμβάνει «κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό».
- Ο Cruden (1991) ορίζει την κατολίσθηση ως «κίνηση μιας μάζας βράχου, εδάφους ή κορημάτων προς τα κατάντη ενός πρανούς».

Η ευρύτερη έννοια του όρου «κατολίσθηση» περιλαμβάνει κάθε αλλαγή στην επιφάνεια μιας πλαγιάς που συνοδεύεται από μετακίνηση υλικού προς αναζήτηση μιας νέας θέσης ισορροπίας.

2.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Η πολυπλοκότητα των κατολισθήσεων έχει καταστήσει απαραίτητη την ταξινόμησή τους, γεγονός που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές. Έχουν προταθεί πολλές ταξινομήσεις για τις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικά κριτήρια, όπως, ο τύπος της μετακίνησης, το είδος του υλικού, το καθεστώς ενεργότητας, ο ρυθμός μετακίνησης.

Από τις ταξινομήσεις που έχουν προταθεί, επικρατέστερη είναι η ταξινόμηση του Varnes (1978), ο οποίος χρησιμοποίησε δύο βασικά κριτήρια: τον τύπο της μετακίνησης και το είδος του μετακινούμενου υλικού.

Οι τύποι της μετακίνησης, κατά τον Varnes, διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες:

- *Πτώσεις (falls)*
- *Ανατροπές (topples)*
- *Ολισθήσεις (slides)*
- *Εξαπλώσεις (spreads)*
- *Ροές (flows)*
- *Σύνθετες μετακινήσεις (complex movements)*

Τα είδη του μετακινούμενου υλικού, σύμφωνα με αυτήν την ταξινόμηση, μπορεί να είναι:

- Βραχώδες υπόβαθρο (bedrock): Σύμφωνα με τον Varnes, ως βραχώδες υπόβαθρο θεωρείται ένα σκληρό ή σταθερό πέτρωμα που βρισκόταν άθικτο στην φυσική του θέση πριν να εκδηλωθεί η μετακίνηση
- Εδάφη (soils): ο Varnes ορίζει ως έδαφος τα χαλαρά ή ασθενώς συνδεδεμένα συσσωματώματα στερεών σωματιδίων, που έχουν προκύψει από την αποσάθρωση, διάβρωση και μεταφορά προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Χωρίζει, επίσης, τα εδάφη σε δύο κατηγορίες:

  α) Κορήματα (debris): σύμφωνα με τον Varnes πρόκειται για εδάφη με σημαντικό ποσοστό χονδρόκοκκου υλικού. Συγκεκριμένα, ένα ποσοστό 20-80% των θραυσμάτων έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 2mm, ενώ το υπόλοιπο έχει μέγεθος μικρότερο από 2mm.

  β) Γαίες (earth): με τον όρο αυτό περιλαμβάνει εδάφη που αποτελούνται από υλικά μεγέθους μικρότερου από 2mm σε ποσοστό 80% και άνω.

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση μετακίνησης μαζών κατά Varnes (1978)

Τύπος μετακίνησης		Τύπος μετακινούμενου υλικού		
		Βραχώδες υπόβαθρο	Μηχανικά Εδάφη	
			Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Κατάπτωση		Κατάπτωση βράχων	Κατάπτωση κορημάτων	Κατάπτωση γαιών
Ανατροπή		Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορημάτων	Ανατροπή γαιών
Ολίσθηση	Περιστροφική	Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Πλευρική Εξάπλωση		Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροή		Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός)	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
			(ερπυσμός εδάφους)	
Σύνθετη		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων		

Τα είδη των μετακινήσεων, σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Varnes (1978), παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω:

- **Καταπτώσεις (falls)**: Μια μάζα οποιουδήποτε μεγέθους αποκολλάται από ένα απότομο πρανές, κατά μήκος μιας επιφάνειας με ελάχιστη ή χωρίς διατμητική μετατόπιση, και κατέρχεται με ελεύθερη πτώση, αναπήδηση ή κύλιση.

- **Ανατροπές (topples)**: Αυτός ο τύπος μετακίνησης περιλαμβάνει μια προς τα έξω περιστροφή τμήματος ενός πρανούς, γύρω από ένα σημείο περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας και προκαλείται από τη δύναμη της βαρύτητας και από δυνάμεις που ασκούνται από γειτονικά τεμάχη ή από ρωγμές που έχουν πληρωθεί με νερό.

- **Ολισθήσεις (slides)**: Στις ολισθήσεις, η μετακίνηση περιλαμβάνει διατμητική παραμόρφωση και μετατόπιση κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών

Οι ολισθήσεις διακρίνονται σε περιστροφικές και μεταθετικές.

- **Περιστροφικές ολισθήσεις (rotational slides)**: Πρόκειται για ολισθήσεις που γίνονται κατά μήκος μιας κοίλης προς τα επάνω επιφάνειας. Το ανώτερο τμήμα της ολισθαίνουσας μάζας κινείται σχεδόν κατακόρυφα προς τα κάτω ενώ σε κατώτερα σημεία παρατηρείται ανύψωση (φούσκωμα). Οι περιστροφικές ολισθήσεις εκδηλώνονται κυρίως σε εδάφη και σε βραχομάζες με πολύ πυκνά συστήματα ασυνεχειών, οι οποίες μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρονται ισότροπα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας περιστροφικής ολίσθησης, σύμφωνα με τον Varnes (1978), αναφέρονται παρακάτω:

-**Στέψη (crown)**: Το ανώτερο σταθερό τμήμα του εδάφους που είναι πλησιέστερο στην κύρια κατακρήμνιση.

-**Κύρια κατακρήμνιση (main scarp)**: Απότομο βύθισμα της επιφάνειας του εδάφους στην στέψη, που προκλήθηκε από την μετακίνηση.

-**Κορυφή (top)**: Το πιο υψηλό σημείο που φέρνει σε επαφή την ολισθαίνουσα μάζα και την κύρια κατακρήμνιση.

-**Κεφαλή (head)**: Τα ανώτερα τμήματα της ολίσθησης κατά μήκος της επαφής της ολισθαίνουσας μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.

-**Δευτερεύουσα κατακρήμνιση (minor scarp)**: Επιφάνεια θραύσης της ολισθαίνουσας μάζας που έχει προκληθεί από διαφορικές μετακινήσεις αυτής.

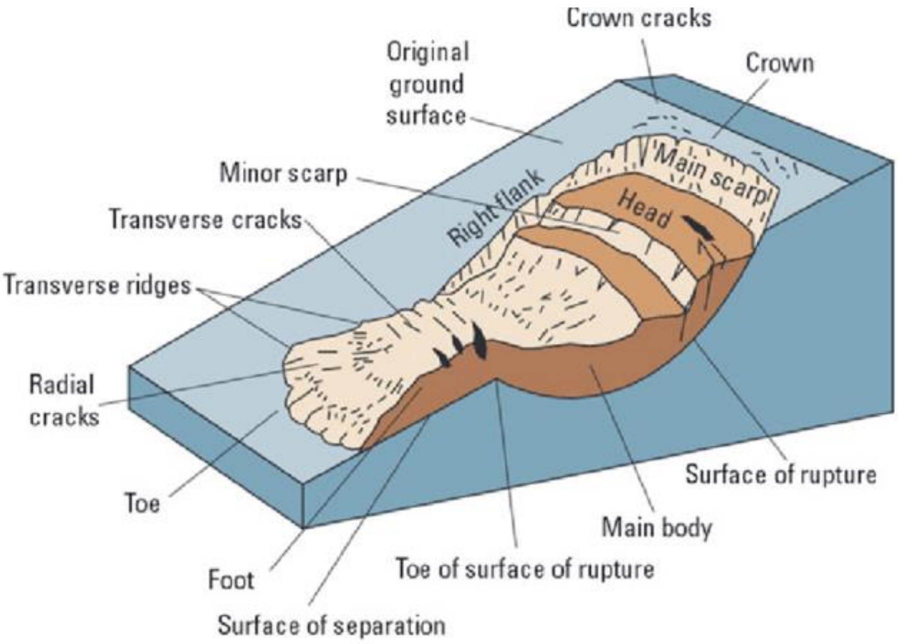
-**Κύριο σώμα (main body)**: Το τμήμα εκείνο της ολισθαίνουσας μάζας που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης, μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης και της επιφάνειας ολίσθησης.

-**Πόδας (foot)**: Το τμήμα της κατολίσθησης που έχει κινηθεί πέραν του τέλους της επιφάνειας ολίσθησης και βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (επιφάνεια διαχωρισμού).

-Απόληξη (toe): Το κατώτερο όριο της ολισθαίνουσας μάζας.

-Άκρο (tip): Το σημείο της απόληξης που απέχει την μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της κατολίσθησης.

-Επιφάνεια ολίσθησης (surface of rupture): Η επιφάνεια πάνω στην οποία έγινε η ολίσθηση και αποτελεί προέκταση της κύριας κατακρήμνισης.



Σχήμα 2.1 Κύρια χαρακτηριστικά μιας ιδεατής περιστροφικής ολίσθησης (Varnes, 1978)

- **Μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides)**: Η ολισθαίνουσα μάζα κινείται προς τα κάτω ή προς τα έξω κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών που μπορεί να είναι επίπεδες ή ελαφρώς κυματοειδείς και χαρακτηρίζονται από μικρή περιστροφική κίνηση ή κάμψη. Η κίνηση στις μεταθετικές ολισθήσεις ελέγχεται από επιφάνειες αδυναμίας, όπως ρήγματα, διακλάσεις, επιφάνειες στρώσης, από διαφοροποιήσεις στην διατμητική αντοχή μεταξύ των στρωμάτων, ή από την επαφή του βραχώδους υλικού με τον υπερκείμενο μανδύα αποσάθρωσης.

Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται και οι εξής ολισθήσεις:

α) Επίπεδες ολισθήσεις: Σε βραχώδη πρανή, οι ολισθήσεις αυτές ελέγχονται από μία επιφάνεια ασυνέχειας η οποία προβάλλει στο μέτωπο του πρανούς. Η ολίσθηση γίνεται κατά μήκος αυτής της ασυνέχειας.

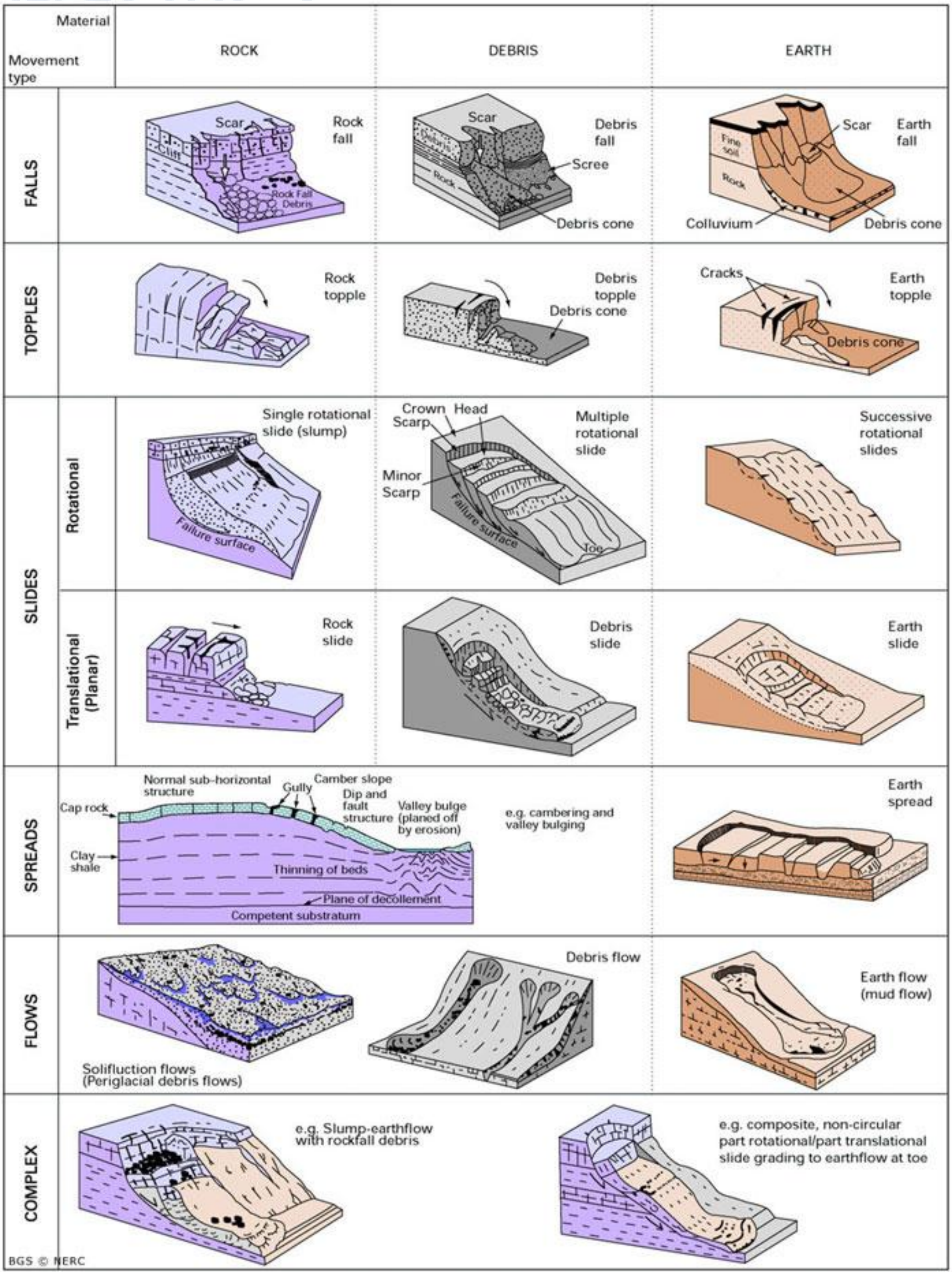
β) Σφηνοειδείς ολισθήσεις: Οι ολισθήσεις αυτές περιλαμβάνουν μια μάζα που ορίζεται από δύο επιφάνειες ασυνεχειών που τέμνονται κατά μια ακμή με κατηφορική κλίση προς το μέτωπο του πρανούς. Η ολίσθηση μπορεί να γίνει κατά μήκος μίας εκ των δύο ασυνεχειών ή κατά μήκος της ακμής.

- **Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)**: Ο κυρίαρχος τύπος μετακίνησης είναι η πλευρική έκταση συνοδευόμενη από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές. Σύμφωνα με τον Varnes, διακρίνονται δύο είδη πλευρικών εξαπλώσεων:

  α) Κινήσεις που εκδηλώνονται ως αποτέλεσμα μιας γενικής έκτασης, χωρίς την ύπαρξη αναγνωρισμένης ή καθορισμένης επιφάνειας διάτμησης και εκδηλώνονται συνήθως σε βραχώδη υλικά.

  β) Κινήσεις που περιλαμβάνουν θραύση και έκταση συνεκτικού υλικού, βραχώδους ή εδαφικού, που οφείλεται στην ρευστοποίηση ή στην πλαστική ροή ενός υποκείμενου υλικού.

- **Ροές (flows)**: Οι ροές που εκδηλώνονται σε χαλαρά υλικά και μπορεί να είναι γρήγορες ή αργές, υγρές ή ξηρές. Στο βραχώδες υπόβαθρο, τέτοιες κινήσεις είναι πολύ αργές και κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές κοντινές ρωγμές, ή παρατηρούνται στην ίδια τη μάζα του πετρώματος και προέρχονται από πτύχωση, κάμψη ή διόγκωση.
- **Σύνθετες μετακινήσεις (composite movements)**: Πρόκειται για συνδυασμό δύο ή περισσότερων τύπων μετακίνησης.



Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση της ταξινόμησης των κατολισθήσεων (Varnes, 1978)

2.3 Αίτια εκδήλωσης κατολισθήσεων

Όπως προαναφέρθηκε, οι κατολισθήσεις αποτελούν περίπλοκα φαινόμενα καθώς δεν οφείλονται αποκλειστικά σε ένα αίτιο. Η μετάβαση από μια θέση ισορροπίας σε ένα καθεστώς αστάθειας πραγματοποιείται με μια σειρά γεγονότων που αφορούν γεωλογικές, γεωμορφολογικές, φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες. Ως έναυσμα μετακίνησης (triggering factor) αναφέρεται ο τελικός παράγοντας που προκαλεί την εκκίνηση του φαινομένου, όπως είναι, ενδεικτικά, μια έντονη βροχόπτωση ή ένας σεισμός.

Ο Varnes (1978) χωρίζει τους παράγοντες εκδήλωσης μιας κατολίσθησης σε τρεις κατηγορίες:

- Στους παράγοντες που συμβάλλουν στην **αύξηση της διατμητικής τάσης** που ασκείται στο μετακινούμενο υλικό: αφαίρεση υλικού από τη βάση ενός πρανούς, επιφόρτιση, πλευρικές πιέσεις, παροδικές τάσεις, τοπική ανύψωση.
- Στους παράγοντες που συμβάλλουν στην **χαμηλή διατμητική αντοχή** του υλικού: λιθολογική σύσταση , υφή και δομή του υλικού
- Στους παράγοντες που προκαλούν **μείωση της διατμητικής αντοχής** του υλικού: αποσάθρωση, παρουσία νερού με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων του υλικού ή της υδροστατικής πίεσης στις ρωγμές με αποτέλεσμα τη μείωση των ενεργών τάσεων και συνεπώς της διατμητικής αντοχής.

Η Ομάδα Εργασίας της UNESCO για τις κατολισθήσεις (Working Party on World Landslide Inventory, 1994), ασχολήθηκε με παράγοντες που προκαλούν τις κατολισθήσεις και πρότεινε μια ταξινόμηση. Η ταξινόμηση αυτή (WP/WLI, 1994) στηρίζεται στην υποδιαίρεση των παραγόντων που προκαλούν τα κατολισθητικά φαινόμενα με βάση:

- το αποτέλεσμα και τον βαθμό επίδρασής τους, σε:

    α) προκαταρκτικούς παράγοντες (preparatory causal factors)

    β) παράγοντες εναύσματος μετακίνησης (triggering causal factors)

- τη προέλευσή τους, σε παράγοντες που αναφέρονται στις:

    α) εδαφικές συνθήκες

    β) γεωμορφολογικές διεργασίες

    γ) φυσικές διεργασίες

    δ) ανθρωπογενείς διεργασίες

Πίνακας 2.2 Αναλυτικά οι κύριοι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI, 1994)

ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
1	Πλαστικό χαμηλής αντοχής υλικό
2	Ευαίσθητο υλικό
3	Υλικό με επιρρέπεια στη θραύση
4	Αποσαθρωμένο υλικό
5	Διατμημένο υλικό
6	Ρωγματωμένο ή διακλασμένο υλικό
7	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)
8	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)
9	Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα
10	Διαφοροποιήσεις στην δυσκαμψία (στιφρό ή πυκνό υλικό υπερκείμενο πλαστικού υλικού)
ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Τεκτονική ανύψωση
2	Ανύψωση λόγω ηφαιστείων
3	Επίδραση παγετώνων
4	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρανούς
5	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρανούς
6	Διάβρωση της βάσης του πρανούς από παγετώνα
7	Διάβρωση των πλευρών του πρανούς
8	Εσωτερική διάβρωση
9	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρανούς
10	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης (από πυρκαγιά, διάβρωση κ.ά.)
ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Έντονη, μικρής διάρκειας βροχόπτωση
2	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού
3	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση
4	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων
5	Σεισμοί
6	Εκρήξεις ηφαιστείων
7	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστείων
8	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
9	Αποσάθρωση λόγω παγετού
10	Αποσάθρωση από διόγκωση ή συρρίκνωση εδαφών
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Εκσκαφές στη βάση του πρανούς
2	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη του πρανούς
3	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμιευτήρες
4	Άρδευση
5	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
6	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα
7	Αποψίλωση
8	Λατομεία και μεταλλεία
9	Δημιουργία χωματερών
10	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών κ.ά.)

2.4 Αναγνώριση κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις, ανάλογα με το είδος τους, φέρουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται κυρίως στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των περιστροφικών ολισθήσεων είναι: απότομες τοξοειδείς θραύσεις και ρωγμές του εδάφους, εξάρσεις του αναγλύφου και επίπεδες επιφάνειες με ή χωρίς συγκεντρώσεις νερού, πάνω σε πλαγιές, καθώς και ρωγμές που μπορούν να εμφανίζονται σε υφιστάμενες κατασκευές. Η αναγνώριση των κατολισθήσεων (στην ύπαιθρο, σε χάρτες, εικόνες κ.α.) έγκειται στην παρατήρηση αυτών των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών.

Τα τελευταία χρόνια, σημαντική στην παροχή δεδομένων για την έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων, είναι η προσφορά της Τηλεπισκόπησης. Η Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) είναι η τεχνική συλλογής δεδομένων για τον προσδιορισμό της φύσης και των ιδιοτήτων των αντικειμένων μιας περιοχής, από απόσταση. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και των μεθόδων Τηλεπισκόπησης έχει καταστήσει δυνατή και ευκολότερη την απόκτηση δεδομένων, όπως είναι, για παράδειγμα, οι αεροφωτογραφίες και οι δορυφορικές εικόνες, που αξιοποιούνται στην μελέτη των κατολισθήσεων καλύπτοντας ένα πλήθος εφαρμογών όπως είναι η αναγνώριση, ο χαρακτηρισμός και η αποτύπωση των κατολισθήσεων, η παρακολούθηση αυτών και η εκτίμηση της επιδεκτικότητας και επικινδυνότητας (Scaioni et al., 2014).

Παράλληλα, η ραγδαία εξέλιξη της Πληροφορικής, εμφανίζει πολλές προοπτικές όσον αφορά την ανίχνευση και διερεύνηση κατολισθήσεων με αυτοματοποιημένο τρόπο. Σε κάθε περίπτωση, αναγκαία συνθήκη είναι η γνώση των ιδιοτήτων, εκείνων, που χαρακτηρίζουν μια κατολίσθηση, ανάλογα με το είδος της, έτσι ώστε να γίνει σωστή ερμηνεία και εξαγωγή συμπερασμάτων.

2.5 Μελέτη κατολισθήσεων με τη χρήση Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ)

2.5.1 Εισαγωγή

Ο όρος «Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους» (Unmanned Aircraft System) περιλαμβάνει οποιοδήποτε μη επανδρωμένο αεροσκάφος μαζί με τον σχετικό εξοπλισμό που το συνοδεύει (π.χ. επίγειος σταθμός ελέγχου, σύστημα πλοήγησης κ.α.) και είναι απαραίτητος για τη λειτουργία του αεροσκάφους. Η κατάσταση λειτουργίας των ΣμηΕΑ μπορεί να είναι αυτόνομη, ημιαυτόνομη ή τηλεχειριζόμενη. Άλλες ονομασίες που έχουν δοθεί, με σημαντικές, όμως, διαφοροποιήσεις στη σημασία είναι: μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (Unmanned Aerial Vehicle), τηλεχειριζόμενο αεροσκάφος (Remotely Piloted Aircraft), τηλεχειριζόμενο σύστημα αεροσκάφους (Remotely Piloted Aircraft System).

Συνήθη εξαρτήματα των αεροσκαφών αυτών είναι:

- **Συστήματα πλοήγησης**: IMU (Intertial Measurement Unit), GPS (Global Positioning System). Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν τη γνώση της θέσης του αεροσκάφους κάθε χρονική στιγμή και δίνουν τη δυνατότητα σε αυτό να μην αποκλίνει από το σχέδιο πτήσης που του έχει ανατεθεί.

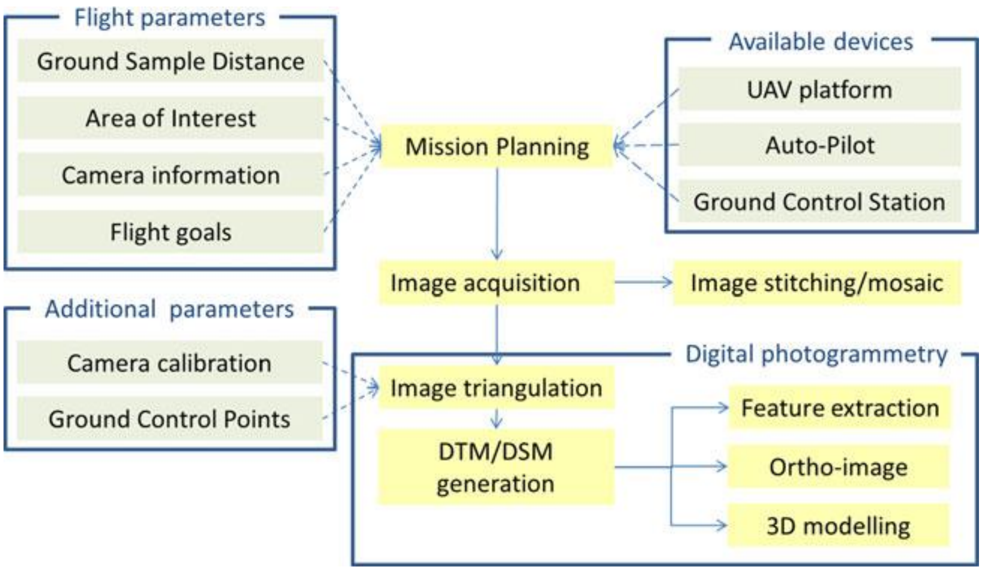
- **Αισθητήρες καταγραφής και μετρήσεων**: Πρόκειται για φωτογραφικές, θερμικές και πολυφασματικές κάμερες, που καταγράφουν την ηλιακή ή θερμική ακτινοβολία στα ορατά και υπέρυθρα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, και για άλλους σύγχρονους αισθητήρες, όπως είναι οι αισθητήρες LiDAR, η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στην εκπομπή ακτινοβολίας laser και καταγραφή της ανακλώμενης ακτινοβολίας που επιστρέφει όταν έρθει σε επαφή με έναν στόχο.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, σε αυτά με: α) σταθερές πτέρυγες (Fixed Wing), όπως τα αεροπλάνα, και β) με έλικες (Rotary), όπως τα ελικόπτερα. Το μέγεθός τους ποικίλει, εφόσον ο όρος περιλαμβάνει οποιοδήποτε μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Βέβαια, πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι τα μικρά μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Mini UAVs), καθώς εμφανίζουν ευελιξία και έχουν μικρό κόστος.

Τα ΣμηΕΑ έχουν πολλές εφαρμογές, τόσο για στρατιωτικούς όσο για εμπορικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Η διαθεσιμότητα και το μικρό τους κόστος, σε συνδυασμό με την παροχή δεδομένων υψηλής ανάλυσης έχει προσεγγίσει το ενδιαφέρον πολλών επιστημών, με αποτέλεσμα η χρήση των ΣμηΕΑ να εμφανίζει ραγδαία ανάπτυξη, με εφαρμογές σε πολλά πεδία, όπως είναι, ενδεικτικά, η αρχαιολογία και η γεωγραφία. Τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται ευρέως στην μελέτη φυσικών καταστροφών, όπως στην μελέτη ηφαιστείων, σεισμογενών περιοχών και κατολισθητικών φαινομένων.

2.5.2 Μεθοδολογία

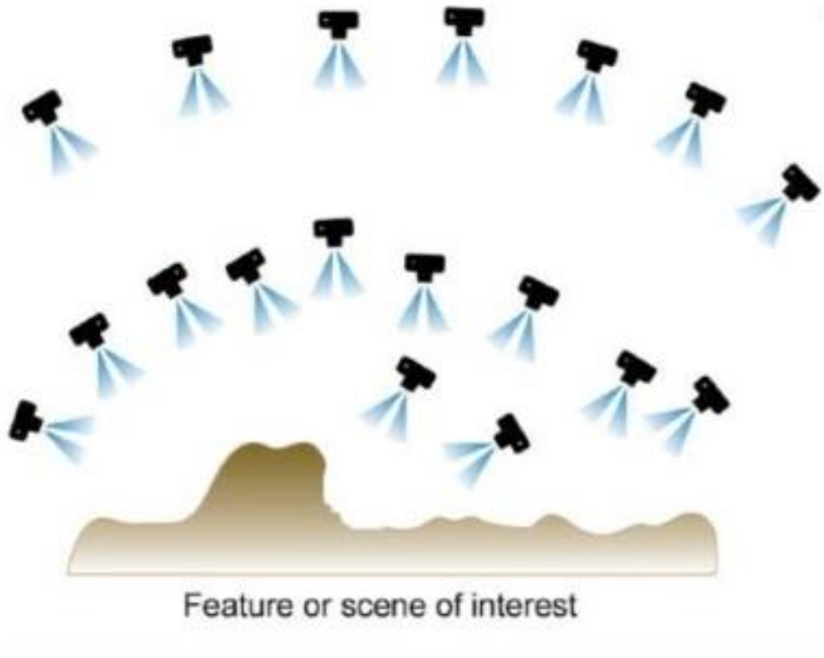
Για την παραγωγή των τελικών προϊόντων ακολουθείται μια σειρά διαδικασιών, από την προετοιμασία μέχρι την τελική επεξεργασία των δεδομένων που έχουν ληφθεί από το αεροσκάφος. Μια τυπική ροή εργασιών παρατίθεται παρακάτω:



Σχήμα 2.3 Ροή εργασιών για την απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων από UAV (Nex, Remondino, 2004)

Αρχικά, προγραμματίζονται οι παράμετροι και το πλάνο πτήσης. Αρχίζοντας με την περιοχή ενδιαφέροντος (Area of Interest), την απόσταση του εδαφικού δείγματος (Ground Sample Distance) και με γνωστές τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας που φέρει το αεροσκάφος, υπολογίζεται το ύψος πτήσης. Το αμέσως επόμενο στάδιο είναι η λήψη πλήθους φωτογραφιών της περιοχής ενδιαφέροντος.

Σε συνδυασμό με την τεχνολογία των ΣμηΕΑ, εφαρμόζεται και η τεχνική Structure from Motion (SfM), για την απόκτηση μεγάλης πυκνότητας και ακρίβειας τρισδιάστατων δεδομένων της γήινης επιφάνειας. Συγκεκριμένα, η διαδικασία SfM βασίζεται στην λήψη εικόνων ενός αντικειμένου ή μιας περιοχής ενδιαφέροντος με μεγάλη αλληλοεπικάλυψη (80-90%) από πολλαπλές θέσεις ή/και γωνίες.



Σχήμα 2.4 Παράδειγμα λήψης εικόνων. Η φωτογραμμετρία SfM απαιτεί λήψη πολλών φωτογραφιών με μεγάλη επικάλυψη από πολλαπλές θέσεις (Micheletti et al., 2013)

Σύμφωνα με τις εξέλιξη στις τεχνικές αυτόματης αναγνώρισης αντικειμένων σε εικόνες, απεικονιζόμενα χαρακτηριστικά ή αντικείμενα μπορούν να ανιχνευθούν, να περιγραφούν και να ταυτιστούν μεταξύ των φωτογραφιών. Κατ' αυτόν τον τρόπο αναγνωρίζονται κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των φωτογραφιών που έχουν ληφθεί από την κάμερα του αεροσκάφους. Με μια διαδικασία προσδιορισμού της θέσης και του προσανατολισμού της κάμερας καθώς και των θέσεων (XYZ) των αντικειμένων, δημιουργείται ένα αραιό νέφος σημείων και ακολουθεί η πύκνωση αυτού. Η ενσωμάτωση GPS στην κάμερα ή/και η χρήση σημείων ελέγχου εδάφους (Ground Control Points) επιτρέπει την γεωαναφορά του τρισδιάστατου μοντέλου σε ένα πραγματικό σύστημα συντεταγμένων (Lucieer et al., 2014).

Τα τελικά προϊόντα των παραπάνω διεργασιών είναι τα εξής:

- **Ψηφιακά μοντέλα (Digital Models)**: Μπορεί να είναι Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα (Digital Elevation Models) που περιλαμβάνουν μόνο την τοπογραφική πληροφορία ή Ψηφιακά Επιφανειακά Μοντέλα (Digital Surface Models), τα οποία περιλαμβάνουν επιπλέον τα αντικείμενα που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.
- **Ορθοφωτογραφίες**: Πρόκειται για μια επεξεργασμένη αεροφωτογραφία που έχει υποστεί διόρθωση λόγω αναγλύφου, με αποτέλεσμα να έχει ενιαία κλίμακα και να μπορούν να γίνουν μετρήσεις σε αυτή. Τα **ορθομωσαϊκά** προκύπτουν από τη συνένωση ορθοφωτογραφιών.

2.5.3 Πλεονεκτήματα χρήσης των ΣμηΕΑ στην μελέτη κατολισθήσεων

Η ικανότητα απόκτησης φωτογραφιών και τοπογραφικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης με ασφάλεια και μικρό κόστος έχει καταστήσει εφικτή και πιο εύκολη την έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων. Οι συμβατικές μέθοδοι μελέτης των κατολισθήσεων απαιτούν την επιτόπου παρατήρηση και απόκτηση δεδομένων με επιτόπου μετρήσεις, πράγμα που είναι χρονοβόρο και πολλές φορές ακατόρθωτο. Ο συνδυασμός των δεδομένων από τα ΣμηΕΑ με μεθόδους της Φωτογραμμετρίας αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρέως στην μελέτη των κατολισθήσεων. Τα τελικά προϊόντα που παράγονται, βρίσκουν εφαρμογή στην αποτύπωση και οριοθέτηση των κατολισθήσεων, στην παρακολούθηση αυτών, στον προσδιορισμό της ενεργότητάς τους και καθιστούν δυνατή την εκτέλεση πραγματικών μετρήσεων όπως είναι ο υπολογισμός του όγκου του κατολισθέντος υλικού.

Τα πλεονεκτήματα χρήσης των ΣμηΕΑ είναι τα εξής:

- Πρόσβαση σε απομακρυσμένες, δυσπρόσιτες ή υψηλού ρίσκου περιοχές ενδιαφέροντος
- Άμεση απόδοση και γρήγορη συλλογή δεδομένων
- Λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης
- Χαμηλό κόστος

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες τόσο για τη λειτουργία, όσο και για την ποιότητα των δεδομένων που εξάγονται
- Περιορισμοί λειτουργίας που επιβάλλονται από τη νομοθεσία κάθε χώρας
- Κατάρτιση και άδεια του χειριστή του αεροσκάφους

2.5.4 Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στην διαχρονική ανάλυση κατολίσθησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η χρήση των ΣμηΕΑ εμφανίζει μεγάλη απήχηση, τελευταία, στη μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων, προσφέροντας πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές επίγειες μεθόδους. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στην παρακολούθηση κατολίσθησης αναφέρεται παρακάτω.

Η έρευνα των Lucieer et.al. (2014), αφορά την κατολίσθηση Home Hill που βρίσκεται στις βόρειες πλαγιές της κοιλάδας Huon, στην Ν. Τασμανία της Αυστραλίας, 35km από την πόλη Hobart και σε υψόμετρο περίπου 80m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η κατολίσθηση Home Hill έχει αναπτυχθεί σε έντονα αποσαθρωμένο, λεπτόκοκκο υλικό που αποτελεί υπόλειμμα των υποκείμενων πηλολίθων και ιλυολίθων ηλικίας Περμίου. Πρόκειται για μια περιστροφική ολίσθηση εδάφους που εξελίσσεται, προς τα κατάντη, σε ροή εδάφους. Η πρώτη εκδήλωση της κατολίσθησης ήταν το 1996 και όσον αφορά την κατάσταση ενεργότητάς της, θεωρείται ακόμα ενεργή.

Εικόνα 2.1 Κατολίσθηση Home Hill (Lucieer et.al., 2014)

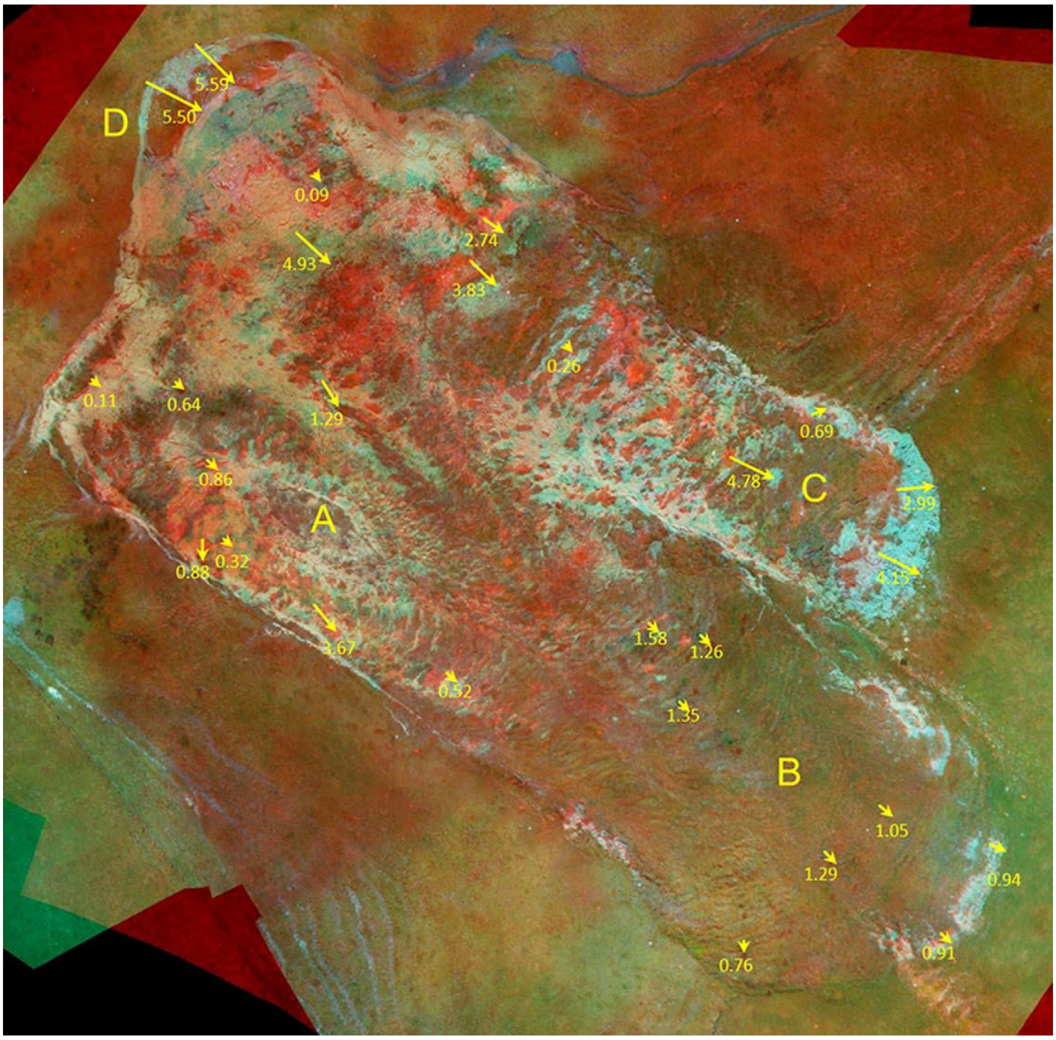
Για την λήψη εικόνων, χρησιμοποιήθηκε ένα μικρό μη επανδρωμένο όχημα με οκτώ έλικες, γνωστό ως Octocopter, εξοπλισμένο με ψηφιακή κάμερα και σύστημα πλοήγησης GPS. Το μέσο ύψος πτήσης ήταν 40m από την επιφάνεια του εδάφους.

Εικόνα 2.2 Τηλεκατευθυνόμενο Octocopter (Lucieer et.al., 2014)

Η διαχρονική ανάλυση των κατολισθήσεων βασίζεται στη συσχέτιση και σύγκριση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών χρονικών περιόδων. Για τον λόγο αυτό χρειάστηκε η λήψη φωτογραφιών της κατολισθαίνουσας περιοχής σε δύο διαφορετικές περιόδους. Και στις δύο ημερομηνίες τοποθετήθηκαν δίσκοι (Ground Control Points) στην περιοχή της κατολίσθησης, οι συντεταγμένες των οποίων μετρήθηκαν επιτόπου αμέσως μετά τις πτήσεις. Οι δίσκοι αυτοί ταυτοποιήθηκαν στις εικόνες που είχαν ληφθεί και χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωαναφορά και την αξιολόγηση της ακρίβειας.

Μετά τη γεωαναφορά των εικόνων, με μια αυτοματοποιημένη ροή εργασιών επεξεργάστηκαν οι αεροφωτογραφίες και παράχθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα, ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEMs) και ορθομωσαϊκά για τις δύο ημερομηνίες λήψης των φωτογραφιών.

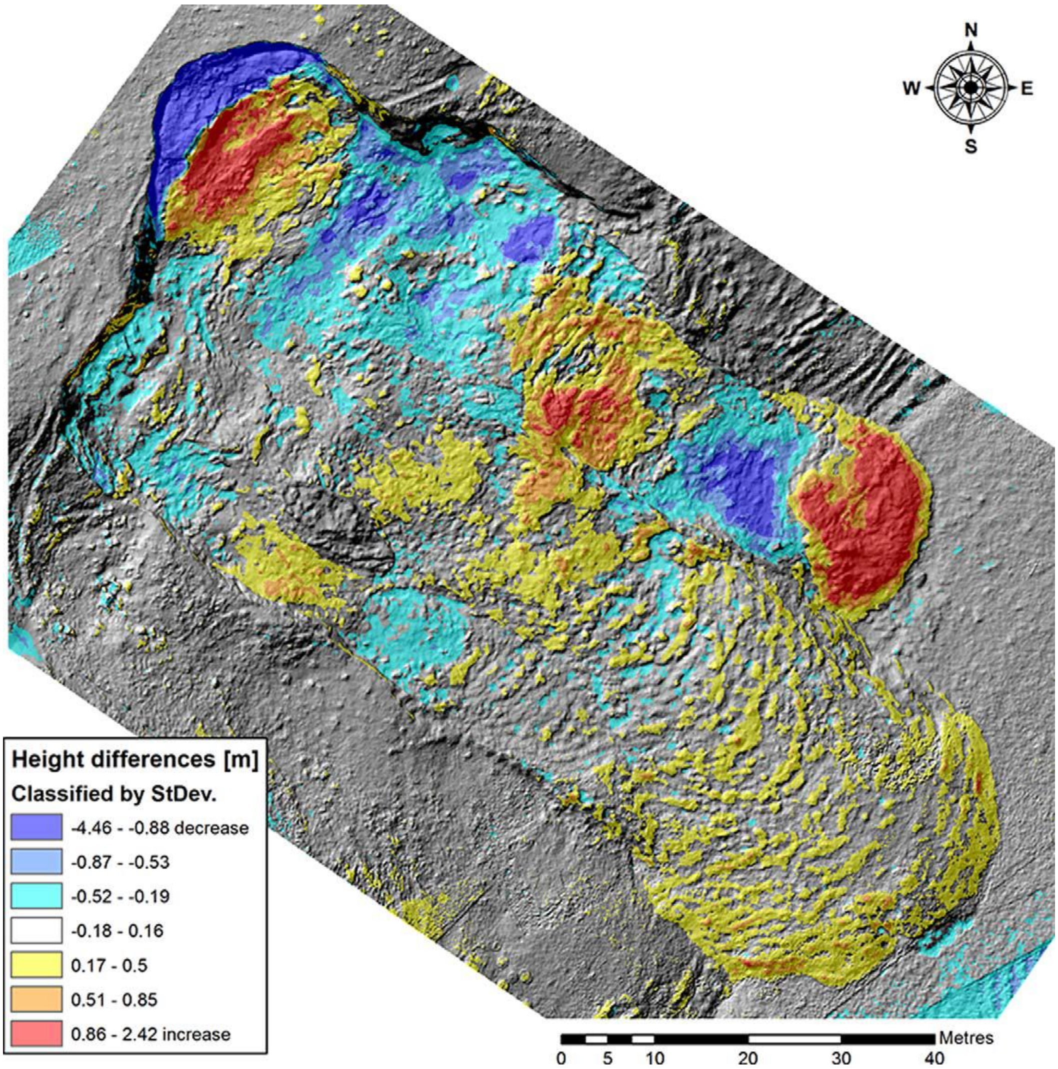
Η δυναμική της κατολίσθησης μεταξύ των δύο ημερομηνιών απόκτησης των δεδομένων εξετάσθηκε με την επικάλυψη των δύο ορθομωσαϊκών με συνδυασμούς RGB που προσδόθηκαν από ένα σύστημα επεξεργασίας εικόνων. Έπειτα, με τη χρήση ενός εργαλείου μέτρησης, υπολογίσθηκαν τα μεγέθη και η κατεύθυνση των μετακινήσεων για τα κύρια χαρακτηριστικά της κατολίσθησης που αναγνωρίσθηκαν. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν την υποχώρηση της κύριας κατακρήμνισης, την επέκταση των δύο ποδιών και άλλες μετακινήσεις στο σώμα της κατολίσθησης.



Σχήμα 2.5 Συνδυασμός των ορθομωσαϊκών της κατολίσθησης Home Hill. Τα βέλη και οι αριθμοί με κίτρινο χρώμα απεικονίζουν την μετακίνηση (απόσταση και κατεύθυνση) των χαρακτηριστικών της κατολίσθησης. (Lucieer et.al., 2014)

Οι μετακινήσεις δεν εμφανίζουν ίδια κατανομή σε όλη την κατολίσθηση, αλλά διαφέρουν σημαντικά από τη μια περιοχή στην άλλη. Το βόρειο τμήμα της κύριας κατακρήμνισης (D) εμφάνισε μεγάλη υποχώρηση σε διάστημα μικρότερο από τέσσερις μήνες, ενώ το νότιο τμήμα της εμφάνισε πολύ μικρότερη μετακίνηση. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το βόρειο, μικρότερο πόδι της κατολίσθησης (C) ήταν πιο ενεργό από το νότιο (B), ενώ ένα τμήμα του εδάφους στο κύριο σώμα της κατολίσθησης (A) δεν εμφάνισε καμία μετακίνηση.

Για την σύγκριση μεταξύ των δύο περιόδων και τον εντοπισμό των μεταβολών της επιφάνειας του εδάφους, χρησιμοποιήθηκαν, εκτός από τα ορθομωσαϊκά, και τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους.



Σχήμα 2.6 Διαφορές μεταξύ των δύο DEMs, που απεικονίζει την μεταβολή της επιφάνειας του εδάφους (Lucieer et al., 2014)

Η σύγκριση των προϊόντων (ορθομωσαϊκά, DEMs) από τα δεδομένα που λήφθηκαν στις δύο διαφορετικές περιόδους, έδειξαν ότι το χρονικό αυτό διάστημα τεσσάρων μηνών, η κατολίσθηση ήταν ενεργή. Πιθανολογείται ότι το έναυσμα της μετακίνησης ήταν μια έντονη βροχόπτωση, καθώς το έτος αυτό εμφάνισε πολλές βροχοπτώσεις.

Σύμφωνα με το παραπάνω παράδειγμα, γίνεται αντιληπτή η σημαντική προσφορά των ΣμηΕΑ, καθώς παρέχουν εύκολα και γρήγορα δεδομένα που αξιοποιούνται στην έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων.

2.6 Μελέτη κατολισθήσεων με χρήση της τεχνολογίας LiDAR

2.6.1 Γενικά

Ο όρος «LiDAR» αποτελεί ακρωνύμιο του «Light Detection and Ranging». Βασική αρχή της τεχνολογίας είναι η εκπομπή παλμών ακτινοβολίας σε ένα αντικείμενο-στόχο και η καταγραφή του ανακλώμενου φωτός που επιστρέφει από τον στόχο για να προσδιοριστεί η θέση του στον τρισδιάστατο χώρο. Αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε πηγή φωτός, στη τεχνολογία LiDAR χρησιμοποιούνται ακτίνες laser λόγω του δυνατού σήματος και επειδή σχηματίζουν στενές (<2mm) δέσμες (Lato M., 2010).

Τα συστήματα LiDAR αποτελούνται από τρία κυρίως μέρη:

- Πλατφόρμα (αεροσκάφη, οχήματα, τρίποδα)
- Σύστημα σάρωσης laser
- GPS

Υπάρχουν δύο κύρια είδη συστημάτων LiDAR:

- Επίγεια (Terrestrial Laser Scanners-TLS), τα οποία διακρίνονται σε κινητά (mobile) και στατικά (static)
- Αερομεταφερόμενα (Airborne Laser Scanners-ALS), τα οποία διακρίνονται σε τοπογραφικά (topographic) και βαθυμετρικά (bathymetric)

Τα στατικά συστήματα LiDAR, τοποθετημένα σε ένα τρίποδο, παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια λήψης των δεδομένων. Συνήθως απαρτίζονται μόνο από τον σαρωτή, αλλά μπορούν να είναι και εξοπλισμένα με GPS, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και του διαθέσιμου λογισμικού επεξεργασίας.

Τα κινητά συστήματα LiDAR, συμπεριλαμβανομένων των αερομεταφερόμενων, αποτελούνται, εκτός από σαρωτή και GPS, από ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (Inertial Navigation System-INS), εξασφαλίζοντας έγκυρα και ακριβή δεδομένα.

2.6.2 Δέκτες LiDAR

Οι δέκτες LiDAR είναι ενεργητικοί καθώς χρησιμοποιούν τη δική τους πηγή ακτινοβολίας και όχι τη φυσική ακτινοβολία των αντικειμένων-στόχων για την καταγραφή των απαραίτητων δεδομένων.

Η ποιότητα ενός δέκτη LiDAR επηρεάζεται από τρεις ιδιότητες:

- Απόκλιση δέσμης (Beam divergence), δηλαδή η σταδιακή διεύρυνση της δέσμης καθώς απομακρύνεται. Αποτέλεσμα της μεγάλης απόκλισης είναι η μικρότερη πυκνότητα σημείων στα αποτελέσματα της σάρωσης.
- Μέγιστη εμβέλεια (Maximum range)
- Ρυθμός συλλογής δεδομένων (Data collection rate)

Οι ενεργητικοί αυτοί δέκτες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες με βάση την αρχή λειτουργίας τους:

- **Δέκτες Μέτρησης Χρόνου (Time-of-Flight Sensors)**: Οι δέκτες αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν την ταχύτητα του φωτός και τον χρόνο που μεσολάβησε από την εκπομπή του παλμού μέχρι την επιστροφή του για να μετρήσουν την απόσταση από τον στόχο. Οι δέκτες αυτοί μπορούν τυπικά να σαρώσουν με ρυθμό 2,500-200,000 παλμούς ανά δευτερόλεπτο, και να συλλέξουν δεδομένα που βρίσκονται σε απόσταση μέχρι και 1,500m.
- **Δέκτες Μέτρησης Διαφοράς Φάσης (Phase-based Sensors)**: Οι δέκτες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν laser γνωστής συχνότητας και μετράνε τη μεταβολή της συχνότητας της δέσμης αυτής μετά από την ανάκλαση και επιστροφή της από τον στόχο. Αφού γίνει ο υπολογισμός της διαφοράς φάσης, και σε συνδυασμό με τη διάρκεια εκπομπής του παλμού, υπολογίζεται η απόσταση από τον στόχο.

2.6.3 Δεδομένα LiDAR

Τα χωρικά δεδομένα που συλλέγουν τα συστήματα LiDAR κυμαίνονται σε ένα εύρος μεταξύ 2,500 και 1,000,000 σημείων ανά δευτερόλεπτο, δίνοντας τη δυνατότητα γρήγορης δημιουργίας «σκηνών». Η σκηνή περιλαμβάνει οποιοδήποτε αντικείμενο στην εμβέλεια του δέκτη, συνήθως μεταξύ 70m και 1,500m, ανάλογα με το είδος της τεχνολογίας laser που χρησιμοποιείται (Lato M., 2010).

Τα δεδομένα που μπορούν να ληφθούν με την τεχνολογία LiDAR είναι σημειακά και διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- **(XYZ)**: Μετράται η απόσταση από τα αντικείμενα και παρουσιάζονται τα δεδομένα ως σημεία (XYZ) σε συνάρτηση με την θέση του δέκτη LiDAR που θεωρείται (0, 0, 0).
- **(XYZI)**: Σε αυτόν τον τύπο δεδομένων προστίθεται και υπολογιζόμενη ένταση (Intensity) της ακτίνας κατά την επιστροφή της. Η ένταση είναι η ποσότητα της ακτινοβολίας που επιστρέφει, υπολογισμένη ως ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Οι τιμές της έντασης σχετίζονται με την ανακλαστική ικανότητα του κάθε αντικειμένου.
- **(XYZRGB)**: Όταν ο εξοπλισμός του συστήματος LiDAR συνοδεύεται από κάμερα, τότε στο νέφος των σημείων μπορούν να αποδοθούν τιμές ψευδο-χρωματισμού ώστε να ταιριάζει με τις ιδιότητες RGB (Red Green Blue) που έχουν επεξεργαστεί από την κάμερα. Αυτή η διεργασία είναι γνωστή ως «pixel mapping».

Η ποιότητα των δεδομένων προσδιορίζεται από δύο χαρακτηριστικά: την πυκνότητα και την ακρίβεια των δεδομένων. Οι ιδιότητες αυτές ελέγχονται από το είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, την δεξιότητα του χειριστή και από τις τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων.

Τα δεδομένα που συλλέγονται με τη τεχνολογία LiDAR συνθέτουν νέφη σημείων (point clouds), με κάθε σημείο να χαρακτηρίζεται από τρεις συντεταγμένες X, Y, Z, ή/και επιπρόσθετες ιδιότητες, όπως είναι η ένταση. Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την κατασκευή ενός τρισδιάστατου μοντέλου, όπως είναι το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (Digital Elevation Model-DEM) και το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (Digital Surface Model-DSM). Το πρώτο απεικονίζει αποκλειστικά την επιφάνεια του φυσικού εδάφους, δηλαδή το ανάγλυφο, ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει επιπλέον και τα αντικείμενα που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (κτίρια, βλάστηση κ.α.).

2.6.4 Πλεονεκτήματα χρήσης της τεχνολογίας LiDAR στην μελέτη κατολισθήσεων

Η δυνατότητα απόκτησης της τρισδιάστατης πληροφορίας του εδάφους με μεγάλη ακρίβεια και υψηλή χωρική ανάλυση ανοίγει νέους δρόμους για την μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων. Η τεχνολογία LiDAR αποτελεί μια από αυτές τις μεθόδους καθώς είναι ικανή να δώσει την απεικόνιση του αναγλύφου μέσω υψηλής ανάλυσης ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DEMs) ή 3D μοντέλων.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας LiDAR στην έρευνα των κατολισθήσεων αφορά τα παρακάτω:

- Ανίχνευση και χαρακτηρισμός
- Εκτίμηση επικινδυνότητας και χαρτογράφηση επιδεκτικότητας
- Μοντελοποίηση, προσομοίωση
- Παρακολούθηση

Η ανίχνευση και ο χαρακτηρισμός μιας κατολίσθησης, βασίζεται κυρίως στην αναγνώριση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, όπως είναι οι απότομες θραύσεις ή το πόδι μιας περιστροφικής ολίσθησης. Η προσέγγιση αυτή δεν αντικαθιστά την έρευνα πεδίου αλλά δίνει τη δυνατότητα επαλήθευσης μέσω της χρήσης των τρισδιάστατων μοντέλων. Η διαδικασία αυτή, βέβαια, δεν εφαρμόζεται πάντα με ευκολία καθώς υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες η απόκτηση δεδομένων καλής ποιότητας δεν είναι εφικτή (π.χ έντονη παρουσία βλάστησης).

Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας, την χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας των κατολισθήσεων εφαρμόζονται κυρίως τα αερομεταφερόμενα συστήματα LiDAR (ALS) καθώς τα παραγόμενα DEM προσφέρουν τη δυνατότητα λεπτομερούς οριοθέτησης των κατολισθήσεων.

Τα επεξεργασμένα δεδομένα LiDAR βοηθούν με μεγάλη ακρίβεια στην διαδικασία δημιουργίας μοντέλων κατολισθήσεων, καθώς βελτιώνουν την περιγραφή της γεωμετρίας τους.

Πριν την ανάπτυξη των τεχνικών της Τηλεπισκόπησης, όπως LiDAR, RADAR και φωτογραμμετρία, η παρακολούθηση των μετακινήσεων ήταν ενόργανη και περιλάμβανε επιτόπου μετρήσεις. Τα συστήματα LiDAR, σήμερα, χρησιμοποιούνται ευρέως στην παρακολούθηση μετακινήσεων. Βασική αρχή αποτελεί η δημιουργία δύο ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων από δεδομένα που έχουν ληφθεί, είτε από ALS είτε από TLS, δύο διαφορετικές περιόδους, ώστε να γίνει η μεταξύ τους σύγκριση. Η παρακολούθηση απαιτεί υψηλή ανάλυση και μεγάλης ακρίβειας δεδομένα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται περισσότερο τα επίγεια συστήματα LiDAR (TLS) σε σχέση με τα αερομεταφερόμενα. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης είναι είτε διανύσματα, είτε αποστάσεις μεταξύ δύο σημείων ή περιοχών. Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων μεταξύ των δύο περιόδων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη, και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ποιότητα των δεδομένων από το σύστημα LiDAR, η παρουσία βλάστησης, η τραχύτητα του αναγλύφου, η σχετική και η απόλυτη θέση του TLS (Jaboyedoff M., et al., 2012).

Τα κύρια πλεονεκτήματα χρήσης της τεχνικής αυτής, και συγκεκριμένα του TLS, είναι:

- Η γρήγορη συλλογή των δεδομένων
- Η ευκολία στο στήσιμο και τη μεταφορά του εξοπλισμού
- Η απόκτηση της πραγματικής τρισδιάστατης πληροφορίας
- Η υψηλή ανάλυση των παραγόμενων προϊόντων
- Δυνατότητα λειτουργίας μέρα και νύχτα, με αντίξοες καιρικές συνθήκες ή σε περιοχές που καλύπτονται από μερική βλάστηση

Τα κύρια μειονεκτήματα της τεχνολογίας LiDAR

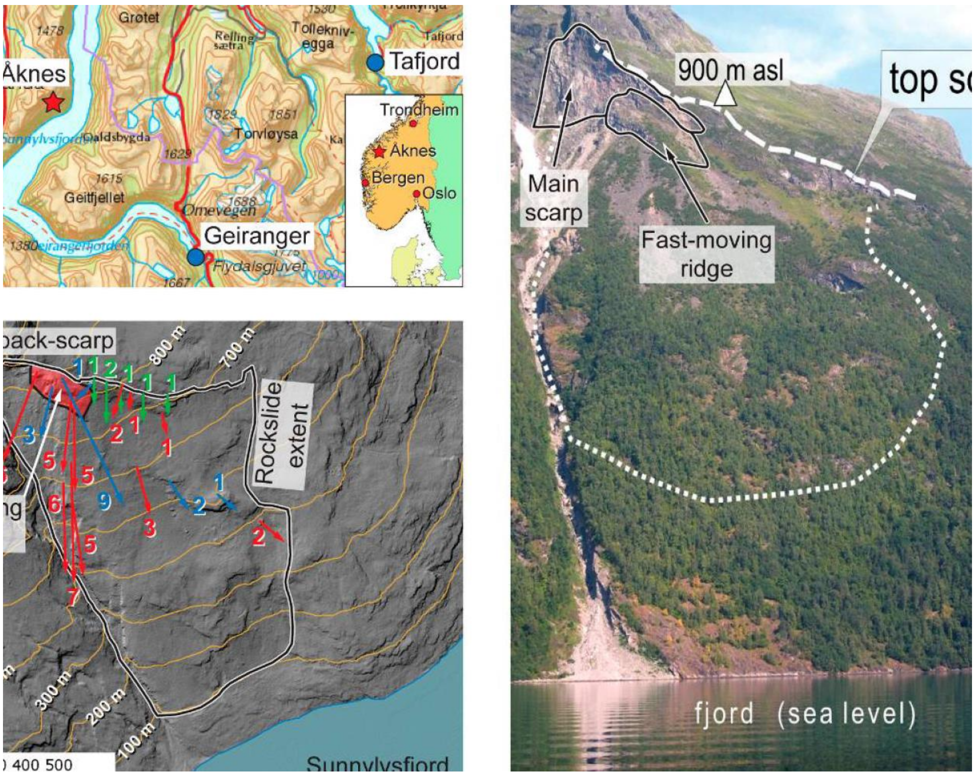
- Έμφραξη (Occlusion). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε ένα νέφος σημείων σε θέσεις με μικρή ή καθόλου πυκνότητα δεδομένων. Πρόκειται, δηλαδή, για σκιές που εμφανίζονται λόγω της μη δυνατής απόκτησης δεδομένων.
- Επιλογή κατάλληλης θέσης ή κατάλληλων θέσεων για την τοποθέτηση του εξοπλισμού ώστε να καλυφθεί η περιοχή ενδιαφέροντος και να αποφευχθεί το φαινομένο της έμφραξης

2.6.5 Παράδειγμα εφαρμογής της τεχνολογίας LiDAR στον χαρακτηρισμό κατολίσθησης

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση της τεχνολογίας LiDAR έχει ευρεία χρήση στην έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων κυρίως λόγω της δυνατότητας απόκτησης υψηλής ανάλυσης δεδομένων της τοπογραφίας. Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα χρήσης της μεθόδου αυτής, και συγκεκριμένα της χρήσης ενός επίγειου συστήματος LiDAR (TLS), βρίσκοντας εφαρμογή στον χαρακτηρισμό και τη διαχρονική ανάλυση μιας κατολίσθησης.

Η μελέτη των Oppikofer et al. (2009), εστιάζει στην κατολίσθηση Åknes, που εντοπίζεται στη δυτική πλευρά του φιόρδ Sunnylvsfjord στη Δυτική Νορβηγία.

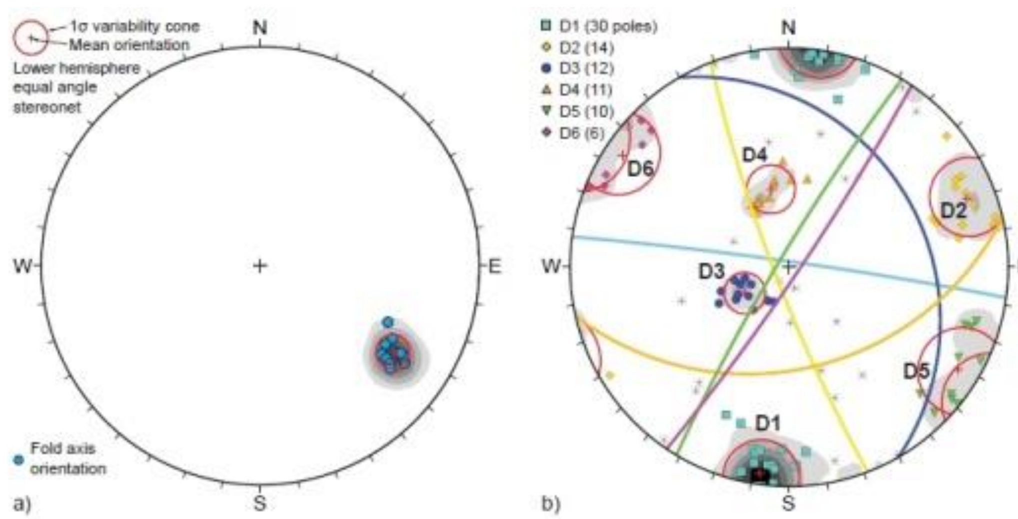
Λόγω του μεγάλου όγκου της και της υψηλής επικινδυνότητας, η κατολίσθηση Åknes παρακολουθείται στενά με έναν συνδυασμό συμβατικών μεθόδων (π.χ GPS, μηκυνσιόμετρα) και άλλων, όπως είναι η φωτογραμμετρία και η τεχνολογία LiDAR.



Σχήμα 2.7 Χάρτης περιοχής, φωτογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος και χάρτης σκιασμένου αναγλύφου της κατολίσθησης Åknes (Oppikofer et al., 2009)

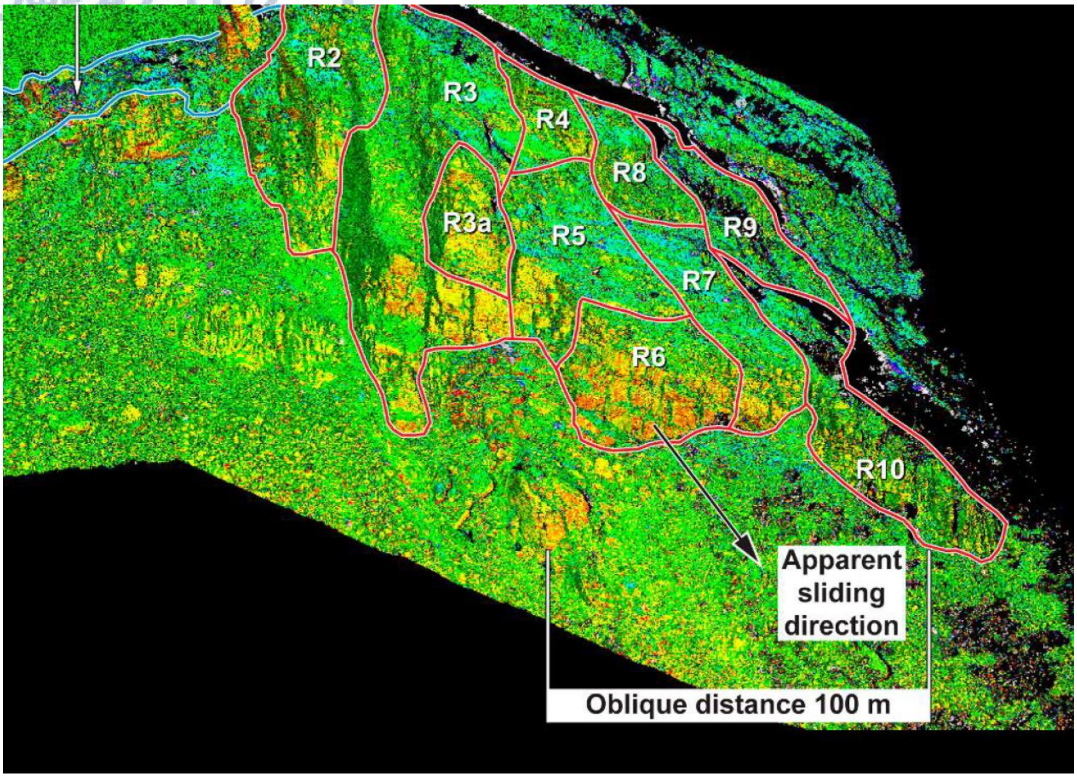
Κύριο στόχος της μελέτης, που αφορά το διάστημα 2006 με 2008, ήταν η ανίχνευση των μετακινήσεων στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης, με συσχέτιση των δεδομένων, και η ανάλυση της δομής στην περιοχή της κύριας κατακρήμνισης.

Μετά την λήψη των δεδομένων από ένα επίγειο σύστημα LiDAR και την ανάλυση των κύριων δομικών στοιχείων, προσδιορίστηκε ο προσανατολισμός του άξονα μιας πτυχής και έξι οικογενειών ασυνεχειών (D1-D6), εκ των οποίων η D4 είναι η φολίδωση του γνευσίου που επικρατεί στην περιοχή της κατακρήμνισης (Σχήμα 2.8).



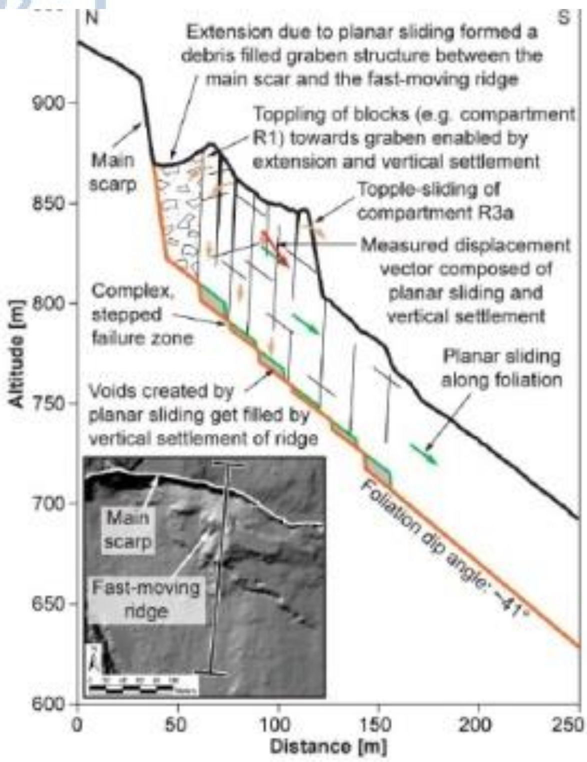
Σχήμα 2.8 Προσανατολισμός a) του άξονα της πτυχής και b) των κύριων οικογενειών ασυνεχειών (Oppikofer et al., 2009)

Για τη λεπτομερή ανάλυση των μετακινήσεων η περιοχή της ολισθαίνουσας ράχης χωρίστηκε σε επιμέρους τμήματα (R1-R10). Η σύγκριση των νεφών σημείων από τα δεδομένα που πάρθηκαν τις δύο διαφορετικές περιόδους δείχνουν μια γενική μετακίνηση στην ολισθαίνουσα ράχη προς τα Ν,ΝΔ (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 Συσχέτιση των νεφών σημείων, μεταξύ 2006 και 2008, της ολισθαίνουσας ράχης (Oppikofer et al., 2009)

Η κατολίσθηση Åknes χαρακτηρίστηκε ως σύνθετη καθώς περιλαμβάνει τόσο επίπεδες ολισθήσεις όσο και ανατροπές. Τελική διεργασία της έρευνας αυτής, αποτέλεσε η δημιουργία ενός μοντέλου της κατολίσθησης για την απόδοση και κατανόηση του πιθανού μηχανισμού αστοχίας. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τις επίπεδες ολισθήσεις, τις ανατροπές και τις κατακόρυφες μετακινήσεις (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 Σχηματικό προφίλ του ανώτερου τμήματος της κατολίσθησης Åknes (Oppikofer et al., 2009)

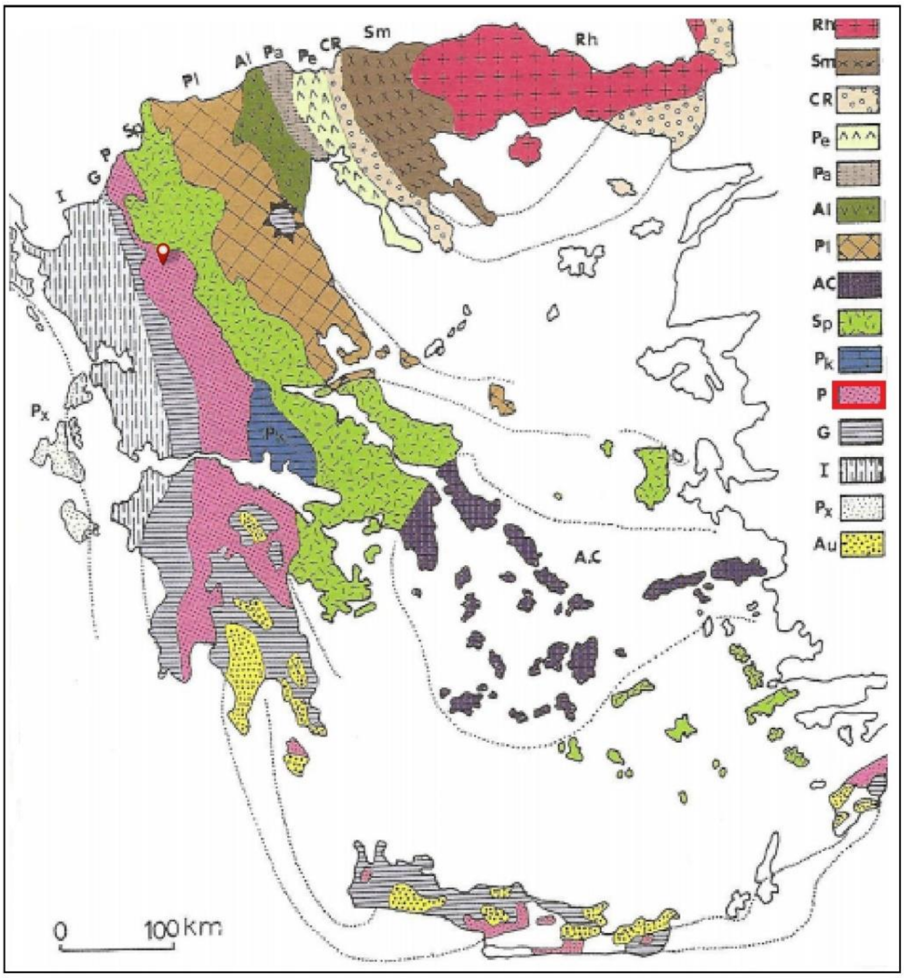
Συμπερασματικά, τα δεδομένα που αποκτήθηκαν με αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν για την διαχρονική ανάλυση της κατολίσθησης, διαδικασία που απαιτεί δεδομένα μεγάλης ακρίβειας, και για την κατανόηση και απόδοση ενός μηχανισμού αστοχίας. Έτσι, γίνεται φανερή η συνεισφορά της τεχνολογίας LiDAR στην απόκτηση δεδομένων και, γενικότερα, στην ερευνητική διαδικασία των κατολισθήσεων.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Γεωτεκτονική ζώνη

Ο ελλαδικός χώρος συγκροτείται από δώδεκα κύριες ζώνες, με την κάθε μία να χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη λιθοστρωματογραφική και τεκτονική εξέλιξη. Οι ζώνες αυτές ονομάζονται Ελληνικές γεωτεκτονικές ζώνες ή Ελληνίδες ζώνες.

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης εντάσσεται στη ζώνη Ωλονού-Πίνδου. Η ζώνη αυτή εκτείνεται από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα προς τον κορμό της ηπειρωτικής Ελλάδας στην οροσειρά της Πίνδου, τη Στερεά Ελλάδα και την Πελοπόννησο, ενώ εμφανίσεις της υπάρχουν και στα νησιά Κρήτη και Ρόδο.



Σχήμα 3.1 Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών (Μουντράκης et al., 1983). Με κόκκινο επισημαίνεται η θέση της περιοχής έρευνας.

3.1.1 Γεωτεκτονική θέση

Η ζώνη Ωλονού-Πίνδου θεωρήθηκε η πιο βαθιά αύλακα της Ελλάδας ανάμεσα από τα υβώματα της Πελαγονικής ζώνης και της ζώνης Γαβρόβου-Τρίπολης. Σήμερα είναι γενικά αποδεκτό ότι η ζώνη Πίνδου και η Υποπελαγονική ζώνη συγκροτούσαν τον ωκεάνιο χώρο της Νέο-Τηθύος που βρισκόταν Δυτικά της Πελαγονικής ζώνης.

Συγκεκριμένα, με τη βύθιση και καταστροφή του ωκεανού της Νέο-Τηθύος (Κ. Κρητιδικό), έγινε η επώθηση των οφειολίθων στο Δυτικό Πελαγονικό περιθώριο, δηλαδή στη σημερινή Υποπελαγονική ζώνη. Το δυτικό τμήμα του ωκεανού στο οποίο δεν έγινε επώθηση των οφειολίθων και αποτελείται από ωκεάνια ιζήματα είναι η ζώνη Ωλονού-Πίνδου. Σήμερα βέβαια, σε θέσεις εμφανίζονται οφειολιθικές μάζες τεκτονικά τοποθετημένες πάνω στον Τριτογενή φλύσχη της ζώνης Πίνδου που τοποθετήθηκαν, όμως, μεταγενέστερα (Μουντράκης, 2010).

3.1.2 Λιθοστρωματογραφία

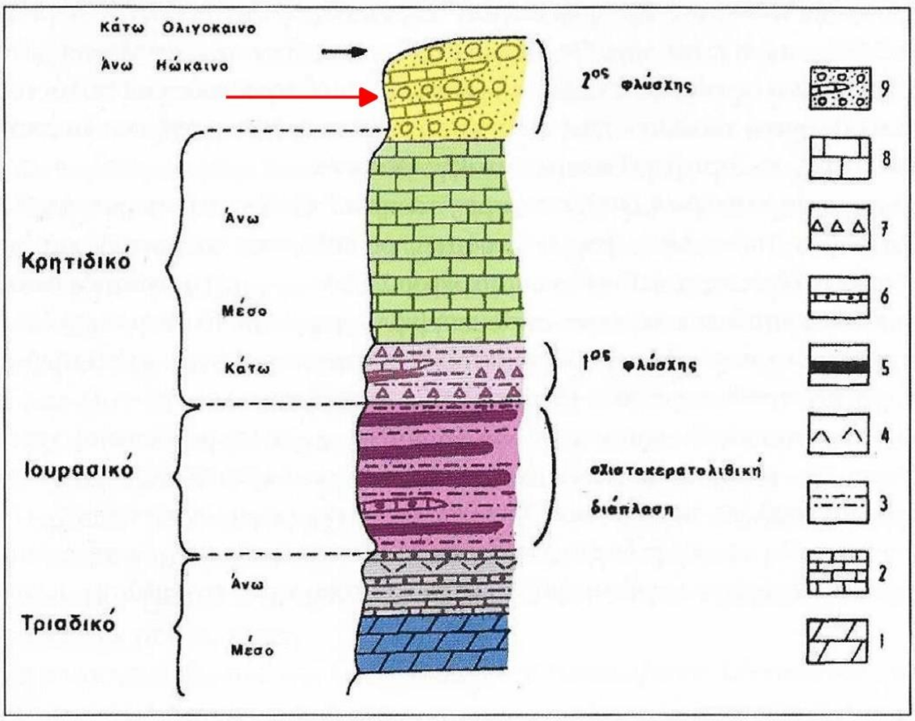
Σύμφωνα με τον Μουντράκη (2010), η λιθοστρωματογραφική εξέλιξη της ζώνης Ωλονού-Πίνδου αφορά τις περιόδους του Τριαδικού, του Ιουρασικού, του Κρητιδικού και του Παλαιογενούς.

Τα πρώτα Αλπικά ιζήματα της ζώνης Πίνδου είναι ηλικίας Μέσου-Άνω Τριαδικού. Συγκεκριμένα η κλαστική ιζηματογένεση του Μέσου Τριαδικού, που αφορά ψαμμίτες, πυριτιόλιθους, μάργες και ασβεστόλιθους, εξελίσσεται σταδιακά προς το Άνω Τριαδικό κυρίως σε ασβεστόλιθους, με παρεμβολές κερατολίθων καθώς και ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά.

Η περίοδος του Ιουρασικού για την ζώνη Πίνδου χαρακτηρίζεται από απόθεση ιζημάτων βαθιάς θάλασσας, με απόθεση ραδιολαριτικών κερατολίθων, αργίλων, ψαμμιτών, πυριτικών ασβεστολίθων και ιάσπιδων. Ο στρωματογραφικός αυτός ορίζοντας είναι γνωστός ως «σχιστοκερατολιθική διάπλαση».

Η περίοδος του Κρητιδικού χαρακτηρίζεται από την απόθεση μιας σειράς ρυθμικών εναλλαγών από πελίτες, ψαμμίτες, μάργες, ραδιολαρίτες και ασβεστόλιθους. Ο ορίζοντας αυτός ονομάστηκε «πρώτος φλύσχης της Πίνδου» καθώς θυμίζει συμπεριφορά φλύσχη, αν και δεν αποτελεί τον τυπικό φλύσχη. Η ιζηματογένεση συνεχίστηκε στο Άνω Κρητιδικό χωρίς διακοπή με απόθεση ιζημάτων μεταβατικών προς τον κανονικό φλύσχη της Πίνδου.

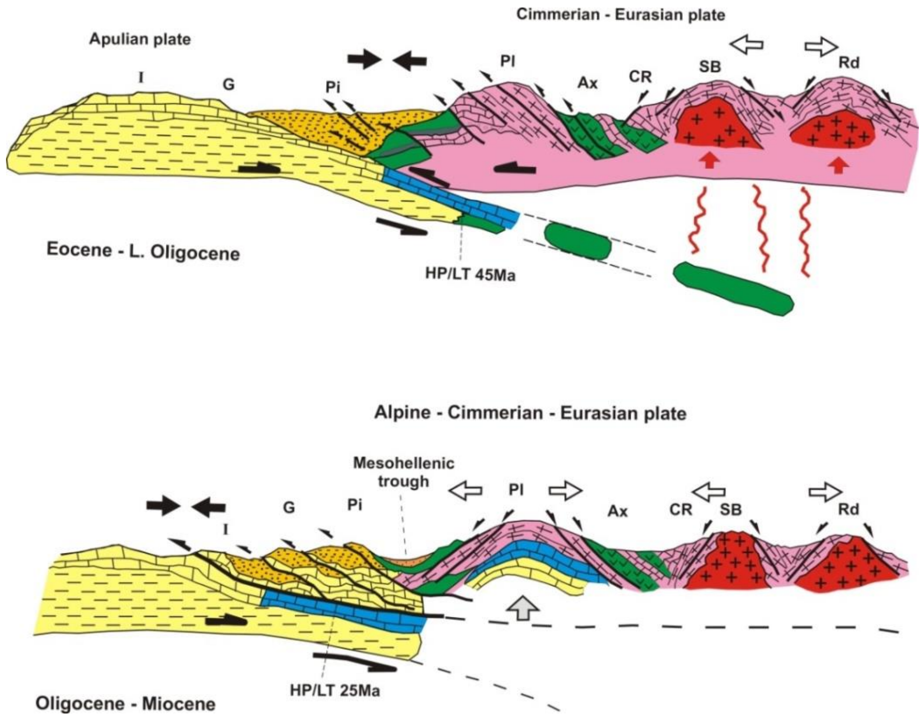
Από τα τέλη του Άνω Κρητιδικού αρχίζει η απόθεση των σχηματισμών του φλύσχη και συνεχίζεται έως και το Άνω Ηώκαινο. Ο Τριτογενής αυτός φλύσχης, που αναφέρεται και ως «δεύτερος φλύσχης της Πίνδου» είναι ο τυπικός φλύσχης της ζώνη Πίνδου και αποτελείται κυρίως από ρυθμικές εναλλαγές ψαμμιτών και μαργών και σπανιότερα από ασβεστόλιθους και κροκαλοπαγή. Σε πολλές θέσεις όπου στα ιζήματα του φλύσχη εμφανίζονται ολισθόλιθοι έντονα τεκτονισμένοι, η εικόνα του φλύσχη είναι αυτή ενός «χαοτικού μείγματος», με αποτέλεσμα να αποκαλείται «άγριος φλύσχης».



Σχήμα 3.2 Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη της ζώνης Ωλονού-Πίνδου, 1:δολομίτες, 2:πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 3:αργιλοψαμμίτες, 4:ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά, 5:κερατόλιθοι, 6:ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7:λατυποπαγή, 8: ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού, 9:φλύσχης Τριτογενούς (Μουντράκης, 2010). Με κόκκινο βέλος επισημαίνονται οι σχηματισμοί της περιοχής που ερευνάται.

3.1.3 Τεκτονική

Η ζώνη Ωλονού-Πίνδου (Pi), ως τμήμα των Εξωτερικών Ελληνίδων ζωνών, είχε αδιάκοπη ιζηματογένεση από το Τριαδικό έως το Τριτογενές και έχει υποστεί μόνο τη δράση της τελικής ορογένεσης και πτύχωσης του Τριτογενούς. Ειδικότερα, στο Τριτογενές έλαβε χώρα η τελική ηπειρωτική σύγκρουση της Απουλίας πλάκας με την ενωμένη Ευρασία με αποτέλεσμα να προκληθούν ισχυρές συμπιεστικές τάσεις. Με την πτύχωση αυτή, έγινε η επώθηση της ζώνης Ωλονού-Πίνδου προς τα δυτικά υπό μορφή τεκτονικού καλύμματος και ταυτόχρονα η λεπίωση των σχηματισμών της.



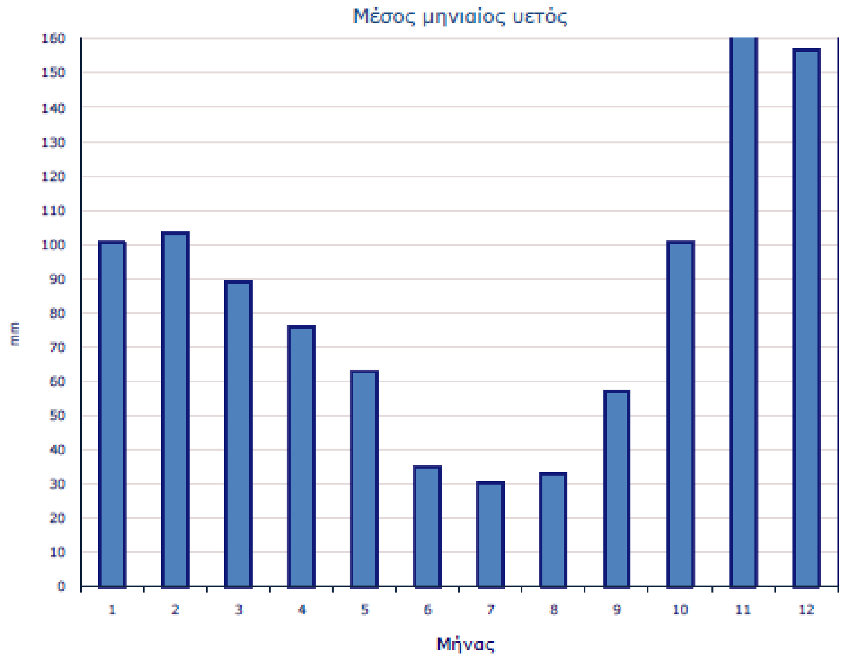
Σχήμα 3.3 Σχηματικές τομές που αναπαριστούν την γεωδυναμική εξέλιξη των Ελληνίδων κατά τη 2η περίοδο της Αλπικής Ορογένεσης. Απεικονίζεται η συμπιεστική τεκτονική παραμόρφωση-λεπίωση στην θέση σύγκλισης των δύο ηπειρωτικών πλακών (Μουντράκης, 2010)

Έτσι, το λεγόμενο «Τεκτονικό Κάλυμμα της Πίνδου» έχει επωθηθεί πάνω στην ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης ή και απευθείας πάνω στην Ιόνιο ζώνη υπερκαλύπτοντας την ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης. Τα τεκτονικά λέπια της Πίνδου εμφανίζονται με κατεύθυνση από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά, δημιουργώντας πολλαπλές επαναλήψεις των σχηματισμών της ζώνης. Επίσης, στην ζώνη Ωλονού-Πίνδου εμφανίζονται οφειολιθικές μάζες, τεκτονικά τοποθετημένες πάνω στον Τριτογενή φλύσχη. Στο Μειόκαινο-Πλειόκαινο, το συμπιεστικό αυτό γεγονός αντικαθίσταται από εφελκυσμό, με αποτέλεσμα την δημιουργία κανονικών ρηγμάτων.

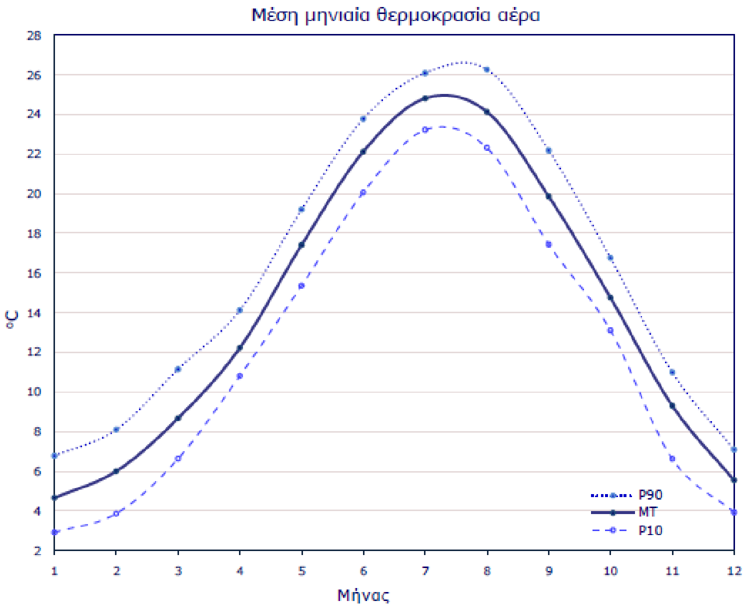
3.2 Κλιματικές συνθήκες

Το κλίμα του Ελλαδικού χώρου επηρεάζεται καθοριστικά από την οροσειρά της Πίνδου που διαμορφώνει γενικότερα το κλίμα τόσο της Δυτικής όσο και της Ανατολικής Ελλάδας. Στις ορεινές περιοχές της Δυτικής Ελλάδας το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης ξεπερνά τα 1.500mm, σε αντίθεση με τις περιοχές της Ανατολικής Ελλάδας που εμφανίζει πολύ χαμηλότερο μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και υετού για τον νομό Ιωαννίνων, από τον κλιματικό άτλαντα της Ελλάδας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ). Τα δεδομένα αφορούν την περίοδο 1971-2000.

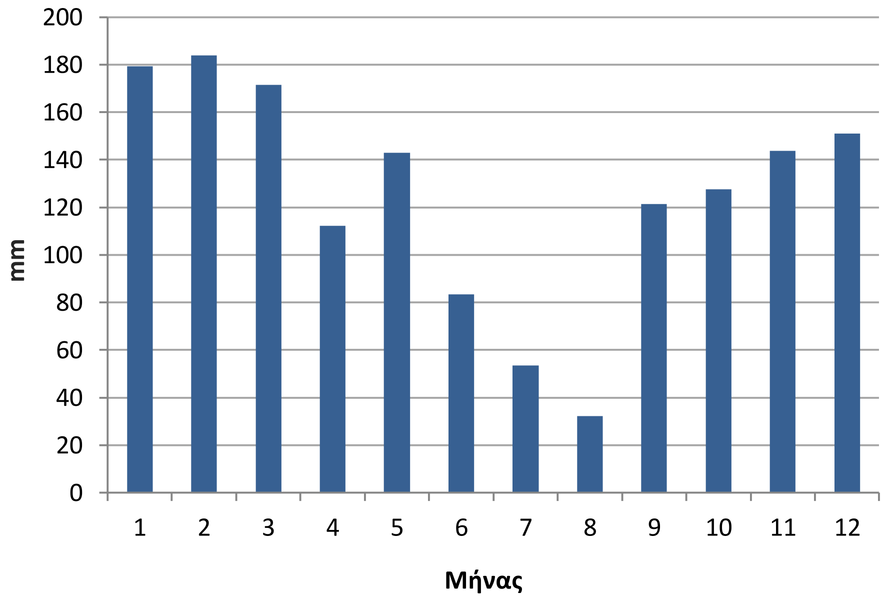


Σχήμα 3.4 Διάγραμμα μέσου μηνιαίου υετού για τον νομό Ιωαννίνων για το διάστημα 1971-2000 (ΕΜΥ, http://climatlas.hnms.gr/)



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα μέση μηνιαίας θερμοκρασίας για τον νομό Ιωαννίνων για το διάστημα 1971-2000 (ΕΜΥ, http://climatlas.hnms.gr/)

Σύμφωνα με δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού που βρίσκεται στο Μέτσοβο, σε υψόμετρο 1240m, και βρίσκεται σε λειτουργία από τον Απρίλιο 2011 έως σήμερα, δημιουργήθηκαν διαγράμματα μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης για την περίοδο 2012-2018.



Σχήμα 3.6 Μέση μηνιαία βροχόπτωση από δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού του Μετσόβου για το διάστημα 2012-2018 (http://penteli.meteo.gr/stations/metsovo/)

Όπως γίνεται αντιληπτό, η ευρύτερη περιοχή μελέτης, ως εβρισκόμενη στην Βόρεια Πίνδο σε μεγάλο υψόμετρο, χαρακτηρίζεται από μεγάλο ύψος υετού, με το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων να παρατηρείται στο διάστημα Οκτώβρη-Μάρτη.

3.3 Υδρολογικό και υδρογεωλογικό καθεστώς

Η ευρύτερη περιοχή αποτελεί σημείο συνάντησης για πέντε από τις κυριότερες υδρολογικές λεκάνες της Ελλάδας: του Αράχθου, του Αχελώου, του Πηνειού, του Αλιάκμονα και του Αώου, με σημαντικότερο υδρόρευμα στην περιοχή έρευνας τον Μετσοβίτικο, που αποτελεί παραπόταμο του Αράχθου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από υγρό κλίμα με μεγάλη τιμή ετήσιου ύψους υετού. Το μεγάλο ύψος κατακρημνίσεων σε συνδυασμό με την μορφολογία της περιοχής και τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται εκεί, δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την επιφανειακή απορροή.

Συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, οι σχηματισμοί του υποβάθρου της ευρύτερης περιοχής είναι σχηματισμοί του φλύσχη της Πίνδου. Ο φλύσχης θεωρείται γενικά αδιαπέρατος σχηματισμός, ακόμα και όταν δεν πρόκειται για ιλυολιθικό φλύσχη αλλά για εναλλαγές ιλυολίθων-ψαμμιτών, καθώς οι παρεμβολές των αδιαπέρατων ιλυολιθικών στρωμάτων εμποδίζουν την εκτεταμένη κυκλοφορία και την εισχώρηση του νερού σε μεγαλύτερα βάθη. Αποτέλεσμα αυτού είναι η επιφανειακή απορροή να ευνοείται, σε σχέση με την κατείσδυση του νερού και τη δημιουργία υδροφόρων οριζόντων.

Τοπικά, όμως, όπου επικρατούν οι ψαμμίτες και πιθανώς κροκαλοπαγή ή σε θέσεις όπου ευνοείται η κατείσδυση και διακίνηση του νερού λόγω δευτερογενούς πορώδους, είναι δυνατόν να σχηματίζονται περιορισμένης έκτασης υδροφορείς. Επίσης, σε πρόσφατες αποθέσεις, κορήματα, μάζες ολισθημένου υλικού, αποσαθρωμένες μάζες σχηματίζονται εποχικοί υδροφόροι ορίζοντες. Το νερό αυτό εμφανίζεται πολλές φορές στην επιφάνεια με τη μορφή πηγών, όπως παρατηρείται σε πολλές θέσεις της ευρύτερης περιοχής.

3.4 Σεισμικότητα και Σεισμική επικινδυνότητα

Στην ευρύτερη περιοχή έρευνας δεν εμφανίζεται έντονη σεισμική δραστηριότητα. Σύμφωνα με δεδομένα του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου, που αφορούν την περίοδο 1995-2018, για μια ακτινική περιοχή 80 *km* με κέντρο το Ανήλιο, οι σεισμοί μεγέθους Μ < 5 παρατίθενται παρακάτω.

Πίνακας 3.1 Σεισμοί μεγέθους Μ>5.0 για το διάστημα 1995-2018 (http://www.gein.noa.gr/el/)

Ημερομηνία	**Μέγεθος**	**Απόσταση από την περιοχή έρευνας (km)**
13/05/1995	6.1	53.6
05/08/1996	5.2	56.1
09/04/2001	5.3	71.6
15/10/2016	5.3	42.8

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό, ο ελλαδικός χώρος υποδιαιρείται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, τα όρια των οποίων καθορίζονται στον αναθεωρημένο Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (Σχήμα 3.7). Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί μια τιμή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους Α, η οποία είναι ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας (Πίνακας 3.2). Η ευρύτερη περιοχή μελέτης εντάσσεται στην Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας Ι, με τιμή εδαφικής επιτάχυνσης 0.16g.

Σχήμα 3.7 Νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η περιοχή έρευνας (http://portal.tee.gr)

Πίνακας 3.2 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους: A = α· g

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
α	0.16	0.24	0.36

4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 Τοποθεσία

Η υπό μελέτη περιοχή εντοπίζεται στην περιοχή του Ανηλίου (Εικόνα 4.1). Το χωριό Ανήλιο, όπως προαναφέρθηκε, εντάσσεται στον δήμο Μετσόβου του νομού Ιωαννίνων και βρίσκεται στις πλαγιές της Βόρειας Πίνδου.

Απέναντι από το Ανήλιο εντοπίζεται το Μέτσοβο, ενώ την περιοχή ανάμεσά τους διασχίζει ο Μετσοβίτικος ποταμός.

Το μορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής θεωρείται ορεινό, με απότομες κλίσεις ανάντη του χωριού και ηπιότερες κλίσεις στις υπόλοιπες θέσεις. Η περιοχή καλύπτεται από πυκνή έως και δασώδη βλάστηση.

Εικόνα 4.1 Τοποθεσία περιοχής έρευνας (Google Earth)

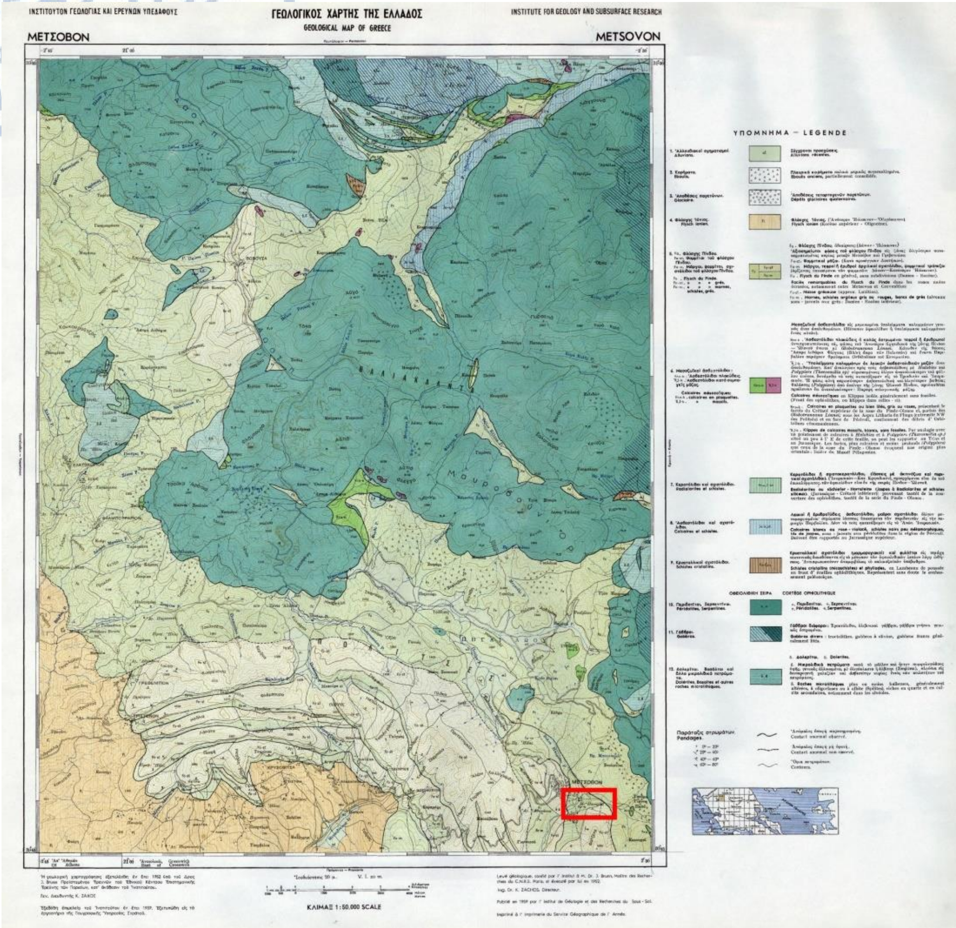
4.2 Γεωλογία περιοχής

Η περιοχή του Ανηλίου εντάσσεται γεωτεκτονικά στην ζώνη Ωλονού-Πίνδου με την περιοχή έρευνας να δομείται από σχηματισμούς του φλύσχη της Πίνδου και, ειδικότερα, από εναλλαγές ψαμμιτών-ιλυολίθων με διαφορετική επικράτηση του ενός έναντι του άλλου ανά θέσεις. Χαρακτηριστικό των σχηματισμών αυτών της περιοχής, αποτελεί η έντονη τεκτονική παραμόρφωση που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια των γεωλογικών χρόνων.

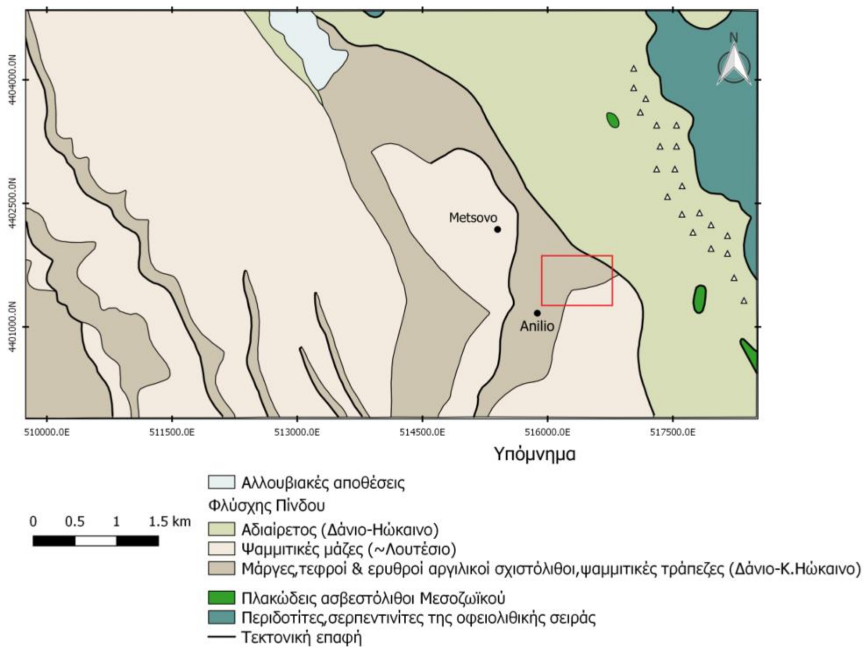
Συγκεκριμένα, ως αποτέλεσμα της εξέλιξης του αλπικού γεωτεκτονικού κύκλου, στον ελλαδικό χώρο, κατά την περίοδο του Τριτογενούς, με τις ισχυρές συμπιεστικές τάσεις που ασκήθηκαν κατά την ηπειρωτική σύγκρουση, έγιναν οι μεγάλες επωθήσεις και εφιππεύσεις που συναντώνται σήμερα στις Ελληνίδες. Έτσι, οι κινήσεις που έλαβαν χώρα κατά την επώθηση της ζώνης Πίνδου προς τα δυτικά, πάνω στην Ιόνιο ζώνη, και συγκεκριμένα κατά την επώθηση του φλύσχη της Πίνδου πάνω στον φλύσχη της Ιονίου ζώνης, σχετίζονται με εφιππεύσεις εντός του επωθημένου υλικού.

Στα πλαίσια κατασκευής της σήραγγας του Ανηλίου, ως τμήμα της Εγνατίας Οδού, διεξήχθησαν γεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες. Σύμφωνα με τις έρευνες αυτές διαπιστώθηκε ότι η περιοχή του Ανηλίου, διατρέχεται από πέντε κύριες εφιππεύσεις με γενική διεύθυνση Β-Ν και κλίση προς τα Ανατολικά, και από άλλες δευτερεύουσες, παράλληλες προς τις κύριες, εφιππεύσεις (Μουρτζάς Ν. & Σωτηρόπουλος Η., 1999). Οι εσωτερικές αυτές εφιππεύσεις συνοδεύονται συνήθως από μια σειρά ερυθρών ιλυολίθων του φλύσχη της Πίνδου, οι οποίοι έχουν διευκολύνει τις κινήσεις αυτές δρώντας ως λιπαντικό μέσο και, απουσία βλάστησης, μπορούν να χαρτογραφηθούν (Marinos V. et al., 2004).

Το τμήμα αυτό από τον Μετσοβίτικο ποταμό έως και την περιοχή του Μετσόβου-Ανηλίου που αποτελείται από φλυσχικούς σχηματισμούς χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική παραμόρφωση που εκδηλώνεται με εφιππεύσεις, έντονες πτυχώσεις και διατμήσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι, σε ορισμένες θέσεις, λόγω της ισχυρής τεκτονικής καταπόνησης να μειώνεται η όποια αρχική ποιότητα των υλικών και να εκδηλώνονται αστάθειες και μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις (Marinos P.G and Hoek E., 2006).

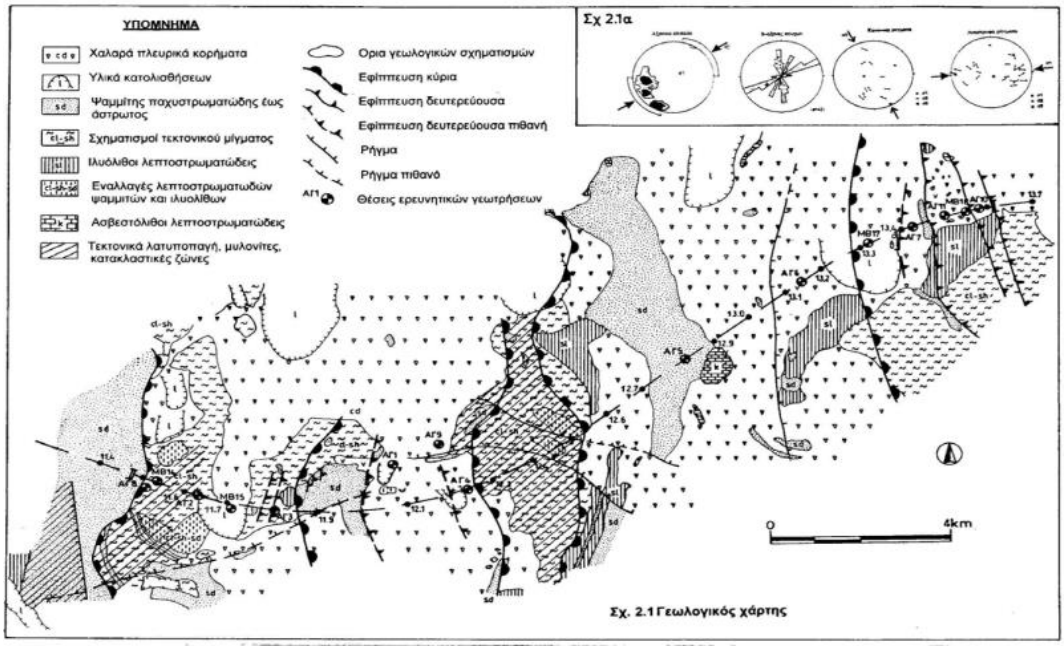


Εικόνα 4.2 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η περιοχή έρευνας. (Φύλλο χάρτη ΜΕΤΣΟΒΟΝ, ΙΓΜΕ, 1959)

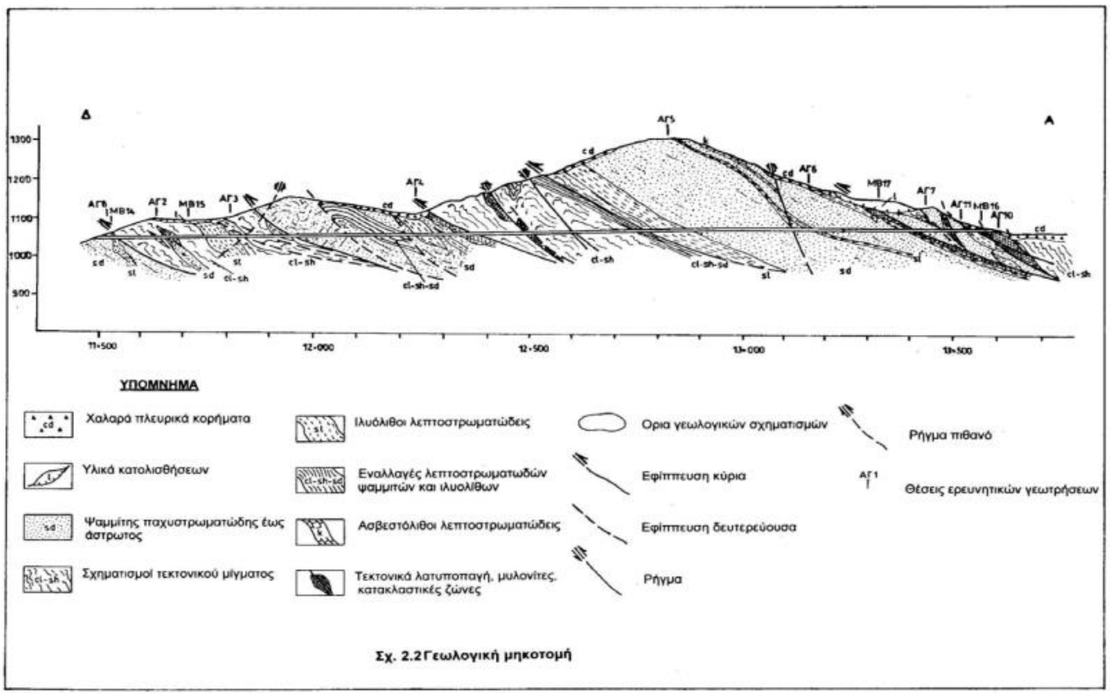


Σχήμα 4.1 Ψηφιοποιημένο απόσπασμα του φύλλου ΜΕΤΣΟΒΟΝ (ΙΓΜΕ, 1959). Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος. (Ψηφιοποιημένο από την συγγραφέα)

Σύμφωνα με τις μελέτες, που όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο κατασκευής της σήραγγας του Ανηλίου, συντάχθηκε το γεωλογικό μοντέλο της περιοχής που περιγράφει την γεωλογική δομή με τις αλλεπάλληλες λεπιώσεις κατά μήκος της χάραξης (Σχήμα 4.2 και 4.3).



Σχήμα 4.2 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας Ανηλίου (Μουρτζάς Ν. & Σωτηρόπουλος Η., 1999)



Σχήμα 4.3 Γεωλογική μηκοτομή της σήραγγας Ανηλίου (Μουρτζάς Ν. & Σωτηρόπουλος Η., 1999)

4.2.1 Γεωλογικό πρότυπο φλύσχη

Ο *φλύσχης* δεν αποτελεί συγκεκριμένο πετρογραφικό σχηματισμό, αλλά πετρογραφικό όρο που δηλώνει θαλάσσια ιζηματογενή φάση. Χαρακτηρίζεται από μια ακολουθία ιζημάτων που αποτελείται από ρυθμικές εναλλαγές ψαμμιτών, ιλυολίθων, μαργών, αργιλικών σχιστολίθων και σπανιότερα κροκαλοπαγών και ασβεστολίθων.

Ο σχηματισμός του φλύσχη συνδέεται με την εξέλιξη ενός ορογενούς, αντιπροσωπεύοντας το σύνολο των ιζημάτων που αποτίθενται σε μια λεκάνη στο τελικό στάδιο πλήρωσης του γεωσυγκλίνου. Επομένως, πρόκειται για σχηματισμό που σηματοδοτεί το κλείσιμο του κύκλου ιζηματογένεσης πριν την κύρια πτύχωση.

Συγκεκριμένα, οι ηπειρωτικές κατωφέρειες , που αποτελούν προέκταση των ηπείρων προς τον ωκεανό και έχουν απότομες κλίσεις, τροφοδοτούνται με κλαστικό υλικό από την πλευρά των ηπείρων, των ραχών και των ηφαιστειακών τόξων με τη δράση τουρβιδικών ρευμάτων. Τα κλαστικά αυτά υλικά, σε συνδυασμό πολλές φορές με παρεμβολές ολισθολίθων, αποτελούν τα ιζήματα του φλύσχη. Με το κλείσιμο της ωκεάνιας λεκάνης και την ηπειρωτική σύγκρουση που ακολουθείται λόγω ισχυρών συμπιεστικών δυνάμεων, ο φλύσχης συμμετέχει στις ορογενετικές κινήσεις, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται έντονα πτυχωμένος και τεκτονισμένος.

4.2.2 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη

Ο φλύσχης, λόγω της φύσης και της σύνθετης γεωλογικής του ιστορίας, είναι ένας ιδιαίτερος σχηματισμός που συχνά εμφανίζει πτωχές ιδιότητες και προκαλεί προβλήματα σε φυσικά πρανή και στα τεχνικά έργα. Η ιδιαιτερότητα αυτή του φλύσχη έγκειται στα εξής χαρακτηριστικά (Μαρίνος Β., 2010) :

- Ετερογένεια

Οι διάφοροι λιθολογικοί τύποι που απαρτίζουν τον φλύσχη, όπως ψαμμίτες, ιλυόλιθοι, αργιλικοί σχιστόλιθοι, με τις εναλλαγές τους, προσδίδουν στον σχηματισμό αυτό ποικίλλουσα ετερογένεια. Η λιθολογική αυτή ετερογένεια συνεπάγεται και ετερογένεια στα μηχανικά χαρακτηριστικά των μελών του φλύσχη.

- Έντονη στρωσιγένεια

Οι επιφάνειες στρώσης αποτελούν ασυνέχειες με μεγάλη εμμονή και μειωμένη αντοχή. Σημαντικός είναι ο παράγοντας προσανατολισμού της στρώσης καθώς είναι πιθανό να είναι δυσμενής σε σχέση με τη γεωμετρία ενός πρανούς.

- Συμμετοχή μελών με χαμηλή αντοχή

Η συμμετοχή γεωυλικών με χαμηλή αντοχή, όπως μάργες, ιλυόλιθοι, αργιλικοί σχιστόλιθοι, σε συνδυασμό με την έντονη τεκτονική καταπόνηση και την πτωχή ποιότητα των ασυνεχειών τους υποβαθμίζουν την ποιότητα της βραχομάζας, δρώντας αρνητικά στην ευστάθεια.

- Τεκτονική καταπόνηση

Η τεκτονική διαταραχή μπορεί να είναι ασθενής έως πολύ ισχυρή και εκφράζεται με κερματισμό, ρηγματώσεις, πτυχώσεις, επωθήσεις, εφιππεύσεις και διατμήσεις. Η τεκτονική καταπόνηση μεταβάλλει την αρχική δομή και υποβαθμίζει την όποια αρχική ποιότητα της βραχομάζας του φλύσχη.

- Ανάπτυξη υδατικών πιέσεων

Ο φλύσχης στο σύνολό του αποτελεί έναν αδιαπέρατο σχηματισμό, με τοπικές υδροφορίες να περιορίζονται στα ψαμμιτικά μέλη. Η παρουσία αργιλικών, ιλυολιθικών πετρωμάτων έχει ως αποτέλεσμα σε αστράγγιστες συνθήκες να αυξάνονται οι υδατικές πιέσεις, είτε ως υδροστατική πίεση σε ρωγμές είτε ως πίεση πόρων μέσα στους σχηματισμούς, και επομένως να μειώνονται οι ενεργές τάσεις και σε κάθε περίπτωση η αντοχή της βραχομάζας. Ιδιαίτερα στα πλαστικά μέλη του φλύσχη, που είναι ευαίσθητα σε αλλαγές της περιεχόμενης υγρασίας, η παρουσία του νερού απομειώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

- Αποσάθρωση

Η αποσάθρωση περιορίζεται κυρίως στα πλαστικά-αργιλικά μέλη και εμφανίζεται με τον μηχανισμό της σχιστοποίησης-σχάσης σε επιφανειακές κυρίως συνθήκες. Εάν υπάρχουν ασυνέχειες που ευνοούν την κατείσδυση και διακίνηση του νερού τότε είναι πιθανό η αποσάθρωση να συνεχίζει σε βάθος, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μανδύας αποσάθρωσης μεγάλου πάχους.

Με βάση την κατανομή των παραπάνω γνωρισμάτων, ο φλύσχης διαμορφώνει σύνθετες και ασθενείς βραχομάζες.

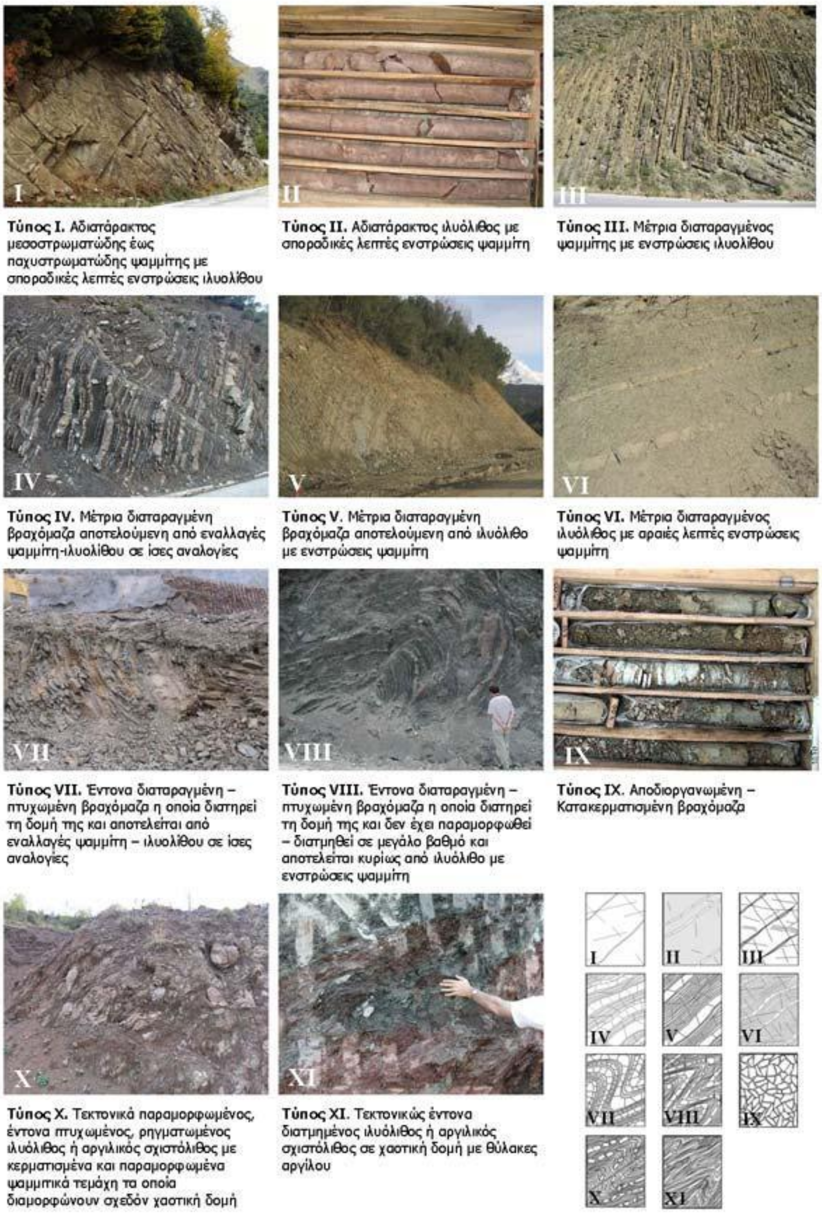
4.2.3 Σύστημα γεωτεχνικής ταξινόμησης του φλύσχη

Η εκτίμηση των παραμέτρων που αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά μιας βραχομάζας εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου όσο και από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Η κατάσταση αυτή δυσχεραίνεται στην περίπτωση του φλύσχη, λόγω της ποικίλλουσας ετερογένειας που παρουσιάζει στη σύσταση και τη δομή.

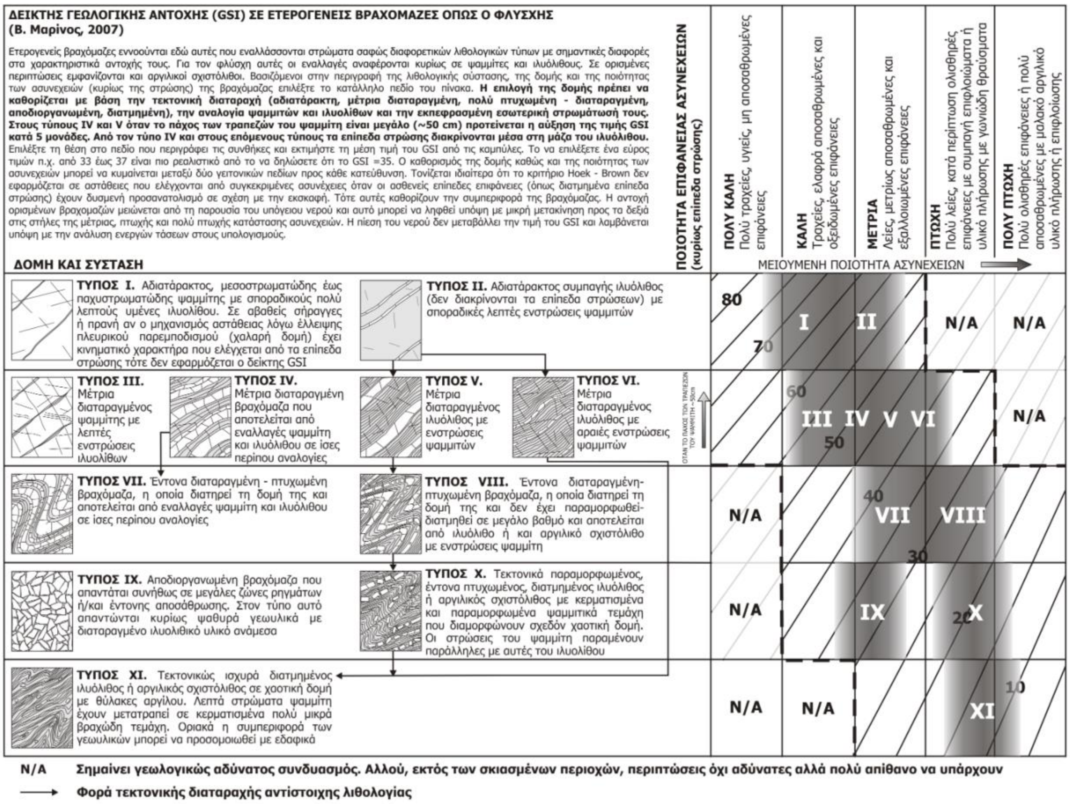
Η εκτίμηση αυτών των παραμέτρων είναι αδύνατον να γίνει με εργαστηριακές δοκιμές καθώς η δειγματοληψία είναι πολλές φορές αδύνατη, και μη αντιπροσωπευτική της βραχομάζας λόγω της διαταραχής και ανομοιογένειας. Η εκτέλεση επιτόπου δοκιμών για την εύρεση των χαρακτηριστικών αυτών συνήθως είναι αδύνατη, με αποτέλεσμα να έχει περιορισμένη εφαρμογή. Επομένως, η εκτίμηση αυτών των παραμέτρων γίνεται με τη χρήση συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας, που έχουν προκύψει από πραγματικές περιπτώσεις κατασκευής τεχνικών έργων.

Για τον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό και την εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών των βραχομαζών του φλύσχη, έγινε ταξινόμηση αυτών σε ένδεκα τύπους (I έως XI) με βάση την επικράτηση των ψαμμιτικών και ιλυολιθικών μελών και την τεκτονική διαταραχή (Σχήμα 4.4) (Μαρίνος Β., 2010).

Για τις βραχομάζες του φλύσχη, προτάθηκε από τους Marinos P. & Hoek E. (2001) το σύστημα ταξινόμησης GSI (Geological Strength Index=Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής) για ετερογενείς βραχομάζες, ενώ αργότερα, ως αναθεώρηση των τιμών του συστήματος αυτού, προτάθηκε ένα νέο διάγραμμα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχομάζες όπως ο φλύσχης (Μαρίνος Β., 2010) (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.4 Τύποι βραχομαζών φλύσχη (Μαρίνος Β., 2010)



Σχήμα 4.5 Το αναθεωρημένο διάγραμμα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχομάζες όπως ο φλύσχης (Μαρίνος Β., 2010)

4.3 Γεωλογία στενής περιοχής

Όπως προαναφέρθηκε, στην περιοχή του Ανηλίου παρατηρήθηκε μια σειρά εφιππεύσεων εντός του φλύσχη της Πίνδου. Λόγω της συμπιεστικής τεκτονικής παραμόρφωσης που έχει δεχθεί ο φλύσχης, αλλά και λόγω της φύσης του, έχουν σχηματιστεί πολύ ασθενείς βραχομάζες.

Με σκοπό την επιτόπου παρατήρηση και αξιολόγηση των γεωλογικών συνθηκών, πραγματοποιήθηκε επίσκεψη στην περιοχή. Από εμφανίσεις σχηματισμών της περιοχής παρατηρήθηκε η έντονη τεκτονική παραμόρφωση που έχουν υποστεί και η σημαντική επικράτηση της ιλυολιθικής έναντι της ψαμμιτικής φάσης του φλύσχη.

Στην περιοχή, συναντήθηκαν τα εξής:

- έντονα πτυχωμένοι και διατμημένοι ιλυόλιθοι με παραμορφωμένα και κερματισμένα ψαμμιτικά τεμάχη

Εικόνα 4.3 Έντονα διατμημένοι ιλυόλιθοι με παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχη που συναντήθηκαν στην περιοχή έρευνας.

- ερυθροί ιλυόλιθοι, ισχυρά διατμημένοι που εμφανίζονται εύθρυπτοι και φυλλώδεις, με ψαμμιτικά τεμάχη κατά θέσεις.

Εικόνα 4.4 Έντονα διατμημένοι ερυθροί ιλυόλιθοι που συναντήθηκαν στην περιοχή έρευνας.

- μέτρια διαταραγμένοι τεφροί-καστανοί ψαμμίτες, με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων

Εικόνα 4.5 Μέτρια διαταραγμένοι ψαμμίτες που συναντήθηκαν στην περιοχή έρευνας.

Εικόνα 4.6 Εικόνα με τις θέσεις των σχηματισμών που συναντήθηκαν κατά την υπαίθρια γεωλογική εργασία (Google Earth)

5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

5.1 Εργασία πεδίου

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε έρευνα στην περιοχή του Ανηλίου με σκοπό την επιτόπου παρατήρηση και διερεύνηση των γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή της κατολίσθησης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν οι επιτόπου συνθήκες και αναζητήθηκαν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τυπικών κατολισθήσεων, καθώς και εμφανίσεις σχηματισμών, με σκοπό την εκτίμηση των ορίων, την κατανόηση του φαινομένου, και την αποτύπωσή του.

Κατά την υπαίθρια εργασία παρατηρήθηκε, αρχικά, το ανώμαλο ανάγλυφο της περιοχής, με την ύπαρξη βυθισμάτων και εξάρσεων, χαρακτηριστικό των περιοχών κατολίσθησης.

Εικόνα 5.1 Ταπεινώσεις και εξάρσεις του αναγλύφου στην περιοχή έρευνας.

Άλλες ενδείξεις αποτέλεσαν οι ρωγμές σε δρόμους, κατασκευές και κτίρια που βρίσκονται στο άνω τμήμα της κατολίσθησης, στην περιοχή του φρυδιού, καθώς και διαρρήξεις του εδάφους στο σώμα της κατολίσθησης.

Εικόνα 5.2 Ρωγμές στον δρόμο και σε κτίριο που βρίσκονται στο άνω τμήμα της περιοχής κατολίσθησης.

Χαρακτηριστικό της περιοχής κατολίσθησης είναι η ύπαρξη επιπεδώσεων. Οι αναβαθμοί που έχουν δημιουργηθεί, αποτελούν δευτερεύουσες κατακρημνίσεις που σχετίζονται με δευτερεύοντα ολισθαίνοντα τεμάχη (blocks) στο κύριο σώμα της κατολίσθησης.

Εικόνα 5.3 Ύπαρξη επιπεδώσεων στην μάζα της κατολίσθησης

Στην περιοχή παρατηρήθηκαν μικρές συγκεντρώσεις νερού κατά θέσεις, και ύπαρξη πηγής στο κάτω μέρος της κατολίσθησης.

Εικόνα 5.4 Συγκεντρώσεις νερού που συναντήθηκαν σε επιπεδώσεις στην μάζα της κατολίσθησης

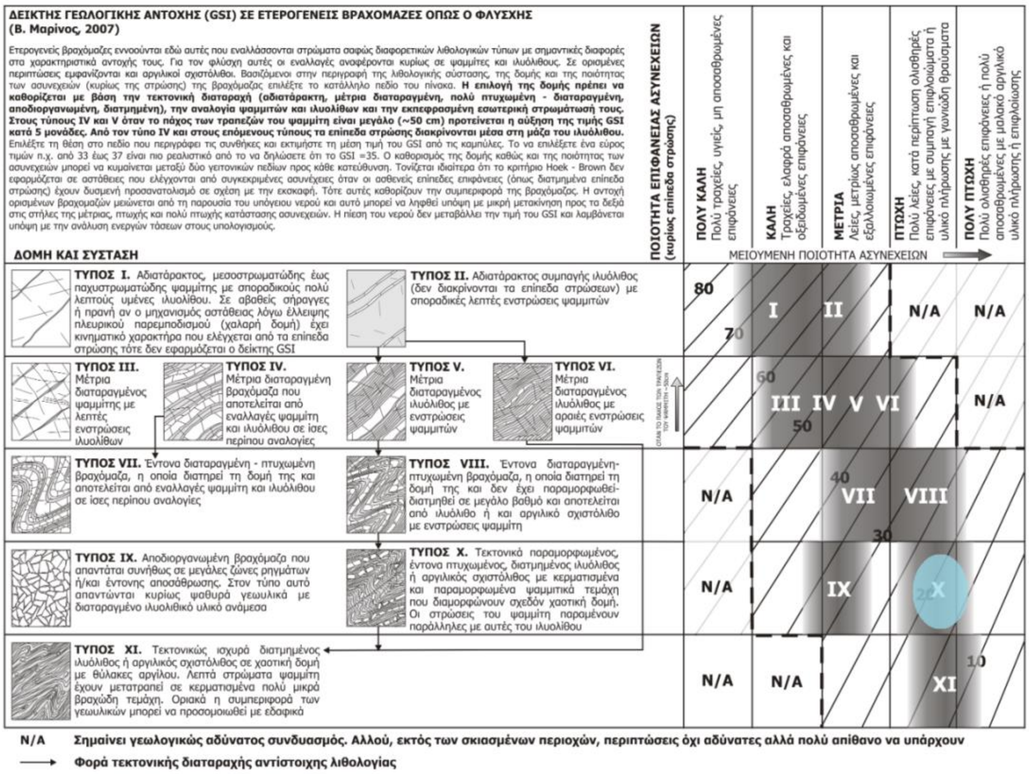
Εικόνα 5.5 Πηγή που εμφανίζεται στο κάτω τμήμα της κατολίσθησης

Στο κατώτερο τμήμα της κατολίσθησης παρατηρήθηκε ένα «φούσκωμα» του εδάφους, χαρακτηριστικό της περιοχής στο πόδι μιας κατολίσθησης.

Εικόνα 5.6 Φούσκωμα του εδάφους που βρίσκεται στην βάση της πλαγιάς δίπλα στο ποτάμι του Μετσοβίτικου

Στην περιοχή της κατολίσθησης συναντήθηκαν τεκτονικά παραμορφωμένοι, έντονα πτυχωμένοι και διατμημένοι ιλυόλιθοι με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχη, που διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή (Εικόνα 5.7). Η βραχομάζα αυτή αντιστοιχεί στον Τύπο Χ του διαγράμματος GSI για τον φλύσχη. Ο συνδυασμός της δομής με την πτωχή ποιότητα των ασυνεχειών προσδίδει στη βραχομάζα μια τιμή GSI 15-20 (Σχήμα 5.1).

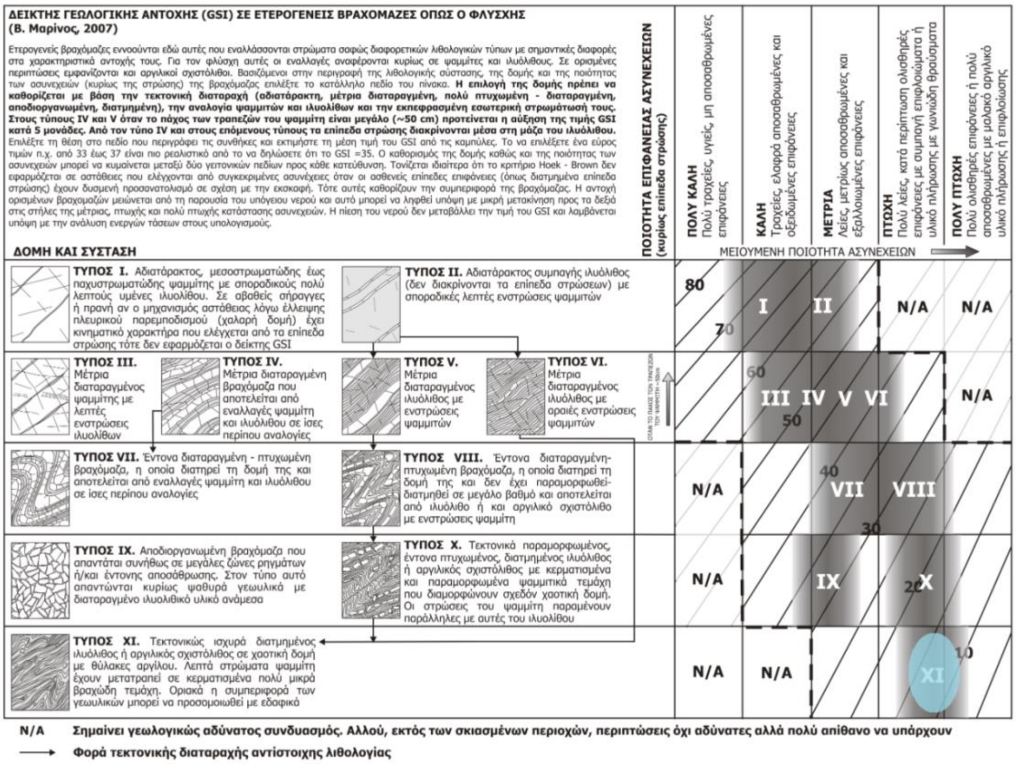
Εικόνα 5.7 Βραχομάζα τύπου Χ που απαντάται στην περιοχή της κατολίσθησης



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχομάζες όπως ο φλύσχης. Με γαλάζιο σημειώνεται η τιμή του GSI που αντιστοιχεί στην βραχομάζα τύπου X που απαντάται στην περιοχή. (Μαρίνος Β., 2010)

Στην περιοχή παρατηρήθηκαν, επίσης, εμφανίσεις ερυθρών (και τεφρών) ιλυολίθων ισχυρά διατμημένων, με χαοτική δομή (Εικόνα 5.8). Λεπτά στρώματα ψαμμίτη έχουν μετατραπεί σε πολύ κερματισμένα μικρά τεμάχη. Η βραχομάζα αυτή αντιστοιχεί στον Τύπο XI του διαγράμματος GSI και το εύρος που της αντιστοιχεί είναι 10-15 (Σχήμα 5.2). Η ζώνη αυτή εμφανίζεται πλησίον του οικισμού του Ανηλίου και συνδέεται με μια από τις εφιππεύσεις τις περιοχής. Τέτοιες ζώνες εμφανίζονται στις βάσεις και στα μέτωπα των εφιππεύσεων της περιοχής και μπορούν να παρατηρηθούν σε θέσεις απουσία βλάστησης.

Εικόνα 5.8 Βραχομάζα τύπου XI που απαντάται στην περιοχή



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα GSI για ετερογενείς σχηματισμούς όπως ο φλύσχης. Με γαλάζιο χρώμα σημειώνεται η τιμή του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής που αντιστοιχεί στην βραχομάζα τύπου XI της περιοχής. (Μαρίνος Β., 2010)

Επίσης, παρατηρήθηκαν μέτρια διαταραγμένοι, τεφροί-καστανοί ψαμμίτες (Εικόνα 5.9). Στη θέση αυτή βρίσκεται το δεξιό (όπως φαίνεται από την στέψη) πλευρικό όριο της κατολίσθησης.

Εικόνα 5.9 Εμφάνιση ψαμμιτών στο ένα πλευρικό όριο της κατολίσθησης

Εικόνα 5.10 Θέσεις των βραχομαζών που παρατηρήθηκαν κατά την εργασία υπαίθρου (Google Earth)

5.2 Μηχανισμός αστοχίας

Κατά την υπαίθρια εργασία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παρατηρήθηκε η μορφολογία της κατολίσθησης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αρχικά η κύρια κατακρήμνιση που έχει απότομη κλίση και μορφή τόξου. Επίσης, παρατηρήθηκε το ανώμαλο ανάγλυφο του σώματος της κατολίσθησης, με τις ηπιότερες κλίσεις σε σχέση με την περιοχή του φρυδιού, και τις επιπεδώσεις της πλαγιάς. Τέλος, παρατηρήθηκε η περιοχή συσσώρευσης υλικού στην περιοχή του πόδα της κατολίσθησης που καταλήγει στον ποταμό του Μετσοβίτικου, όπου στην βάση της πλαγιάς οι κλίσεις είναι πιο απότομες. Οι παρατηρήσεις αυτές αποτελούν γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τυπικών περιστροφικών ολισθήσεων.

Η περιοχή που ερευνάται, όπως προαναφέρθηκε, δομείται από φλυσχικούς σχηματισμούς της ζώνης Ωλονού-Πίνδου και βρίσκεται σε ένα περιβάλλον διαδοχικών εφιππεύσεων. Ως αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης, έχουν δημιουργηθεί ασθενείς βραχομάζες. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της κατολίσθησης συναντήθηκαν έντονα πτυχωμένοι και διατμημένοι ιλυόλιθοι με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχη (Τύπος X), και ισχυρά διατμημένοι ιλυόλιθοι που διαμορφώνουν μια χαοτική δομή (Τύπος XI), με επικρατέστερη στην περιοχή τη βραχομάζα Τύπου X. Τα ψαμμιτικά τεμάχη που βρίσκονται μέσα στο σώμα του τύπου αυτού είναι λιγότερο διατμημένα, αλλά δεν είναι ικανά ώστε να προσδώσουν αντοχή στις βραχομάζες. Έτσι, η βραχομάζα αυτή, λόγω της δομής, και κυρίως λόγω της ισχυρής τεκτονικής καταπόνησης καθώς και των ήδη χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών του άρρηκτου πετρώματος, χαρακτηρίζονται από πολύ πτωχή ποιότητα και συμπεριφέρονται ισότροπα.

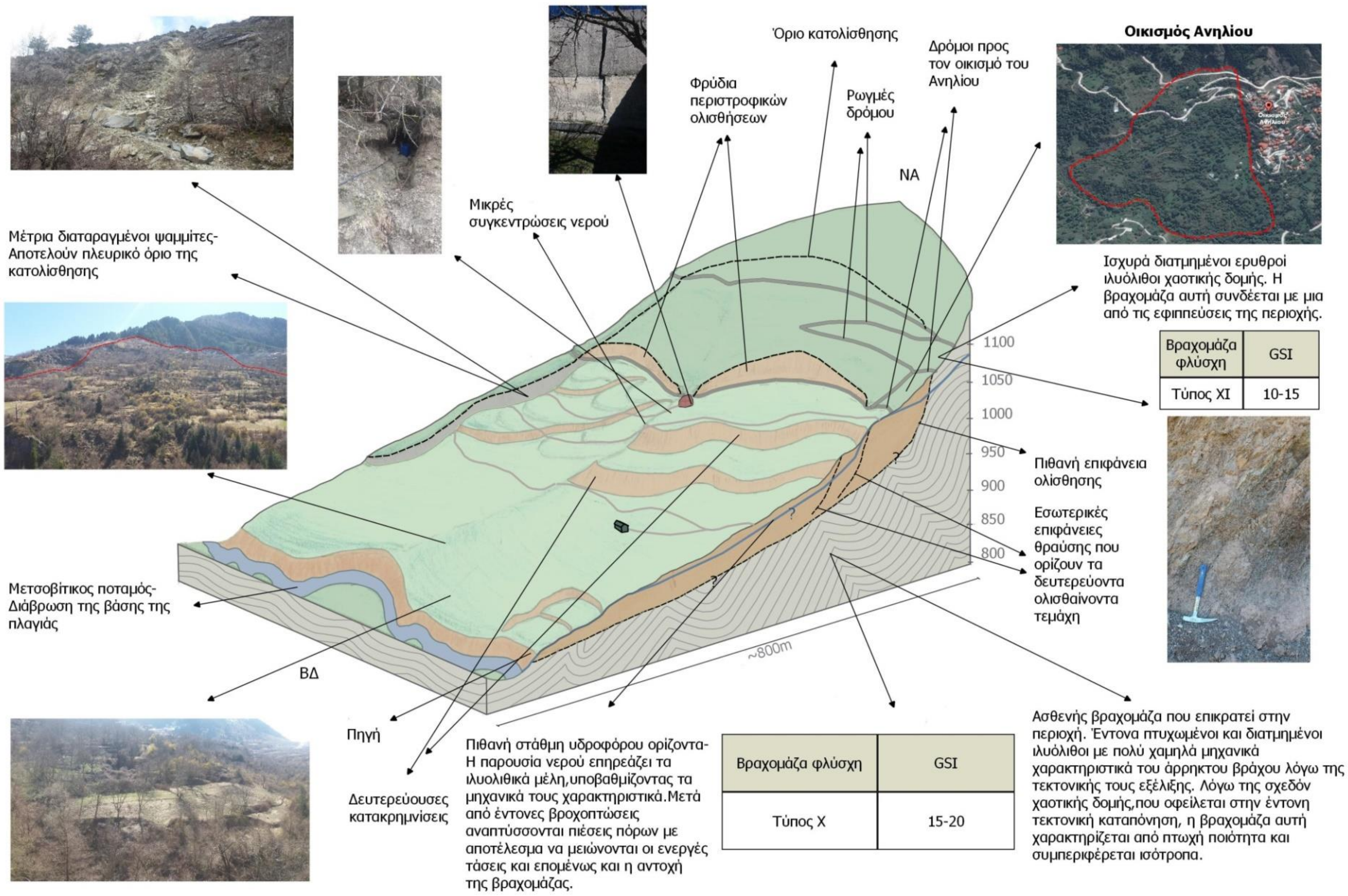
Η σημαντική επικράτηση των ιλυολιθικών έναντι των ψαμμιτικών μελών στην περιοχή είναι εξαιρετικής σημασίας, καθώς γενικά αποτελούν ασθενέστερα μέλη του φλύσχη, και λόγω της ευαισθησίας που εμφανίζουν σε θέματα νερού. Ειδικότερα, ποσότητες νερού που κατεισδύουν μέσω ασυνεχειών ευνοούν την αποσάθρωση των ιλυολιθικών μελών. Επίσης, σε αστράγγιστες συνθήκες αναπτύσσονται ή/και αυξάνονται οι υδατικές πιέσεις, είτε ως υδροστατική πίεση μέσα σε ρωγμές, είτε ως πίεση πόρων μέσα στον σχηματισμό. Έτσι, μετά από έντονες βροχοπτώσεις αναπτύσσονται πιέσεις πόρων με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ενεργές τάσεις και επομένως και η αντοχή της βραχομάζας.

Κατάντη της περιοχής κατολίσθησης, και ανάμεσα από το Μέτσοβο και το Ανήλιο, διέρχεται ο Μετσοβίτικος ποταμός. Η διαβρωτική δράση του ποταμού στην βάση της πλαγιάς έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια στήριξης της μάζας της πλαγιάς, γεγονός που οδηγεί τη μάζα προς ολίσθηση. Με την πάροδο του χρόνου, η συνεχής διάβρωση, είναι δυνατόν να προκάλεσε όλα τα διαφορετικά επεισόδια των κατολισθητικών φαινομένων που παρατηρούνται στην περιοχή της κατολίσθησης. Επομένως, εκτιμάται ότι το έναυσμα μετακίνησης ήταν ποτάμια διαβρωτική δράση στη βάση της πλαγιάς ή κάποια βροχόπτωση που είχε ως αποτέλεσμα τη φόρτιση της μάζας. Σε κάθε περίπτωση, η συμβολή του νερού είναι μεγάλης σημασίας, τόσο για τη δημιουργία όσο και για την εξέλιξη του φαινομένου.

Συμπερασματικά, λόγω της πτωχής ποιότητας που χαρακτηρίζει τις βραχομάζες αυτές του φλύσχη, σε συνδυασμό με τις επιτόπου συνθήκες (συνθήκες υπόγειου νερού, μορφολογικές και κλιματικές συνθήκες), στην περιοχή έχουν δημιουργηθεί ισότροπες, κυκλικού τύπου αστοχίες, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια κατολίσθηση μεγάλης κλίμακας (κλίμακας πλαγιάς) εντός της οποίας υπάρχουν δευτερεύουσες μικρότερες ολισθήσεις.

5.2.1 Μοντέλο κατολίσθησης

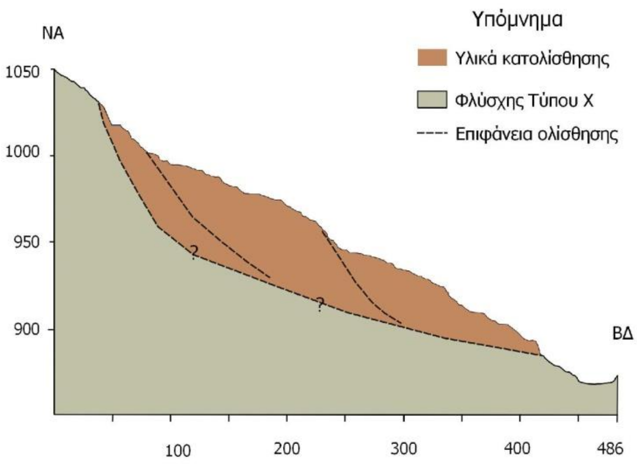
Με βάση τις υπαίθριες παρατηρήσεις και τα προϊόντα επεξεργασίας των δεδομένων που ελήφθησαν με το σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους δημιουργήθηκε ένα πιθανό μοντέλο της περιοχής της κατολίσθησης (Σχήμα 5.3). Με δεδομένο ότι η περιοχή καλύπτεται από πυκνή βλάστηση, ο εντοπισμός και, συνεπώς, και ο σχεδιασμός των κύριων χαρακτηριστικών των κατολισθήσεων έγινε με βάση την παρατήρηση της μορφολογίας. Δηλαδή, η θέση του αναγλύφου με τοξοειδή μορφή και απότομη κλίση αντιστοιχεί στην περιοχή του φρυδιού και οι θέσεις που το ανάγλυφο είναι ανώμαλο με επιπεδώσεις πάνω στην πλαγιά αντιστοιχούν στο κύριο σώμα της κατολίσθησης. Στο μοντέλο προσομοίωσης της κατολίσθησης σημειώνονται οι παρατηρήσεις που έγιναν κατά την υπαίθρια εργασία και δεν είναι εμφανείς στα υπόλοιπα δεδομένα.

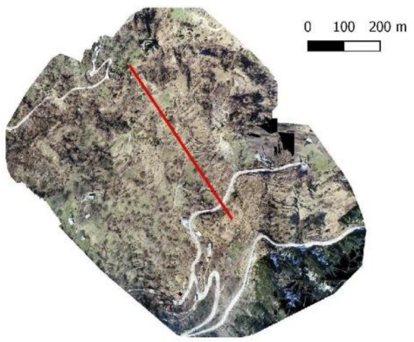


Σχήμα 5.3 Σχηματικό μοντέλο προσομοίωσης της κατολίσθησης

Επιπλέον, σε περιβάλλον λογισμικού δημιουργήθηκε σχηματική τομή της κατολίσθησης με σκοπό την εκτίμηση μιας πιθανής επιφάνειας ολίσθησης. Σύμφωνα με εργασία που αφορά την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση για την ανάλυση ευστάθειας κατολίσθησης στην περιοχή του Ανηλίου, σε θέση πλησίον της περιοχής έρευνας της παρούσας εργασίας, ο κύκλος ολίσθησης που προέκυψε, μετά από έρευνα φύλλων γεωτρήσεων, εκτιμήθηκε ότι βρίσκεται σε βάθος περίπου 25 μέτρα (Χατζηθεοδοσίου Θ., 2018).

Η παρούσα σχηματική τομή (Σχήμα 5.4) αποτελεί εκτίμηση μιας πιθανής επιφάνειας ολίσθησης που πραγματοποιήθηκε με μορφολογικά κριτήρια, καθώς δεν υπήρχε πρόσβαση σε δεδομένα από υπεδαφικές έρευνες. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται ένας πιθανός κύκλος ολίσθησης καθώς και εσωτερικές επιφάνειες θραύσης που ορίζουν τα δευτερεύοντα τεμάχη (blocks) στο κύριο σώμα της κατολίσθησης.





Σχήμα 5.4 Σχηματικό προφίλ της κατολίσθησης όπως φαίνεται η θέση στο σχήμα δεξιά.

6. ΧΡΗΣΗ ΣμηΕΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LiDAR ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

6.1 Συλλογή δεδομένων

Κατά την επίσκεψη στην περιοχή της κατολίσθησης, εκτός από την επιτόπου παρατήρηση, χρησιμοποιήθηκαν δύο εργαλεία για τη συλλογή δεδομένων, ένα σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους (ΣμηΕΑ) και ένα επίγειο σύστημα LiDAR (Terrestrial Laser Scanner-TLS). Η χρήση σύγχρονων εργαλείων στην έρευνα κατολισθητικών φαινομένων εμφανίζει μεγάλη απήχηση τα τελευταία χρόνια με πλήθος εφαρμογών. Η εφαρμογή τους στην παρούσα εργασία αφορά την αναγνώριση και αποτύπωση των κατολισθήσεων στην περιοχή και την μεταξύ τους σύγκριση.

Για τη χρήση του μη επανδρωμένου αεροσκάφους (Phantom 4 Pro της εταιρείας DJI), καθορίστηκαν αρχικά οι κατάλληλες παράμετροι και το σχέδιο πτήσης από τον χειριστή του αεροσκάφους. Κατά τη λειτουργία του αεροσκάφους, καλύπτοντας έκταση 0.6 km^2, λήφθηκε μια σειρά 281 επικαλυπτόμενων φωτογραφιών της περιοχής ενδιαφέροντος με μια μέση τιμή Ground Sampling Distance (GSD), δηλαδή η απόσταση των κέντρων δύο γειτονικών pixels μετρημένη στο έδαφος, ίση με 5.01 *cm*.

Παράλληλα με τη χρήση του αεροσκάφους, χρησιμοποιήθηκε και ένα επίγειο στατικό σύστημα σάρωσης (ILRIS της εταιρείας Optech). Ο ενεργητικός αυτός δέκτης που χρησιμοποιήθηκε είναι δέκτης μέτρησης χρόνου (Time of Flight sensor), δηλαδή έχει ως αρχή λειτουργίας τη μέτρηση της απόστασης από τον στόχο χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του φωτός και τον χρόνο που μεσολαβεί από την εκπομπή ενός παλμού έως και την επιστροφή του. Με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος και την αποφυγή του φαινομένου της έμφραξης (occlusion) χρειάζονται πολλαπλές σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις (Jaboyedoff et al., 2018). Για τον λόγο αυτό, οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν από δύο διαφορετικές θέσεις μετά από επανατοποθέτηση του συστήματος.

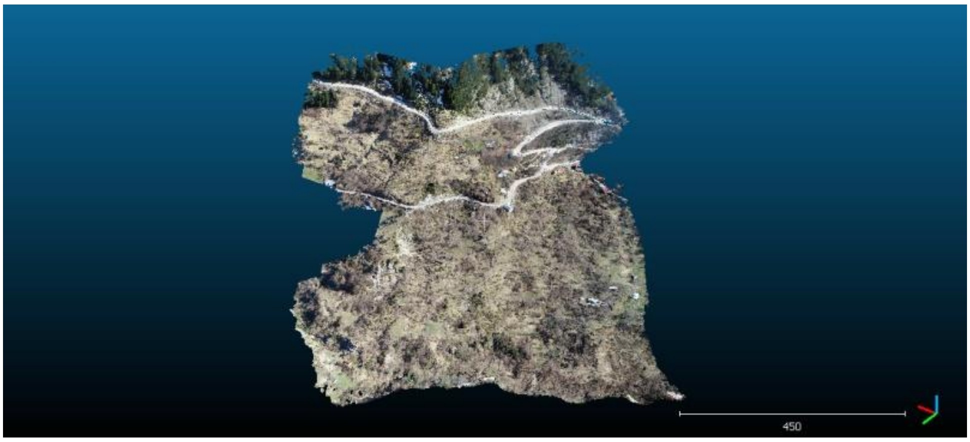
Τόσο τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το μη επανδρωμένο αεροσκάφος- φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης με σχετική αλληλοεπικάλυψη- όσο και τα δεδομένα που λήφθηκαν από τον επίγειο σαρωτή- σημειακά δεδομένα της μορφής (XYZ)- χρησιμοποιήθηκαν σε επόμενη φάση για επεξεργασία και παραγωγή των τελικών προϊόντων.

6.2 Επεξεργασία δεδομένων

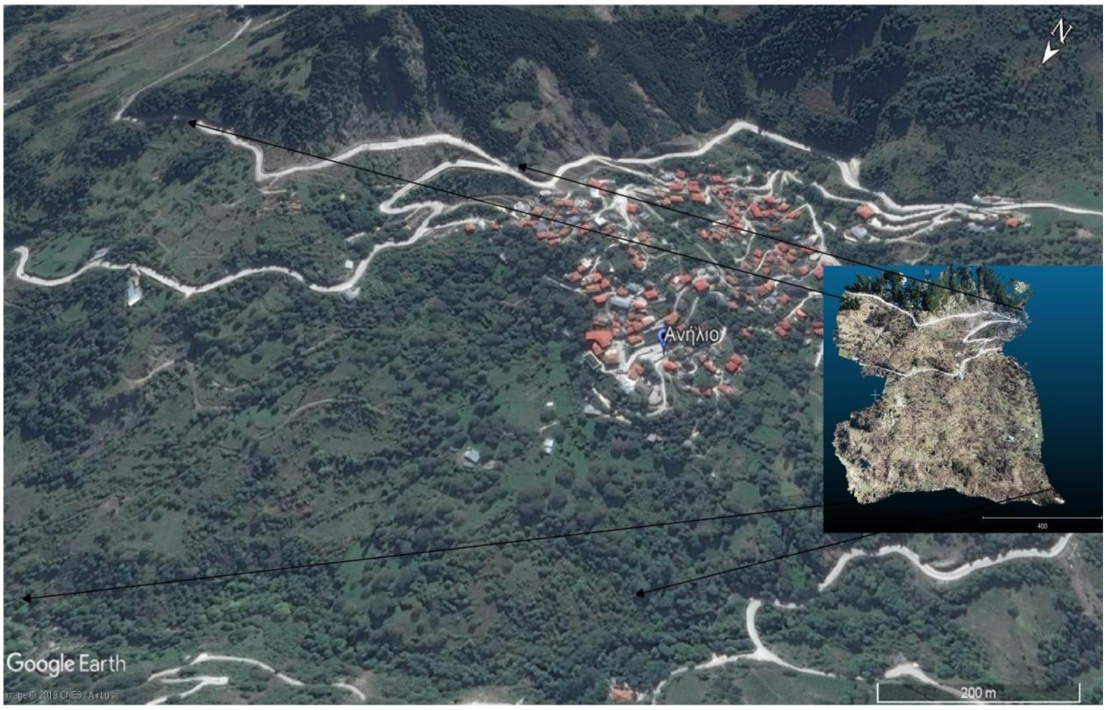
Οι εικόνες που λήφθηκαν από το σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους χρησιμοποιήθηκαν σε περιβάλλον λογισμικού (Pix4D) στη ροή εργασιών της τεχνικής Structure from Motion (SfM), καθώς είναι δυνατόν να παραχθούν πολύ λεπτομερή τρισδιάστατα μοντέλα από επικαλυπτόμενες φωτογραφίες με τη χρήση αλγορίθμων SfM (Lucieer et al., 2014).

Η επεξεργασία αυτή των φωτογραφιών έγινε με αυτοματοποιημένο τρόπο και είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή των παρακάτω φωτογραμμετρικών προϊόντων:

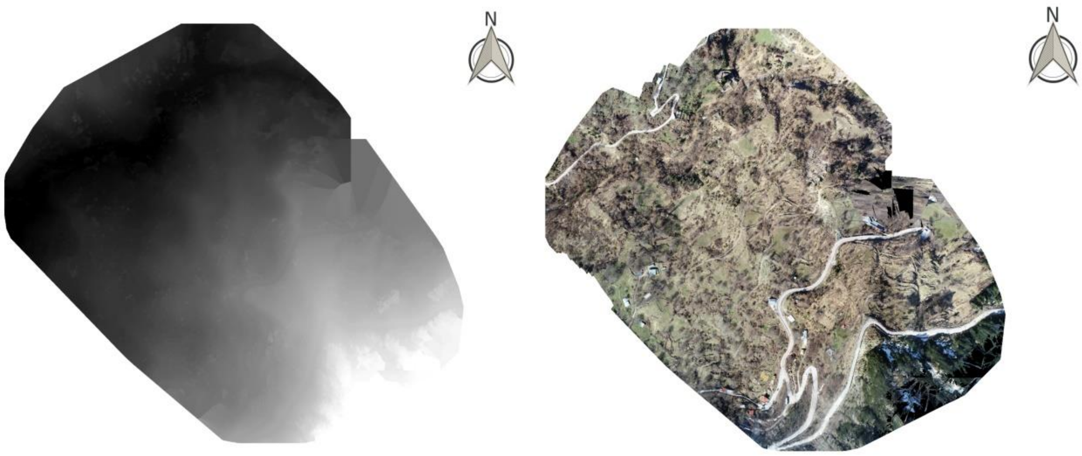
- Πυκνό νέφος σημείων (dense point-cloud) που αποδίδει την τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής με κάθε σημείο να ανήκει σε ένα σύστημα συντεταγμένων και να φέρει χρωματική πληροφορία
- Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας (Digital Surface Model-DSM), το οποίο αποδίδει και περιγράφει τόσο το ανάγλυφο του εδάφους όσο και τα αντικείμενα που βρίσκονται πάνω σε αυτό (βλάστηση, κτίρια κ.α.)
- Ορθομωσαϊκό, το οποίο αποτελεί την συνένωση ορθοφωτογραφιών. Οι ορθοφωτογραφίες είναι φωτογραφίες που έχουν υποστεί διόρθωση λόγω αναγλύφου (ορθοδιόρθωση) με αποτέλεσμα να έχουν ενιαία κλίμακα και μπορούν να γίνουν μετρήσεις πάνω σε αυτές.



Εικόνα 6.1 Πυκνό νέφος σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος όπως προέκυψε από την επεξεργασία των εικόνων που πάρθηκαν από το ΣμηΕΑ.



Εικόνα 6.2 Εικόνα περιοχής που έχει καλυφθεί από το Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (Google Earth)



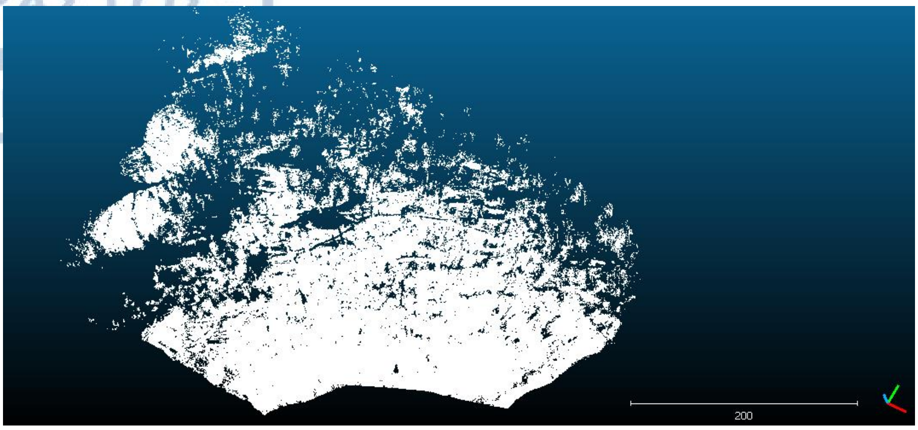
Εικόνα 6.3 Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (αριστερά) και ορθομωσαϊκό (δεξιά) παράχθηκαν από την επεξεργασία των εικόνων που λήφθηκαν από το ΣμηΕΑ

Η επεξεργασία των σημειακών δεδομένων που προέκυψαν από τις διάφορες σαρώσεις με την χρήση του επίγειου συστήματος LiDAR αποτέλεσε μια πιο σύνθετη διαδικασία. Σε πρώτη φάση, από τα νέφη σημείων που προέκυψαν από τις διάφορες σαρώσεις επιλέχθηκαν εκείνα που θεωρήθηκαν πιο αντιπροσωπευτικά της περιοχής της κατολίσθησης. Με σκοπό τη δημιουργία ενός ενιαίου νέφους σημείων που να περιέχει την πληροφορία που αφορά την περιοχή, κρίθηκε απαραίτητη η συνένωση των νεφών σημείων που προέκυψαν από τις διάφορες σαρώσεις.

Για τον λόγο αυτό, σε περιβάλλον λογισμικού επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων (CloudCompare 2.10.2), μεταξύ των επιμέρους νεφών αναγνωρίσθηκαν κοινές περιοχές που αντιστοιχούν σε ομόλογα σημεία, με βάση τις οποίες έγινε η ενοποίηση. Επομένως, αξιοποιήθηκαν οι επικαλυπτόμενες επιφάνειες των νεφών σημείων ώστε να επιτευχθεί η ένωσή τους. Η διαδικασία αυτή της έγινε με μη αυτοματοποιημένο τρόπο, καθώς η αναγνώριση των κοινών περιοχών πραγματοποιήθηκε μέσω οπτικής ερμηνείας και η τελική συνένωση, χειροκίνητα. Σε επόμενο στάδιο, μέσω της χρήσης του ίδιου λογισμικού, χρησιμοποιήθηκε το ενιαίο νέφος σημείων για την παραγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (DSM).

Συνοψίζοντας, από την επεξεργασία των σημειακών δεδομένων που λήφθηκαν από το σύστημα LiDAR παράχθηκαν τα εξής προϊόντα:

- Νέφος σημείων (point-cloud), που προέκυψε από την συνένωση των νεφών από τις πολλαπλές σαρώσεις
- Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας (DSM), το οποίο δημιουργήθηκε με βάση το ενιαίο νέφος σημείων



Εικόνα 6.4 Νέφος σημείων που δημιουργήθηκε από την ένωση επιμέρους νεφών που προέκυψαν από τις διάφορες σαρώσεις του συστήματος LiDAR.

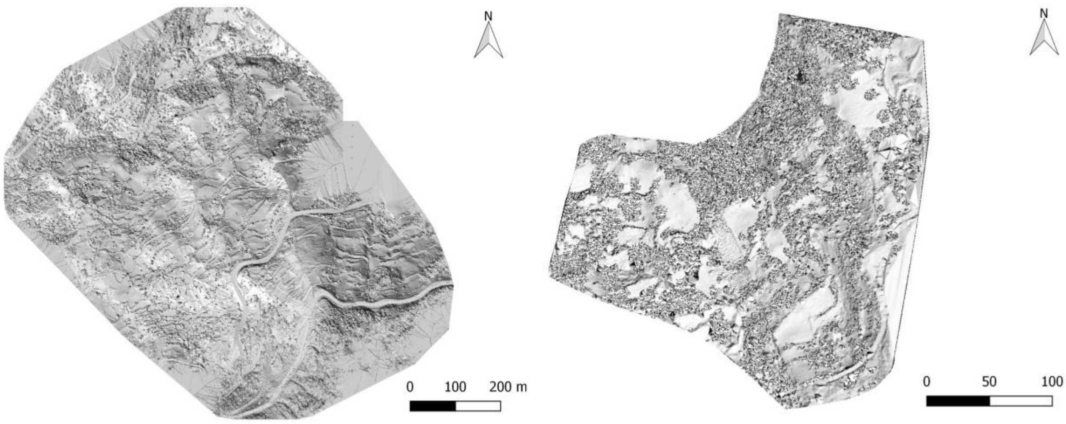
6.3 Αποτύπωση κατολισθήσεων

Σε αυτό το στάδιο, τα δύο ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας (DSMs) που δημιουργήθηκαν κατά την επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω επεξεργασία. Συγκεκριμένα, κάθε ένα από τα DSMs εισήχθη σε περιβάλλον GIS (Geographic Information Systems-Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών) με σκοπό την δημιουργία δύο αρχείων εικόνων σκιασμένου αναγλύφου (hillshade rasters). Η σκίαση του αναγλύφου (hilshading) γίνεται με βάση τον καθορισμό της θέσης μιας φωτεινής πηγής, όπως ο ήλιος. Για τον υπολογισμό του σκιασμένου αναγλύφου λήφθηκε υπόψη η θέση του ήλιου κατά την λήψη των δεδομένων, με αζιμούθιο (θέση) *220°* και γωνία (ύψος) *40°*.

Η σκίαση του αναγλύφου βασίζεται στην επίδραση του φυσικού φωτισμού στην γήινη επιφάνεια με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ρεαλιστική αναπαράσταση του αναγλύφου, γεγονός που διευκολύνει την αναγνώριση και, επομένως, και την χαρτογράφηση των κατολισθήσεων. Για τον λόγο αυτό, τα αρχεία σκιασμένου αναγλύφου δημιουργήθηκαν με σκοπό την ανίχνευση και αποτύπωση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών τυπικών κατολισθήσεων σε περιβάλλον GIS.

Στην περίπτωση αυτή, που χρησιμοποιήθηκαν τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας, στα αρχεία που δημιουργήθηκαν απεικονίζεται η μορφολογία όσο και τα αντικείμενα που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του εδάφους (βλάστηση, κτίρια κ.α.).

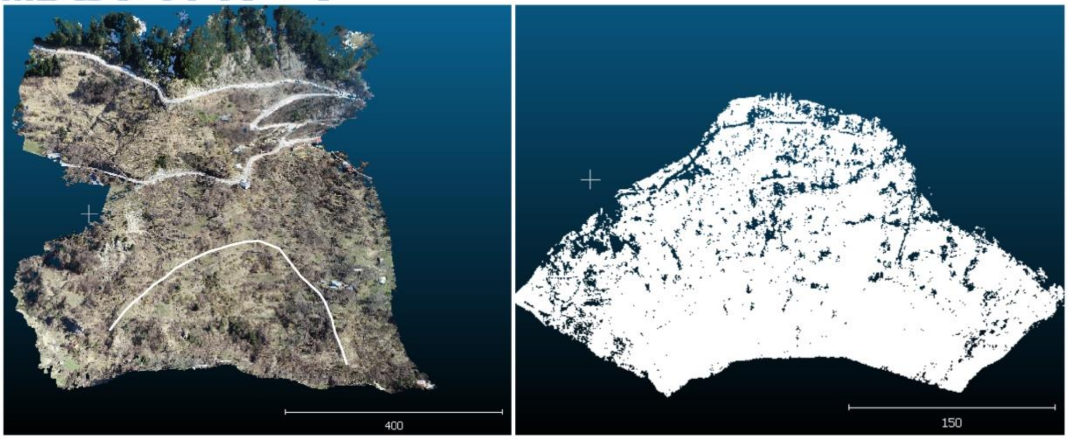
Όπως διακρίνεται στους χάρτες σκιασμένου αναγλύφου (Σχήμα 6.1) που δημιουργήθηκαν από την επεξεργασία των δεδομένων του ΣμηΕΑ και των δεδομένων LiDAR οι απεικονιζόμενες περιοχές διαφέρουν αρκετά. Οι διαφορές αυτές, που αντικατοπτρίζονται στα αποτελέσματα, είναι, ουσιαστικά, απόρροια των διαφορών μεταξύ των δύο μεθόδων-εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν και είναι εμφανείς σε όλα τα βήματα της ερευνητικής διαδικασίας από την συλλογή των δεδομένων έως και τη διεργασία της αποτύπωσης.



Σχήμα 6.1 Χάρτες σκιασμένου αναγλύφου που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων του ΣμηΕΑ (αριστερά) και των δεδομένων που αποκτήθηκαν με την τεχνολογία LiDAR (δεξιά).

Τα χαρακτηριστικά αυτά των δύο μεθόδων στα οποία οφείλεται και η διαφορά στα τελικά παράγωγα, όπως συμπεραίνονται από την συγκεκριμένη έρευνα, συνοψίζονται παρακάτω.

Στα δεδομένα που ελήφθησαν από τον επίγειο σαρωτή LiDAR ήταν εμφανές το φαινόμενο της έμφραξης, που εκφράζεται με την ύπαρξη σκιών-κενών στο νέφος σημείων. Συγκρίνοντας τα δύο νέφη σημείων γίνεται αντιληπτό ότι τα δεδομένα δεν καλύπτουν την ίδια ακριβώς περιοχή, με το νέφος σημείων από τα δεδομένα LiDAR να αποτελεί ένα τμήμα μόνο του νέφους σημείων που δημιουργήθηκε από τα δεδομένα του ΣμηΕΑ (Εικόνα 6.5).



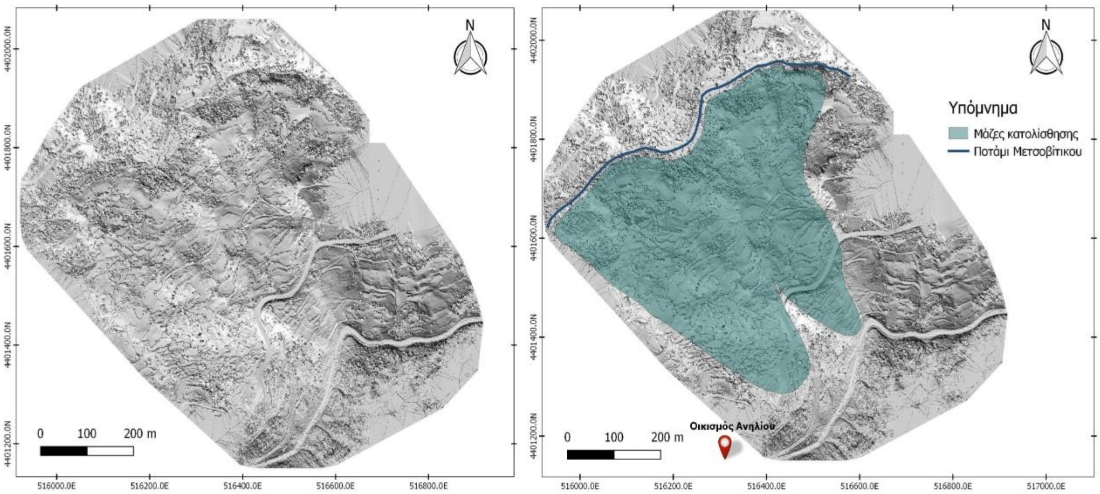
Εικόνα 6.5 Τα δύο νέφη σημείων που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα του ΣμηΕΑ (αριστερά) και από αυτά του συστήματος LiDAR (δεξιά). Η άσπρη γραμμή στο αριστερό σχήμα οριοθετεί το τμήμα εκείνο που αποτελεί το νέφος σημείων από τα δεδομένα LiDAR.

Η επεξεργασία των φωτογραφιών που αποκτήθηκαν κατά τη πτήση του αεροσκάφους έγινε με αυτοματοποιημένο τρόπο, ενώ αυτή των δεδομένων LiDAR έγινε κυρίως χειροκίνητα με αποτέλεσμα η δεύτερη να είναι πιο χρονοβόρα και να εισάγει μεγαλύτερα σφάλματα καθώς εξαρτάται από την εμπειρία και την αντικειμενικότητα του ερευνητή.

Τα δύο νέφη σημείων χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Το γεγονός αυτό επηρεάζει και τα ακόλουθα παράγωγα (DEM, hillshade) και, επομένως και την αποτύπωση των χαρακτηριστικών της κατολίσθησης.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις καθιστούν τις δύο περιπτώσεις μη συγκρίσιμες. Το αρχείο σκιασμένου αναγλύφου από τα δεδομένα του ΣμηΕΑ θεωρήθηκε πληρέστερο, καθώς αφορά όλη την περιοχή ενδιαφέροντος και επομένως, επιλέχθηκε για την αποτύπωση των κατολισθήσεων.

Συγκεκριμένα, μέσω οπτική έρευνας, αναζητήθηκαν τα γεωμορφορφολογικά χαρακτηριστικά των περιστροφικών ολισθήσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός χάρτης σκιασμένου αναγλύφου που απεικονίζει τα όρια της κατολίσθησης (Σχήμα 6.2). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, στην περιοχή της κατολίσθησης αναγνωρίστηκαν δύο κύριες μάζες της κατολίσθησης. Ειδικότερα, με τη σκίαση του αναγλύφου κατέστη δυνατή η παρατήρηση και επομένως και η οριοθέτηση της κατολίσθησης. Με δεδομένο ότι η περιοχή ότι δεν πρόκειται για πρόσφατες κατολισθήσεις ώστε να έχουν γυμνές, τραχείες επιφάνειες και η περιοχή καλύπτεται από βλάστηση, η θέση της κύριας κατακρήμνισης έγινε με μορφολογικά κριτήρια.



Σχήμα 6.2 Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου που προέκυψε από επεξεργασία των δεδομένων του ΣμηΕΑ (αριστερά) και χάρτης σκιασμένου αναγλύφου όπου απεικονίζονται οι δύο μάζες της κατολίσθησης (δεξιά)

Συμπερασματικά, από την παραπάνω διαδικασία γίνεται αντιληπτό ότι και τα δύο εργαλεία προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων, εξοικονομώντας χρόνο σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους απόκτησης δεδομένων. Βέβαια, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, όπως στην περίπτωση αυτή, με το φαινόμενο της έμφραξης στα δεδομένα που ελήφθησαν με το σύστημα σάρωσης LiDAR.

7. ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η έρευνα κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή του οικισμού του Ανηλίου, μετά από αξιολόγηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν με συμβατικές μεθόδους και εργασία υπαίθρου αλλά και με σύγχρονες τεχνικές Τηλεπισκόπησης. Σκοπός της έρευνας ήταν η εκτίμηση του μηχανισμού αστοχίας και η οριοθέτηση της κατολίσθησης.

Η υπό μελέτη κατολίσθηση εντοπίζεται στην περιοχή του Ανηλίου, στις πλαγιές της Βόρειας Πίνδου σε ένα σύνθετο περιβάλλον πολλαπλών λεπιώσεων του φλύσχη της ζώνης Ωλονού-Πίνδου. Λόγω της έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης που έχουν δεχθεί οι φλυσχικοί σχηματισμοί κατά τη γεωλογική τους ιστορία, που εκφράζεται με εφιππεύσεις, πτυχώσεις και διατμήσεις, έχουν δημιουργηθεί ασθενείς βραχομάζες.

Για την συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών πραγματοποιήθηκε υπαίθρια εργασία κατά την οποία ερευνήθηκαν οι γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αρχικά η μορφολογία της περιοχής, που έχει τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής περιστροφικής ολίσθησης. Επίσης, στην περιοχή παρατηρήθηκε, από εμφανίσεις σχηματισμών, η επικράτηση των ιλυολιθικών μελών του φλύσχη, και η έντονη τεκτονική καταπόνηση που έχουν δεχθεί, καθώς συναντήθηκαν ισχυρά πτυχωμένοι και διατμημένοι ιλυόλιθοι με παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχη (Τύπος X) και ισχυρά διατμημένοι ερυθροί ιλυόλιθοι με χαοτική δομή (Τύπος XI), που αποτελούν πολύ πτωχής ποιότητας βραχομάζες, με την βραχομάζα Τύπου X να επικρατεί στην περιοχή. Η έντονη παρουσία της ιλυολιθικής φάσης του φλύσχη σε συνδυασμό με τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έχουν ως αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της αντοχής της βραχομάζας λόγω ανάπτυξης υποπιέσεων, μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Επίσης, η παρουσία του Μετσοβίτικου ποταμού κατάντη της κατολίσθησης, έχει ως αποτέλεσμα την εκσκαφή της βάσης της πλαγιάς λόγω της ποτάμιας διαβρωτικής δράσης. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, στην περιοχή έχει δημιουργηθεί μια κατολίσθηση μεγάλης κλίμακας που αποτελεί σύνθεση μικρότερων ολισθήσεων.

Παράλληλα με την εκτίμηση του πιθανού μηχανισμού αστοχίας και την οριοθέτηση του κατολισθητικού φαινομένου, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατολίσθησης. Επίσης δημιουργήθηκε μια σχηματική τομή της κατολίσθησης για την εκτίμηση μιας πιθανής επιφάνειας ολίσθησης. Βέβαια, για την εύρεση του βάθους απαιτείται εντοπισμένη υπεδαφική έρευνα. Με δεδομένο ότι δεν υπήρχε πρόσβαση σε τέτοιου είδους δεδομένα, η εργασία εστιάζει στην αποτύπωση της κατολίσθησης.

Τέλος, παράλληλα με την επιτόπου παρατήρηση, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους (ΣμηΕΑ) και ένα επίγειο σύστημα σάρωσης LiDAR για την συλλογή δεδομένων. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων, προέκυψαν δύο αρχεία σκιασμένου αναγλύφου και επιλέχθηκε αυτό που προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων του ΣμηΕΑ για την αποτύπωση της κατολίσθησης. Η αποτύπωση δεν ήταν δυνατή και στις δύο περιπτώσεις καθώς τα δύο νέφη σημείων δεν απεικόνιζαν την ίδια έκταση της περιοχής. Συγκεκριμένα, στο νέφος σημείων που προέκυψε από τα σημειακά δεδομένα LiDAR ήταν εμφανές το φαινόμενο της έμφραξης λόγω της πυκνής βλάστησης και ύπαρξης δέντρων στην περιοχή, που εκφράζεται με την ύπαρξη σκιών-κενών, δηλαδή έλλειψη σημειακών δεδομένων. Συμπεραίνεται ότι και τα δύο εργαλεία προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων καθώς διευκολύνουν την απόκτηση δεδομένων εξοικονομώντας χρόνο και προσφέροντας μια άλλη οπτική των φαινομένων αυτών, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, αλλά εμφανίζουν ορισμένους περιορισμούς. Για τον λόγο αυτό, η υπαίθρια εργασία και παρατήρηση δεν αντικαθιστάται και κρίνεται απαραίτητη για την σύγκριση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Giordan D., Manconi A., Tannant D.D., Allasia P., (2015). UAV: low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides in IEEE international geoscience and remote sensing symposium proceedings. *In: Proceeding of Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*; Jul 26–31; Milan (Italy).

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), pages 5-28,* March.

Jaboyedoff M., Abellán A., Carrea D., Derron M. H., Matasci B. and Michoud C., (2018). Mapping and Monitoring of Landslides Using LIDAR. *In book: Natural Hazards: Earthquakes, Volcanoes, and Landslides.*

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, 38(1), 97–116.*

Marinos, P.G., and Hoek, E., (2006). The construction of the Egnatia Highway through unstable slopes in northern Greece. *In Proceedings of the XI Conference on Rock Mechanics.*

Marinos V.P., Aggistalis G., Kazilis N., (2004). Engineering Geological Considerations in Tunnelling through Major Tectonic Thrust Zones - Cases along the Egnatia Motorway, Northern Greece. In: Hack R., Azzam R., Charlier R. (eds) *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Lecture Notes in Earth Sciences, vol 104*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Micheletti, N., Chandler, J.H. and Lane, S.N., (2015). Structure from motion (SFM) photogrammetry. IN: Clarke, L.E. and Nield, J.M. (Eds.) *Geomorphological Techniques. London: British Society for Geomorphology. ISSN: 2047-0371, Chap. 2, Sec. 2.2.*

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

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.*

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.

UNESCO-WP/WLI,. (1994). A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 71-74.*

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.

Ελληνική βιβλιογραφία

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

Μαρίνος Β., (2010). Το νέο, αναθεωρημένο, σύστημα γεωτεχνικής ταξινόμησης GSI για ετερογενείς σχηματισμούς, όπως ο φλύσχης. *6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕ*Ε, 29/09-1/10, Βόλος.

Μουντράκης Δ.Μ., (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, University Studio Press.

Μουρτζάς Ν., Σωτηρόπουλος Η., (1999). Σήραγγα Ανηλίου- Γεωλογική δομή- Σχεδιασμός-Ανάλυση. *Διημερίδα: Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού*.

Χατζηθεοδοσίου Θ., 2018. «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση για την ανάλυση ευστάθειας κατολίσθησης στο Ανήλιο Ιωαννίνων», *Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης*

Διαδικτυακές πηγές

Γεωδυναμικό Ινστιτούτο- *http://www.gein.noa.gr/el/*

Μετεωρολογικός σταθμός Μετσόβου- *http://penteli.meteo.gr/stations/metsovo/*

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας - *http://portal.tee.gr*