



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Σ. ΑΓΡΑΦΙΩΤΗΣ

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗ: ΠΥΡΡΑ ΤΡΙΚΑΛΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2024



[λευκή σελίδα]



ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Σ. ΑΓΡΑΦΙΩΤΗΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 6155

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗ: ΠΥΡΡΑ ΤΡΙΚΑΛΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Τεκτονικής, Ιστορικής και Εφαρμοσμένης
Γεωλογίας

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Επιβλέπων

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

(Αναπληρωτής Καθηγητής)



©Αθανάσιος Σ. Αγραφιώτης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Τεκτονικής, Ιστορικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗ: ΠΥΡΡΑ ΤΡΙΚΑΛΩΝ – *Διπλωματική Εργασία*

©Athanasios S. Agrafiotis, School of Geology, Dept. of Structural, Historical & Applied Geology, 2024

All rights reserved.

MONITORING THE EVOLUTION OF LANDSLIDE PHENOMENA USING NEW TECHNOLOGIES LOCATION: PYRRA TRIKALA – *Bachelor Thesis*

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

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



Αφιερώνω την διπλωματική αυτή εργασία στην οικογένειά μου..



Ευχαριστίες

Με μεγάλη χαρά και ανακούφιση ολοκλήρωσα τη διπλωματική μου εργασία και θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν σε αυτή την διαδρομή. Αρχικά, θα ήθελα να τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Παπαθανασίου Γεώργιο, ο οποίος με καθοδήγησε χάρη στις πολύτιμες οδηγίες του αλλά και τον Δρ. Βαλκανιώτη Σωτήριο για τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, την κοπέλα μου και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξη και πίστη τους καθώς με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε πρόκληση.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τον Σεπτέμβριο του 2023 η κακοκαιρία Daniel έπληξε τον Ελληνικό χώρο με μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις για αρκετές ημέρες. Η περιοχή της Θεσσαλίας ήταν η περιοχή με τις περισσότερες και μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές όπως κατολισθήσεις και πλημμύρες. Πιο συγκεκριμένα στο χωριό Πύρρα Τρικάλων εκδηλώθηκε μία μεγάλη σε έκταση κατολίσθηση εξαιτίας των τεράστιων όγκου βροχόπτωσης στη περιοχή. Χρησιμοποιώντας νέες μεθόδους αποτύπωσης, μη επανδρωμένο αερόχημα (UAV), η κατολίσθηση αποτυπώθηκε δύο φορές από τον Οκτώβριο του 2023 μέχρι τον Ιούνιο του 2024. Σκοπός της αποτύπωσης είναι η παρακολούθηση του φαινομένου με την πάροδο του χρόνου. Με τη χρήση του λογισμικού CloudCompare πραγματοποιήθηκε αυτή η παρακολούθηση αποτυπώνοντας σε τρισδιάστατα μοντέλα την ποσότητα υλικού που μετακινήθηκε εξαιτίας του φαινομένου της κατολίσθησης.

Λέξεις κλειδιά

Κατολίσθηση, Daniel, UAV, αποτύπωση, παρακολούθηση

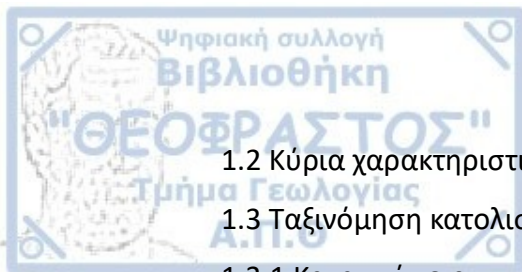


In September 2023, the severe weather event known as Daniel impacted Greece, particularly causing intense rainfall over several days. The region of Thessaly experienced the most significant natural disasters, including landslides and floods. Notably, in the village of Pyrra in Trikala, a large-scale landslide occurred due to the excessive rainfall. To monitor this phenomenon over time, advanced methods were employed, including the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The landslide was documented twice between October 2023 and June 2024. The aim of this monitoring was to observe changes in the landscape resulting from the landslide. Using CloudCompare software, three-dimensional models were created to quantify the volume of material displaced by the landslide.

Keywords: Landslide, Daniel, UAV, documentation, monitoring.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
Κεφάλαιο 1: Κατολισθητικά φαινόμενα.....	9
1.1 Ορισμός κατολίσθησης	9

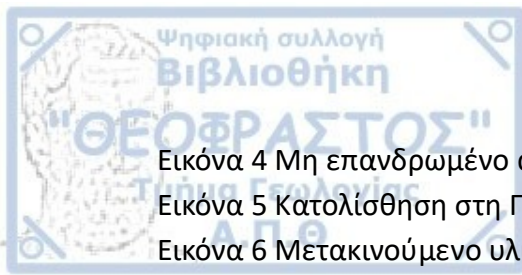


1.2 Κύρια χαρακτηριστικά.....	9
1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων	11
1.3.1 Καταπτώσεις.....	12
1.3.2 Ανατροπές	12
1.3.3 Ολίσθηση.....	13
1.3.4 Ροές	15
1.3.5 Ερπυσμός.....	15
1.3.6 Πλευρικές εξαπλώσεις	16
1.3.7 Σύνθετες μετακινήσεις.....	17
1.4 Ενεργότητα κατολισθήσεων.....	17
1.4.1 Καθεστώς ενεργότητας	17
1.4.2 Κατανομή ενεργότητας	17
1.4.3 Τύπος ενεργότητας	18
1.5 Ταχύτητα μετακίνησης.....	18
1.6 Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων	19
Κεφάλαιο 2: Φυσικά φράγματα από κατολισθήσεις	25
2.1 Γεωμορφολογικές συνθήκες φυσικών φραγμάτων	25
2.2 Αιτίες δημιουργίας	25
2.3 Ταξινόμηση φυσικών φραγμάτων	25
2.4 Παραδείγματα φυσικών φραγμάτων	27
Κεφάλαιο 3: Αποτύπωση με νέες μεθόδους.....	28
3.1 Εισαγωγή	28
3.2 Χρήση Αεροφωτογραφιών / Δορυφορικών εικόνων	29
3.3 Επίγειοι σαρωτές LiDAR	30
3.4 Μη επανδρωμένα αεροχήματα UAV	31
Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση μεθοδολογίας φωτογραμμετρίας	33
4.1 Ορισμός	33
4.2 Ιστορικά στοιχεία.....	33
4.3 Διαδικασία φωτογραμμετρίας	34
4.4 Στερεοσκοπία στη φωτογραμμετρία	35
4.5 Προϊόντα	35
4.6 Φωτογραμμετρική επεξεργασία / Μέθοδος Structure from Motion (SfM).	36

Κεφάλαιο 5: Περιοχή Έρευνας.....	37
Κεφάλαιο 6: Αστοχίες προκαλούμενες από την κακοκαιρία Daniel.....	38
6.1 Χαρακτηριστικά του φαινομένου	38
6.2 Κατολισθήσεις στην περιοχή έρευνας.....	39
6.3 Γεωμετρικά στοιχεία της κατολίσθησης και του φράγματος.....	41
Κεφάλαιο 7: Γεωλογία, Υδρογεωλογία και κλιματικά στοιχεία.....	41
7.1 Γεωλογία.....	41
7.1.1 Αλπικοί σχηματισμοί.....	43
7.1.2 Μεταλπικοί σχηματισμοί	49
7.2 Γεωλογία περιοχής κατολίσθησης.....	50
7.3 Υδρογεωλογία.....	53
7.4 Κλιματικά στοιχεία.....	54
Κεφάλαιο 8: Αποτύπωση κατολίσθησης με UAV	55
8.1 Επεξεργασία με το λογισμικό Agisoft Metashape Professional.....	56
Κεφάλαιο 9: Ανίχνευση αλλαγών	58
9.1 Στόχος	58
9.2 Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων μέσω του λογισμικού CloudCompare	59
9.3 Μεθοδολογία	60
9.4 Αποτελέσματα C2C και M3C2	64
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	68
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	69

Πίνακας εικόνων

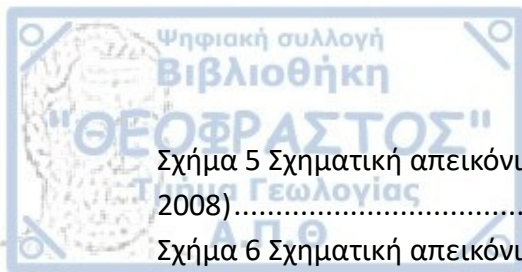
Εικόνα 1 Στη φωτογραφία φαίνεται με πράσινη γραμμή το απότομο βύθισμα και με βελάκια σημειώνεται η κατεύθυνση κίνησης της μάζας (Michael J. Crozier, 2006)	16
Εικόνα 2 Το φυσικό φράγμα Usoi όπως είναι σήμερα (Φωτογραφία από Martin Mergili , The World in Images, 2011)	28
Εικόνα 3 Ένας επίγειος σαρωτής LiDAR (Török et al. 2016;Kordić et al. 2019).....	31



Εικόνα 4 Μη επανδρωμένο αερόχημα DJI Inspire (British Geological Survey)	32
Εικόνα 5 Κατολίσθηση στη Πύρρα Τρικάλων (Φωτογραφία Σ. Βαλκανιώτης 2023) .	38
Εικόνα 6 Μετακινούμενο υλικό το οποίο δημιούργησε φυσικό φράγμα (Φωτογραφία Σ. Βαλκανιώτης 2023).....	40
Εικόνα 7 Η λίμνη που σχηματίστηκε στη περιοχή (Φωτογραφία Σ. Βαλκανιώτης 2023).....	40
Εικόνα 8 Ενδεικτικά το μήκος, το πλάτος και οι κατακρημνίσεις της κατολίσθησης στη περιοχή μελέτης.....	41
Εικόνα 9 Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη περιοχής μελέτης «Φύλλο Καστανέα»	52
Εικόνα 10 Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη περιοχής μελέτης «Φύλλο Καστανέα»	53
Εικόνα 11 Περιβάλλον λογισμικού Agisoft Metashape Professional.....	57
Εικόνα 12 Περιβάλλον λογισμικού CloudCompare	59
Εικόνα 13 Διαδικασία ανοίγματος δεδομένων.....	60
Εικόνα 14 Χαρακτηριστικά του νέφους σημείων	60
Εικόνα 15 Επεξεργασία συντεταγμένων των σημείων	61
Εικόνα 16 Διαδικασία αποκοπής σημείων από το νέφος	61
Εικόνα 17 Παράθυρο ελαχιστοποίησης σημείων.....	62
Εικόνα 18 Παράθυρο ταύτισης των δύο νεφών	62
Εικόνα 19 Παράθυρο επιλογής συγκρινόμενου και αναφερόμενου νέφους με τη μέθοδο C2C.....	63
Εικόνα 20 Παράθυρο επιλογής παραμέτρων με την μέθοδο M3C2	63
Εικόνα 21 1η σύγκριση με τη μέθοδο C2C. Με άσπρο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις σε μέτρα (22/09/16 – 03/10/23)	64
Εικόνα 22 2η σύγκριση με τη μέθοδο C2C. Με άσπρο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις σε μέτρα (03/10/23 – 21/06/24)	64
Εικόνα 23 1η σύγκριση με τη μέθοδο M3C2. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις ενώ με μπλε η συσσώρευση (22/09/16 – 3/10/23)	65
Εικόνα 24 2η σύγκριση με τη μέθοδο M3C2. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις, ενώ με μπλε η συσσώρευση υλικού(3/10/23 – 21/06/24).....	65

Πίνακας Σχημάτων

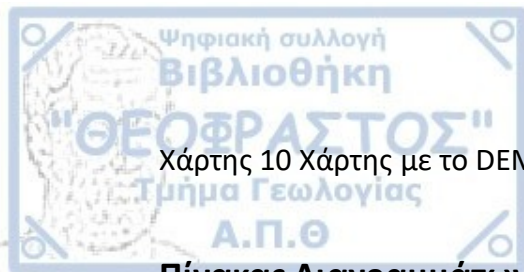
Σχήμα 1 Κύρια χαρακτηριστικά μιας κατολίσθησης [Από Παπαθανασίου (2022) τροποποιημένο από Highland & Bobrowsky (2008)].....	11
Σχήμα 2 Σχηματική απεικόνιση μίας κατάπτωσης βράχου (Highland και Bobrowsky 2008).....	12
Σχήμα 3 Απεικόνιση μίας ανατροπής loess (a), παρόμοια αστοχία (b), σχηματική αναπαράσταση της αστοχίας της εικόνας (a) (Li, Yanrong 2019).....	13
Σχήμα 4 Σχηματική απεικόνιση μίας περιστροφικής ολίσθησης (Highland & Bobrowsky, 2008).....	14



Σχήμα 5 Σχηματική απεικόνιση μίας μεταθετικής ολίσθησης (Highland & Bobrowsky, 2008).....	14
Σχήμα 6 Σχηματική απεικόνιση ροής κορημάτων (Highland & Bobrowsky, 2008)	15
Σχήμα 7 Σχηματική απεικόνιση ερπυσμού (Lyons, Sue & Ross, Robert 2015).....	16
Σχήμα 8 Σχηματική απεικόνιση των αιτιών που οδηγούν σε κατολίσθηση. Μείωση διατμητικής αντοχής (1) Αποσάθρωση, (2) Υπόγειο νερό και πίεση των πόρων, (2.1) Βροχόπτωση/Λιώσιμο του χιονιού, (2.2) σωλήνες/ δίκτυο σωλήνων, (2.3) ρωγμές (ευνοούν την εισροή νερού), (2.4) γέμισμα ταμιευτήρα στη βάση, (3) απομάκρυνση βλάστησης Αύξηση διατμητικής τάσης (4) αποσυμπίεση στη βάση, (4.1) αφαίρεση υλικού (εξαιτίας του ποταμού ή τεχνητά), (4.2) άδειασμα ταμιευτήρα/λιώσιμο πάγων (5) φόρτιση (φυσική ή τεχνική), (6) παροδική φόρτιση (Lacroix, P et al. 2020)	24
Σχήμα 9 Οι 5 τύποι φυσικών φραγμάτων τα οποία χωρίζονται με βάση τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους. (Fan et al. 2017)	26
Σχήμα 10 Οι τρεις υποκατηγορίες των φυσικών φραγμάτων οι οποίες σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που αποτίθενται (Fan et al. 2017)	27
Σχήμα 11 Απεικόνιση αρχής της σάρωσης με σαρωτή LiDAR (Jaboyedoff, M. et al 2012).....	30
Σχήμα 12 Βασική αρχή της φωτογραμμετρίας (van Riel, Sjoerd 2016)	35
Σχήμα 13 Χωρική κατανομή των ημερησίων βροχοπτώσεων (Dimitriou et al 2024)	39
Σχήμα 14 Λιθοστρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης (Μουντράκης 2020)	45
Σχήμα 15 Λιθοστρωματογραφική στήλη ζώνης Ωλονού - Πίνδου (Μουντράκης 2020)	48

Πίνακας Χαρτών

Χάρτης 1 Ο διαχωρισμός των δήμων και των κοινοτήτων της Περιφερειακής Ενότητας Τρικάλων (Μπαθρέλλου 2005)	37
Χάρτης 2 Χάρτης με κατολισθήσεις στην περιοχή των Τρικάλων	39
Χάρτης 3 Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος (Μουντράκης 2020)	42
Χάρτης 4 Οι ζώνες που εντοπίζονται στην Περιφερειακή Ενότητα Τρικάλων (Μπαθρέλλος 2008)	43
Χάρτης 5 Η Μεσοελληνική Αύλακα στον Ελληνικό χώρο (1) Σειρά Κρανιάς, (2) Σειρά Επταχωρίου, (3) Σειρά Πενταλόφου – Μετεώρων, (4) Σειρά Τσοτυλίου, (5) Σειρά Όντρια (Μουντράκης 2020).....	50
Χάρτης 6 Γεωλογικός χάρτης περιοχής σε κλίμακα 1:50.000 «Φύλλο Καστανέα». Μέσα στο άσπρο πλαίσιο η θέση της κατολίσθησης στη Πύρρα Τρικάλων.....	51
Χάρτης 7 Αχελώος ποταμός (Efstratiadis et al 2014 χάρτης από Α. Κουκουνίνος)....	54
Χάρτης 8 Χάρτης αποτύπωσης της κατολίσθησης	56
Χάρτης 9 Ορθοφωτοχάρτης της κατολίσθησης	58



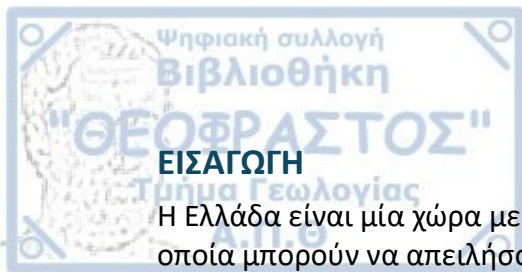
Χάρτης 10 Χάρτης με το DEM της κατολίσθησης	58
---	----

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Γραφική απεικόνιση μείωσης του συντελεστή ασφάλειας με το πέρασμα του χρόνου (Κούκης & Σαμπατακάκης 2007)	20
Διάγραμμα 2 Οι 4 φάσεις της φωτογραμμετρίας (Schenk, T. 2005)	34

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1 Ρυθμός μετακίνησης των κατολισθήσεων (Παπαθανασίου, Γ 2022)	18
Πίνακας 2 Πιθανές βλάβες σε συνάρτηση της ταχύτητας μετακίνησης (Παπαθανασίου, Γ 2022)	19
Πίνακας 3 Οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων (Κούκης & Σαμπατακάκης 2022)	22
Πίνακας 4 Μέση εποχιακή και ετήσια ύψη βροχόπτωσης σε χιλιοστά (mm) κατά τη διάρκεια 1973 – 2003 (Μπαθρέλλου 2005)	55
Πίνακας 5 Πορεία μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας της περιοχής των Τρικάλων (Μπαθρέλλου 2005)	55



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα είναι μία χώρα με πολλά καταγεγραμμένα κατολισθητικά φαινόμενα τα οποία μπορούν να απειλήσουν υποδομές και πολύ χειρότερα ακόμη και ανθρώπινες ζωές. Για αυτό το λόγο η ανάλυση ενός φαινομένου και η σχεδίαση μέτρων προστασίας είναι σημαντική. Εξαιτίας της γεωμορφολογίας της η Ελλάδα διαθέτει περιοχές οι οποίες είναι δύσβατες και η χαρτογράφηση της θεωρείται δύσκολή. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες ξεπερνάει αυτό το εμπόδιο διαθέτοντας σύγχρονες μεθόδους αποτύπωσης και παρακολούθησης των κατολισθητικών φαινομένων. Με τη χρήση σαρωτών LiDAR είτε με τη χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων (UAV) η αποτύπωση πραγματοποιείται από απόσταση. Στη συνέχεια με τη μέθοδο Structure from Motion (SfM) παράγονται τρισδιάστατα μοντέλα εδάφους και ορθοφωτοχάρτες με σκοπό την αποτύπωση και την παρακολούθηση μελλοντικών μετατοπίσεων των κατολισθητικών φαινομένων.

Κεφάλαιο 1: Κατολίσθητικά φαινόμενα

1.1 Ορισμός κατολίσθησης

Ο όρος κατολίσθηση αναφέρεται στην πτώση, ανατροπή ή και ροή υλικού από την υψηλότερη θέση προς την χαμηλότερη. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό είναι ικανό να λάβει χώρα ακόμη και μέσα σε θάλασσες ή λίμνες. Γενικά, κατολίσθηση είναι κάθε αλλαγή της επιφάνειας μιας κλιτύος, συνοδευόμενη από μετακίνηση υλικού η οποία προέρχεται από τις δυνάμεις της βαρύτητας.

Αρκετοί ερευνητές απέδωσαν τον όρο κατολίσθηση με τους επικρατέστερους μέχρι και σήμερα να αναφέρονται παρακάτω:

Ο Terzaghi (1950) όρισε ως κατολίσθηση μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρानού, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω.

Οι Zagumba και Mencl (1969) θεώρησαν ως κατολίσθηση μια γρήγορη κίνηση πετρωμάτων που οφείλεται στην ολίσθηση ενός τμήματος πρानού που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μια καλά καθορισμένη επιφάνεια.

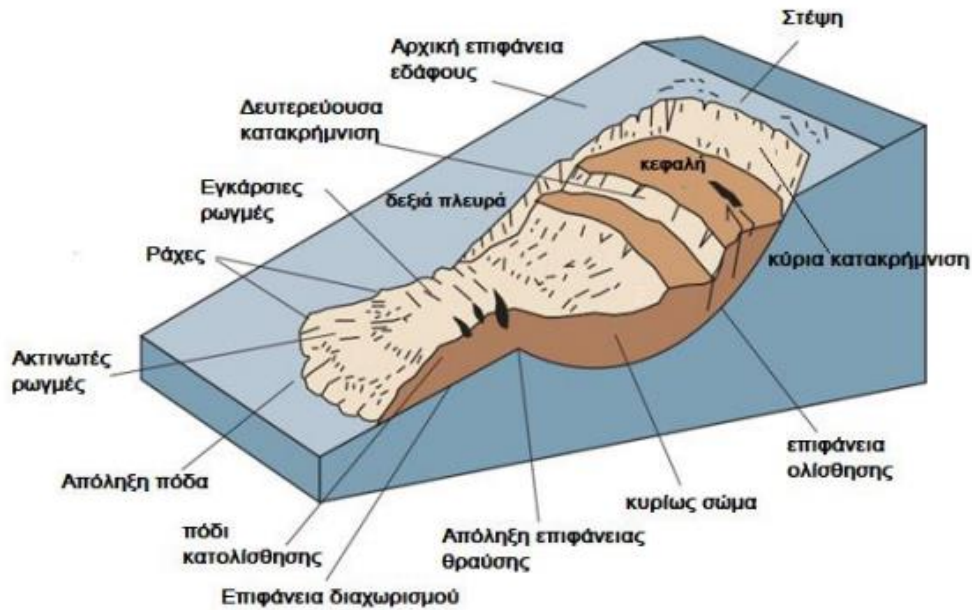
Ο Varnes (1978) απέδωσε τον όρο μετακίνηση μαζών αντί του όρου κατολίσθηση συμπεριλαμβάνοντας κάθε μετακίνηση τμήματος πρानού η οποία οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό, ενώ δεν περιλαμβάνονται στις κατολισθήσεις φαινόμενα όπως οι καθιζήσεις, οι χιονοστιβάδες και οι μετακινήσεις πάγου.

1.2 Κύρια χαρακτηριστικά

Ο Varnes (1978) προχώρησε στη διάκριση των επιμέρους τμημάτων μιας περιστροφικής κατολίσθησης. Μερικά χρόνια αργότερα η Διεθνής Ένωση Τεχνικής Γεωλογίας (1990) δημιουργώντας Ειδική Επιτροπή για τα κατολίσθητικά φαινόμενα πρότεινε μια περισσότερο λεπτομερή ονοματολογία η οποία αφορά όλες τις κατολισθήσεις και όχι μόνο τις περιστροφικές. Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας κατολίσθησης είναι:

- **Στέψη:** Ονομάζεται το τμήμα του εδάφους το οποίο δεν συμμετέχει στην κατολίσθηση και βρίσκεται πάνω από την κύρια κατακρήμνιση.
- **Κύρια κατακρήμνιση:** Η απότομη επιφάνεια του αδιατάρακτου εδάφους το οποίο σχηματίζεται από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας και περιβάλλει την κατολίσθηση.
- **Δευτερεύουσα κατακρήμνιση:** Αποτελείται από απότομες επιφάνειες εντός του διαταραγμένου υλικού εξαιτίας διαφορικών κινήσεων.
- **Κεφαλή:** Αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα των μετακινούμενων υλικών και βρίσκεται στην κορυφή της κατολίσθησης.
- **Κορυφή:** Το υψηλότερο σημείο της ολισθαίνουσας μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.

- **Κύριο σώμα:** Θεωρείται το τμήμα της μετακινούμενης μάζας το οποίο υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης και παρατηρείται μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης και της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης.
- **Άκρο:** Αποκαλείται το σημείο της απόληξης το οποίο βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της κατολίσθησης.
- **Απόληξη:** Απέχει την μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της κατολίσθησης και οριοθετεί την μετακινούμενη μάζα.
- **Πόδι:** Ονομάζεται το μέρος της κατολίσθησης το οποίο έχει κινηθεί πέραν της απόληξης της ολισθαίνουσας επιφάνειας και υπέρκειται του φυσικού εδάφους.
- **Πλευρά:** Η αριστερή ή η δεξιά πλευρά της κατολίσθησης.
- **Επιφάνεια ολίσθησης:** Η επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η μετακίνηση υλικού που κατολισθαίνει.
- **Απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης:** Αποτελεί την τομή του χαμηλότερου σημείου της επιφάνειας ολίσθησης και της επιφάνειας του φυσικού εδάφους.
- **Επιφάνεια διαχωρισμού:** Ονομάζεται το μέρος της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους το οποίο καλύπτεται από το πόδι της κατολίσθησης.
- **Μετακινούμενη μάζα:** Είναι η μάζα η οποία έχει μετακινηθεί από την αρχική της θέση εξαιτίας της κατολίσθησης.
- **Ζώνη απομείωσης:** Φανερώνει την περιοχή στην οποία το υλικό βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια.
- **Συσσώρευση:** Είναι το μέρος της μετακινούμενης μάζας το οποίο υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
- **Ζώνη συσσώρευσης:** Είναι το μέρος όπου το μετακινούμενο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια.
- **Απομείωση:** Θεωρείται ο όγκος ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα στην κύρια κατακρήμνιση, την απομειούμενη μάζα αλλά και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
- **Απομειούμενη μάζα:** Είναι το μέρος της μάζας που μετακινείται και υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης, ενώ υπόκειται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
- **Αρχική επιφάνεια εδάφους:** Ονομάζεται η επιφάνεια του εδάφους πριν πραγματοποιηθεί η κατολίσθηση.



Σχήμα 1 Κύρια χαρακτηριστικά μιας κατολίσθησης [Από Παπαθανασίου (2022) τροποποιημένο από Highland & Bobrowsky (2008)].

Άξιο αναφοράς είναι πως το υψόμετρο της αρχικής επιφάνειας στη ζώνη απομείωσης μειώνεται, ενώ στη ζώνη συσσώρευσης συμβαίνει το αντίθετο καθώς αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή το υλικό το οποίο συσσωρεύεται στη ζώνη συσσώρευσης έχει μεγαλύτερο όγκο από το υλικό το οποίο απομειώνεται. Καθώς η μάζα ολισθαίνει το υλικό χαλαρώνει και η πυκνότητα του μειώνεται.

Επιπλέον, ο βασικός παράγοντας στην εκτίμηση του όγκου μιας κατολίσθησης είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Ακόμη η εκτίμηση του όγκου της κατολίσθησης είναι βασικό κομμάτι στον σχεδιασμό μέτρων αντιμετώπισης και αποκατάστασης της κατολίσθησης. (Κούκης & Σαμπατακάκης 2022)

1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

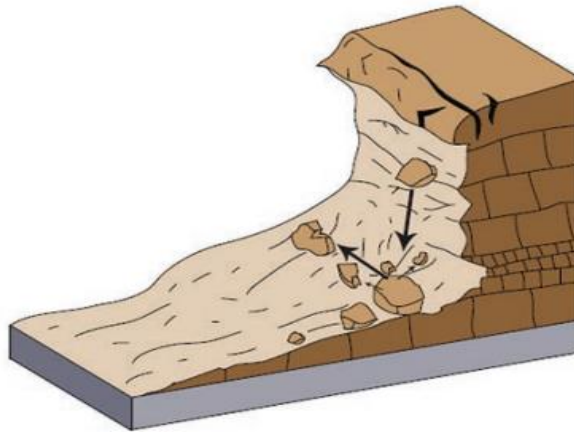
Τον περασμένο αιώνα επιστήμονες ανά τον κόσμο πρότειναν διάφορες ταξινομήσεις έχοντας ως στόχο τη διευκόλυνση της μελέτης ενός κατολισθητικού φαινομένου. Ο Sharpe (1939), ο Varnes (1958), ο Erskine (1973), οι Zaruba και Mencl (1969 και 1976) και ο Coates (1977) ήταν αυτοί που ταξινόμησαν τις κατολισθήσεις με βάση διάφορα χαρακτηριστικά. Στις μέρες μας είναι καθολικά αποδεκτή η ταξινόμηση από τους Cruden και Varnes (1996) και εφαρμόζεται από γεωεπιστήμονες και μηχανικούς οι οποίοι μελετάνε τις κατολισθήσεις.

Η ταξινόμηση αυτή χωρίζει τα κατολισθητικά φαινόμενα με βάση τον τύπο κίνησης χωρίζοντας τις κατολισθήσεις σε 5 κατηγορίες οι οποίες είναι οι πτώσεις, οι ανατροπές, οι ολισθήσεις, οι εξαπλώσεις και οι ροές. Επιπλέον διακρίνονται με βάση το υλικό που κατολισθαίνει που είτε είναι βράχος είτε είναι έδαφος. Ακόμη ο διαχωρισμός διακρίνεται με βάση την ταχύτητα κίνησης της μάζας που ολισθαίνει σε γρήγορο ή αργό. Τέλος χωρίζονται ανάλογα με το στάδιο δράσης ως ενεργές, ανενεργές, επανεργοποιημένες, υπό αναστολή και αρχαίες ή απολιθωμένες.

1.3.1 Καταπτώσεις

Κατάπτωση χαρακτηρίζεται η αποκόλληση τους εδάφους ή ενός βράχου από ένα πρανές με σημαντική κλίση κατά μήκος μιας επιφάνειας με σχεδόν μηδενική διατμητική μετατόπιση. Η κίνηση του υλικού διακρίνεται από πολύ γρήγορη έως εξαιρετικά γρήγορη ενώ η πτώση του υλικού δύναται να συμβεί ελεύθερα, με αναπήδηση ή με κύλιση.

Η κλίση του πρανούς είναι ο παράγοντας ο οποίος καθορίζει την ταχύτητα μετακίνησης αλλά και τον τρόπο μετακίνησης της μάζας που αποκόπτεται από το πρανές. Αστοχίες με ελεύθερη πτώση του υλικού πραγματοποιούνται σε πρανή με κλίση μεγαλύτερη των 76° . Σε πρανή με μικρότερες και πιο ήπιες κλίσεις εκδηλώνονται αναπήδηση του υλικού το οποίο αποκόπτεται από το πρανές ενώ σε μεγάλα πρανή με ακόμη πιο μικρή κλίση παρατηρείται κύλιση του τεμάχους. Επιπλέον, από την στιγμή όπου ένα πρανές αλλάζει συνεχώς κλίση η μετακίνηση του υλικού πραγματοποιείται από ελεύθερη πτώση σε αναπήδηση και κύλιση και αντίστροφα. (Κούκης και Σαμπατακάκης 2022).



Σχήμα 2 Σχηματική απεικόνιση μίας κατάπτωσης βράχου (Highland και Bobrowsky 2008)

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν μία από τις πιο συνηθισμένες γεωμορφολογικές διαδικασίες με μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας κυρίως στον ορεινό όγκο καθώς είναι ικανές να απειλήσουν ανθρώπινες ζωές, το οδικό δίκτυο, οικισμούς και εγκαταστάσεις.

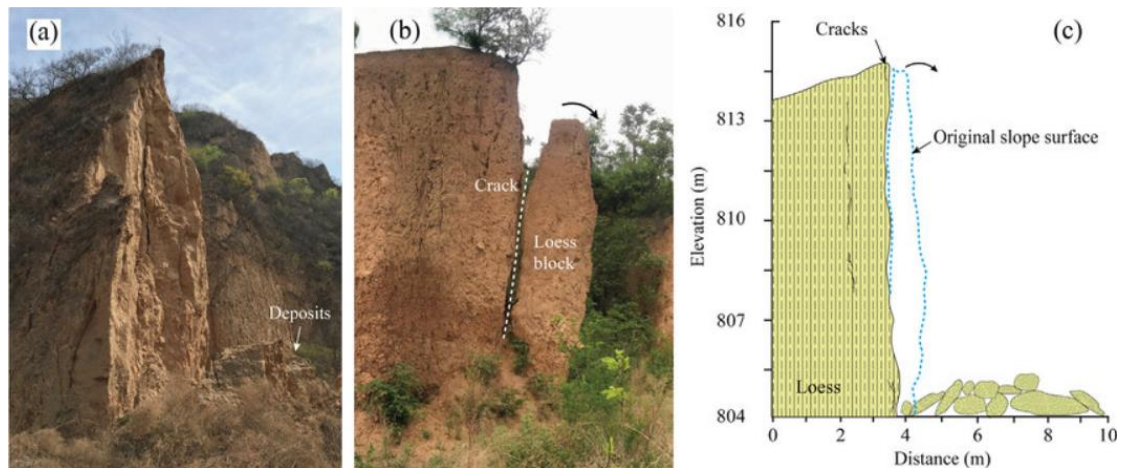
1.3.2 Ανατροπές

Ως ανατροπή χαρακτηρίζεται η περιστροφική κίνηση γύρω από έναν άξονα ενός τεμάχους με φορά προς τα έξω από το πρανές (Cruden & Varnes, 1996). Στη συνέχεια τα τεμάχη αποχωρίζονται από την υπόλοιπη μάζα πέφτοντας προς τα κατάντη του πρανούς. Η ταχύτητα κίνησης του υλικού στις ανατροπές μπορεί να είναι από εξαιρετικά αργή έως και εξαιρετικά γρήγορη ενώ μπορεί να επιταχύνεται κατά την διάρκεια εκδήλωσης του φαινομένου. Μια ανατροπή μπορεί να προκληθεί εξαιτίας των δυνάμεων βαρύτητας οι οποίες ασκούνται σε γειτονικά τεμάχη είτε από την επίδραση του νερού που γεμίζει τις ασυνέχειες.

Στις ανατροπές πραγματοποιείται ένας διαχωρισμός σε υποκατηγορίες ο οποίος τις ταξινομεί με βάση τον μηχανισμό αστοχίας σε κυρίως βραχώδεις σχηματισμούς (Hoek & Bray, 1977).

Το υλικό αστοχεί εξαιτίας ενός μοναδικού υποκατακόρυφου συστήματος ασυνεχειών και συνήθως αποκόπτεται σε κολώνες. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ανατροπή λόγω κάμψης.

Αστοχία παρόμοια με την προηγούμενη κατηγορία είναι αυτή της ανατροπής τεμαχών. Η μόνη διαφορά στην ανατροπή τεμαχών είναι πως εκτός από το υποκατακόρυφο σύστημα ασυνεχειών υπάρχει ακόμη ένα το οποίο είναι σχεδόν κάθετο στο κύριο σύστημα ασυνεχειών.



Σχήμα 3 Απεικόνιση μίας ανατροπής loess (a), παρόμοια αστοχία (b), σχηματική αναπαράσταση της αστοχίας της εικόνας (a) (Li, Yanrong 2019)

Επιπλέον, σε πρανή τα οποία έχουν μεγάλη κλίση και η δομή τους αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις κερματισμένους σχηματισμούς υπάρχει πιθανότητα να συμβεί κάμψη των πετρωμάτων κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ανατροπή τεμαχών λόγω κάμψης.

Ακόμη μία κατηγορία είναι οι δευτερογενείς ανατροπές. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται εξαιτίας υποσκαφής της βάσης του πρανούς. Υποσκαφή συμβαίνει εξαιτίας φυσικών διεργασιών είτε εξαιτίας ανθρωπογενών παρεμβάσεων.

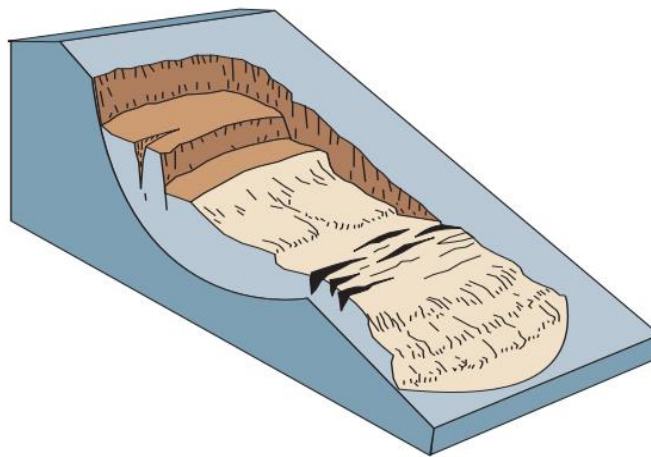
1.3.3 Ολίσθηση

Ολίσθηση ονομάζεται η καθοδική μετακίνηση ενός εδαφικού ή βραχώδους υλικού η οποία λαμβάνει χώρα κυρίως σε επιφάνειες ασυνεχειών οι οποίες είτε είναι ορατές είτε όχι. Επιπλέον, η αποσπώμενη μάζα μετακινείται προς τον πόδα της επιφάνειας θραύσης, καλύπτοντας την αρχική επιφάνεια του πρανούς, η οποία εξελίσσεται σε επιφάνεια διαχωρισμού.

Σύμφωνα με τον Varnes (1978) ανάλογα με τον μηχανισμό μετακίνησης και τη μορφή της επιφάνειας οι ολισθήσεις διακρίνονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες.

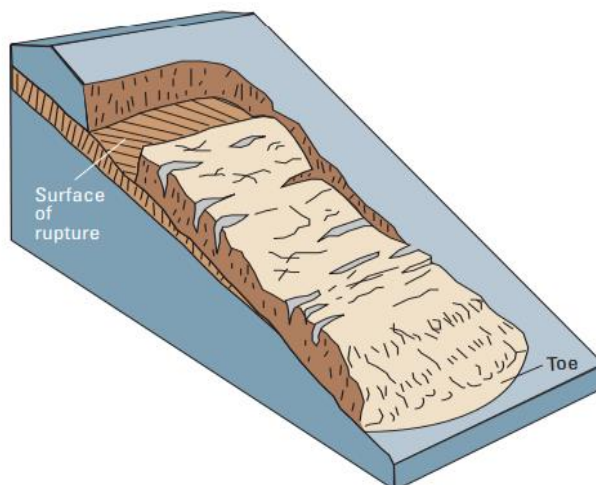
- **Περιστροφική Ολίσθηση:** Οι κατολισθήσεις αυτές ονομάζονται έτσι διότι η μετακίνηση του υλικού πραγματοποιείται περιστροφικά κατά μήκος μιας

κεκλιμένης επιφάνειας. Η ολίσθηση αυτή εμφανίζεται κοίλη προς τα πάνω και στο εσωτερικό της ολισθαίνουσας μάζας παρατηρείται μια μικρή παραμόρφωση. Ρωγμές εφελκυσμού εμφανίζονται στα ανάντη της κεφαλής οι οποίες είναι παράλληλες με την διεύθυνση του πρηνούς και οφείλονται στην απώλεια στήριξης του. Περιστροφικές ολισθήσεις εκδηλώνονται σε ομοιογενή εδαφικά υλικά, ενώ σε μικρότερο ποσοστό εμφανίζονται και σε έντονα κερματισμένες βραχομάζες παρουσιάζοντας ισότροπη συμπεριφορά. Τέλος, όσον αφορά τις διαστάσεις ο λόγος του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης με το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης κυμαίνεται μεταξύ 0,15 και 0,33 (Skempton & Hutchinson, 1969).



Σχήμα 4 Σχηματική απεικόνιση μίας περιστροφικής ολίσθησης (Highland & Bobrowsky, 2008)

- **Μεταθετική Ολίσθηση:** Η μετακίνηση του εδαφικού υλικού αυτής της κατηγορίας πραγματοποιείται κατά μήκος μιας κυματοειδούς επιφάνειας και παράλληλα με την επιφάνεια ολίσθησης ενώ η μάζα που έχει αποκολληθεί κινείται προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω χωρίς να παρουσιάζει περιστροφή. Μεταθετικές ολισθήσεις πραγματοποιούνται σε ρήγματα, επίπεδα στρώσης ή διακλάσεις αλλά και σε νεογενείς αποθέσεις. Τέλος, ο λόγος του βάθους προς το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης είναι μικρότερος του 1 (Skempton & Hutchinson, 1969).

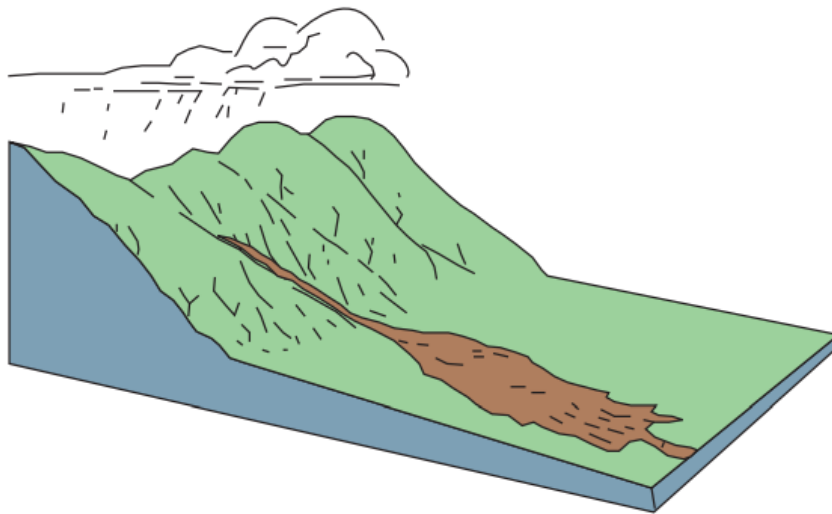


Σχήμα 5 Σχηματική απεικόνιση μίας μεταθετικής ολίσθησης (Highland & Bobrowsky, 2008)

1.3.4 Ροές

Το είδος αυτής της μετακίνησης πραγματοποιείται κυρίως σε χαλαρά υλικά και είναι ικανή να αναπτύξει μεγάλες ταχύτητες. Εξαιτίας της ταχύτητας που αναπτύσσει κατά την διάρκεια της μετακίνησης θεωρείται, ίσως, το πιο επικίνδυνο κατολισθητικό φαινόμενο. Το βασικό αίτιο της μετακίνησης είναι το νερό και εκδηλώνονται σε περιοχές με χαλαρά υλικά και έντονη κλίση. Η μετακίνηση αυτή διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες. (Κούκης & Σαμπατακάκης 2022)

- **Ροές βραχώδους υποβάθρου:** Αναφέρεται σε παραμορφώσεις της βραχομάζας μεταξύ των ασυνεχειών χωρίς να διακρίνεται η μετατόπιση κατά μήκος της επιφάνειας, ενώ παρατηρούνται σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο.
- **Ροές κορημάτων:** Στην περίπτωση αυτή η μετακίνηση του εδαφικού υλικού εμφανίζει ταχύτητες που αυξάνονται προοδευτικά εξαιτίας της παρουσίας μεγάλου ποσοστού χαλαρών υλικών. Όταν το ποσοστό νερού είναι μεγάλο και το πρηνές παρουσιάζει μεγάλη κλίση τότε δημιουργείται η λεγόμενη «χιονοστιβάδα κορημάτων».
- **Ροές γαιών:** Η κατηγορία αυτή αναφέρεται σε διαβρεγμένα γεωυλικά και η περιεκτικότητά τους αγγίζει ποσοστό τουλάχιστον 50% ενώ μερικές φορές αποκαλούνται ως λασποροές. Όπως και στις προηγούμενες κατηγορίες ροής οι περιοχές εκδήλωσης του φαινομένου έχουν μεγάλη κλίση και δημιουργούνται έπειτα από περίοδο έντονων βροχοπτώσεων.

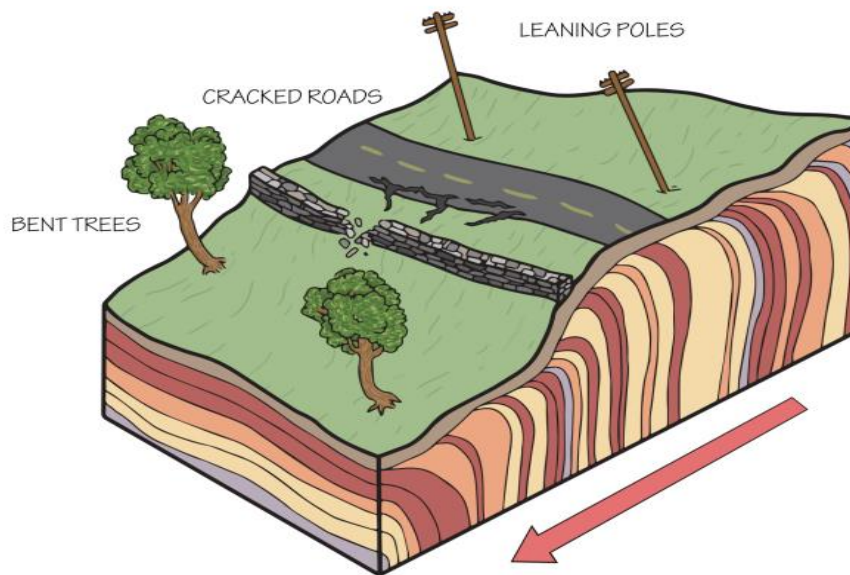


Σχήμα 6 Σχηματική απεικόνιση ροής κορημάτων (Highland & Bobrowsky, 2008)

1.3.5 Ερπυσμός

Το φαινόμενο του ερπυσμού εκδηλώνεται σε ζώνες αποσάθρωσης και κερματισμού πετρωμάτων ενώ το βάθος μετακίνησης φτάνει μέχρι και 3 μέτρα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ταχύτητα μετακίνησης η οποία κυμαίνεται στα 10^{-6} mm/sec κάτι που καθιστά το φαινόμενο του ερπυσμού αδύνατο για μακροσκοπική παρατήρηση.

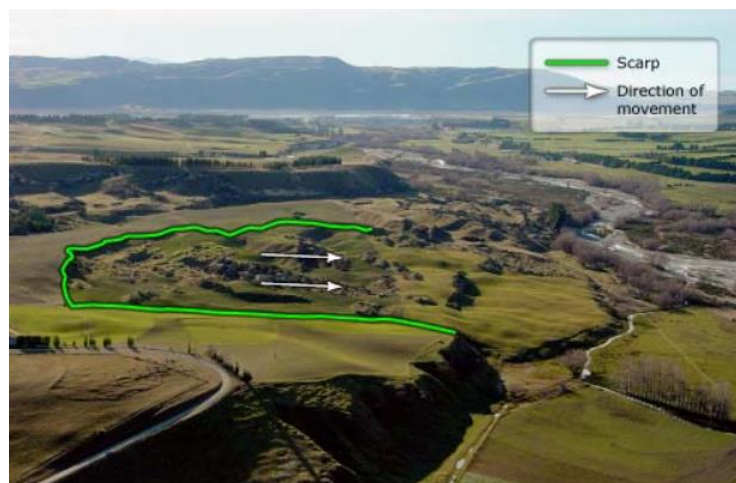
Σύμφωνα με τους Varnes (1978), Κούκη & Σαμπατακάκη (2022) στον ερπυσμό κατατάσσονται οι αργές ροές. (Παπαθανασίου 2022).



Σχήμα 7 Σχηματική απεικόνιση ερπυσμού (Lyons, Sue & Ross, Robert 2015).

1.3.6 Πλευρικές εξαπλώσεις

Ο όρος αυτός περιγράφει μετακινήσεις σε στρώσεις άμμου ή ιλύος οι οποίες καλύπτονται από αργιλικά στρώματα και εκδηλώνονται λόγω των διατμητικών ή εφελκυστικών ρωγμών. Οι μετακινήσεις αυτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξαπλώσεις τεμαχών, οι εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης και στις σύνθετες πλευρικές εξαπλώσεις.



Εικόνα 1 Στη φωτογραφία φαίνεται με πράσινη γραμμή το απότομο βύθισμα και με βελόκια σημειώνεται η κατεύθυνση κίνησης της μάζας (Michael J. Crozier, 2006)

1.3.7 Σύνθετες μετακινήσεις

Οι μετακινήσεις των πρανών αποτελούνται από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων ειδών των παραπάνω κατολισθητικών φαινομένων που αναλύθηκαν. Στον ελληνικό χώρο η πιο συνήθης σύνθετη μετακίνηση είναι η εξέλιξη περιστροφικής ή μεταθετικής ολίσθησης σε ροή εδάφους.

1.4 Ενεργότητα κατολισθήσεων

Ο προσδιορισμός της ενεργότητας των κατολισθήσεων είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων. Οι τρεις κατηγορίες ταξινόμησης σύμφωνα με τους Cruden & Varnes (1996) είναι:

Το **καθεστώς ενεργότητας** το οποίο αναλύει το χρονικό της μετακίνησης μιας κατολίσθησης και χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι η ενεργή, η ανενεργή και η παλιά ή απολιθωμένη. Η κατανομή ενεργότητας η οποία περιγράφει τα τμήματα που βρίσκονται υπό καθεστώς μετακίνησης και ο τύπος ενεργότητας ο οποίος παρουσιάζει την διαδικασία με την οποία εκδηλώνονται οι διαφορετικές μετακινήσεις στο σώμα της κατολίσθησης.

1.4.1 Καθεστώς ενεργότητας

- **Ενεργή:** Οι κατολισθήσεις αυτές υποδηλώνουν σχετικά πρόσφατες μετακινήσεις και οι μορφολογικοί χαρακτήρες αυτών είναι εύκολα διακριτές. Επιπλέον, οι κατολισθήσεις οι οποίες ενεργοποιούνται ξανά μετά από ένα χρονικό διάστημα ονομάζονται **επανεργοποιημένες** και κινούνται σε επιφάνειες ολίσθησης οι οποίες προϋπήρχαν.
- **Ανενεργή:** Οι ανενεργές κατολισθήσεις είναι αυτές οι οποίες δεν έχουν παρουσιάσει μετακίνηση για περισσότερο από ένα έτος. Εφόσον, τα αίτια της κατολίσθησης παραμένουν ίδια τότε η κατολίσθηση βρίσκεται **υπό λανθάνουσα κατάσταση**, ενώ όταν τα αίτια της έχουν εκλείψει τότε ονομάζεται **μη ενεργοποιήσιμη κατολίσθηση**. Τέλος, όταν έχουν ληφθεί μέτρα σταθεροποίησης η κατολίσθηση θεωρείται **σταθεροποιημένη**.
- **Παλιά ή Απολιθωμένη:** Εφόσον η κατολίσθηση παραμένει σε ανενεργή κατάσταση για πάρα πολλά χρόνια και τα κατώτερα τμήματα καλύπτονται από νεογενή ιζήματα.

1.4.2 Κατανομή ενεργότητας

Η κατανομή ενεργότητας χωρίζεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- **Πρωθούμενη:** Είναι η κατολίσθηση η οποία καταλαμβάνει επιπλέον έκταση από τα ανάντη προς τα κατόντη, δηλαδή την κατεύθυνση της μετακίνησης.
- **Ανάδρομη:** Η κατολίσθηση ονομάζεται έτσι εφόσον επεκτείνεται αντίθετα της κατεύθυνσης της μετακίνησης
- **Διευρυνόμενη:** Ονομάζεται η κατολίσθηση της οποίας η επέκταση πραγματοποιείται πλευρικά.

- **Προοδευτική:** Η κατολίσθηση της οποίας οι διαστάσεις αυξάνονται τόσο σε πλάτος όσο και σε μήκος.
- **Απομειούμενη:** Τα υλικά τα οποία μετακινούνται ελαττώνονται με την πάροδο του χρόνου.
- **Κινούμενη:** Τα υλικά που μετακινήθηκαν αρχικά συνεχίζουν να ολισθαίνουν χωρίς να παρατηρείται αλλαγή στην επιφάνεια ολίσθησης.

1.4.3 Τύπος ενεργότητας

Όσον αφορά τον τύπο ενεργότητας σύμφωνα με τους Cruden & Varnes (1996) όταν έχουμε δύο διαφορετικούς τύπους ολίσθησης σε μία κατολίσθηση τότε αυτή ονομάζεται **σύνθετη**. Επίσης σύμφωνα με τους Κούκη και Σαμπατακάκη (2007) όταν σε μία κατολίσθηση διενεργούνται επαναλαμβανόμενες μετακινήσεις του ίδιου τύπου τότε αυτή ονομάζεται **πολλαπλή**. Επιπλέον, στην περίπτωση που δεν υπάρχει επικάλυψη του υλικού της αρχικής κατολίσθησης με την μετέπειτα τότε ονομάζεται **διαδοχική** και τέλος εφόσον εκδηλώνεται ένας τύπος μετακίνησης τότε η κατολίσθηση ονομάζεται **απλή**.

1.5 Ταχύτητα μετακίνησης

Η ταχύτητα μετακίνησης είναι σημαντικός παράγοντας ο οποίος χρειάζεται για την αξιολόγηση επικινδυνότητας για ένα κατολισθητικό φαινόμενο. Σε περιπτώσεις που η κατολίσθηση είναι σύνθετη και έχει διαφορετικές ταχύτητες σε διαφορετικές περιοχές θα χρειαστεί να αξιολογηθεί κάθε περιοχή ξεχωριστά για το πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα. Επιπλέον, όσο η ταχύτητα μετακίνησης αυξάνεται οι επιπτώσεις στην περιοχή θα είναι μεγαλύτερες.

Πίνακας 1 Ρυθμός μετακίνησης των κατολισθήσεων (Παπαθανασίου, Γ 2022)

Κατηγορία	Περιγραφή	Ταχύτητα u (mm/sec)	Τυπική ταχύτητα
1	Εξαιρετικά αργή	$< 5 \cdot 10^{-7}$	Έως 16 mm/έτος
2	Πολύ αργή	$5 \cdot 10^{-7} < u < 5 \cdot 10^{-5}$	Έως 1,6 m/έτος
3	Αργή	$5 \cdot 10^{-5} < u < 5 \cdot 10^{-3}$	Έως 13 m/μήνα
4	Μέτρια	$5 \cdot 10^{-3} < u < 5 \cdot 10^{-1}$	Έως 1,8 m/ώρα
5	Γρήγορη	$5 \cdot 10^{-1} < u < 5 \cdot 10^1$	Έως 3 m/λεπτό
6	Πολύ γρήγορη	$5 \cdot 10^1 < u < 5 \cdot 10^3$	Έως 5 m/δευτερόλεπτο
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$> 5 \cdot 10^3$	> 5 m/δευτερόλεπτο

Πίνακας 2 Πιθανές βλάβες σε συνάρτηση της ταχύτητας μετακίνησης (Παπαθανασίου, Γ 2022)

Κατηγορία ταχύτητας μετακίνησης	Πιθανές βλάβες
1	Η μετακίνηση προσδιορίζεται μόνο με ενόργανες μετρήσεις λόγω του μικρού μεγέθους της. Οι κατασκευές δεν υφίστανται βλάβες όταν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.
2	Μερικές από τις μόνιμες κατασκευές παραμένουν ανέπαφες.
3	Δυνατή η λήψη μέτρων προστασίας κατά την ενεργοποίηση. Μερικές καλά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν με κατάλληλη συντήρηση αν δεν υπάρξει ξαφνική επιτάχυνση της κίνησης.
4	Μερικές από τις προσωρινές εγκαταστάσεις είναι δυνατόν να διατηρηθούν.
5	Δυνατή η ασφαλής φυγή κατοίκων. Σπίτια, εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής με μεγάλες βλάβες ή κατεστραμμένα.
6	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων.
7	Καταστροφές κτηρίων λόγω έντονων μετακινήσεων ή πρόσκρουσης της μετακινούμενης μάζας, πολλοί θάνατοι, απίθανη ύπαρξη επιζώντων.

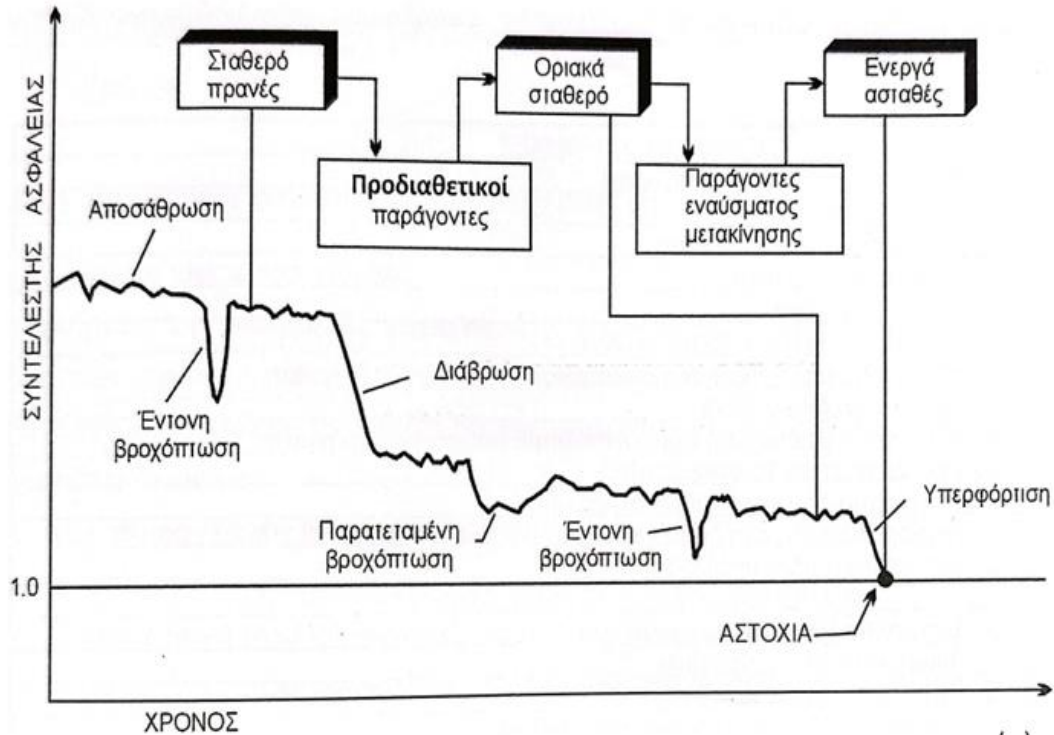
1.6 Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων

Από τη στιγμή που εκδηλωθεί ένα κατολισθητικό φαινόμενο ο γεωλόγος είναι υπεύθυνος για την διερεύνηση και την αξιολόγηση του αιτίου ή των αιτίων τα οποία συνέβαλαν στην αστοχία του πρανούς. Για να πραγματοποιηθεί μία κατολίσθηση χρειάζεται να συμβεί μία αλληλουχία γεγονότων η οποία επηρεάζει τις συνθήκες ισορροπίας του πρανούς με απώτερο σκοπό την θραύση και την μετακίνηση του. (Κούκης & Σαμπατακάκης 2007).

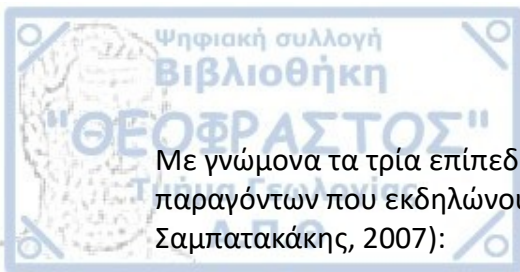
Σημαντικό στοιχείο το οποίο συντελεί στην εκδήλωση μίας κατολίσθησης είναι ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς. Ο συντελεστής ασφάλειας ενός πρανούς με την πάροδο του χρόνου ελαττώνεται δραστικά και φτάνει σε σημείο να προκαλέσει την μετακίνηση του φυσικού πρανούς. Η ελάττωση αυτή προκύπτει ύστερα από συνεχείς βροχοπτώσεις, διάβρωση στη βάση του πρανούς και στην αποσάθρωση των υλικών του πρανούς με την πάροδο του χρόνου. Ένα φυσικό πρανές διέρχεται από τρία στάδια μέχρι την τελική του θραύση. (WP/WLI 1994).

- **Σταθερό:** Είναι το αρχικό στάδιο το οποίο έχει μεγάλο συντελεστή ασφάλειας και αντιστέκεται στις δυνάμεις αποσταθεροποίησης

- **Οριακά σταθερό:** Ο συντελεστής ασφάλειας έχει μειωθεί δραστικά και προβλέπεται αστάθεια εξαιτίας της επίδρασης των δυνάμεων αποσταθεροποίησης
- **Ενεργά ασταθές:** Πλέον οι δυνάμεις αποσταθεροποίησης ασκούνε συνεχείς ή περιοδικές κινήσεις



Διάγραμμα 1 Γραφική απεικόνιση μείωσης του συντελεστή ασφάλειας με το πέρασμα του χρόνου (Κούκης & Σαμπατακάκης 2007)



Με γνώμονα τα τρία επίπεδα ευστάθειας πραγματοποιείται η ταξινόμηση των παραγόντων που εκδηλώνουν κατολισθήσεις σε δύο ομάδες (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007):

- **Προκαταρκτικοί παράγοντες** είναι αυτοί που συμμετέχουν προοδευτικά στη μείωση της ευστάθειας του πρηνούς χωρίς όμως να έχει υποστεί μετακίνηση. Η συμμετοχή τους δημιουργεί ένα οριακά σταθερό πρανές.
- **Παράγοντες εναύσματος** είναι αυτοί που συμβάλουν στην έναρξη της μετακίνησης μετατρέποντας το πρανές σε ενεργό ασταθές.
- Επίσης οι παράγοντες που προκαλούν κατολισθήσεις ταξινομούνται και ανάλογα την προέλευση τους. Έτσι έχουμε παράγοντες οι οποίοι προέρχονται από τις εδαφικές συνθήκες, τις γεωμορφολογικές διαδικασίες, τις φυσικές διεργασίες και τέλος τις ανθρωπογενείς διαδικασίες.
- **Εδαφικές συνθήκες:** Οι παράγοντες της συγκεκριμένης ομάδας εντοπίζονται στο υπαίθρο είτε από επιφανειακή αναγνώριση με την βοήθεια της γεωλογικής χαρτογράφησης είτε σε βάθος με την εκτέλεση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Με βάση των παραπάνω μετρήσεων αποτυπώνονται τα γενικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπως για παράδειγμα η κλίση της επιφάνειας τους εδάφους, παρουσία αργιλικού υλικού, ο βαθμός αποσάθρωσης και η παρουσία επιφανειακού ή υπόγειου νερού.
- **Γεωμορφολογικές διεργασίες:** Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας οι μεταβολές στη μορφολογία είναι δυνατό να εντοπιστούν με τη σύγκριση αεροφωτογραφιών διαφορετικών χρονικών περιόδων. Οι αλλαγές στην μορφολογία οφείλονται σε θαλάσσια διάβρωση ή ποτάμια, στην επίδραση παγετώνων, σε τεκτονικές διεργασίες κ.α.
- **Φυσικές διεργασίες:** Οι παράγοντες αυτής της ομάδας μπορούν να εκτιμηθούν με την εγκατάσταση οργάνων παρακολούθησης όπως σειсмоγράφοι, πιεζόμετρα μέσα σε γεωτρήσεις και βροχόμετρα.
- **Ανθρωπογενείς διεργασίες:** Η ανθρώπινη παρέμβαση στο περιβάλλον είναι πλέον εμφανής παντού και μπορεί να εντοπιστεί από την υπαίθρια παρατήρηση. Σκοπός αυτών των παρατηρήσεων είναι να αποτυπωθούν οι παράγοντες οι οποίοι οφείλονται σε ανθρώπινες παρεμβάσεις στο πρανές όπως για παράδειγμα είναι η εκσκαφή στη βάση του πρηνούς.

1.	ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
1	Πλαστικό χαμηλής αντοχής υλικό
2	Ευαίσθητο υλικό
3	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
4	Αποσαθρωμένο υλικό
5	Διατμημένο υλικό
6	Ρωγματωμένο 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 στη δυσκαμψία (στιφρό ή πυκνό υλικό υπερκείμενο πλαστικού υλικού)
2.	ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ
1	Τεκτονική ανύψωση
2	Ανύψωση λόγω ηφαιστειών
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.λπ.)
3.	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 ηφαιστειών
7	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστειών
8	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
9	Αποσάθρωση λόγω παγετού
10	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
4.	ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ
1	Εκσκαφές στη βάση (πόδι) του πρανούς
2	Φόρτιση στο μέτωπο ή επάνω από τη στέψη του πρανούς
3	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμειυτήρες
4	Άρδευση
5	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
6	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές κ.λπ.)
7	Αποψίλωση
8	Λατομεία και μεταλλεία
9	Δημιουργία χωματερών
10	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, τοποθέτηση πασσάλων κ.λπ.)

Πίνακας 3 Οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων (Κούκης & Σαμπατακάκης 2022)

Σύμφωνα με τον Varnes (1978) πραγματοποιείται ταξινόμηση των παραγόντων οι οποίοι συντελούν στην αστοχία και χωρίζονται σε αυτούς που συντελούν στην αύξηση της διατμητικής αντοχής, σε εκείνους που συμβάλλουν στην χαμηλή διατμητική αντοχή του υλικού και σε εκείνους που συντελούν στην μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού.

Όσον αφορά την αύξηση της διατμητικής αντοχής πραγματοποιείται εξαιτίας:

- **Αφαίρεσης της υποστήριξης:** Θεωρείται από τους πιο συνήθης παράγοντες κατολίσθησης και οφείλεται σε φυσικά αίτια ή ανθρώπινη παρέμβαση. Πιο συγκεκριμένα αυτή οφείλεται στην επιφανειακή διάβρωση εξαιτίας κυμάτων κοντά στη βάση του πρανούς, στην υπόγεια διάβρωση λόγω της ύπαρξης ανθρακικών πετρωμάτων, στη σύνθλιψη του υποκείμενου πλαστικού υλικού και τέλος σε ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η υποσκαφή των πρανών στη βάση τους αλλά και η αφαίρεση έργων υποστήριξης του πρανούς.
- **Πρόσθετη φόρτιση:** Παρομοίως ο συγκεκριμένος παράγοντας οφείλεται σε φυσικές διεργασίες αλλά και στην ανθρώπινη παρέμβαση. Για παράδειγμα το νερό των βροχοπτώσεων και η βλάστηση προσθέτουν επιπλέον βάρος στην μάζα που θα υποστεί μετακίνηση ενώ το βάρος του νερού από απώλειες αγωγών και η κατασκευή επιχωμάτων με σκοπό την κατασκευή τεχνικών έργων είναι μερικοί σημαντικοί παράγοντες που προσθέτουν φόρτιση στο πρανές.
- **Παροδικές τάσεις:** Ο παράγοντας αυτός αναφέρεται στους σεισμούς και πιο συγκεκριμένα στις σεισμικές δονήσεις των οποίων οι οριζόντιες επιταχύνσεις συντελούν στην αύξηση της διατμητικής αντοχής προκαλώντας καταστροφικές μετακινήσεις. Επιπλέον, δονήσεις από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως η κυκλοφορία βαριών οχημάτων, η εκρήξεις και η δυναμική συμπίκνωση για την βελτίωση του εδάφους μπορούν να προκαλέσουν στην αύξηση της διατμητικής αντοχής.
- **Τοπική ανύψωση:** Πρόκειται για τεκτονικές διεργασίες οι οποίες εκδηλώνονται με αργό ρυθμό διαφοροποιώντας τα γεωμετρικά στοιχεία του πρανούς όπως είναι η κλίση και το ύψος. Εξαιτίας του αργού ρυθμού των διεργασιών αυτών τα αποτελέσματα γίνονται αντιληπτά σε επίπεδο γεωλογικού χρόνου (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Επιπλέον, η τοπική ανύψωση οφείλεται και στην ηφαιστειακή δραστηριότητα. Σε αντίθεση με τις τεκτονικές διεργασίες οι ηφαιστειακές πραγματοποιούνται σε σύντομο χρονικό διάστημα και έχουν ως αποτέλεσμα την μεταβολή των τάσεων στα τοιχώματα των κρατήρων.
- **Πλευρική πίεση:** Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Καθοριστικό ρόλο για την αύξηση της διατμητικής αντοχής με πλευρική πίεση είναι η παρουσία νερού στις ρωγμές των πετρωμάτων. Επιπλέον, όταν το νερό που βρίσκεται μέσα στις ρωγμές παγώσει τότε ξανά η διατμητική αντοχή του πρανούς αυξάνεται.

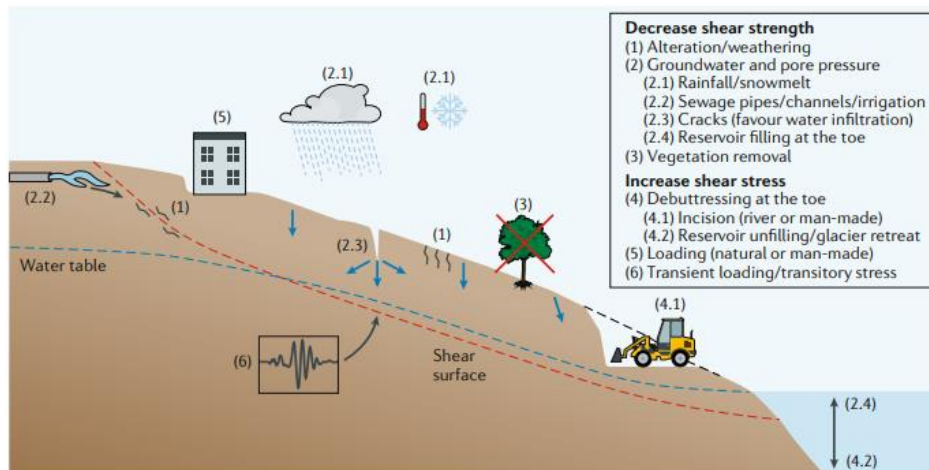
Η χαμηλή διατμητική αντοχή των πετρωμάτων οφείλεται:

- **Λιθολογική σύσταση και υφή:** Πρόκειται για γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι έχουν μικρή αντοχή. Μερικά παραδείγματα γεωλογικών σχηματισμών με μικρή αντοχή είναι οι άργιλοι, οι ηφαιστειακοί τόφφοι, οι ιζηματογενείς και οι μεταμορφωμένοι σχιστόλιθοι. Ακόμη, οι άμμοι οι οποίοι έχουν μικρή πυκνότητα έχουν και μικρή αντοχή.
- **Δομή των πετρωμάτων και γεωμετρία του πρανούς:** Η κλίση του πρανούς είναι σημαντική καθώς όταν τα στρώματα κλίνουν ομόρροπα με το πρανές

και η κλίση τους είναι μικρότερη από αυτή του πρανές τότε η διατμητική αντοχή είναι χαμηλή με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται αστοχία. Επιπλέον, η παρουσία μαλακών πετρωμάτων κάτω από συμπαγή πετρώματα χαμηλώνει την διατμητική αντοχή του πρανούς.

Η μείωση της διατμητικής αντοχής προκαλείται εξαιτίας των παρακάτω παραγόντων:

- **Αποσάθρωση:** Η αποσάθρωση οφείλεται σε φυσικοχημικές διαδικασίες με την παρουσία νερού, το οποίο διεισδύει δια μέσου ρωγμών, να θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας. Το νερό το οποίο απορροφάται από τα αργιλικά ορυκτά του εδάφους μειώνει την συνοχή του εδάφους ελαττώνοντας έτσι την διατμητική του αντοχή. Επίσης, στα αργιλικά εδάφη η πίεση του νερού των πόρων ελαττώνει την ενεργή τάση η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους.
- **Ανάπτυξη ριζικού συστήματος:** Εκτός από την παρουσία νερού μέσα στις ρωγμές των πετρωμάτων μείωση στην διατμητική αντοχή των γεωλογικών σχηματισμών είναι ικανό να δημιουργήσει και το ριζικό σύστημα. Αυτό συμβαίνει καθώς οι ρίζες των φυτών όταν διογκώνονται ασκούν δυνάμεις μεγάλου φορτίου στις ασυνέχειες προκαλώντας μείωση της διατμητικής αντοχής του βραχώδους πρανού οδηγώντας το σε αποκόλληση. Όσον αφορά τους παράγοντες εναύσματος μιας κατολίσθησης αυτοί χωρίζονται σε 4 κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα είναι η έντονη και συνεχής βροχόπτωση, το γρήγορο λιώσιμο του χιονιού, η σεισμική δραστηριότητα και η μεταβολή της στάθμης του νερού (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).



Σχήμα 8 Σχηματική απεικόνιση των αιτιών που οδηγούν σε κατολίσθηση. **Μείωση διατμητικής αντοχής** (1) Αποσάθρωση, (2) Υπόγειο νερό και πίεση των πόρων, (2.1) Βροχόπτωση/Λιώσιμο του χιονιού, (2.2) σωλήνες/ δίκτυο σωλήνων, (2.3) ρωγμές (ευνοούν την εισροή νερού), (2.4) γέμισμα ταμιευτήρα στη βάση, (3) απομάκρυνση βλάστησης **Αύξηση διατμητικής τάσης** (4) αποσυμπίεση στη βάση, (4.1) αφαίρεση υλικού (εξαιτίας του ποταμού ή τεχνητά), (4.2) άδειασμα ταμιευτήρα/λιώσιμο πάγων (5) φόρτιση (φυσική ή τεχνητή), (6) παροδική φόρτιση (Lacroix, P et al. 2020)

Εκτός από τα φράγματα που δημιουργούνται από ανθρώπους για την αξιοποίηση τεράστιων ποσοτήτων νερού το οποίο χρησιμοποιείται για άρδευση, ύδρευση αλλά και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν και τα φυσικά φράγματα. Η φύση από μόνη της είναι ικανή να δημιουργήσει φυσικά φράγματα με την βοήθεια των κατολισθήσεων ή χιονοστιβάδων και σε πολλές περιπτώσεις απειλούν ανθρώπινες ζωές και περιουσίες.

2.1 Γεωμορφολογικές συνθήκες φυσικών φραγμάτων

Τα φυσικά φράγματα δημιουργούνται σε περιοχές όπου στενές κοιλάδες συναντούν ψηλά βουνά. Όσο πιο στενή είναι η κοιλάδα τόσο πιο εύκολα θα δημιουργηθεί ένα τέτοιο φράγμα καθώς απαιτείται μικρότερος όγκος μετακινούμενου υλικού σε σχέση με πιο ανοιχτές κοιλάδες.

2.2 Αιτίες δημιουργίας

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που οδηγούν στην δημιουργία φυσικών φραγμάτων είναι η υπερβολική βροχόπτωση και οι σεισμοί. Επιπλέον, οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν έναν καίριο παράγοντα δημιουργίας αλλά και η αποψίλωση των δασών.

2.3 Ταξινόμηση φυσικών φραγμάτων

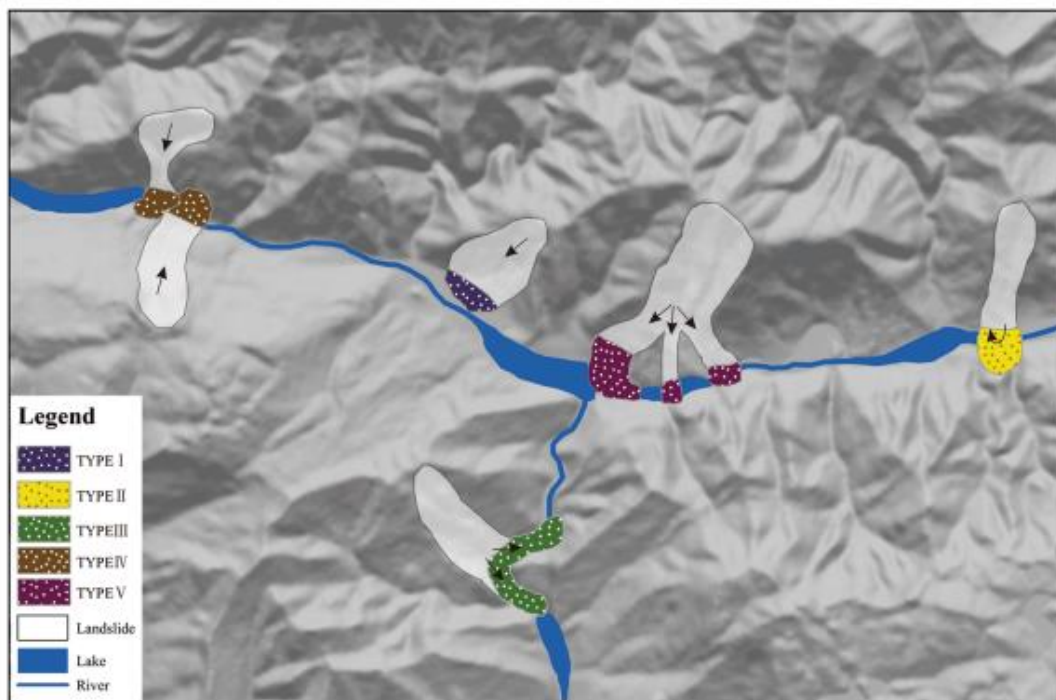
Η σωστή κατανόηση των φραγμάτων τα οποία δημιουργούνται εξαιτίας κατολισθητικών φαινομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς θα χρειαστεί να ληφθούν μέτρα υποστήριξης της μάζας που μετακινήθηκε. Για να γίνει αυτό οι Costa και Schuster (1988) ταξινομήσαν τα φράγματα αυτά με βάση την κατανομή της απόθεσης υλικού σε κάτοψη εντός της κοιλάδας (Σχήμα 9) και με βάση τα ιζηματολογικά χαρακτηριστικά και την σύνθεση του υλικού που αποτέθηκε (Σχήμα 10).

Η πρώτη κατηγορία χωρίζεται σε πέντε τύπους φραγμάτων:

- **Τύπου I:** Είναι μικρά φράγματα και δεν φτάνουν την απέναντι πλευρά της κοιλάδας και συνήθως είναι ακίνδυνα.
- **Τύπου II:** Είναι μεγαλύτερα από αυτά του τύπου I, φτάνοντας την απέναντι πλευρά της κοιλάδας και αποθέτοντας υλικό στην πλευρά εκείνη, ενώ η επικινδυνότητά τους αυξάνεται σε σχέση με του τύπου I.
- **Τύπου III:** Τα φράγματα της τρίτης κατηγορίας γεμίζουν με υλικό την κοιλάδα και μετακινούνται σε μεγάλες αποστάσεις μέσα σε αυτή την κοιλάδα. Επιπλέον, εκτός από το μπλοκάρισμα της κύριας ροής του ποταμού είναι ικανά να μπλοκάρουν και παραπόταμους οι οποίοι βρίσκονται κοντά στην κατολίσθηση.

- **Τύπου IV:** Δημιουργούνται από την ταυτόχρονη μετακίνηση υλικού και από τις δύο πλευρές της κοιλάδας. Είτε ενώνονται ή βρίσκονται η μία δίπλα στην άλλη μέσα στην κοιλάδα.
- **Τύπου V:** Η κατολισθηση από την μία πλευρά της κοιλάδας δημιουργεί πολλαπλά μικρά σε έκταση φράγματα στο ίδιο τμήμα του ποταμού.
- **Τύπου VI:** Αποτελούνται από κατολισθήσεις οι οποίες δημιουργούνται με αργή ολίσθηση και δημιουργούν λίμνες αυξάνοντας το ύψος του ποταμού.

Οι συνηθέστεροι τύποι φυσικών φραγμάτων στον κόσμο είναι η τρίτη και η τέταρτη κατηγορία, ενώ αρκετά επικίνδυνοι μπορούν να γίνουν οι τύποι IV και V εφόσον βρίσκονται κοντά σε στενές κοιλάδες και ο όγκος φερτών υλικών είναι υψηλός.



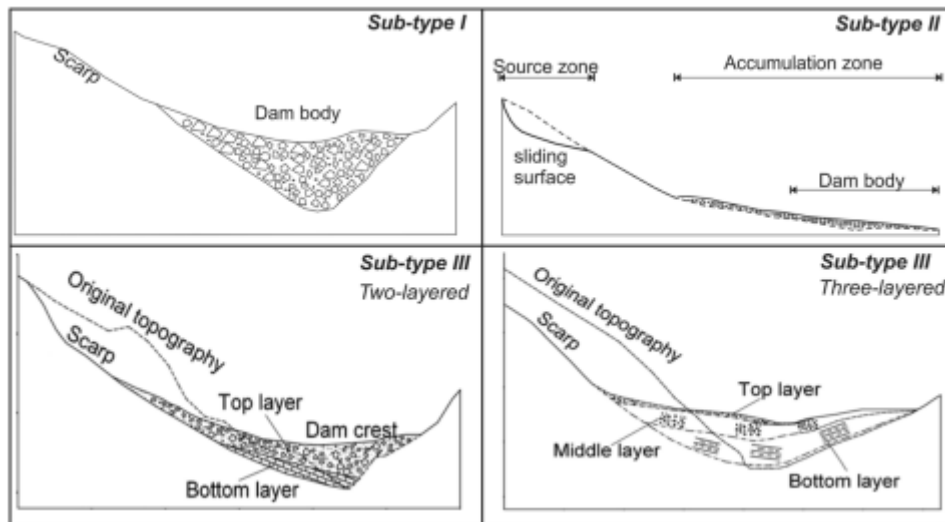
Σχήμα 9 Οι 5 τύποι φυσικών φραγμάτων τα οποία χωρίζονται με βάση τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους. (Fan et al. 2017)

Η δεύτερη κατηγορία χωρίζεται σε τρεις υπό-κατηγορίες:

- **Υποκατηγορία 1:** Τα φυσικά φράγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούνται κυρίως από μεγάλους βράχους και ογκόλιθους που μετακινήθηκαν ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις ή από έναν δυνατό σεισμό στην περιοχή. Επιπλέον, οι αποθέσεις που μετακινούνται από τα βραχώδη πρανή καλύπτονται από νέους ογκόλιθους οι οποίοι αποκολλώνται με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι, με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα στρώμα με κορήματα στο εσωτερικό και μία επιφάνεια που τα καλύπτει από πάνω τους. (Davies και McSaveney 2002).
- **Υποκατηγορία 2:** Σε αυτή την κατηγορία φυσικών φραγμάτων παρατηρούνται μη στερεοποιημένα λεπτόκοκκα θραύσματα. Αυτό συμβαίνει καθώς η απόσταση που διανύουν τα μετακινούμενα υλικά από την έναρξη της μετακίνησης έως το σημείο που επικάθονται. Συνήθως τα φυσικά

φράγματα αυτής της κατηγορίας δημιουργούνται εξαιτίας σεισμικών γεγονότων, ενώ τα ίδια εμφανίζουν υψηλή επιδεκτικότητα στη διάβρωση.

- **Υποκατηγορία 3:** Τέλος σε αυτή την κατηγορία τα φυσικά φράγματα αποτελούνται από μεγάλους βράχους οι οποίοι είναι άθικτοι δημιουργώντας έτσι ένα στρώμα άθικτων πετρωμάτων. Επιπλέον, από πάνω βρίσκονται θρυμματισμένα πετρώματα δημιουργώντας έτσι είτε δύο είτε τριών στρωμάτων. Τα φυσικά φράγματα αυτής της κατηγορίας σχηματίζονται κοντά σε στενές κοιλάδες. Η τοπογραφία περιορίζει την διάλυση των αρχικών πετρωμάτων που μετακινούνται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τα αρχικά στρώματα των άθικτων πετρωμάτων.



Σχήμα 10 Οι τρεις υποκατηγορίες των φυσικών φραγμάτων οι οποίες σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που αποτίθενται (Fan et al. 2017)

2.4 Παραδείγματα φυσικών φραγμάτων

Τατζικιστάν, 1911

Ένα από τα πιο εντυπωσιακά γεωλογικά φαινόμενα βρίσκεται στη λίμνη Sarez της χώρας του Τατζικιστάν και είναι το φυσικό φράγμα γνωστό και ως Usoi Dam. Το συγκεκριμένο φυσικό φράγμα δημιουργήθηκε ύστερα από μία κατολίσθηση που εκδηλώθηκε στην περιοχή και αποτελεί το μεγαλύτερο φυσικό φράγμα του πλανήτη μέχρι και σήμερα. Επιπλέον, εντυπωσιακή είναι και η ευστάθεια του συγκεκριμένου φυσικού φράγματος καθώς η ηλικία του ξεπερνάει τα 100 χρόνια και σε συνδυασμό με την έντονη τεκτονική δραστηριότητα της περιοχής.

Η εκδήλωση της κατολίσθησης συνέβη έπειτα από μια σεισμική δόνηση η οποία προκάλεσε την μετακίνηση μεγάλων τεμαχών προς τις όχθες του ποταμού Mugrab διακόπτοντας τη ροή του ποταμού. Στη συνέχεια η λίμνη γέμισε με νερό σχηματίζοντας το εντυπωσιακό γεωλογικό φαινόμενο που είναι σήμερα.

Η περιοχή αποτελεί πλέον πόλο έλξης για τους τουρίστες εξαιτίας της φυσικής ομορφιάς του τοπίου αλλά και μελέτης από αρκετούς επιστήμονες καθώς σε μια

περιοχή με έντονη τεκτονική δραστηριότητα ο έλεγχος της ευστάθειας του φυσικού φράγματος είναι εξαιρετικά σημαντικός. [Alford, D., & Schuster, R. (2023)]



Εικόνα 2 Το φυσικό φράγμα Usoi όπως είναι σήμερα (Φωτογραφία από Martin Mergili , The World in Images, 2011)

Ελλάδα, 1963

Έπειτα από μία έντονη και συνεχής βροχόπτωση, εκδηλώθηκε κατολίσθηση στην πλαγιά του βουνού Σμίνικο. Η διάρκεια και η ένταση της βροχόπτωσης μείωσε δραματικά την διατμητική αντοχή του εδάφους προκαλώντας έτσι την αποκόλληση μεγάλων τεμαχών. Τα τεμάχια τα οποία αποκολλήθηκαν από το πρηνές του βουνού μεταφέρθηκαν στις όχθες του ποταμού Στεφανιώτη. Η μεταφορά των υλικών διέκοψε την φυσική ροή του νερού , ενώ η συσσώρευση των υλικών από την κατολίσθηση δημιούργησε ένα φυσικό φράγμα. Το φυσικό αυτό φράγμα πλέον είναι η λίμνη Σταφανιάδα και ήταν μέχρι τώρα η πιο καινούρια φυσική λίμνη στον Ελληνικό χώρο.

Επιπλέον, με το πέρασμα του χρόνου ο χώρος γέμισε με νερό σχηματίζοντας έτσι μία λίμνη η οποία υπάρχει μέχρι και σήμερα. Πλέον αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό της περιοχής και πόλο έλξης για τους κατοίκους της περιοχής αλλά και για τουρίστες.

Κεφάλαιο 3: Αποτύπωση με νέες μεθόδους

3.1 Εισαγωγή

Η ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια επηρέασε σημαντικά τον κλάδο της τεχνικής γεωλογίας. Πλέον με την επεξεργασία αεροφωτογραφιών και

δορυφορικών εικόνων η οποία στοχεύει στην διαμόρφωση ενός τρισδιάστατου μοντέλου της περιοχής μελέτης. Εκτός από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων η αποτύπωση πραγματοποιείται με την χρήση επίγειων σαρωτών και μη επανδρωμένων αεροχημάτων. Κύριος σκοπός αυτής της αποτύπωσης είναι η οριοθέτηση και η παρακολούθηση μιας κατολίσθησης αλλά και διάφορων άλλων γεωλογικών κινδύνων.

3.2 Χρήση Αεροφωτογραφιών / Δορυφορικών εικόνων

Η χρήση αεροφωτογραφιών για τον γεωεπιστήμονα αποτελεί πλέον αναπόσπαστο και βασικό κομμάτι της εργασίας του στο γραφείο. Η συλλογή και η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων στοχεύει στην ανίχνευση αλλαγών του υπεδάφους σε μια περιοχή που εκδηλώθηκε κατολίσθηση.

Τα δεδομένα τα οποία προέρχονται από το διάστημα έχουν συλλεχθεί από δορυφόρους ραντάρ ή από οπτικούς δορυφόρους. Τα υποσυστήματα των οπτικών δορυφόρων δέχονται εντολές από σταθμούς στο έδαφος είτε εκτελούνται σε προκαθορισμένες συνθήκες είτε εκτελούνται σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα. Οι λειτουργίες των δορυφόρων ραντάρ έχουν ως στόχο τη σωστή και συνεχή καταγραφή δεδομένων.

Οι δορυφορικές εικόνες δημιουργούνται από όργανα παρατήρησης εγκατεστημένα στον δορυφόρο και μεταβιβάζονται με τη μορφή ψηφιακών σημάτων στους σταθμούς εδάφους σε πραγματικό ή μη πραγματικό χρόνο. Στη πρώτη περίπτωση τα δεδομένα μεταβιβάζονται την στιγμή που δημιουργούνται ενώ στη δεύτερη τα δεδομένα αποθηκεύονται σε έναν ενσωματωμένο καταγραφέα και μεταβιβάζονται την στιγμή όπου ο δορυφόρος είναι στην εμβέλεια του σταθμού εδάφους.

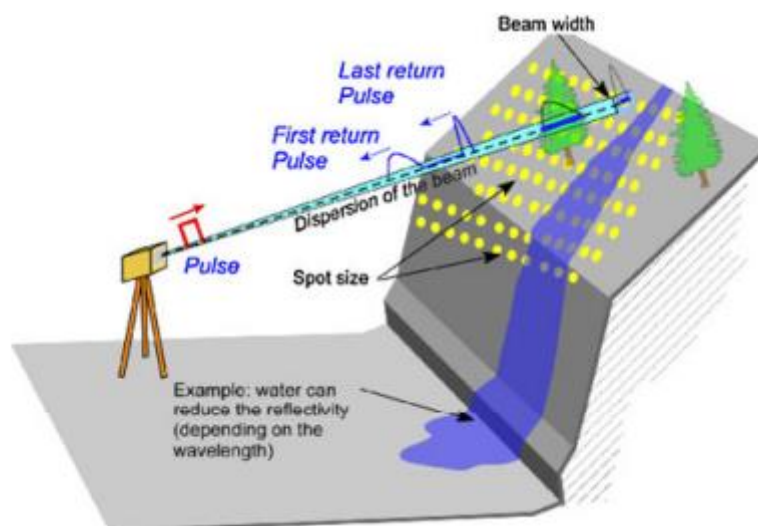
Υπάρχουν δορυφόροι διαφόρων αναλύσεων οι οποίοι είναι εκτοξευμένοι στο διάστημα για περιβαλλοντικά θέματα. Για την τεχνική γεωλογία οι δορυφόροι υψηλής ανάλυσης και οι δορυφόροι υπερ-υψηλής ανάλυσης είναι ιδιαίτεροι χρήσιμοι. Αυτό συμβαίνει διότι οι πρώτοι παρέχουν δεδομένα ανάλυσης μεγαλύτερης από 2-30 μέτρα και από 0,3-2 μέτρα αντίστοιχα. Επιπλέον οι δορυφόροι υψηλής ανάλυσης παρέχουν τακτές χρονικά σαρώσεις σε μεγάλες περιοχές (50-300 χιλιόμετρα). Αντίθετα οι δορυφόροι υπερ-υψηλής ανάλυσης παρέχουν δεδομένα έως και 30 εκατοστά με το μειονέκτημα πως διαθέτουν περιορισμένο εύρος λήψης καθώς και μη επαναλαμβανόμενη λήψη. (Παπαθανασίου 2022).

Με την χρήση δορυφορικών εικόνων διαφορετικής χρονικής λήψης δημιουργείται ψηφιακό μοντέλο εδάφους στο οποίο απεικονίζονται οι εδαφικές μετακινήσεις της κατολίσθησης. Πλέον οι νέοι δορυφόροι έχουν τη δυνατότητα εξαγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους με ανάλυση μικρότερη από ένα μέτρο καθιστώντας την επεξεργασία αεροφωτογραφιών σημαντικό εργαλείο για λεπτομερής ανίχνευση αλλαγών.

3.3 Επίγειοι σαρωτές LiDAR

Εκτός από τις δορυφορικές εικόνες τα τελευταία χρόνια η χρήση επίγειων σαρωτών στην αποτύπωση κατολισθητικών φαινομένων αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς. Με τη χρήση επίγειων σαρωτών LiDAR είναι δυνατή η δημιουργία τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου ενός πρανού με αποτέλεσμα την ανίχνευση αλλαγών με το πέρασμα των χρόνων.

Η σάρωση με χρήση επίγειου σαρωτή πραγματοποιείται εκπέμποντας μια ισχυρή δέσμη φωτός (laser) προς τον στόχο της έρευνας, δηλαδή το πρανές, και στη συνέχεια λαμβάνει την ανάκλασή της από τον καταγραφέα που είναι εγκατεστημένος στον σαρωτή. Ο υπολογισμός της ανακλώμενης δέσμης φωτός είναι σημαντικό στοιχείο καθώς έτσι υπολογίζεται η απόσταση του πρανού από τον σαρωτή. Επιπλέον, βασικός υπολογισμός είναι και η θέση του στόχου η οποία υπολογίζεται από την απόσταση και τον προσανατολισμό του πρανού. Ακόμη, φωτογραφική μηχανή βρίσκεται εγκατεστημένη στο σύστημα του επίγειου σαρωτή η οποία χρησιμεύει στην παραγωγή νεφών σημείων με συνήθως φυσικό χρώμα.



Σχήμα 11 Απεικόνιση αρχής της σάρωσης με σαρωτή LiDAR (Jaboyedoff, M. et al 2012)

Για να επιτευχθεί η ανίχνευση αλλαγών χρειάζονται επαναληπτικές μετρήσεις σε ολόκληρο το πρανές δημιουργώντας έτσι πολλαπλά παραγόμενα νέφη σημείων. Τα σημεία που καταγράφονται κυμαίνονται από λίγες χιλιάδες μέχρι και εκατομμύρια. Ακόμη, τα παραγόμενα νέφη επεξεργάζονται σε λογισμικά ανοιχτής πρόσβασης με στόχο την εξάλειψη θορύβων και την δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου. Η ταύτιση του μοντέλου αυτού με άλλα επίπεδα πληροφορίας παρουσιάζουν τις αλλαγές στο πρανές.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της σάρωσης με επίγειο σαρωτή είναι πως η συλλογή μετρήσεων πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο και τα αποτελέσματα εξετάζονται γρήγορα με σκοπό να συσταθούν μέτρα αντιμετώπισης και αποκατάστασης του κατολισθητικού φαινομένου. Επιπλέον, το τρισδιάστατο

μοντέλο υψηλής ανάλυσης του σαρωτή μειώνει το ποσοστό σφάλματος καθώς με τις παραδοσιακές μεθόδους αποτύπωσης υπερίσχυε η υποκειμενικότητα του γεωλόγου.



Εικόνα 3 Ένας επίγειος σαρωτής LiDAR (Török et al. 2016;Kordić et al. 2019)

Από την άλλη, με την χρήση επίγειου σαρωτή σε περιοχές οι οποίες είναι σχεδόν παράλληλες στο επίπεδο διεύθυνσης της σάρωσης ή με την ύπαρξη ενός φυσικού εμποδίου δημιουργούνται ζώνες σκίασης. Ουσιαστικά σε αυτές τις ζώνες δεν καταγράφεται καμία πληροφορία με αποτέλεσμα να υπάρχουν σφάλματα στις μετρήσεις. Η αποτύπωση του πρσανούς από διαφορετικά σημεία και η χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων σε αυτές τις περιοχές είναι οι λύσεις για την αποφυγή αυτών των ζωνών.

3.4 Μη επανδρωμένα αεροχήματα UAV

Ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία ενός γεωλόγου με σκοπό την αποτύπωση και παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων είναι η χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων (UAV). Αρχικά τα drone τέτοιου τύπου είχαν κατασκευαστεί για στρατιωτικούς σκοπούς, όμως τα τελευταία χρόνια διατίθενται στο ευρύ κοινό και

για εμπορική χρήση. Αυτό συνέβη κυρίως γιατί ο εξοπλισμός είναι σχετικά φθηνός και η καταγραφή δεδομένων πραγματοποιείται άμεσα.



Εικόνα 4 Μη επανδρωμένο αερόχημα DJI Inspire (British Geological Survey)

Υπάρχουν δύο είδη μη επανδρωμένων αεροχημάτων UAV τα οποία χρησιμοποιούνται για παρακολούθηση κατολισθήσεων.

- **Σταθερής πτέρυγας:** Τα drone αυτά μοιάζουν με αεροπλάνα εξαιτίας των σταθερών πτερυγίων τους. Βασικό πλεονέκτημα τους είναι οι μεγαλύτερες ταχύτητες λόγω της αεροδυναμικής τους και ο μεγαλύτερος χρόνος πτήσης τους. Όμως, εξαιτίας του μεγέθους τους η εκτόξευση χρειάζεται να γίνει μέσω ενός διαδρόμου όπως και η προσγείωση. Ακόμη, προσφέρουν τη μεγαλύτερη κάλυψη περιοχής σε μια πτήση από τους άλλους τύπους.
- **Περιστροφικής πτέρυγας:** Τα συγκεκριμένα drone αιωρούνται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και δεν χρειάζεται διάδρομος για απογείωση καθώς είναι ικανά να απογειωθούν και να προσγειωθούν κάθετα. Σε αντίθεση με τα drone σταθερής πτέρυγας έχουν μικρότερο χρόνο πτήσης.

Η τεχνική στην οποία βασίζεται η αποτύπωση κατολισθήσεων με τη χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων είναι αυτή της φωτογραμμετρίας. Σκοπός της αποτύπωσης της περιοχής μελέτης είναι η παραγωγή ενός νέφους σημείων από πτήσεις διαφορετικών σημείων και γωνιών δημιουργώντας έτσι το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Σημαντική είναι η ακριβής γεωαναφορά συγκεκριμένων στόχων πάνω στη περιοχή μελέτης με αποτέλεσμα την ακριβή συσχέτιση στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.

Όπως σε όλες τις αποτυπώσεις με σύγχρονες μεθόδους έτσι και στη χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων τα παραγόμενα αποτελέσματα διακρίνονται από την αντικειμενικότητα του συστήματος και όχι σε μεγάλο βαθμό από την υποκειμενικότητα του γεωλόγου. Επιπλέον, τα drone επιτρέπουν στον γεωλόγο να συλλέξει πληροφορίες σε περιοχές οι οποίες είναι δύσβατες και απροσπέραστες



αλλά και να συλλέξει δεδομένα με ασφάλεια και από απόσταση στο ύπαιθρο. Τέλος είναι μία οικονομική λύση η οποία παράγει άμεσα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση μεθοδολογίας φωτογραμμετρίας

4.1 Ορισμός

Η λέξη φωτογραμμετρία αποτελείται από τρία συνθετικά. Τα συνθετικά είναι φωτο-γραμ-μετρία τα οποία προέρχονται αντίστοιχα από τις λέξεις φωτογραφία, γραμμή και μέτρηση. Επομένως η λέξη φωτογραμμετρία προσδιορίζει την επιστήμη της μέτρησης από φωτογραφίες.

Γενικά η φωτογραμμετρία ορίζεται ως η επιστήμη η οποία αποκτά αξιόπιστες μετρητικές πληροφορίες για τα φυσικά αντικείμενα και το ευρύτερο περιβάλλον μέσω επαναλαμβανόμενης φωτογράφισης του από διαφορετικές γωνίες ενώ επίσης συμπεριλαμβάνει τις διαδικασίες επεξεργασίας των φωτογραφιών αυτών με σκοπό την παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων σε δύο και τρεις διαστάσεις.

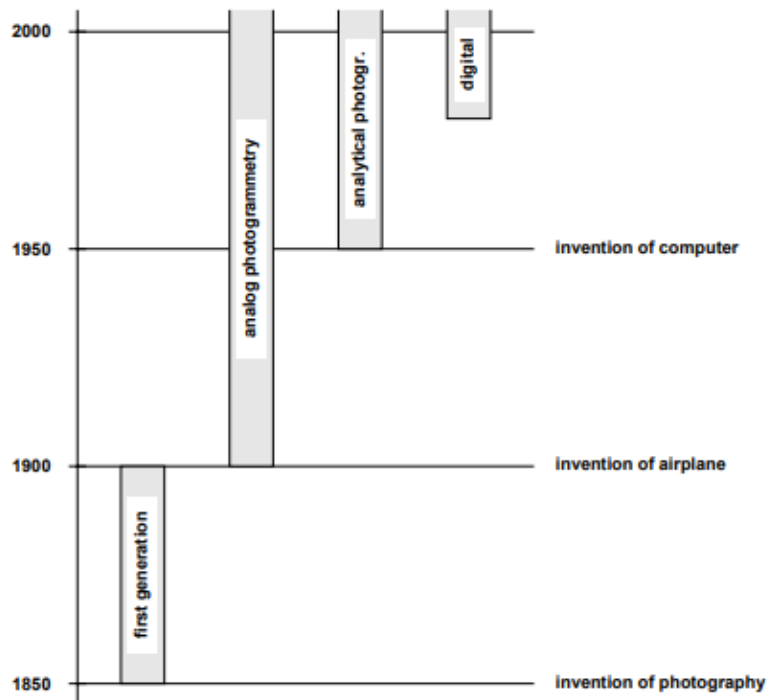
4.2 Ιστορικά στοιχεία

Η τεχνική της φωτογραμμετρίας είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης, καθώς με το πέρασμα των χρόνων διακρίνονται τέσσερις μεγάλες φάσεις της φωτογραμμετρίας. Από την εφεύρεση της φωτογραφίας και των αεροπλάνων μέχρι την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Πιο συγκεκριμένα, στα μέσα του 19^{ου} αιώνα ο Joseph Nicéphore Niépce αποτύπωσε μία εικόνα σε σκληρό αντίγραφο και αυτή η εικόνα είναι η παλαιότερη καθώς χρονολογείται το 1827. Μερικά χρόνια αργότερα ο συνεργάτης του Joseph Nicéphore Niépce ο Louis Daguerre ήταν εκείνος ο οποίος ανέπτυξε την πρώτη μέθοδο για παραγωγή φωτογραφιών σε σκληρό αντίγραφο.

Η πρώτη φάση της φωτογραμμετρίας συναντάται από τα μέσα έως το τέλος του περασμένου αιώνα και είναι μια πειραματική διαδικασία με την αποτύπωση φωτογραφιών τόσο στην επίγεια φωτογραμμετρία όσο και στην αέρια με την βοήθεια ενός αερόστατου. Η δεύτερη φάση και στην διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πολέμου αναπτύσσεται η εναέρια φωτογραμμετρία καθώς αεροπλάνα εγκαθιστούν φωτογραφικές μηχανές πάνω τους με σκοπό την παρακολούθηση από ψηλά. Μεταξύ των δύο παγκοσμίων πολέμων αναπτύσσονται τεχνικές εναέριας φωτογραμμετρίας οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Με τον ερχομό και την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, στην τρίτη φάση της φωτογραμμετρίας, δημιουργήθηκαν προγράμματα για επεξεργασία των φωτογραφιών όπως του εναέριου τριγωνισμού. Τέλος, στη τέταρτη φάση της φωτογραμμετρίας γεννήθηκε ένας καινούριος κλάδος της φωτογραμμετρίας, η

ψηφιακή φωτογραμμετρία. Πλέον, πραγματοποιείται επεξεργασία ψηφιακών εικόνων καθώς υπάρχει πληθώρα αυτών στο διαδίκτυο.



Διάγραμμα 2 Οι 4 φάσεις της φωτογραμμετρίας (Schenk, T. 2005)

4.3 Διαδικασία φωτογραμμετρίας

Οι αεροφωτογραφίες οι οποίες υπάρχουν σε διάφορες πλατφόρμες και είναι ελεύθερες προς το κοινό ή φωτογραφίες που έχουν αποτυπωθεί από το έδαφος είναι οι κύριες πηγές που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης. Επιπλέον, θεωρείται από τις πιο γρήγορες και σχετικά ακριβής διαδικασίες αποτύπωσης στο ύπαιθρο.

Με σκοπό την αποτύπωση μιας περιοχής με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας απαιτείται ο υπολογισμός σταθερών συντεταγμένων. Είναι σημαντικός ο υπολογισμός των σταθερών αυτών σημείων καθώς τα δεδομένα πλέον θα έχουν ακριβή θέση στο χώρο.

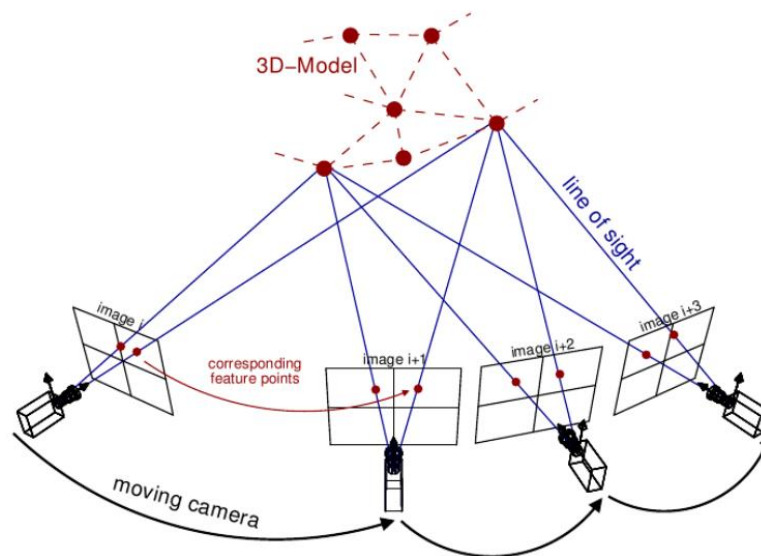
Η διαδικασία της φωτογραμμετρίας είναι πολύπλοκη καθώς εφαρμόζονται αρκετές μαθηματικές πράξεις καθώς η αποτύπωση της περιοχής μελέτης θα χρειαστεί να μοντελοποιηθεί σε τρεις διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, έπειτα από μια αποτύπωση μιας περιοχής όλες οι φωτογραφίες έχουν ληφθεί από διαφορετική γωνία και διαφορετική απόσταση πράγμα που σημαίνει πως έχει υποστεί αλλαγή στην κλίμακα της περιοχής που φωτογραφίζεται. Επιπλέον, ο υπολογισμός των συντεταγμένων αλλά και η συσχέτιση των άπειρων σημείων προσθέτει επιπλέον επεξεργασία της διαδικασίας. Πλέον, η συμβολή των υπολογιστών είναι σημαντική

καθώς αποφεύγονται σε μεγάλο βαθμό αυτές οι υπολογιστικές πράξεις καθώς γίνονται μέσω των εξειδικευμένων λογισμικών.

4.4 Στερεοσκοπία στη φωτογραμμετρία

Η φωτογραμμετρία βασίζεται στη μέθοδο της στερεοσκοπίας η οποία επιτρέπει στο άνθρωπο χάρις την εγκεφαλική του ερμηνεία να αντιλαμβάνεται τη τρίτη διάσταση. Πιο συγκεκριμένα, το τρισδιάστατο μοντέλο κατασκευάζεται μέσω φωτογραφιών οι οποίες έχουν ληφθεί από διαφορετικές γωνίες και αποστάσεις η κάθε μία ξεχωριστά. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς ο φακός παρατηρεί και καταγράφει εικόνες με αμελητέες διαφορές δημιουργώντας μια τρισδιάστατη αντίληψη της περιοχής.

Είναι σημαντικό να υπάρχει μεγάλο ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των φωτογραφιών καθώς έτσι η αποτύπωση της περιοχής σε τρισδιάστατη μορφή είναι περισσότερο ακριβής.



Σχήμα 12 Βασική αρχή της φωτογραμμετρίας (van Riel, Sjoerd 2016)

4.5 Προϊόντα

Έπειτα από την επεξεργασία των δεδομένων σχηματίζονται προϊόντα τα οποία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα φωτογραφικά προϊόντα, τα υπολογιστικά αποτελέσματα και τους χάρτες.

Φωτογραφικά προϊόντα

Τα φωτογραφικά προϊόντα μπορεί να είναι είτε μεμονωμένες εικόνες είτε σύνθετα τα οποία σχηματίζονται από επικαλυπτόμενες φωτογραφίες. Κατά την διάρκεια της αποτύπωσης δημιουργείται μια εικόνα με αρκετά σφάλματα οι οποίες με μεγέθυνση είναι χρήσιμες για μελέτες σχεδιασμού. Για μεγαλύτερη ακρίβεια τα σφάλματα του χάρτη χρειάζεται να περάσουν από διόρθωση η οποία εφόσον το έδαφος έχει ανάγλυφο τα σφάλματα θα μειωθούν αλλά δεν θα μηδενιστούν. Μόνο η ορθοφωτογραφία είναι γεωμετρικά ακριβής με έναν χάρτη. Τα σύνθετα των φωτογραφιών είναι χρήσιμα για μελέτες σχεδιασμού και είναι οι ορθοφωτοχάρτες.

Υπολογιστικά αποτελέσματα

Η πιο πετυχημένη εφαρμογή της φωτογραμμετρίας είναι ο εναέριος τριγωνισμός ο οποίος παρέχει τρισδιάστατες θέσεις σημείων οι οποίες είναι δυνατές να προβληθούν σε οποιοδήποτε σύστημα συντεταγμένων. Το πιο γνωστό προϊόν για την αναπαράσταση γήινης επιφάνειας είναι το DEM (Digital Elevation Model).

Χάρτες

Ίσως το πιο σημαντικό προϊόν της φωτογραμμετρίας είναι οι χάρτες οι οποίοι παράγονται σε διαφορετικές κλίμακες. Οι τοπογραφικοί χάρτες αποτυπώνουν τα υψομετρικά δεδομένα μιας περιοχής ενώ οι ισομετρικοί χάρτες αποτυπώνουν την οριζόντια θέση των σχηματισμών του εδάφους. Τέλος οι θεματικοί χάρτες προσανατολίζονται σε ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό.

4.6 Φωτογραμμετρική επεξεργασία / Μέθοδος Structure from Motion (SfM)

Η μέθοδος Structure from Motion αποσκοπεί στην κατασκευή μιας τρισδιάστατης απεικόνισης της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας δισδιάστατες εικόνες. Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό χάρη στη τεχνολογική ανάπτυξη των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών, των ψηφιακών φωτογραφιών αλλά και των μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων. Πλέον, είναι δυνατό να κατασκευάζονται τρισδιάστατα μοντέλα που βασίζονται στα νέφη σημείων παράγοντας ψηφιακά μοντέλα επιφανειών χωρίς ακριβό εξοπλισμό.

Η μέθοδος αυτή έχει ως βάση την στερεοσκοπία. Τα σημεία δέχονται την επεξεργασία του τριγωνισμού δηλαδή υπολογίζονται τα x , y , z των σημείων με στόχο την δημιουργία του νέφους σημείων. Για μεγαλύτερη ακρίβεια του μοντέλου χρειάζονται αρκετές φωτογραφίες οι οποίες να έχουν ληφθεί από την ίδια ψηφιακή κάμερα και από διαφορετικές γωνίες λήψης. Τα σημεία όλων των φωτογραφιών επεξεργάζονται από εξειδικευμένα λογισμικά τα οποία ταυτίζουν κοινά σημεία όλων των εικόνων. Τα σημεία αυτά σχηματίζονται σε ένα σύστημα συντεταγμένων χώρου εικόνας αλλά με σωστή επεξεργασία είναι δυνατό να ευθυγραμμιστούν με κάποιο γνωστό σύστημα συντεταγμένων. Για να επιτευχθεί το παραπάνω απαιτείται η χρήση σημείων ελέγχου εδάφους τα οποία έχουν γνωστές συντεταγμένες.

Τα βήματα που απαιτούνται για την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου ανάγλυφου είναι τα παρακάτω:

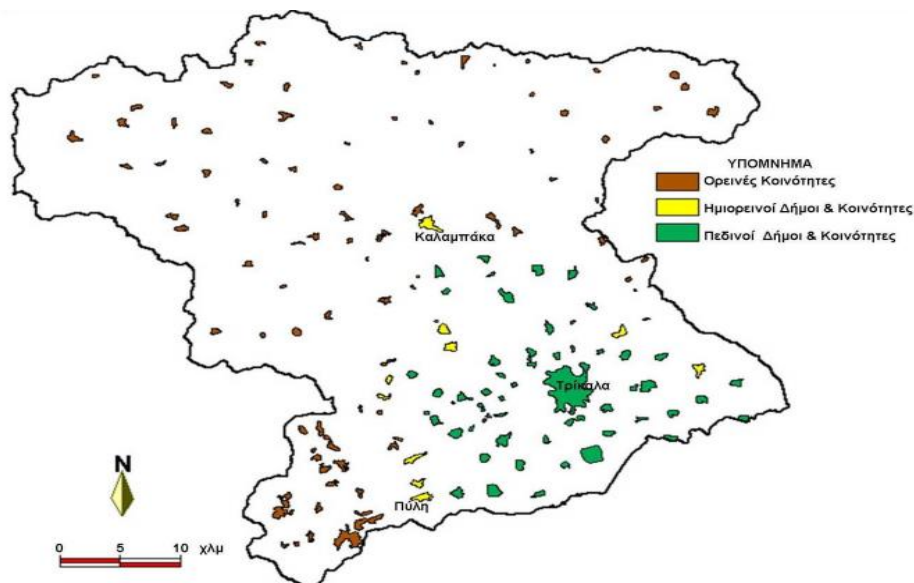
- **1^ο βήμα:** Ταυτίζονται τα σημεία που βρίσκονται σε διαδοχικές φωτογραφίες και πραγματοποιείται ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ τους και της θέσης των σημείων της φωτογράφισης.
- **2^ο βήμα:** Από την στιγμή όπου υπάρξει ταύτιση πολλών σημείων σε δύο ή και περισσότερες φωτογραφίες τότε υπολογίζονται οι συντεταγμένες θέσης, η εστιακή απόσταση του φακού, ο προσανατολισμός της κάμερας αλλά και οι θέσεις των κοινών σημείων στην επιφάνεια της Γης.

- **3^ο βήμα:** Έπειτα από την παραπάνω επεξεργασία σχηματίζεται ένα πυκνό νέφος σημείων από θέσεις που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια που φωτογραφήθηκε.
- **4^ο βήμα:** Από την στιγμή που σχηματίζεται το νέφος σημείων τότε πραγματοποιείται η γεωαναφορά των σημείων σε ένα σχετικό σύστημα συντεταγμένων με δύο τρόπους. Αυτό επιτυγχάνεται έμμεσα με την τοποθέτηση γνωστών σημείων ελέγχου στο έδαφος είτε άμεσα όταν οι θέσεις των σημείων της φωτογράφισης είναι γνωστές.
- **5^ο βήμα:** Πραγματοποιείται η δημιουργία των τελικών προϊόντων τα οποία είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αλλά και οι ορθοφωτογραφίες.

Κεφάλαιο 5: Περιοχή Έρευνας

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο νομό Τρικάλων ο οποίος ανήκει στην περιφέρεια Θεσσαλίας καθιστώντας τη μια από τις 5 περιφερειακές ενότητες της Θεσσαλίας. Ο πληθυσμός του νομού Τρικάλων με βάση τα στοιχεία της τελευταίας απογραφής του 2021 ανέρχεται στους 122.061 κατοίκους.

Η περιφερειακή ενότητα Τρικάλων χαρακτηρίζεται ως η πιο ορεινή από τις υπόλοιπες καθώς το 71,21 % της επιφάνειας των δήμων και των κοινοτήτων καλύπτεται από απότομους ορεινούς όγκους δημιουργώντας εδαφικές πτυχώσεις. Επιπλέον, στην ορεινή ζώνη συγκαταλέγονται δήμοι ή κοινότητες οι οποίοι βρίσκονται σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 800 μέτρων (Μπαθρέλλου 2005). Ακόμη, σε ποσοστό 16,82 % βρίσκονται οι δήμοι και οι κοινότητες των οποίων το απόλυτο υψόμετρο βρίσκεται χαμηλότερα από τα 800 μέτρα. Τέλος, οι δήμοι και οι κοινότητες που βρίσκονται σε υψόμετρο 300 - 400 μέτρων θεωρούνται ημιορεινές με ποσοστό 11,97 %.



Χάρτης 1 Ο διαχωρισμός των δήμων και των κοινοτήτων της Περιφερειακής Ενότητας Τρικάλων (Μπαθρέλλου 2005)

Όσον αφορά το κλίμα στην περιφερειακή ενότητα Τρικάλων αυτό είναι ηπειρωτικό με αρκετό κρύο τους χειμερινούς μήνες και με ζεστά καλοκαίρια. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται στους 16 με 17 C στις πεδινές περιοχές ενώ χαμηλότερη είναι αυτή στις ορεινές περιοχές.

Κεφάλαιο 6: Αστοχίες προκαλούμενες από την κακοκαιρία Daniel

Από τις 4 έως τις 8 Σεπτεμβρίου 2023 καταγράφηκε ένα από τα πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα που έπληξαν την Ελλάδα. Η κακοκαιρία Daniel ήταν ο πιο θανατηφόρος κυκλώνας της Μεσογείου επηρεάζοντας Ελλάδα, Τουρκία, Βουλγαρία, Ισραήλ, Αίγυπτο και Λιβύη. Στην Ελλάδα η περιοχή της Θεσσαλίας επηρεάστηκε περισσότερο από κάθε άλλο μέρος με πλημμύρες και κατολισθήσεις να έχουν καταστρέψει καλλιέργειες και υποδομές τις ημέρες της κακοκαιρίας Daniel. (Dimitriou et al 2024)

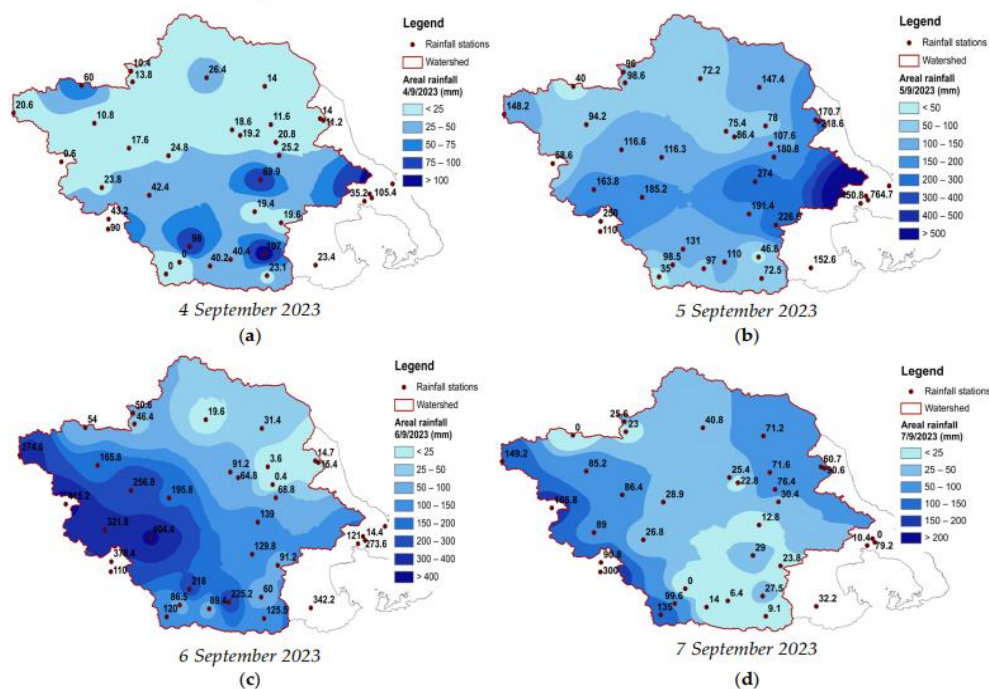


Εικόνα 5 Κατολίσθηση στη Πύρρα Τρικάλων (Φωτογραφία Σ. Βαλκανιώτης 2023)

6.1 Χαρακτηριστικά του φαινομένου

Η κακοκαιρία του Daniel έσπασε κάθε ρεκόρ έντασης σε διάφορες περιοχές της Θεσσαλίας. Χαρακτηριστικά ο μετεωρολογικός σταθμός της Μακρινίτσας κατέγραψε από τις 4 Σεπτεμβρίου μέχρι τις 7 Σεπτεμβρίου κάτι περισσότερο από 1200 (mm) χιλιοστά βροχής ποσότητα η οποία μεταφράζεται σε χιλιοστά 1,5 χρόνου μέσης βροχόπτωσης στην περιοχή. Παρόμοια κατάσταση και στον μετεωρολογικό σταθμό της Ζαγοράς ο οποίος κατέγραψε 1095 (mm) χιλιοστά βροχής στην περιοχή

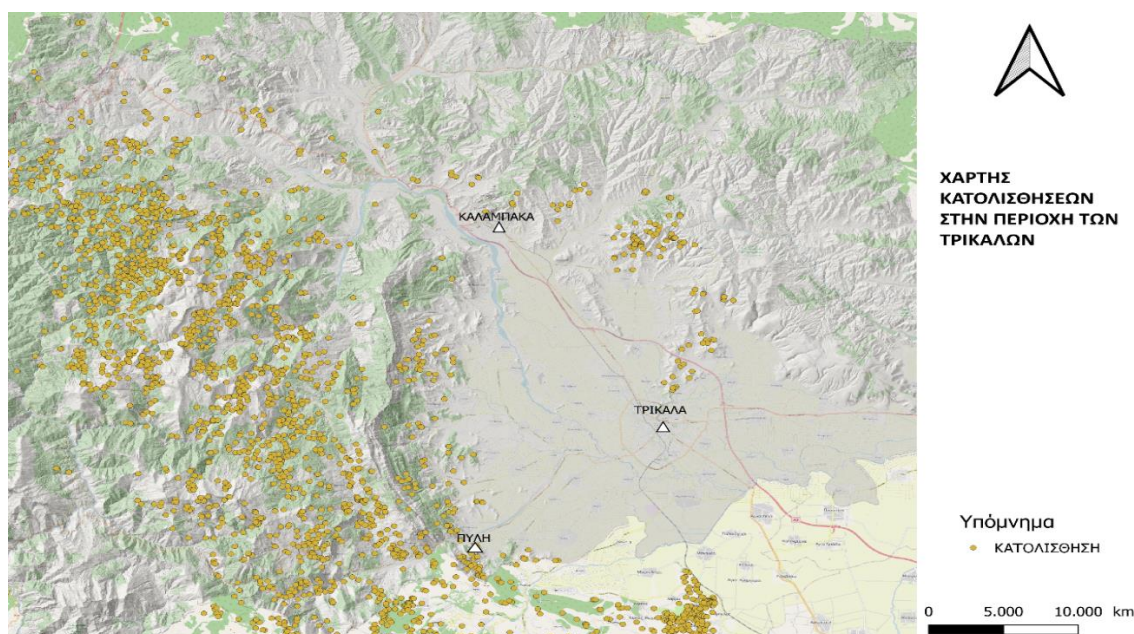
(Dimitriou et al 2024) . Όπως φαίνεται ήταν μία κακοκαιρία η οποία έσπασε αρκετά ρεκόρ βροχόπτωσης σε πολλές περιοχές της Θεσσαλίας.



Σχήμα 13 Χωρική κατανομή των ημερησίων βροχοπτώσεων (Dimitriou et al 2024)

6.2 Κατολισθήσεις στην περιοχή έρευνας

Εξαιτίας του τεράστιου ποσοστού βροχόπτωσης στην περιοχή της Θεσσαλίας και κυρίως στο δυτικό κομμάτι της Θεσσαλίας εκτός από πλημμύρες προκλήθηκαν και κατολισθήσεις οι οποίες ήταν καταστροφικές. Σε υψόμετρο κοντά στα 1800 μέτρα εκδηλώθηκε μία μεγάλη κατολίσθηση.



Χάρτης 2 Χάρτης με κατολισθήσεις στην περιοχή των Τρικάλων

Επίσης, 3 χρόνια πριν την κακοκαιρία Daniel μία ακόμη κακοκαιρία έπληξε την περιοχή μελέτης. Η κακοκαιρία Ιανός έπληξε την περιοχή μελέτης με μεγάλο όγκο βροχόπτωσης προκαλώντας κατολίσθησεις στη περιοχή.



Εικόνα 6 Μετακινούμενο υλικό το οποίο δημιούργησε φυσικό φράγμα (Φωτογραφία Σ. Βαλκανιώτης 2023)

Τα μετακινούμενα υλικά της κατολίσθησης σε συνδυασμό με υλικά από μία ακόμη μικρότερης έκτασης έφραξαν το ρυάκι που διαπερνούσε ανάμεσα τους και δημιούργησαν ένα φυσικό φράγμα.



Εικόνα 7 Η λίμνη που σχηματίστηκε στη περιοχή (Φωτογραφία Σ. Βαλκανιώτης 2023)

6.3 Γεωμετρικά στοιχεία της κατολίσθησης και του φράγματος

Όπως είναι εμφανές από τις εικόνες πρόκειται για μία μεγάλη σε έκταση κατολίσθηση. Το συνολικό μήκος της ολισθαίνουσας μάζας φτάνει τα 580 μέτρα ενώ το πλάτος της ολισθαίνουσας μάζας είναι 230 μέτρα. Επιπλέον, οι κατακρημνίσεις έχουν μέσο όρο 50 μέτρα. Όσον αφορά τα μετακινούμενα υλικά που δημιουργούν το φυσικό φράγμα στη περιοχή φτάνουν περίπου τα 20 μέτρα ύψος. Τα υλικά αυτά εμποδίζουν την ροή νερού προς τα κατάντη δημιουργώντας μία τεχνητή λίμνη.



Εικόνα 8 Ενδεικτικά το μήκος, το πλάτος και οι κατακρημνίσεις της κατολίσθησης στη περιοχή μελέτης

Κεφάλαιο 7: Γεωλογία, Υδρογεωλογία και κλιματικά στοιχεία

7.1 Γεωλογία

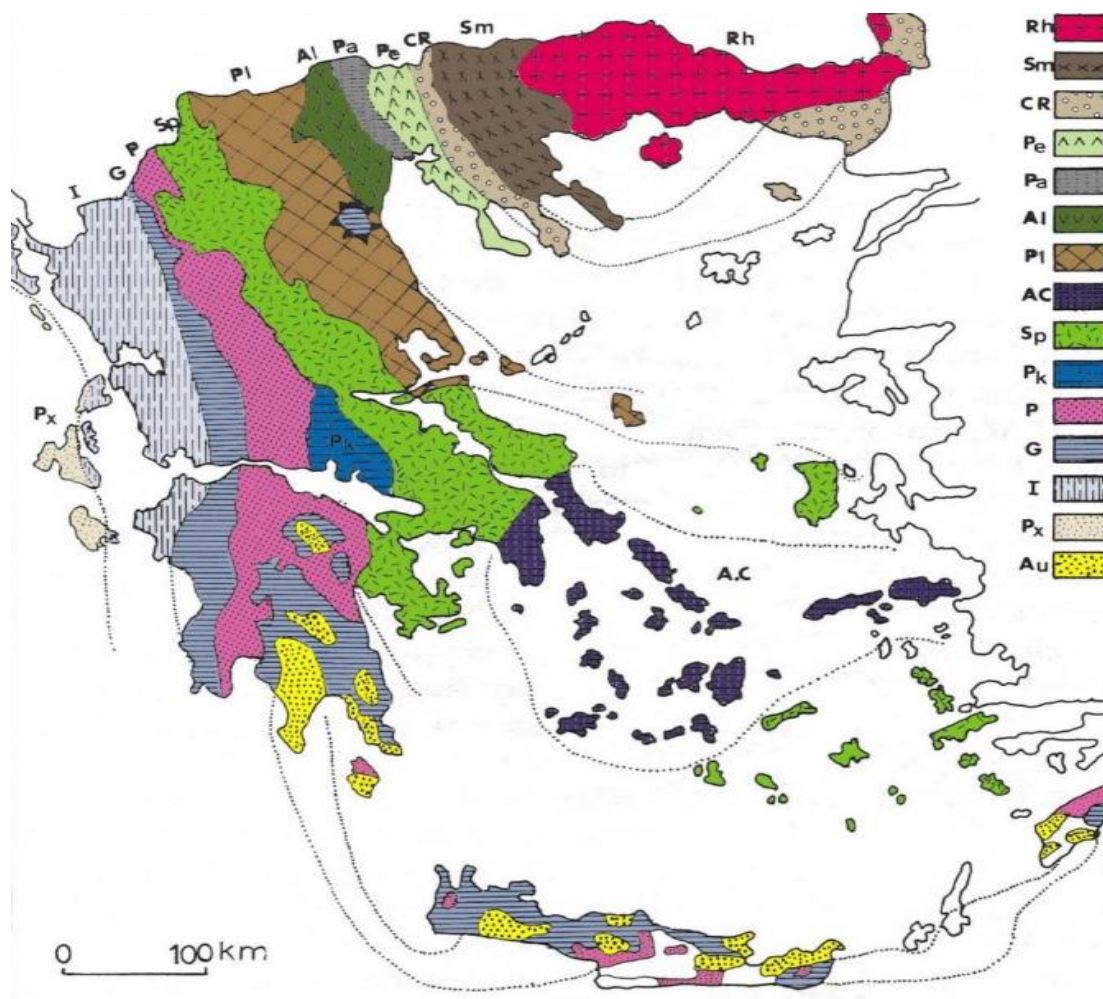
Η σημερινή γεωλογική δομή του Ελληνικού χώρου οφείλεται στην έντονη τεκτονική εξέλιξη που υπέστη κατά την αλπική ορογένεση. Αποτέλεσμα αυτής της τεκτονικής εξέλιξης ήταν και η έντονη πτύχωση των Ελληνίδων.

Οι Ελληνίδες ζώνες που έχουν προκύψει είναι από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά οι εξής:

- Η μάζα της Ροδόπης
- Η Σερβομακεδονική μάζα
- Η Περιροδοπική ζώνη
- Η ζώνη Αξιού (Υποδιαιρείται σε υποζώνες Παιονίας, Πάικου και Αλμωπίας)
- Η Πελαγονική ζώνη
- Η Αττικό-κυκλαδική ζώνη
- Η Υποπελαγονική ζώνη
- Η ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας

- Η ζώνη Ωλονού-Πίνδου
- Η ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης
- Η Ιόνιος ζώνη
- Η ζώνη Παξών

Οι Ελληνίδες χωρίζονται σε «Εσωτερικές» και «Εξωτερικές». Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός πως οι Εσωτερικές Ελληνίδες υπέστησαν την πρώιμη ορογενετική δράση κάτι το οποίο δεν συνέβη στις Εξωτερικές. Στις Εσωτερικές Ελληνίδες τοποθετούνται οι ζώνες Περιροδοπική, Αξιού, Πελαγονική, Αττικό-κυκλαδική και Υποπελαγονική και στις Εξωτερικές οι Παρνασσού-Γκιώνας, Ωλονού-Πίνδου, Γαβρόβου-Τρίπολης, Ιόνιος και Παξών. Οι μάζες Ροδόπης και Σερβομακεδονικής χαρακτηρίζονται ως «Ελληνική Ενδοχώρα» (Μουντράκης 2020).



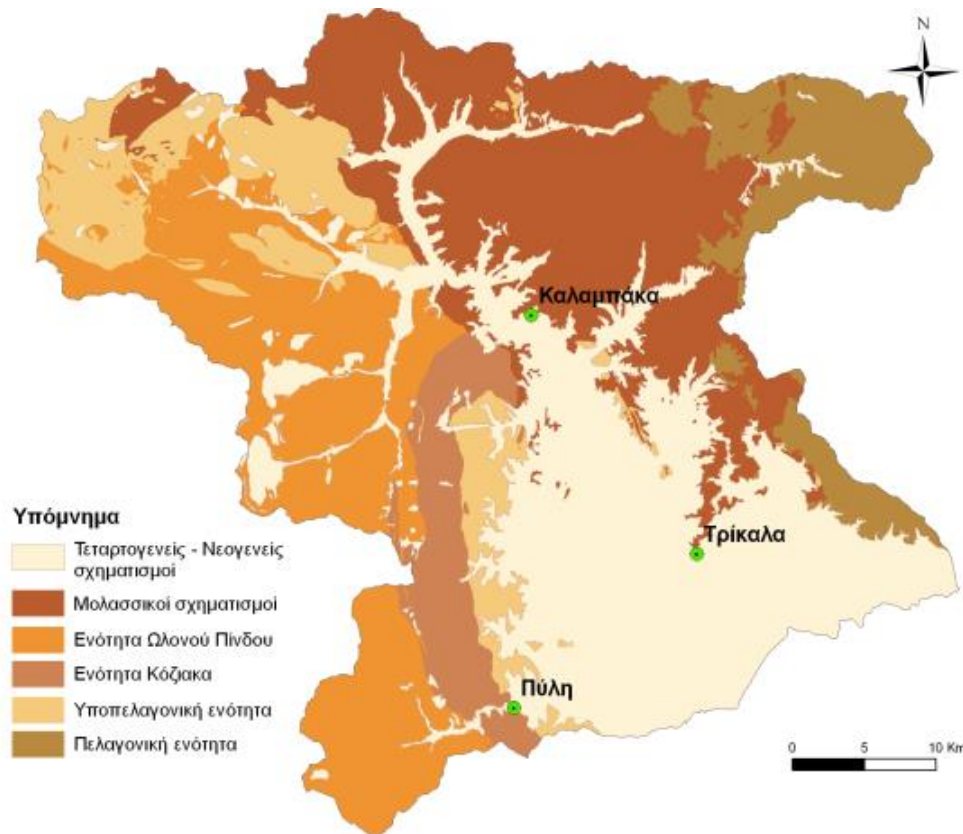
Χάρτης 3 Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος (Μουντράκης 2020)

Η περιοχή της Θεσσαλίας συγκροτείται από πετρώματα τα οποία ανήκουν στις εξής λιθοστρωματογραφικές ενότητες:

- Πελαγονική Ζώνη
- Υποπελαγονική Ζώνη
- Ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας ή Ζώνη Κόζιακα
- Ζώνη Ωλονού – Πίνδου

Οι παραπάνω ζώνες βρίσκονται επωθημένες η μία πάνω στην άλλη με διεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Η νεογενής λεκάνη της Δυτικής Θεσσαλίας έχει δημιουργηθεί εξαιτίας του μεταλλικού εφελκυσμού διεύθυνσης ΒΑ – ΝΔ (Βαλκανιώτης 2005).

Υπερκείμενοι των αλπικών σχηματισμών τοποθετούνται οι μολασσικοί σχηματισμοί της Μεσοελληνικής Αύλακας οι οποίοι εμφανίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της λεκάνης (Βαλκανιώτης 2005).



Χάρτης 4 Οι ζώνες που εντοπίζονται στην Περιφερειακή Ενότητα Τρικάλων (Μπαθρέλλος 2008)

7.1.1 Αλπικοί σχηματισμοί

Πελαγονική ζώνη

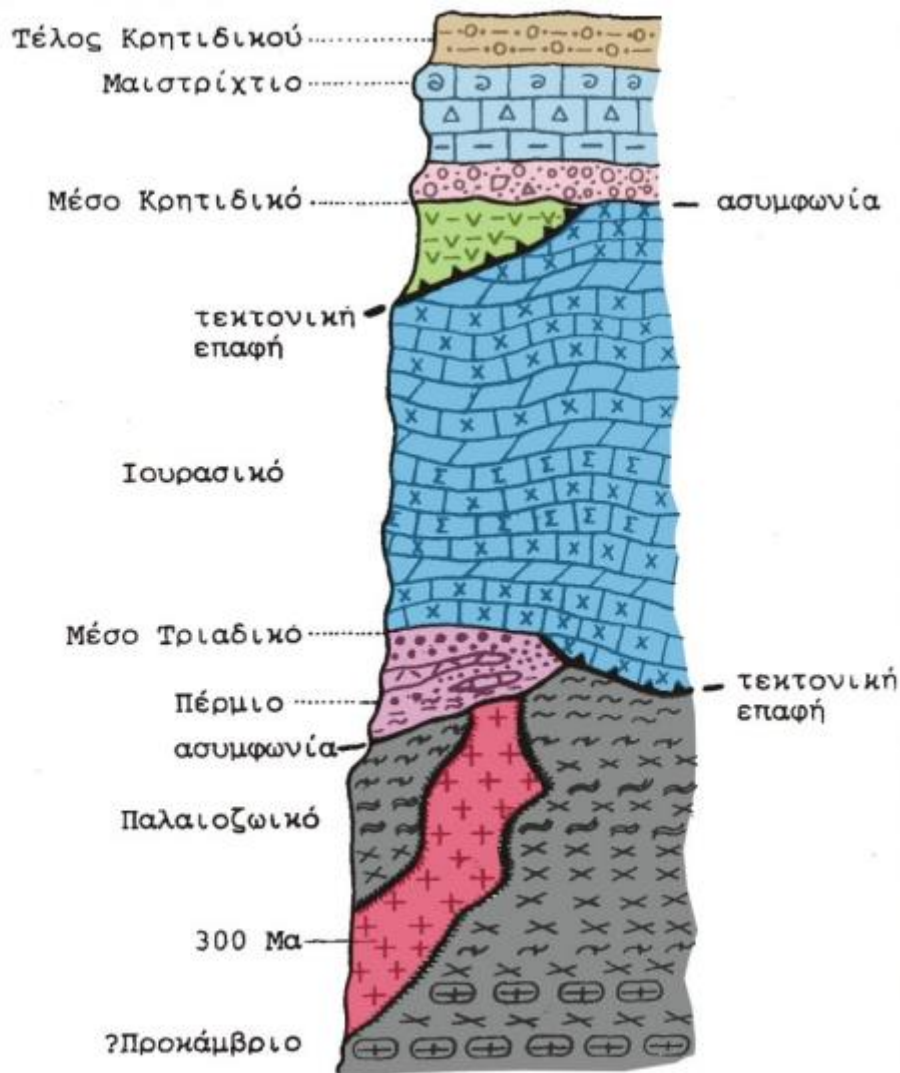
Η Πελαγονική ζώνη εκτείνεται στους ορεινούς όγκους του Βόρα, του Βέρνου, του Βερμίου, στη περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας. Επιπλέον εμφανίζεται στα Πιέρια και στην ευρύτερη περιοχή του Ολύμπου αλλά και στην Ανατολική και Βόρεια Θεσσαλία στο Πήλιο. Τέλος εμφανίζεται στη Βόρεια Εύβοια και στη συνέχεια κάμπτεται προς τις Σποράδες (Μουντράκης 2020).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της Πελαγονικής από τους παλαιότερους προς τους νεότερους:

- **Κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο:** Τα πετρώματα του κρυσταλλοσχιτώδους υποβάθρου είναι αυτά με την μεγαλύτερη εξάπλωση στην ζώνη της Πελαγονικής αποτελώντας το κύριο δομικό της στοιχείο. Το υπόβαθρο της

ζώνης συγκροτείται από διμαρμαρυγιακούς όρθο- και παραγνευσίους, οι οποίοι κατά θέσεις είναι οφθαλμοειδείς, αλλά και από γνευσιοσχιστόλιθους με παρεμβολές αμφιβολιτικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών (Βαλκανιώτης 2005, Μουντράκης 2020) .

- **Γνευσιωμένοι πλουτωνίτες του Άνω Λιθανθρακοφόρου :** Μέσα στα πετρώματα του υποβάθρου εμφανίζονται μεγάλοι πλουτωνικοί όγκοι οι οποίοι είναι μαγματικές διεισδύσεις. Στο μεγαλύτερο μέρος τους οι πλουτωνίτες εμφανίζονται γνευσιωμένοι καθώς δεν υπέστησαν την αλπική μεταμόρφωση του Άνω Ιουρασικού-Κάτω Κρητιδικού (Μουντράκης 2020).
- **Περμοτριάδικές μετακλαστικές ακολουθίες:** Μία ιζηματογενής σειρά με πάχος 200 μέτρα αποτέθηκε πάνω από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Πελαγονικής μέσα στο οποίο παρεμβάλλονται όξινες και βασικές λάβες. Αυτή η ακολουθία αποτέθηκε στο Πέρμιο και Κάτω Τριαδικό και τα πετρώματα από τα οποία συγκροτείται είναι φυλλίτες, μετα-πελίτες, μετά-αρκόζες, σερικιτικοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι, μετά-ψαμμίτες, χαλαζιακά μετά-κροκαλοπαγή, φακοί ασβεστολίθων, ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, μετα-βασάλτες, μετα-ρυόλιθοι και μετα-τόφφοι. (Μουντράκης 2020)
- **Ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού – Ιουρασικού :** Πάνω από τις περμοτριάδικές ακολουθίες τοποθετούνται δύο ξεχωριστά ανθρακικά καλύμματα τα οποία αποτέθηκαν στα περιθώρια της Πελαγονικής ζώνης , ανατολικό και δυτικό, κατά τη διάρκεια Τριαδικού – Ιουρασικού. Το σύνολο αυτών των ανθρακικών ιζημάτων ονομάζεται «Μεσοζωικό ανθρακικό κάλυμμα της Πελαγονικής» (Μουντράκης 2020). Το δυτικό κάλυμμα είναι αυτόχθονο και έχει αποτεθεί στο Μέσο Τριαδικό – Άνω Ιουρασικό και βρίσκεται σε συμφωνία με τα μετακλαστικά ιζήματα του Περμοτριάδικού. Επιπλέον, συγκροτείται από ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους λευκούς, τεφρούς, μαύρους, λατυποπαγείς, ταινιωτούς, πλακώδεις, λεπτοπλακώδεις, καθώς και ελάχιστες παρεμβολές λεπτών πηλινικών ενστρώσεων (Μουντράκης 2020). Τέλος υπολογίζεται συνολικού πάχους του καλύμματος στα 600-800 μέτρα.
- **Επικλυσιογενή ιζήματα του Μέσου – Άνω Κρητιδικού :** Κατά την διάρκεια Κενομάνιο- Τουρώνιο στο Μέσο Κρητιδικό θεωρείται πως ξεκίνησε η επίκλυση αν και σε ορισμένες θέσεις ξεκίνησε κατά το Άνω Κρητιδικό (Σαντώνιο ή και Μαιστρίχτιο). Στρωματογραφικά η επίκλυση αποτελείται από Κροκαλοπαγή, μικρολατυποπαγοί και μαργαϊκούς ασβεστολίθους ηλικίας Κενομανίου – Τουρωνίου, μικρολατυποπαγείς ασβεστολίθους ηλικίας Σαντωνίου – Καμπανίου, συμπαγής ασβεστολίθους με απολιθώματα Orbitoides media ηλικίας Μαιστριχτίου και φλύσχη που αρχικά είναι σχιστώδης ασβεστιτικός και στη συνέχεια εξελίσσεται σε ασβεστοπηλιτικό- ψαμμιτικό καταλήγοντας σε πηλιτικό – κροκαλοπαγή με ηλικία Άνω Μαιστριχτίου – Αρχές Παλαιοκαίνου (Μουντράκης 2020). Η παραπάνω στρωματογραφική διάρθρωση αποτυπώνεται από τα παλαιότερα προς τα νεότερα πετρώματα.



Σχήμα 14 Λιθοστρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης (Μουντράκης 2020)

Υποπελαγονική ζώνη

Η Υποπελαγονική ζώνη τοποθετείται δυτικά της Πελαγονικής και εμφανίζεται από την Θεσσαλία έως την Κρήτη. Είναι γνωστή και ως ζώνη Ανατολικής Ελλάδος με την στρωματογραφική της διάρθρωση να μη διαφέρει αρκετά από αυτή της Πελαγονικής ζώνης απουσιάζοντας ωστόσο το Παλαιοζωικό υπόβαθρο. Στη βάση της τοποθετείται μια μετάφαιστειο-ιζηματογενής Περμοτριάδικη σειρά ενώ η ιζηματογένεση της σταματά με απόθεση φλύσχη στο Παλαιόκαινο.

Όσον αφορά την περιοχή έρευνας οι σχηματισμοί της Υποπελαγονικής βρίσκονται στο δυτικό ορεινό κομμάτι της περιοχής και αναλύονται παρακάτω από τους παλαιότερους προς τους νεότερους.

Τα παλαιότερα πετρώματα της Υποπελαγονικής ζώνης είναι οι άστρωτοι, ανοικτότεφροι ή λευκοί **ασβεστόλιθοι** οι οποίοι έχουν Τριαδική ηλικία. Πρόκειται για ασβεστόλιθους οι οποίοι ανήκουν σε μία μεταβατική περιοχή ανάμεσα στην Υποπελαγονική ζώνη και την ζώνη Ωλονού – Πίνδου (Μπαθρέλλου 2005).

Στη συνέχεια παρατηρούνται επίσης **ασβεστόλιθοι** λευκοί και τεφροί οι οποίοι είναι στρωμένοι και περιέχουν φακούς ραδιολαριτών. Η ηλικία των ασβεστολίθων αυτών είναι Ιουρασικής.

Ακολουθεί το **οφειολιθικό κάλυμμα**. Αποτελείται από σχηματισμούς ωκεάνιας περιοχής όπως υπερβασικά πετρώματα με δουνίτες, περιδοτίτες και πυροξενίτες να εμφανίζονται ενώ και βασικά πετρώματα όπως γάββρους και διορίτες. (Μπαθρέλλου 2005).

Επίσης, εμφανίζονται **ασβεστόλιθοι της Ανωκρητιδικής επίκλυσης** στη ζώνη. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί είναι ρουδιστοφόροι και πολλές φορές εναλλάσσονται με ερυθρόχρωμους πλακώδεις ασβεστολίθους ενώ έχουν πάχος 300-400 μέτρα.

Τέλος, ο πιο νέος σχηματισμός που εμφανίζεται είναι ο φλύσχης. Η ηλικία του είναι Μαιστρίχτιο – Παλαιόκαινο και αποτελείται από εναλλαγές ιλυωδών, μαρμαρυγιούχων ψαμμιτών (Μπαθρέλλου 2005).

Ενότητα Κόζιακα ή Δυτικής Θεσσαλίας

- **Φλύσχης:** Πρόκειται για εναλλαγές χονδρόκοκκων ψαμμιτικών στρωμάτων με πάχος 10-80 εκατοστά και πηλιτικών στρωμάτων με πάχος 5-40 εκατοστά ενώ υπάρχουν παρεμβολές μαργαϊκών ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών τα οποία προέρχονται από μεταμορφωμένα πετρώματα. Επίσης, στα ανώτερα στρώματα εμφανίζεται ο Άγριος Φλύσχης από Τριαδικούς ασβεστολίθους και Ανωκρητιδικούς ασβεστολίθους. (Λέκκας 1988).
- **Σχηματισμός Ερυθρών Πηλιτών Αμυγδαλής:** Στρώματα ερυθρών πηλιτών με πάχος 3-10 εκατοστά με λεπτούς οριζόντες μικρολατυποπαγών ασβεστολίθων και θραύσματα ραδιολαριτών να παρεμβάλλονται με σταδιακή μείωση προς τα επάνω. Η ηλικία του σχηματισμού είναι Παλαιοκαίνου. (Λέκκας 1988).
- **Σχηματισμός Ασβεστολίθων Θυμιάματος:** Ερυθροί-λευκοί πελαγικοί και κατά θέσεις μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι με πάχος σχεδόν 60 μέτρα. Από οφειόλιθους, ραδιολαρίτες, κερατόλιθους, ερυθρούς πηλίτες και θραύσματα ρουδιστών προέρχονται οι μικρολατύπες οι οποίες έχουν μέγεθος έως 2 εκατοστά. Η ηλικία τους τοποθετείται στο Άνω Κρητιδικό (Κενομάνιο – Μαιστρίχτιο) με βάση τη μικροπανίδα (Λέκκας 1988).
- **Κλαστικός Σχηματισμός Πόρτης:** Πρόκειται για εναλλαγές στρωμάτων ψαμμιτών, πηλιτών, μαργαϊκών ασβεστολίθων, κερατόλιθων και ραδιολαριτών με παρεμβολές οφειολιθικών τεμαχών με πάχος έως και 30 εκατοστά αλλά και αποστρογγυλεμένων ογκολίθων από ωολιθικούς-μικρολατυποπαγείς ασβεστολίθους με ηλικία Δογγέριο – Μάλμιο. Επίσης, οι ψαμμίτες οι οποίοι είναι χονδρομεσόκοκοι και με υλικό το οποίο προέρχεται από οφειολιθικά πετρώματα έχουν πάχος 10-40 εκατοστά. Η ηλικία του σχηματισμού ο οποίος έχει ονομαστεί «Βοιωτικός Φλύσχης» είναι Τιθώνιο – Άλβιο (Λέκκας 1988).
- **Σχηματισμός Ραδιολαριτών – Πηλιτών Κόζιακα:** Ραδιολαρίτες, πηλίτες, και κερατόλιθοι συγκροτούν τους βασικούς λιθολογικούς τύπους του σχηματισμού οι οποίοι επίσης υπερέχουν σε έκταση και πάχους. Οι

ερυθρόχρωμοι ραδιολαρίτες-πηλίτες εναλλάσσονται μεταξύ τους και έχουν πάχος 5-15 εκατοστά. Η βάση του σχηματισμού τοποθετείται στο Λαδίνιο και η βάση του στο Τιθώνιο – Βαλανζίνιο ενώ το πάχος του είναι 400-700 μέτρα (Λέκκας 1988).

- **Σχηματισμός Ασβεστολίθων Κόζιακα:** Πρόκειται για λευκούς, υπόλευκους παχυστρωματώδεις έως άστρωτους ασβεστολίθους οι οποίοι γίνονται κατά θέσεις μικρολατυποπαγείς. Το πάχος τους κυμαίνεται από 40 έως και 150 μέτρα ενώ η ηλικία τους τοποθετείται στο Άνω Τριαδικό έως Δογγέριο – Μάλμιο.
- **Σχηματισμός Ασβεστολίθων Πορταϊκού:** Ο σχηματισμός αποτελείται από λευκούς – ερυθρωπούς λεπτοστρωματώδεις ασβεστολίθους με ενστρώσεις πυριτόλιθων οι οποίοι ελαττώνονται σταδιακά προς τα πάνω. Επιπλέον, προς τα άνω εξελίσσονται σε μεσοστρωματώδεις νηριτικούς ασβεστολίθους Ιουραϊκής ηλικίας (Λέκκας 1988).
- **Κλαστικός σχηματισμός Πύλης:** Εντοπίζονται εναλλαγές τεφρόχρωων ψαμμιτικών σχηματισμών με πάχος 5-20 εκατοστά, ερυθρών πηλιτικών στρωμάτων, μαργαϊκών ασβεστολιθικών στρωμάτων και λεπτών στρωμάτων σπαρίτη. Τα ανώτερα στρώματα έχουν ηλικία Κάτω Νόριο με το πάχος να μη ξεπερνάει τα 25 μέτρα (Λέκκας 1988).

Ζώνη Ωλονού – Πίνδου

Η ζώνη Ωλονού – Πίνδου θεωρήθηκε η πιο βαθιά Ελληνική αύλακα και συνήθως χαρακτηρίζεται ως «το Ελληνικό ευγεωσύγκλινο» κατά τη διάρκεια του Μεσοζωικού (Μουντράκης 2020).

Η συγκεκριμένη ζώνη είναι η εξωτερικότερη στη περιοχή έρευνας και αποτελείται από πελαγικά ιζήματα ανθρακικά με ηλικία η οποία τοποθετείται από το Τριαδικό έως το Άνω Κρητιδικό και ιζήματα φλύσχη Πίνδου με ηλικία Παλαιοκαίνου – Άνω Ηωκαίνου. Οι παρακάτω σχηματισμοί αναφέρονται από τους παλαιότερους προς τους νεότερους.

Ασβεστόλιθοι του Τριαδικού στους οποίους έχουν εντοπιστεί απολιθώματα *Halobia* sp και κωνόδοντων. Το πάχος των στρωμάτων εκτιμάται στα 15 εκατοστά. Τα υπερκείμενα στρώματα αποτελούνται από αργιλομαργαϊκούς σχιστόλιθους πράσινου χρώματος και από μαργαϊκούς ασβεστολίθους τεφρού χρώματος. Το πάχος όλου του σχηματισμού φτάνει έως τα 150 μέτρα.

Στη συνέχεια παρατηρούνται **πολύχρωμοι κερατόλιθοι** οι οποίοι συγκροτούνται από εναλλαγές κυανών, ερυθρών, πράσινων και μαύρων κερατόλιθων με πάχος έως 20 εκατοστά και μέσα σε αυτούς εμφανίζονται λεπτές ενστρώσεις αργιλοπυριτικού υλικού και λατυποπαγών ασβεστολίθων (Μπαθρέλλου 2005). Το πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 120 μέτρα ενώ η ηλικία του είναι Άνω Δογγέριο – Τιθώνιο.

Ασβεστόλιθοι με Καλπιονέλλες παρατηρούνται στη ζώνη με το πάχος τους να φτάνει τα 90 μέτρα. Τα υποκείμενα μέλη της σειράς αυτής αποτελούνται από ερυθρούς και κιτρινοπράσινους ασβεστολίθους ενώ τα υπερκείμενα από εναλλαγές κόκκινων λεπτοπλακώδων ασβεστολίθων αλλά και γκριζόλευκου με λεπτές

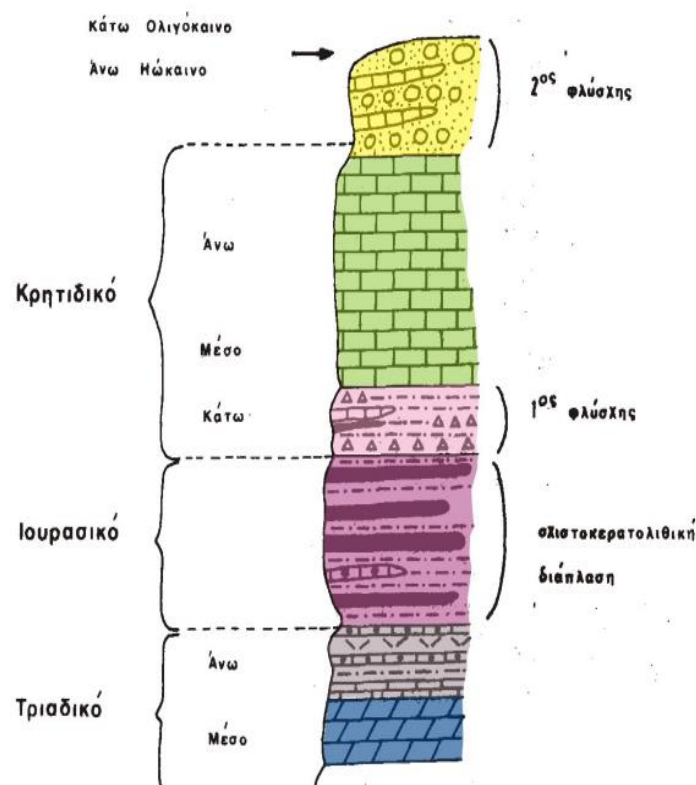
ενστρώσεις κερατόλιθων. Η ηλικία του σχηματισμού είναι άνω Τιθώνιο – Κάτω Βερριάσιο. (Μπαθρέλλου 2005).

Πρώτος Φλύσχος στη συνέχεια ο οποίος αποτελείται από εναλλαγές αργιλομαργαικών ασβεστολίθων, κερατόλιθων, αργιλομαργαικών σχιστολίθων, ερυθρών μαργών και ψαμμιτών (Μπαθρέλλου 2005). Η ηλικία του σχηματισμού είναι Βαλανζίνιο – Τουρώνιο ενώ το συνολικό πάχος του σχηματισμού φτάνει τα 70 μέτρα.

Υπερκείμενα του Πρώτου Φλύσχη τοποθετείται ο **Ανωκρητιδικός ασβεστόλιθος** με ηλικία Τουρώνιο – Μαιστρίχτιο και συνολικό πάχος 160 μέτρα. Πρόκειται για πελαγικούς ασβεστολίθους και λεπτές ενστρώσεις πυριτόλιθων.

Μεταβατική σειρά προς τον φλύσχη παρατηρείται στη συνέχεια με εναλλασσόμενα στρώματα λεπτοστρωματώδων ασβεστολίθων, κλαστικών ασβεστολίθων και ψαμμούχων μαργών. (Πυργιώτης 1997). Αποτελεί το πέρασμα των Ανωκρητιδικών ασβεστολίθων προς φλύσχη με ηλικία Μέσο Μαιστρίχτιο – Κάτω Παλαιόκαινο ενώ το πάχος του σχηματισμού ανέρχεται στα 50 μέτρα.

Τέλος εντοπίζεται ο **δεύτερος Φλύσχος**. Πρόκειται για ψαμμίτες και αργιλικούς σχιστόλιθους με ηλικία Κάτω Παλαιόκαινο – Ηώκαινο.



Σχήμα 15 Λιθοστρωματογραφική στήλη ζώνης Ωλονού - Πίνδου (Μουντράκης 2020)

7.1.2 Μεταλτικοί σχηματισμοί

Οι μεταλτικοί σχηματισμοί που βρίσκονται στη περιοχή έρευνας είναι τα μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας, τα Νεογενή ιζήματα και οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί.

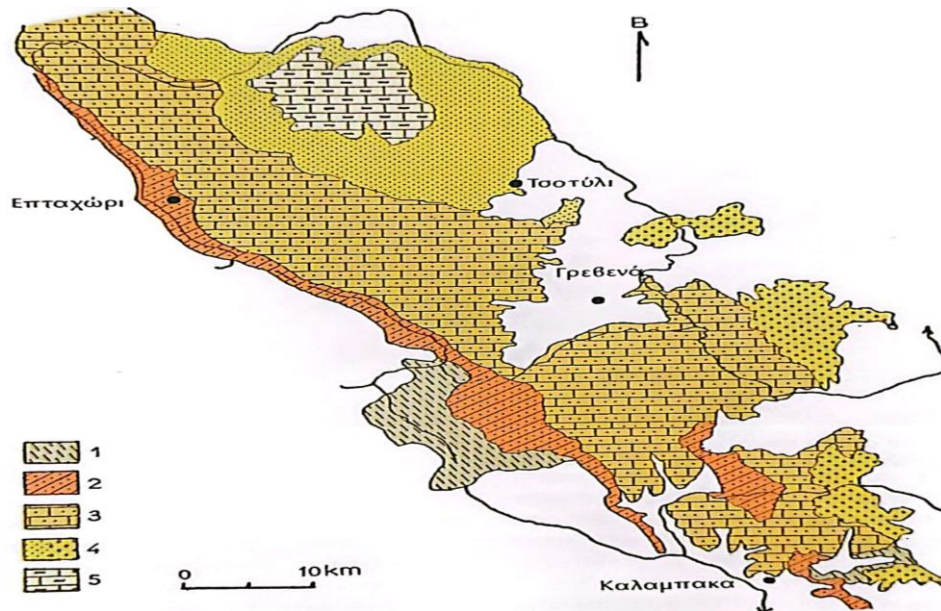
Μεσοελληνική Αύλακα

Η Μεσοελληνική Αύλακα αποτελεί την σημαντικότερη και πιο πλήρης μολασσική αύλακα του Ελληνικού χώρου. Έχει μήκος περίπου 130 χιλιόμετρα και πλάτος που υπερβαίνει τα 40 χιλιόμετρα ενώ η διεύθυνση με την οποία εκτείνεται είναι ΒΔ – ΝΑ παράλληλα στο Ελληνικό ορογενετικό τόξο (Μουντράκης 2020).

Η μεγαλύτερή της εμφάνιση πραγματοποιείται στην Υποπελαγονική ζώνη και ένας μέρος της εμφανίζεται και στη ζώνη Ωλονού – Πίνδου. Το υπόβαθρο της είναι Αλπικό με οφειολιθικές μάζες μεγάλου πάχους και ασβεστολίθους του Μεσοζωικού. Υπερκείμενα του υποβάθρου αποτέθηκαν μολασσικού τύπου ιζήματα με προμήθεια υλικού ιζηματογένεσης από τις οροσειρές της Πίνδου και της Πελαγονικής (Μουντράκης 2020). Η απόθεση αυτή έλαβε χώρα κατά το Άνω Ηώκαινο - Ολιγόκαινο – Μειόκαινο.

- **Σειρά Κρανιάς:** Αποτελείται από κροκαλοπαγή και λατυποπαγή τα οποία επικάθονται στους οφειόλιθους αλλά και από εναλλαγές ιλυολίθων – ψαμμιτών. Το πάχος του υπολογίζεται στα 200 μέτρα ενώ η ηλικία τους είναι Άνω ηώκαινική.
- **Σειρά Επταχωρίου:** Αλληπάλληλα στρώματα μαργών – ιλυολίθων μέσα στα οποία βρίσκονται λιγνιτικά κοιτάσματα. Η ηλικία τους είναι Άνω Ολιγόκαινο ενώ το συνολικό τους πάχος ανέρχεται στα 600 μέτρα.
- **Σειρά Πενταλόφου – Μετεώρων:** Χωρίζεται στα κατώτερα κροκαλοπαγή και στα ανώτερα. Τα κατώτερα κροκαλοπαγή είναι πολύμεικτα με διασταυρούμενη στρώση ενώ τα ανώτερα εμπεριέχουν και ενστρώσεις ψαμμιτών και ιλυολίθων. Η ηλικία τους είναι Ακουιτάνιο ενώ το πάχος τους φτάνει τα 3000 μέτρα καθιστώντας τη σειρά ως την πιο παχιά.

- **Σειρά Τσοτυλίου:** Μια σειρά η οποία αποτελείται από μάργες και λιγνιτικά κοιτάσματα λιμναίας φάσης με πάχος 600 μέτρα και ηλικία Άνω Ακουιτάνιου – Βουρδιγαλίου.
- **Σειρά Όντριας:** Τέλος η νεότερη σειρά της αύλακας περιλαμβάνει από κάτω προς τα επάνω ψαμμίτες, ασβεστόλιθους, μάργες και ψαμμιτομαργαικούς ασβεστολίθους. Η ηλικία τους είναι Βουρδιγάλιο – Άνω Μειόκαινο.



Χάρτης 5 Η Μεσοελληνική Αύλακα στον Ελληνικό χώρο (1) Σειρά Κρανιάς, (2) Σειρά Επταχωρίου, (3) Σειρά Πενταλόφου – Μετεώρων, (4) Σειρά Τσοτυλίου, (5) Σειρά Όντρια (Μουντράκης 2020)

Νεογενείς αποθέσεις

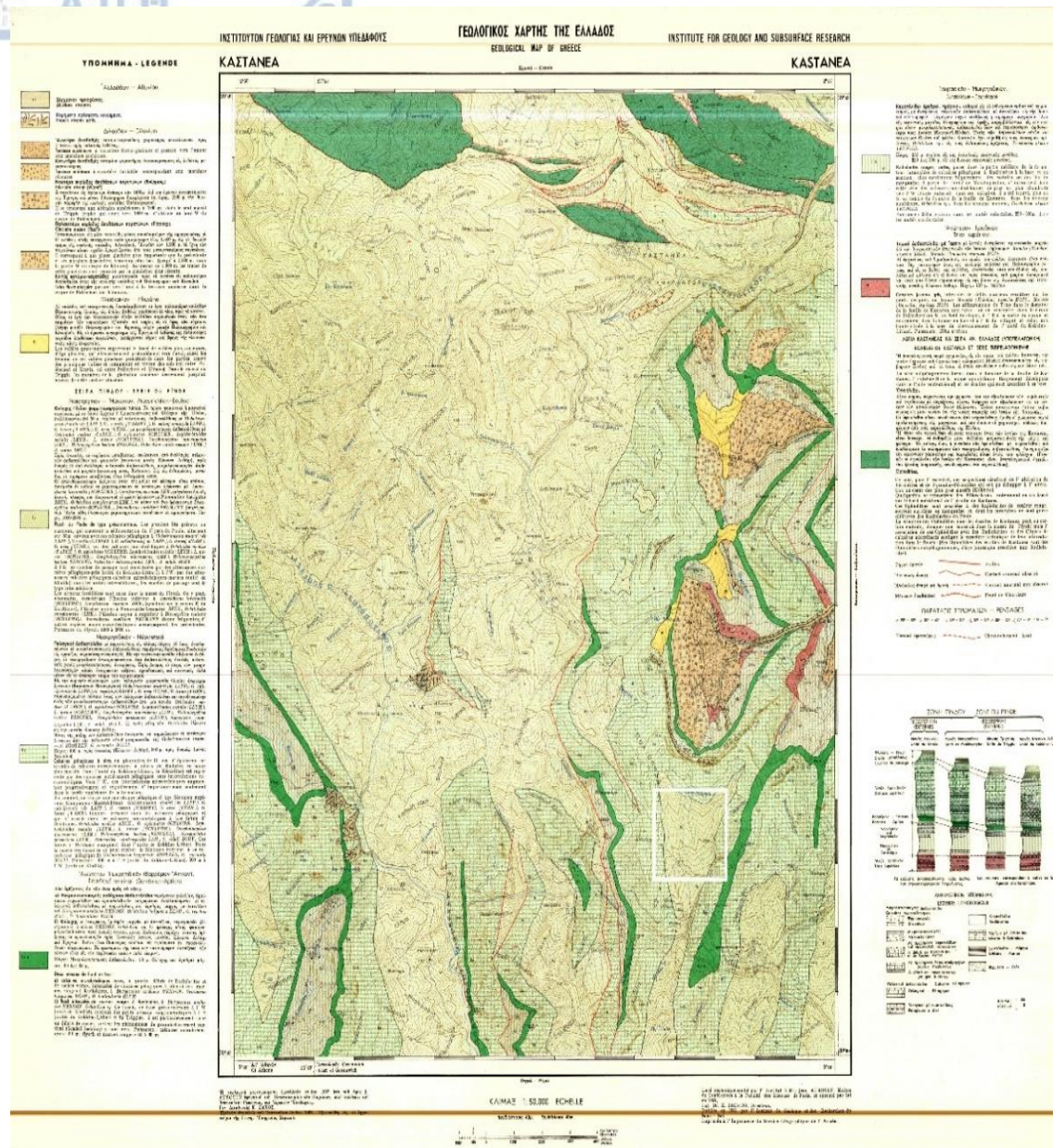
Οι Νεογενείς αποθέσεις που αποκαλύπτονται στη περιοχή έρευνας έχουν συμβεί στο Πλειόκαινο και στο Τεταρτογενές. Οι **Πλειοκαινικοί σχηματισμοί** έχουν βρεθεί στη πεδιάδα της Δυτικής Θεσσαλίας και αποτελούνται κυρίως από ποτάμια και λιμναία λεπτόκοκκα ιζήματα ενώ τα **Τεταρτογενή ιζήματα** που βρίσκονται στα περιθώρια της πεδιάδας της Δυτικής Θεσσαλίας είναι αποθέσεις ερυθροστρωμάτων με πιθανή ηλικία το Άνω Πλειστόκαινο (Βαλκανιώτης 2005).

7.2 Γεωλογία περιοχής κατολίσθησης

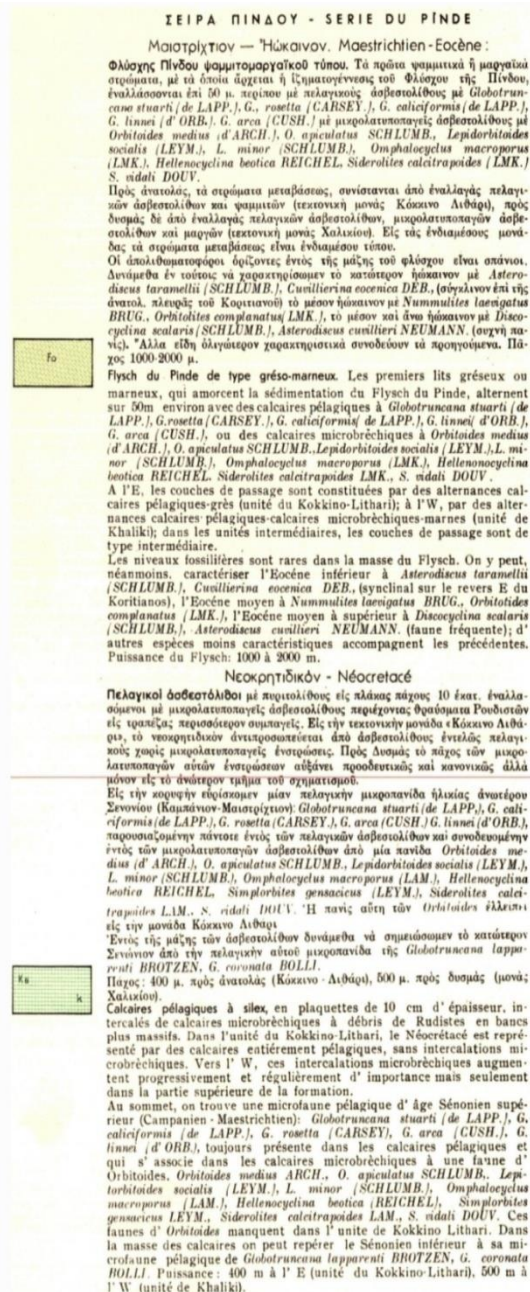
Η κατολίσθηση η οποία πραγματοποιήθηκε την περίοδο όπου η κακοκαιρία Daniel χτύπησε την Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα την περιοχή της Θεσσαλίας τοποθετείται στη ζώνη Ωλονού – Πίνδου με βάση τον παρακάτω γεωλογικό χάρτη της περιοχής.

Πιο συγκεκριμένα είναι Φλύσχης Πίνδου ψαμμιτομαργαικού τύπου. Πρόκειται για εναλλαγή στρωμάτων του φλύσχη με πελαγικούς ασβεστολίθους ηλικίας Μαιστριχτίου – Ηωκαίνου. Επίσης στα όρια του Φλύσχη Πίνδου φαίνονται και

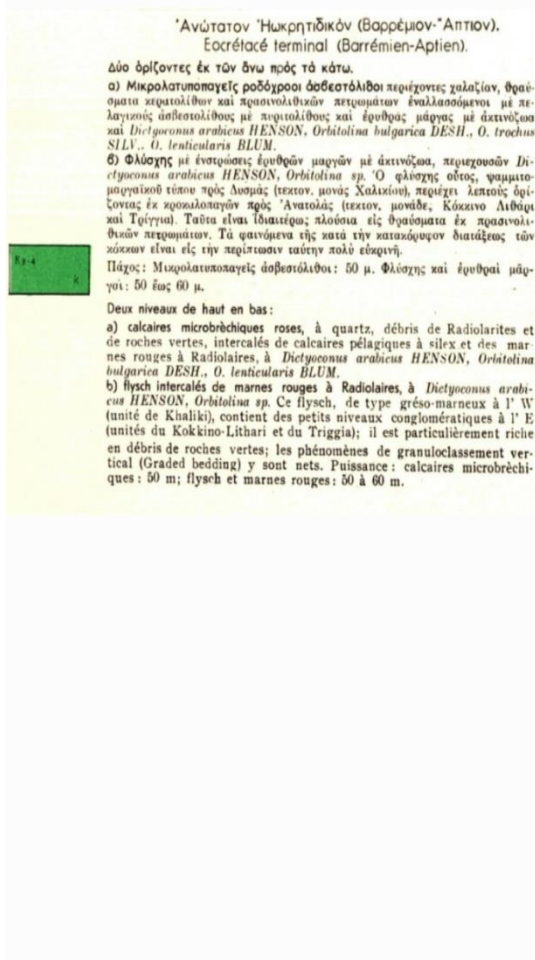
πελαγικοί ασβεστόλιθοι ηλικίας Άνω Σενωνίου οι οποίοι περιέχουν θραύσματα
Ρουδιτών και είναι περισσότερο συμπαγής.



Χάρτης 6 Γεωλογικός χάρτης περιοχής σε κλίμακα 1:50.000 «Φύλλο Καστανέα». Μέσα στο άσπρο πλαίσιο η θέση της κατολίσθησης στη Πύρρα Τρικάλων



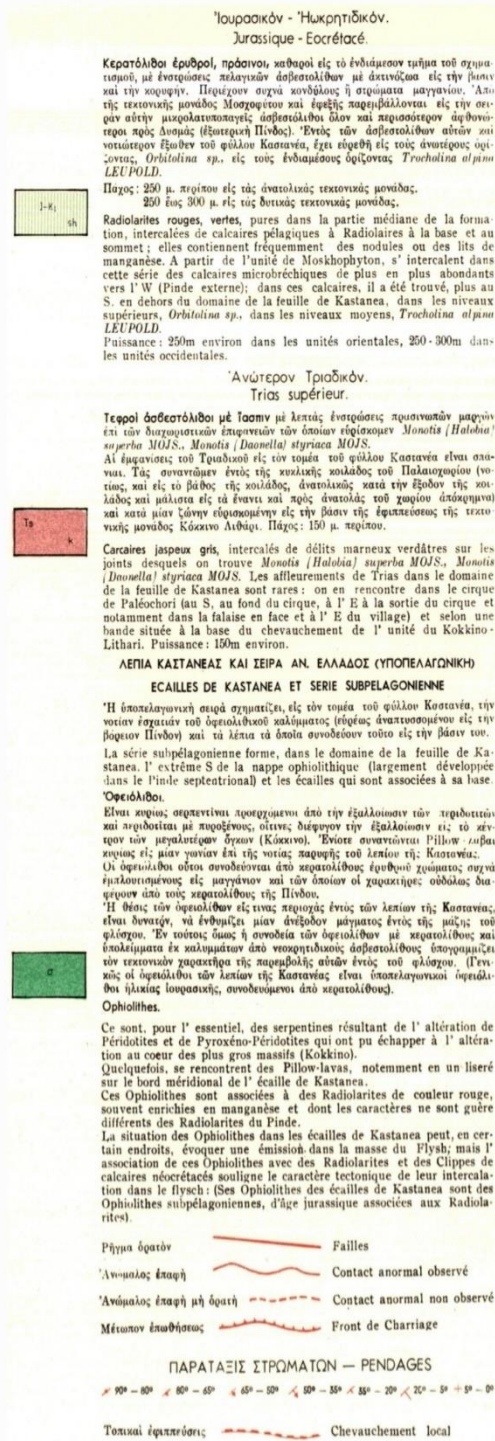
Εικόνα 9 Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη περιοχής μελέτης «Φύλλο Καστανέα»

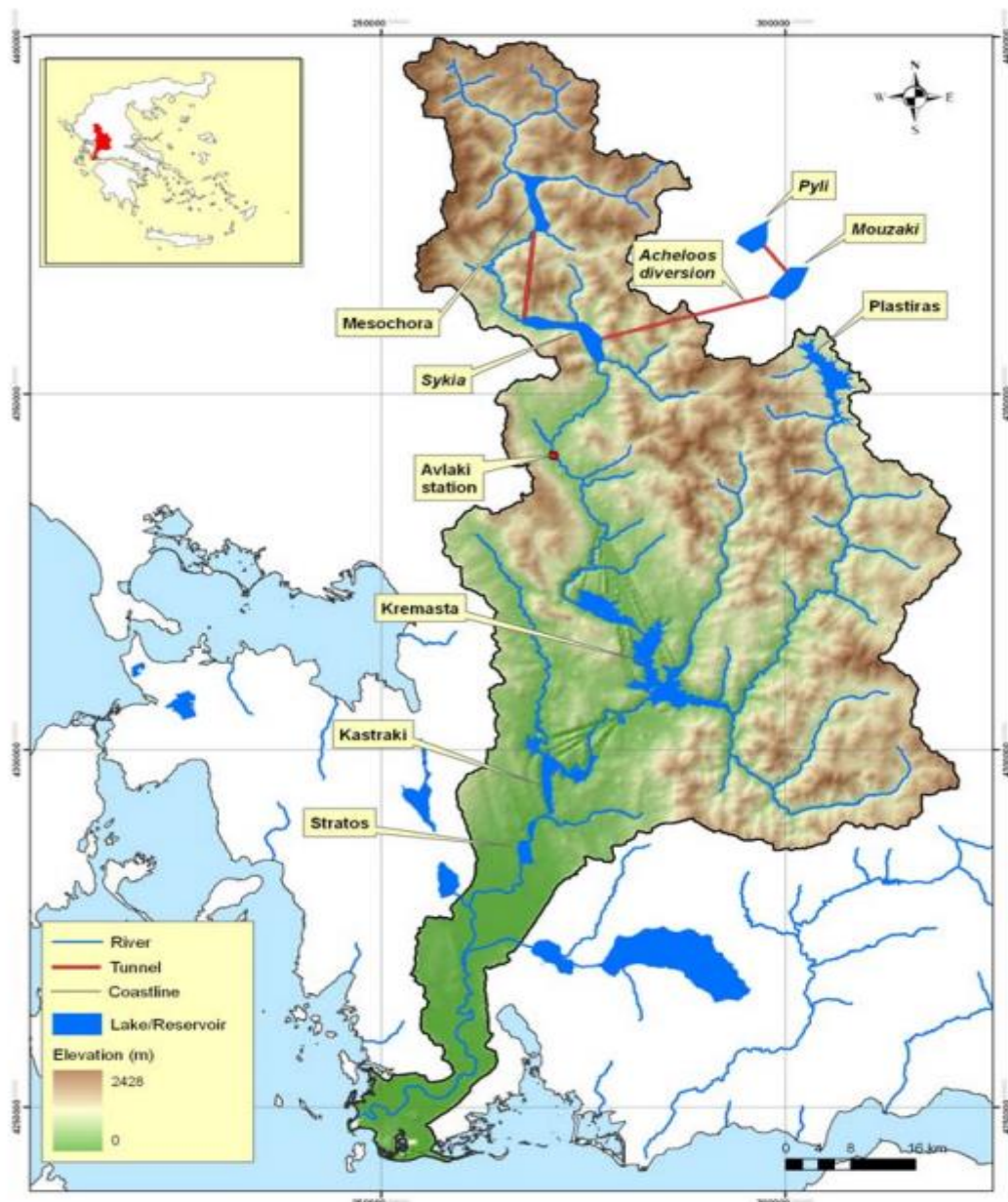


Εικόνα 10 Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη περιοχής μελέτης «Φύλλο Καστανέα»

7.3 Υδρογεωλογία

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο του Αχελώου ποταμού. Ο ποταμός Αχελώος είναι ένα από τα μεγαλύτερα ποτάμια της Ελλάδας και συγκεκριμένα ο δεύτερος πιο μεγάλος ποταμός της χώρας. Πρόκειται για ένα ποταμό με 217 χιλιόμετρα συνολικό μήκος πηγάζοντας από το όριο μεταξύ Πίνδου και Θεσσαλίας. Τα νερά του έπειτα από ένα μεγάλο ταξίδι από την πηγή εκβάλλουν στο Ιόνιο πέλαγος.





Χάρτης 7 Αχελώος ποταμός (Efstratiadis et al 2014 χάρτης από Α. Κουκουνίνος)

Εξαιτίας των τεράστιων ποσοτήτων του ποταμού έχουν κατασκευαστεί υδροηλεκτρικά φράγματα με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα από τα μεγαλύτερα φράγματα της Ευρώπης είναι αυτό των Κρεμαστών. Ακόμη τα υδροηλεκτρικά φράγματα Καστρακίου και Στράτου είναι κατασκευασμένα σε περιοχές όπου διαπερνά ο ποταμός.

7.4 Κλιματικά στοιχεία

Η περιοχή του των Τρικάλων βρίσκεται ανατολικά της οροσειράς της Πίνδου η οποία εμποδίζει τους δυνατούς και βροχοφόρους ανέμους του Ιονίου πελάγους να επηρεάσουν τον νομό. Εξαιτίας αυτής της μορφολογίας η μείωση του ύψους της βροχής από το δυτικό προς το ανατολικό κομμάτι των Τρικάλων είναι γεγονός. Στον

παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μέσα ετήσια και η εποχιακή ύψη βροχόπτωσης την περίοδο 1973-2003 στη περιοχή των Τρικάλων.

Πίνακας 4 Μέση εποχιακή και ετήσια ύψη βροχόπτωσης σε χιλιοστά (mm) κατά τη διάρκεια 1973 – 2003 (Μπαθρέλλου 2005)

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΕΤΟΣ	ΧΕΙΜΩΝΑΣ	ΑΝΟΙΞΗ	ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ	ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ
ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΙΚΑ	1633,6	653,6	441,4	86,2	452,4
ΕΛΑΤΗ	1568,6	571,5	403,9	122,2	471,0
ΧΡΥΣΟΜΗΛΙΑ	1188,4	441,1	279,5	83,0	384,9
ΜΑΛΑΚΑΣΙΟ	1061,7	418,0	239,9	96,8	306,9
ΜΕΓΑΛΗ ΚΕΡΑΣΙΑ	894,3	292,2	235,5	90,7	276,0
ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	879,2	323,4	215,4	89,3	251,0
ΑΓΙΟΦΥΛΛΟ	788,7	274,0	202,0	84,7	227,9
ΚΟΝΙΣΚΟΣ	729,3	222,9	201,9	99,0	205,6
ΤΡΙΚΑΛΑ	722,4	265,8	184,0	61,8	210,7
ΛΙΟΠΡΑΣΙΟ	671,7	189,2	175,8	97,9	208,9

Όπως φαίνεται ο χειμώνας είναι αυτός με τις υψηλότερες τιμές ακολουθώντας το φθινόπωρο με την άνοιξη και τέλος οι καλοκαιρινοί μήνες. Φαίνεται πως ο Δεκέμβριος είναι ο πιο βροχερός μήνας ενώ κατά την διάρκεια των θερινών μηνών παρατηρείται λιγότερη βροχόπτωση η οποία προέρχεται από θερινές καταιγίδες.

Όσον αφορά τη θερμοκρασία στο νομό των Τρικάλων η μέση τιμή της ανέρχεται στους 16,1 C με τον θερμότερο μήνα να είναι ο Ιούλιος ενώ ο πιο ψυχρός να είναι ο Ιανουάριος. Στο επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι μηνιαίες πορείες μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα για τον μετεωρολογικό σταθμό του Περτουλίου.

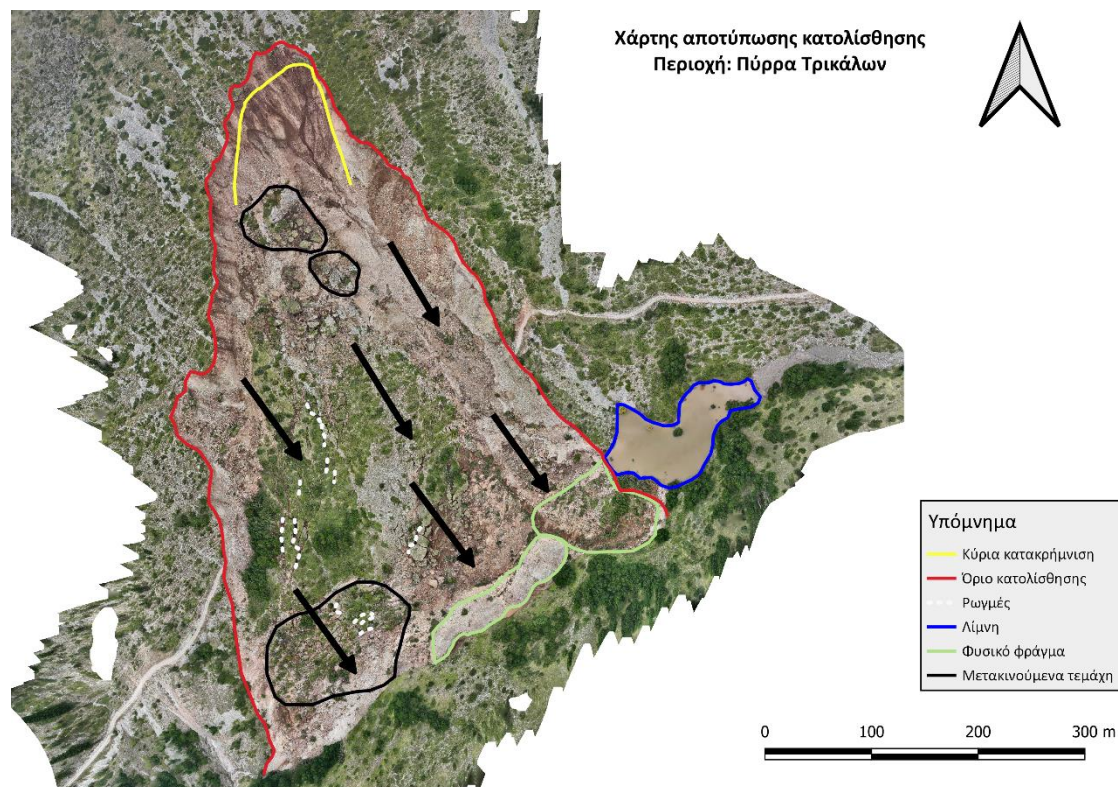
Πίνακας 5 Πορεία μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας της περιοχής των Τρικάλων (Μπαθρέλλου 2005)

ΤΡΙΚΑΛΑ (122m)			
ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	5,32	9,93	1,42
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	6,51	11,24	2,06
ΜΑΡΤΙΟΣ	10,25	15,02	4,87
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	15,14	20,21	8,50
ΜΑΙΟΣ	20,48	25,63	13,09
ΙΟΥΝΙΟΣ	25,76	31,22	17,00
ΙΟΥΛΙΟΣ	27,36	32,69	18,68
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	26,31	32,11	18,24
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	22,74	29,02	15,13
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	16,52	22,34	11,12
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	10,09	14,94	6,18
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	6,32	10,79	2,74

Κεφάλαιο 8: Αποτύπωση κατολίσθησης με UAV

Στις 7 Σεπτεμβρίου 2023 στον ορεινό όγκο της περιοχής της Πύρρας Τρικάλων έλαβε χώρα μία μεγάλη κατολίσθηση. Η κατολίσθηση αυτή έχει ολικό μήκος 580 μέτρα,

πλάτος 230 μέτρα ενώ βάθος 30 μέτρα καθιστώντας τον όγκο των μεταφερόμενων υλικό αρκετά μεγάλο. Πιο συγκεκριμένα η κατολίσθηση έχει όγκο $4.002.000\text{m}^3$. Εξαιτίας της παράλληλης κίνησης της μετακινούμενης μάζας πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης η ολίσθηση χαρακτηρίζεται ως μεταθετική. Επιπλέον, υπάρχουν εγκάρσιες ρωγμές στο έδαφος.



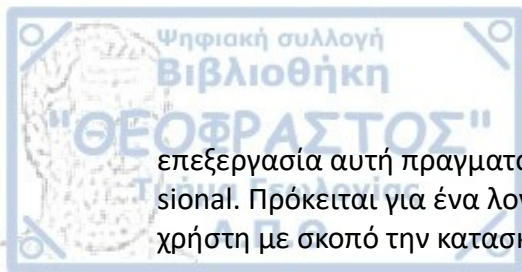
Χάρτης 8 Χάρτης αποτύπωσης της κατολίσθησης

Με σκοπό την αποτύπωση αλλά και την παρακολούθηση της κατολίσθησης η οποία είναι μεγάλης έκτασης έγινε χρήση ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV). Ο στόχος είναι η αποτύπωση της κατολίσθησης ώστε έπειτα από την επεξεργασία, μέσω εξειδικευμένων λογισμικών, να κατασκευαστεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM).

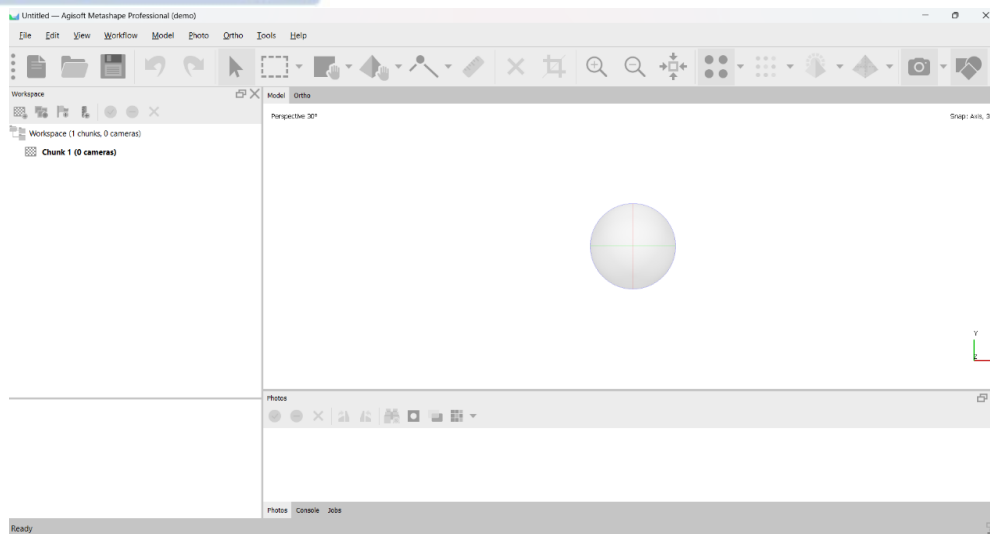
Η πρώτη πτήση πραγματοποιήθηκε στις 3 Οκτωβρίου 2023 ενώ η δεύτερη πραγματοποιήθηκε στις 21 Ιουνίου 2024. Η πτήση απαιτεί εμπειρία και γνώση καθώς όσο καλύτερη είναι η αλληλοεπικάλυψη τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα μετά την επεξεργασία.

8.1 Επεξεργασία με το λογισμικό Agisoft Metashape Professional

Για την κατασκευή των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM) θα χρειαστεί η επεξεργασία των εικόνων οι οποίες θα ληφθούν κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η



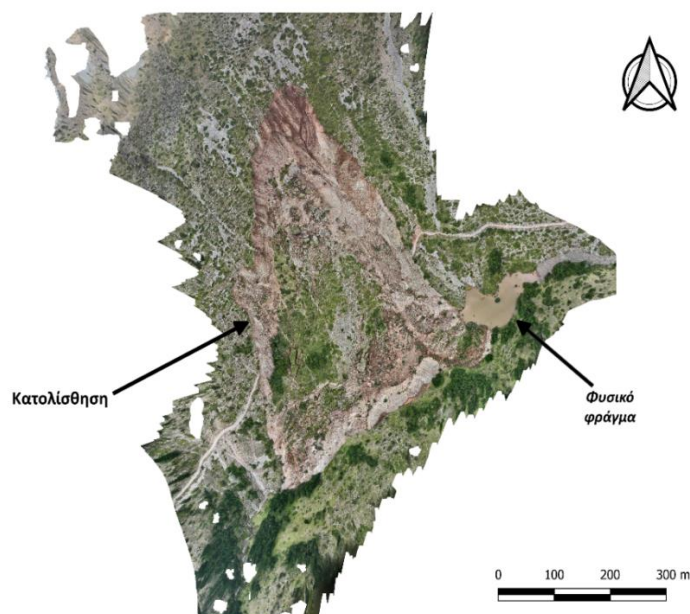
επεξεργασία αυτή πραγματοποιείται με το λογισμικό Agisoft Metashape Professional. Πρόκειται για ένα λογισμικό με εύκολο και προσιτό περιβάλλον προς τον χρήστη με σκοπό την κατασκευή υψηλής ποιότητας αποτελεσμάτων.



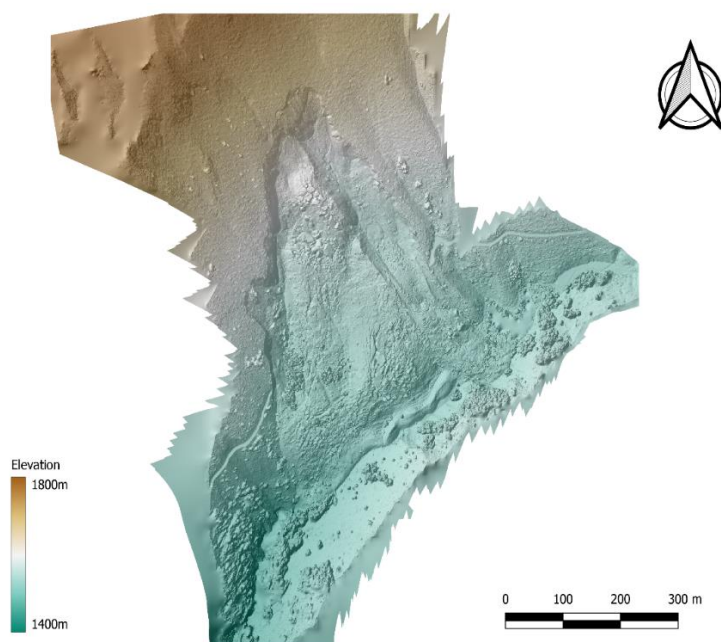
Εικόνα 11 Περιβάλλον λογισμικού Agisoft Metashape Professional

Ακολουθεί η ανάλυση διαδικασίας η οποία χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την επεξεργασία των εικόνων μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού.

- Αρχικά εισάγονται όλες οι εικόνες της περιοχής οι οποίες είναι γεωαναφερμένες με σκοπό τα αποτελέσματα να είναι ικανά να εισαχθούν σε περιβάλλον GIS.
- Στη συνέχεια πραγματοποιείται η επιλογή των εικόνων που θα χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία. Η αφαίρεση εικόνων που δεν είναι απαραίτητες για την ανάλυση όπως για παράδειγμα ο ουρανός δημιουργούν καλύτερης ποιότητας αποτελέσματα.
- Στο επόμενο βήμα χρειάζεται να εντοπίσουμε τα κοινά σημεία των εικόνων. Στη δεύτερη πτήση τα κοινά σημεία είναι
- Επίσης θα χρειαστεί να δημιουργήσουμε ένα πυκνό νέφος σημείων το οποίο αναπαριστά με πολύ μεγαλύτερη λεπτομέρεια το νέφος σημείων.
- Τέλος πραγματοποιείται η κατασκευή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM)



Χάρτης 9 Ορθοφωτοχάρτης της κατολίσθησης



Χάρτης 10 Χάρτης με το DEM της κατολίσθησης

Κεφάλαιο 9: Ανίχνευση αλλαγών

9.1 Στόχος

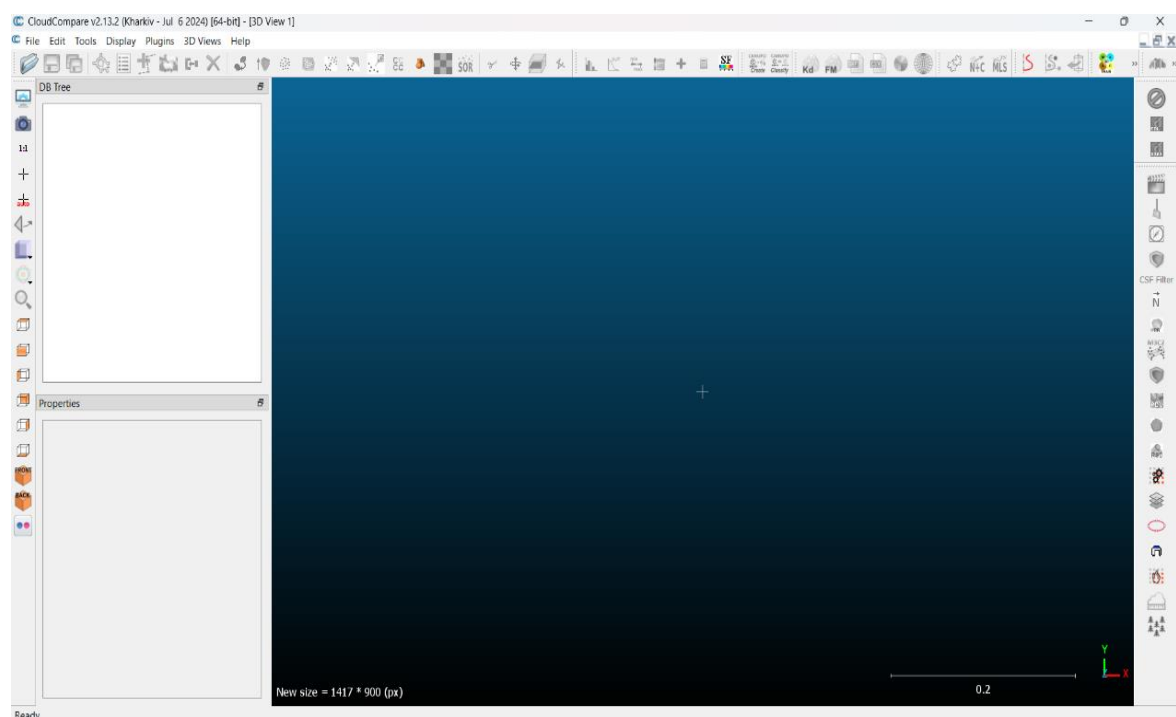
Η παρούσα διπλωματική διεξάγεται με σκοπό την αποτύπωση της κατολίσθησης στη περιοχή της Πύρρας Τρικάλων αλλά και η ανίχνευση των αλλαγών οι οποίες θα υπάρξουν ύστερα από την εκδήλωση του φαινομένου. Η ανίχνευση των αλλαγών θα



πραγματοποιηθεί εφόσον συγκριθούν τα νέφη σημείων που δημιουργήθηκαν κατά την επεξεργασία στο λογισμικό Agisoft Metashape Professional.

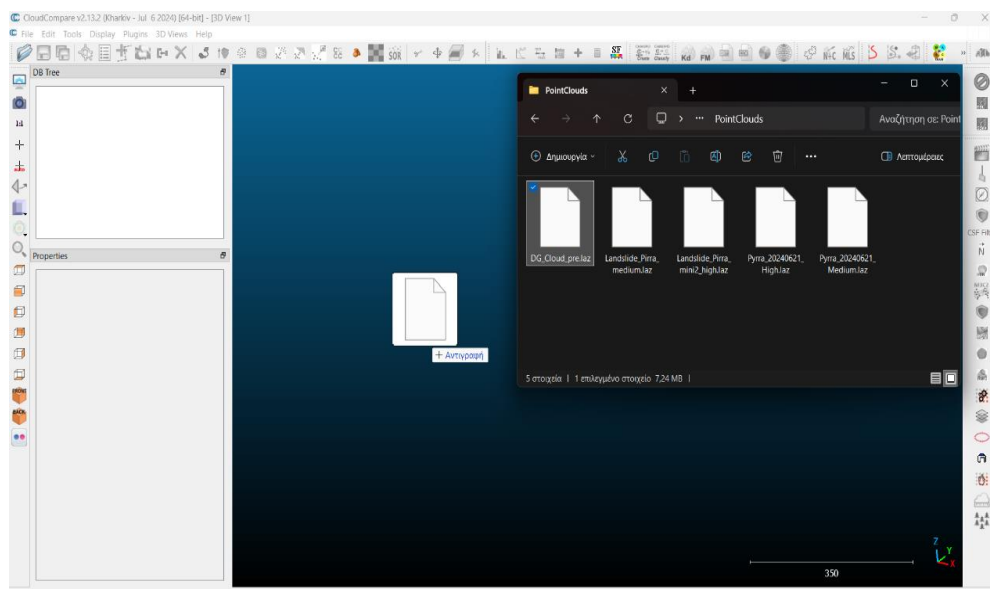
9.2 Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων μέσω του λογισμικού CloudCompare

Για την ανίχνευση αλλαγών χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό του CloudCompare. Αρχικά θα χρειαστεί να παρατηρήσουμε την διαφορά στο μετακινούμενο υλικό πριν την αρχική εκδήλωση και αμέσως μετά την στιγμή που εκδηλώθηκε το γεγονός. Στη συνέχεια θα συγκρίνουμε το νέφος σημείων του Οκτωβρίου με το αντίστοιχο του Ιουνίου ώστε να παρατηρήσουμε τυχόν αλλαγές εκείνο το χρονικό διάστημα.



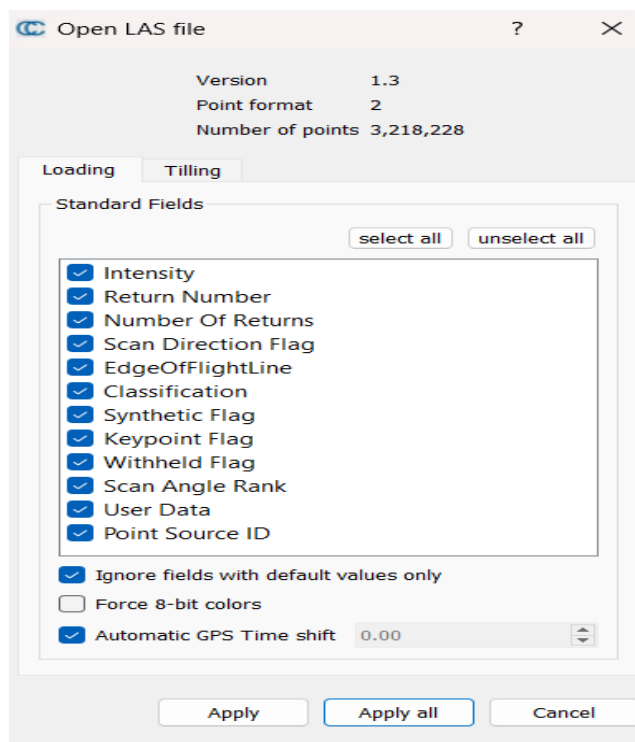
Εικόνα 12 Περιβάλλον λογισμικού CloudCompare

Αρχικά για να περάσουμε τα νέφη σημείων στο λογισμικό θα χρειαστεί είτε να τα σύρουμε με το ποντίκι μας στην επιφάνεια όπως στην παρακάτω φωτογραφία είτε να ακολουθήσουμε τον παρακάτω δρόμο εντολών File » Open.

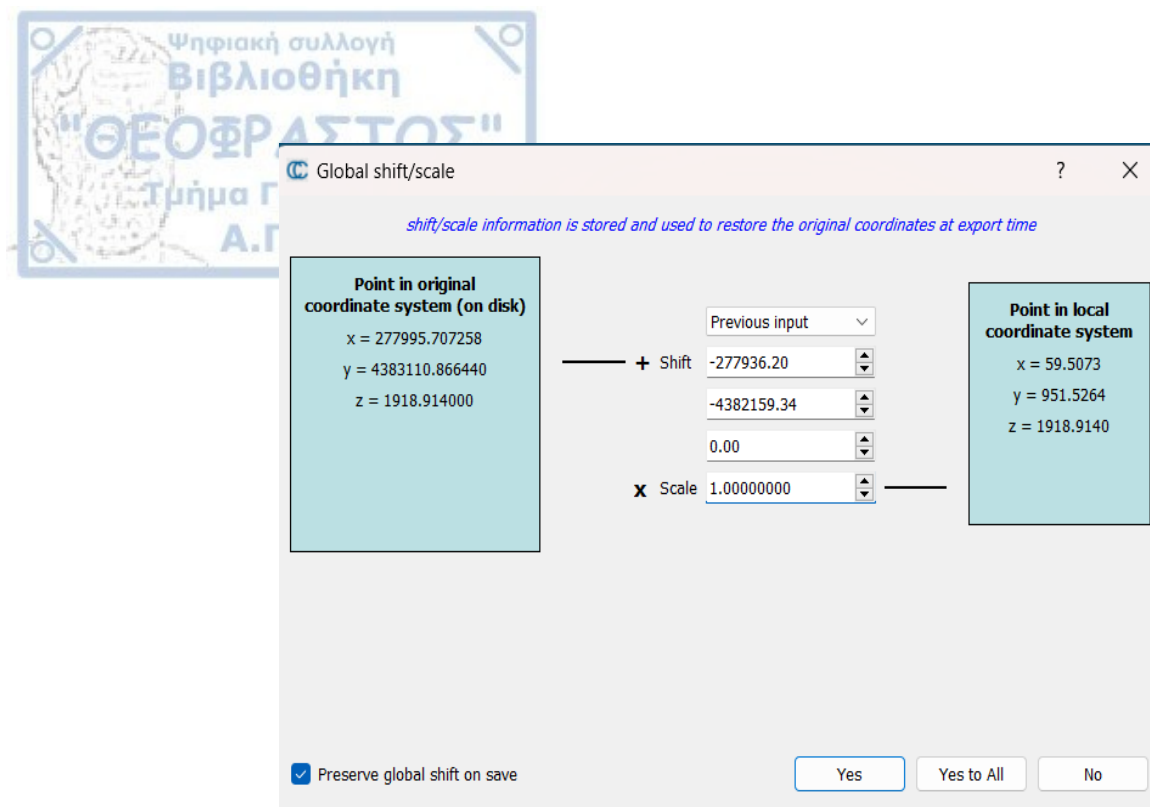


Εικόνα 13 Διαδικασία ανοίγματος δεδομένων

Πριν ανοίξουν τα δεδομένα μας το λογισμικό θα μας εμφανίσει 2 παράθυρα στα οποία θα επιλέξουμε Apply all και στη συνέχεια Yes to all. Με το βήμα αυτό το λογισμικό προσαρμόζει το νέφος σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

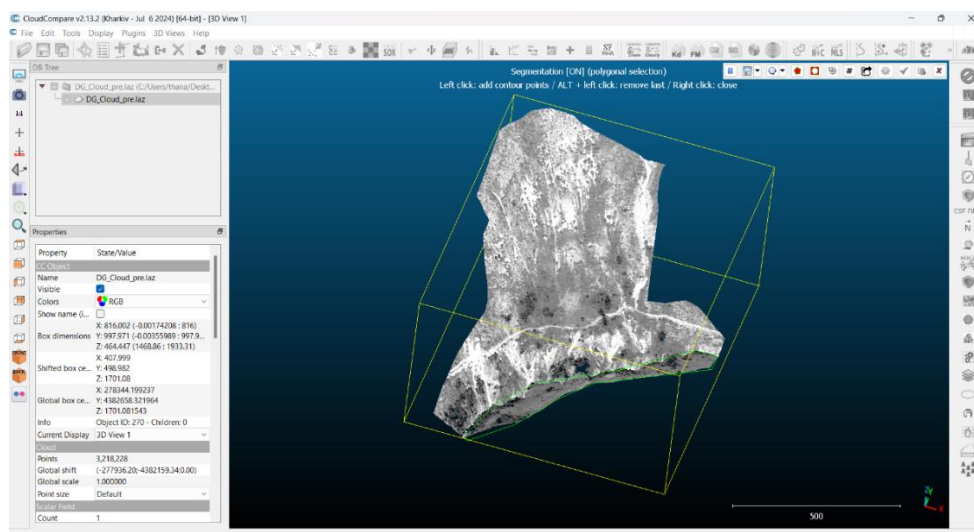


Εικόνα 14 Χαρακτηριστικά του νέφους σημείων



Εικόνα 15 Επεξεργασία συντεταγμένων των σημείων

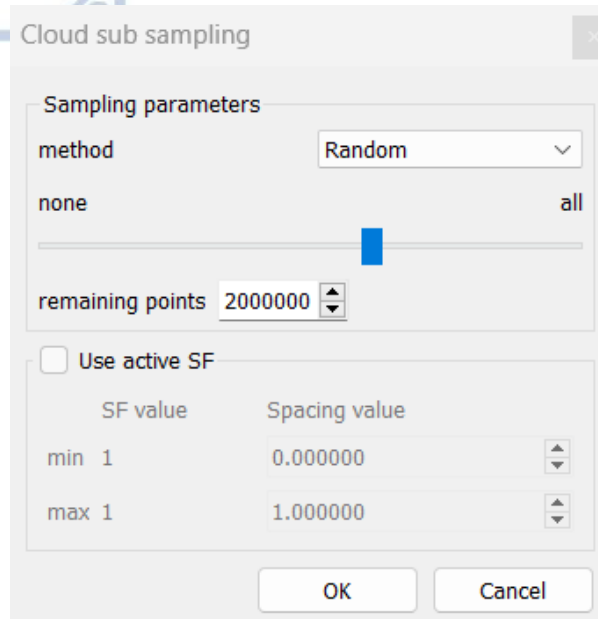
Μόλις γίνει το πρώτο βήμα θα χρειαστεί να επεξεργαστούμε τα νέφη καθώς περιέχουν αρκετά σημεία τα οποία θα δημιουργούν σφάλματα με την ύπαρξή τους. Με το εργαλείο segment  μπορούμε να αφαιρέσουμε σημεία όπως για παράδειγμα βλάστηση.



Εικόνα 16 Διαδικασία αποκοπής σημείων από το νέφος

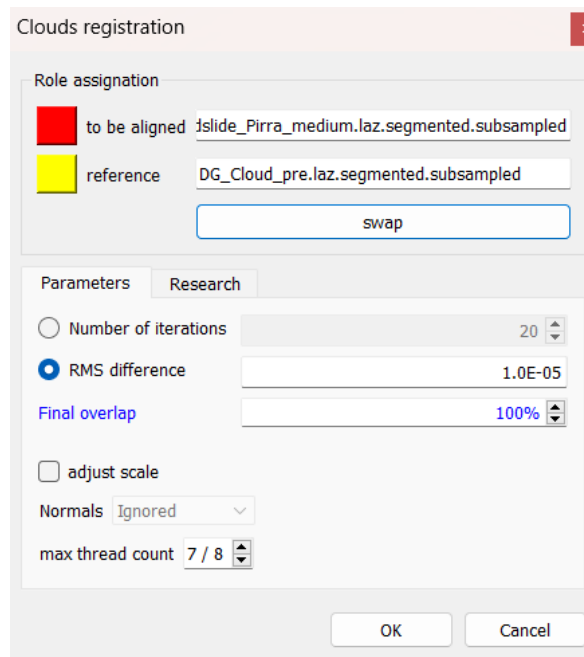
Αφού αφαιρέσουμε και από τα δύο νέφη μερικά σημεία θα χρειαστεί να μειώσουμε τον αριθμό σημείων στα νέφη με στόχο την πιο γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων. Μέσω του εργαλείου subsample  θα μειώσουμε τον αριθμό σημείων στο κάθε νέφος ξεχωριστά. Μόλις ενεργοποιήσουμε το εργαλείο τότε θα

εμφανιστεί το παρακάτω παράθυρο όπου θα επιλέξουμε Random μέθοδο και έτσι θα μπορούμε εμείς να επιλέξουμε τον ακριβή αριθμό σημείων.



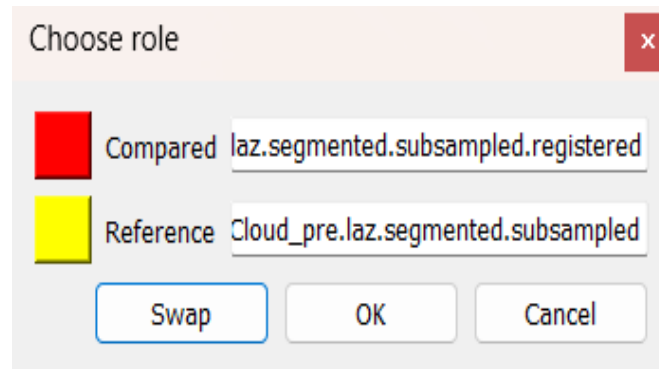
Εικόνα 17 Παράθυρο ελαχιστοποίησης σημείων

Στη συνέχεια θα χρειαστεί να ταυτίσουμε τα δύο νέφη το ένα πάνω στο άλλο. Αυτό το βήμα γίνεται εφόσον πατήσουμε το fine registration  και στη συνέχεια θα εμφανιστεί ένα παράθυρο όπου θα επιλέξουμε ποια από τα δύο νέφη θα είναι αυτό που θα μετακινηθεί και ποιο θα μείνει σταθερό με βάση το κίτρινο και κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 18 Παράθυρο ταύτισης των δύο νεφών

Τέλος για την σύγκριση των νεφών θα επιλέξουμε το εργαλείο Cloud 2 Cloud distance  το οποίο υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των δύο νεφών. Στον πίνακα που θα εμφανιστεί επιλέγουμε σε ποιο νέφος θα υπολογιστούν οι αποστάσεις (Compared) και ποιο θα είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί ως αναφερόμενο (Reference). Στη συνέχεια επιλέγουμε το compute και τέλος θα εμφανιστεί το τρισδιάστατο μοντέλο. Διαλέγουμε χρωματική κλίμακα η οποία θα μας εμφανίζει ξεκάθαρα τις μετακινήσεις μεταξύ των δύο νεφών.

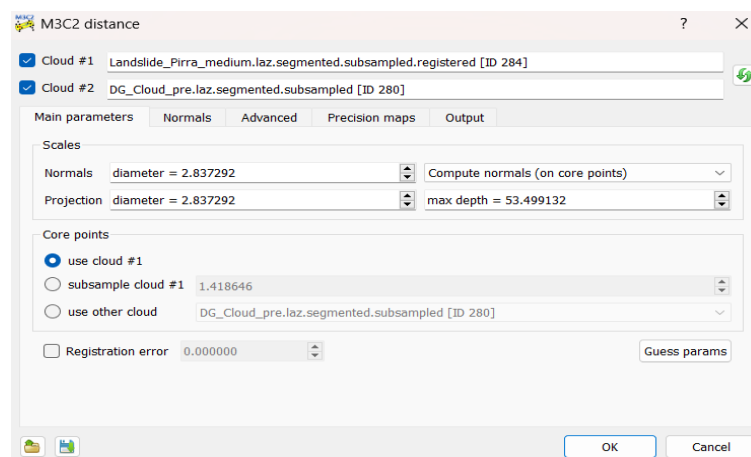


Εικόνα 19 Παράθυρο επιλογής συγκρινόμενου και αναφερόμενου νέφους με τη μέθοδο C2C

Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε και για το νέφος σημείων του Οκτωβρίου και του Ιουνίου για να εντοπίσουμε επιπλέον μετακινήσεις.

Εκτός από την σύγκριση νεφών με την μέθοδο C2C θα εφαρμόσουμε και την μέθοδο M3C2 αντίστοιχα. Με την μέθοδο M3C2 μπορούμε να παράγουμε περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς λαμβάνει υπόψη την τοπική γεωμετρία των νεφών. Έτσι μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα ανώμαλες επιφάνειες σε σχέση με την μέθοδο C2C καθώς το M3C2 δίνει σχετικές μετατοπίσεις τις επιφάνειας (αρνητικές ή θετικές), σε σύγκριση με το C2C το οποίο δίνει μόνο απόλυτη απόσταση.

Η διαδικασία περιλαμβάνει την ίδια σειρά επιλογών μέχρι την επιλογή fine registration. Στην συνέχεια επιλέγουμε  από την δεξιά μπάρα εργαλείων εμφανίζοντάς μας το παρακάτω παράθυρο. Επιλέγουμε την επιλογή guess parameters η οποία προσαρμόζει τις παραμέτρους στα δεδομένα μας ενώ επίσης μπορούμε να επιλέξουμε σε ποιο από τα δύο νέφη θα παρουσιαστεί το αποτέλεσμα.

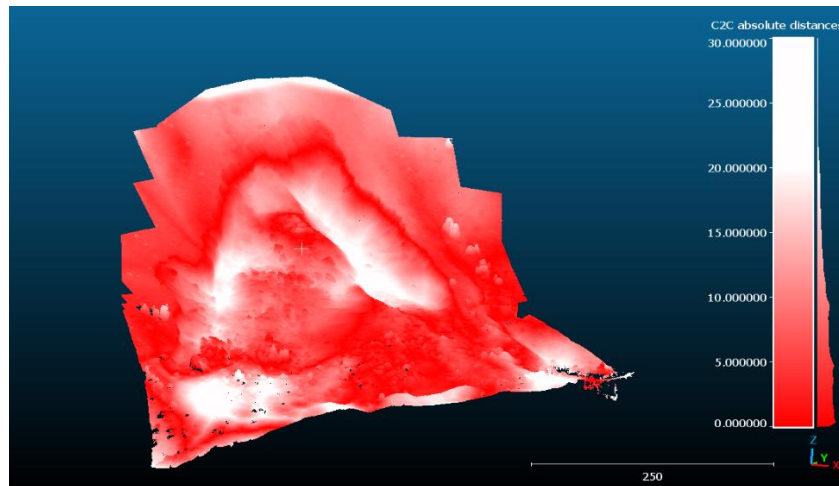


Εικόνα 20 Παράθυρο επιλογής παραμέτρων με την μέθοδο M3C2

Τη συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήσαμε για την σύγκριση της αποτύπωσης πριν την κατολίσθηση και της πρώτης πτήσης του Οκτωβρίου αλλά και για τη σύγκριση των πτήσεων Οκτωβρίου και Ιουνίου.

9.4 Αποτελέσματα C2C και M3C2

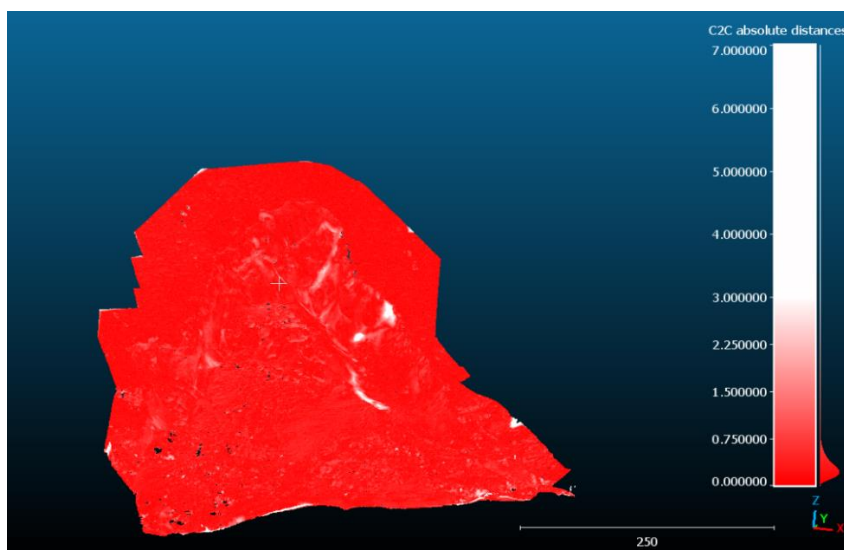
Εφόσον ακολουθήσουμε τα παραπάνω βήματα για κάθε μια σύγκριση ξεχωριστά θα δημιουργήσουμε τα παρακάτω τρισδιάστατα μοντέλα τα οποία μας απεικονίζουν μεταφορά υλικού ή απόθεση υλικού με βάση την χρωματική παλέτα που βρίσκεται στα δεξιά.



Εικόνα 21 1η σύγκριση με τη μέθοδο C2C. Με άσπρο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις σε μέτρα (22/09/16 – 03/10/23)

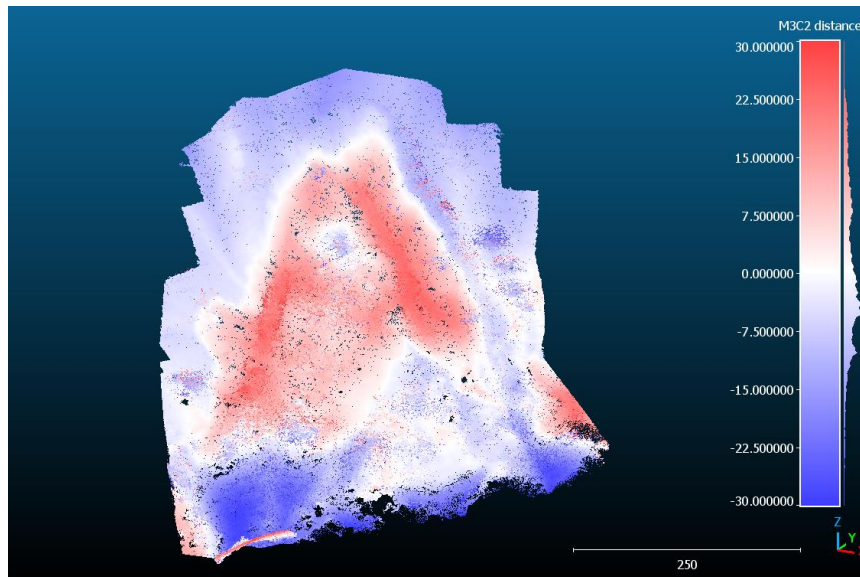
Στη πρώτη εικόνα έχουμε συγκρίνει την αεροφωτογραφία πριν εκδηλωθεί η κατολίσθηση και το νέφος σημείων έπειτα από τη πρώτη πτήση του Οκτωβρίου.

Παρατηρούμε με άσπρο χρώμα στο εσωτερικό της κατολίσθησης το υλικό που έχει μεταφερθεί 30 μέτρα από την αρχική τους θέση στο πρανές ενώ με κόκκινο χρώμα το υλικό που δεν έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές.



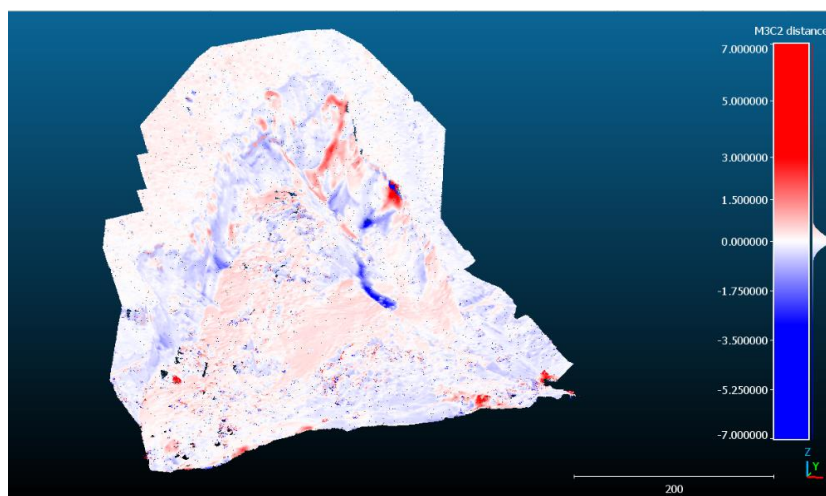
Εικόνα 22 2η σύγκριση με τη μέθοδο C2C. Με άσπρο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις σε μέτρα (03/10/23 – 21/06/24)

Στην εικόνα έχουμε συγκρίνει με τη μέθοδο C2C το νέφος σημείων της πτήσης του Οκτωβρίου και αυτό της τελευταίας πτήσης του Ιουνίου. Εδώ δεν παρατηρούμε μεγάλες αλλαγές στην μεταφορά υλικού όπως στην πρώτη περίπτωση. Οι αλλαγές παρατηρούνται στο κέντρο της κατολίσθησης με άσπρο χρώμα και μέγιστη τιμή τα 7 μέτρα ενώ τα άσπρα σημάδια περιμετρικά του νέφους είναι σφάλματα εξαιτίας εσφαλμένης ταύτισης ή παρουσίας βλάστησης η οποία δεν αποτυπώνεται σωστά.

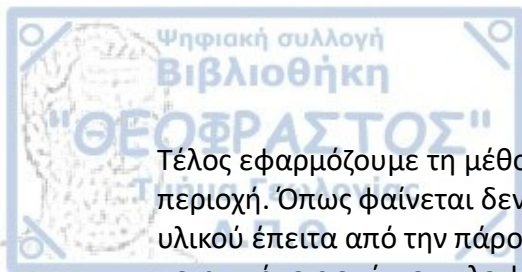


Εικόνα 23 1η σύγκριση με τη μέθοδο M3C2. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις ενώ με μπλε η συσσώρευση (22/09/16 – 3/10/23)

Στην εικόνα εφαρμόζουμε πλέον στην μέθοδο M3C2 όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υλικό που μετακινήθηκε και σε ποια σημεία αποτέθηκε. Με κόκκινο χρώμα στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται το υλικό που έχει μετακινηθεί κατά την διάρκεια της εκδήλωσης της κατολίσθησης καθώς η σύγκριση αφορά την πρώτη περίπτωση όπου συγκρίνουμε το πρανές πριν και μετά την εκδήλωση την περίοδο της κακοκαιρίας Daniel. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα σημεία όπου έχει αποτεθεί το μεταφερόμενο υλικό. Οι μέγιστες τιμές μετακίνησης και συσσώρευσης με βάση την κλίμακα είναι 30 μέτρα.



Εικόνα 24 2η σύγκριση με τη μέθοδο M3C2. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις, ενώ με μπλε η συσσώρευση υλικού(3/10/23 – 21/06/24).



Τέλος εφαρμόζουμε τη μέθοδο M3C2 και στις δύο πτήσεις που διενεργήθηκαν στην περιοχή. Όπως φαίνεται δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές στις μετακινήσεις υλικού έπειτα από την πάροδο μηνών. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μετακινήσεις ενώ με μπλε φαίνεται το σημείο που έχει συσσωρευτεί. Μέγιστη και ελάχιστη τιμή με βάση τη χρωματική κλίμακα είναι στα 7 μέτρα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Έπειτα από τη κακοκαιρία Daniel που έπληξε την περιοχή των Τρικάλων εκδηλώθηκαν αρκετά κατολισθητικά φαινόμενα στα ορεινά του νομού. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αποτύπωση του κατολισθητικού φαινομένου το οποίο δημιούργησε και ένα φυσικό φράγμα στη περιοχή.
- Με δύο πτήσεις που πραγματοποιήθηκαν το διάστημα μεταξύ Οκτώβριου του 2023 και Ιούνιο του 2024 αποτυπώθηκε η μεγάλης έκτασης κατολίσθηση. Πιο συγκεκριμένα η ολίσθηση που έχει εκδηλωθεί στην περιοχή είναι μεταθετική με βάθος περίπου στα 30 μέτρα, μήκος 580 μέτρα και πλάτος 230 μέτρα με όγκο $4.002.000\text{m}^3$.
- Με τη βοήθεια του ελεύθερου λογισμικού όπως είναι το CloudCompare πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των παραγόμενων νεφών με λεπτομέρεια και ακρίβεια. Με τα εργαλεία C2C και M3C2 υπολογιστήκαν οι μετακινήσεις τη στιγμή που εκδηλώθηκε η κατολίσθηση αλλά και έπειτα από 8 μήνες. Οι μετακινήσεις έχουν μέγιστη τιμή στα 30 μέτρα έπειτα από την εκδήλωση της κατολίσθησης και 7 μέτρων μετακινήσεις έπειτα από 8 μήνες που μεσολαβήσαν μέχρι την δεύτερη πτήση.
- Πλέον με τις σύγχρονες μεθόδους η αποτύπωση και η παρακολούθηση ενός κατολισθητικού φαινομένου πραγματοποιείται με ταχύτητα, ασφάλεια και ακρίβεια ακόμη και σε δύσβατες περιοχές.

Cruden, David. (1996). Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996, Landslide Types and Processes, Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75. Special Report - National Research Council, Transportation Research Board. 247. 36-57.

Dimitriou, Elias, Andreas Efstratiadis, Ioanna Zotou, Anastasios Papadopoulos, Theano Iliopoulou, Georgia-Konstantina Sakki, Katerina Mazi, Evangelos Rozos, Antonios Koukouvinos, Antonis D. Koussis, et al. 2024. "Post-Analysis of Daniel Extreme Flood Event in Thessaly, Central Greece: Practical Lessons and the Value of State-of-the-Art Water-Monitoring Networks" *Water* 16, no. 7: 980.

<https://doi.org/10.3390/w16070980>

Efstratiadis, Andreas & Tegos, Aristoteles & Varveris, & Koutsoyiannis, Demetris. (2014). Assessment of environmental flows under limited data availability: Case study of the Acheloos River, Greece. *Hydrological Sciences Journal*. 59. 10.1080/02626667.2013.804625.

Fan, Xuanmei. (2013). Understanding the causes and effects of earthquake-induced landslide dams.

Fan, X., Xu, Q., van Westen, C.J. *et al.* Characteristics and classification of landslide dams associated with the 2008 Wenchuan earthquake. *Geoenviron Disasters* 4, 12 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0079-8>

Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter, 2008, The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A. *et al.* Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards* 61, 5–28 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>

Lacroix, P., Handwerker, A.L. & Bièvre, G. Life and death of slow-moving landslides. *Nat Rev Earth Environ* 1, 404–419 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0072-8>

Li, Yanrong & Mo, Ping. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. *Geomorphology*. 340. 10.1016/j.geomorph.2019.04.020.

Lyons, Sue & Ross, Robert. (2015). Earth Hazards of the South Central US.

Michael J. Crozier, 'Landslides - Hill country, regolith and submarine landslides', Te Ara - the Encyclopedia of New Zealand, <http://www.TeAra.govt.nz/en/photo-graph/8792/rotational-landslide>

Schenk, Toni, and Autumn Quarter. "Introduction to Photogrammetry."

Török, Ákos & Bögöly, Gyula & Czinder, Balázs & Görög, Péter & Kleb, B. & Vasarhelyi, Balazs & Lovas, Tamas & Barsi, Arpad & Molnár, Bence & Koppanyi, Zoltan & Somogyi, Arpad. (2016). Terrestrial laser scanner aided survey and stability analyses of



rhyolite tuff cliff faces with potential rock-fall hazards, an example from Hungary. 10.1201/9781315388502-151.

Valkaniotis, S., 2005. Active faults investigation of Western Thessaly. MSc. thesis, Aristotle University of Thessaloniki, pp. 118 [in Greek].

van Riel, Sjoerd. (2016). Exploring the use of 3D GIS as an analytical tool in archaeological excavation practice. 10.13140/RG.2.1.4738.2643.

Κούκης, Γ. & Σαμπατακάκης, Ν. 2^η Έκδοση. Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Αθήνα 2022

ΛΕΚΚΑΣ, Ε (1988). - Γεωλογική δομή και γεωδυναμική εξέλιξη της οροσειράς του Κόζιακα (Δυτική Θεσσαλία). Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστημίου Αθηνών, ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΜΟΝΟΓΡΑΦΙΕΣ Νο 1, Τομέας Δυν. Τεκτ. Εφαρμ. Γεωλογίας Πανεπιστημίου Αθηνών, 281σ., Αθήνα

Μπαθρέλλου, Γ. (2005). Γεωλογική, Γεωμορφολογική και γεωγραφική μελέτη των αστικών περιοχών του νομού Τρικάλων-Δυτικής Θεσσαλίας (Διδακτορική Διατριβή). Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Μουντράκης, Δ. Β' Έκδοση. Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, Θεσσαλονίκη 2022

Παπαθανασίου, Γ. (2022). Τεχνική Γεωλογία και Γεωλογικοί Κίνδυνοι [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις
<http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-96>

Πυργιώτης, Λ. (1997). Τεχνικογεωλογικές συνθήκες στο νομό Καρδίτσας. Κατολισθητικά φαινόμενα στους σχηματισμούς του φλύσχη (Διδακτορική Διατριβή) Πανεπιστήμιο Πατρών

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<https://www.mergili.at/worldimages/picture.php?/9330>

<https://www.bgs.ac.uk/about-bgs/our-work/how-we-use-drones/>