



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ»

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ:
«ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ ΧΑΤΖΗΘΕΟΔΟΣΙΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΩΝ
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV,
ΣΤΟΝ ΤΥΜΦΡΗΣΤΟ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ
ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΑΜΙΑΣ – ΚΑΡΠΕΝΗΣΙΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2021



ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ ΧΑΤΖΗΘΕΟΔΟΣΙΟΥ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΩΝ
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV, ΣΤΟΝ
ΤΥΜΦΡΗΣΤΟ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΛΑΜΙΑΣ – ΚΑΡΠΕΝΗΣΙΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία», Κατεύθυνση «Τεχνική Γεωλογία και Περιβάλλον».

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Μαρίνος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Επιβλέπων.

Παπαθανασίου Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής Τμ. Γεωλογίας ΑΠΘ, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

Δρ. Μακεδών Θωμάς, Ε.ΔΙ.Π Τμ. Γεωλογίας ΑΠΘ, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.



Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV, ΣΤΟΝ ΤΥΜΦΡΗΣΤΟ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΑΜΙΑΣ – ΚΑΡΠΕΝΗΣΙΟΥ – Μεταπτυχιακή Διπλωματική Διατριβή

© Themistoklis Chatzitheodosiou, 2021

All rights reserved.

ENGINEERING GEOLOGICAL INVESTIGATION OF EXTENSIVE LANDSLIDE PHENOMENA, USING UAV, IN TYMPHRISTOS – EVRYTANIA ALONG THE ROAD NETWORK OF LAMIA – KARPENISI – Master Thesis

Παραπομπή:

Χατζηθεοδοσίου Θ., (2021). Τεχνικογεωλογική έρευνα επί των εκτεταμένων κατολισθητικών φαινομένων, με τη χρήση UAV, στον Τυμφρηστό Ευρυτανίας κατά μήκος του οδικού δικτύου Λάμιας – Καρπενησιού. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 282 σελ.

Citation:

Chatzitheodosiou T., (2021). Engineering geological investigation of extensive landslide phenomena, using UAV, in Tymphristos – Evrytania along the road network of Lamia – Karpenisi. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 282 pp.

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

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



Στη μνήμη του Ομότιμου Καθηγητή Τεχνικής Γεωλογίας
του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Παύλου Μαρίνου,
για το πολύτιμο έργο και την συνεισφορά του
στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας, στον κλάδο ειδίκευσης Τεχνικής Γεωλογίας και Περιβάλλοντος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Ως μέλος του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος μου δόθηκε μια μοναδική ευκαιρία να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου πάνω σε θέματα και εφαρμογές αιχμής Τεχνικής Γεωλογίας και να διδαχθώ από τους καλύτερους στον τομέα.

Καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος είχα την τύχη και το προνόμιο να συνδυάσω αποτελεσματικά και επιστημονικά θεωρία και πράξη, διευρύνοντας το γνωστικό μου ορίζοντα, χάρη στη διδασκαλία, την καθοδήγηση και τη συνεργασία πολλών αξιοσέβαστων καθηγητών που ευτύχησα να απολαύσω, μα και συνδέοντας το θεωρητικό αυτό υπόβαθρο, με τη γοητεία και την άγραφη γνώση της πρακτικής εφαρμογής της επιστήμης στον επαγγελματικό στίβο της αγοράς εργασίας, μέσω των αξιοθαύμαστων και έμπειρων επαγγελματιών που είχα την τύχη συνεργαστώ, και που μου χάρισαν πολύτιμα εφόδια και εργασιακή εμπειρία, για την μετέπειτα επιστημονική και επαγγελματική σταδιοδρομία μου.

Γι' αυτό τον λόγο, με την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά εκτίμηση και τις θερμές ευχαριστίες, σε όλους εκείνους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος, όσο και στην πραγματοποίηση της παρούσας διατριβής και ιδιαίτερα:

Τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής αυτής διπλωματικής εργασίας, κ. Βασίλειο Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε ως προς την ολοκλήρωση της. Η στήριξη και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε με κάθε τρόπο, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, από τον προπτυχιακό ακόμα κύκλο σπουδών, δημιουργήσαν τις προϋποθέσεις για την βαθύτερη ενασχόληση και αγάπη της επιστήμης του εδάφους, ενώ επίσης υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Τον κ. Παπαθανασίου Γεώργιο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, Μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για την βοήθεια και την επιστημονική του καθοδήγηση, καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, σε θέματα έρευνας και μελέτης κατολισθητικών φαινομένων.

Τον Δρ. Μακεδόνα Θωμά, Ε.ΔΙ.Π του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, Μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για την καθοδήγηση, τις ουσιαστικές υποδείξεις του και τις πολύτιμες συμβουλές του, καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, τόσο σε θέματα Τεχνικής Γεωλογίας, όσο και σε θέματα Εδαφομηχανικής.

Τον Δρ. Νικόλαο Χατζηγώγο, MSc Τεχνικό Γεωλόγο, του οποίου η βαθιά επιστημονική γνώση αποτέλεσε έμπνευση για μένα.

Την Dr. Pawluszek Kamila, το ερευνητικό έργο της οποίας αποτέλεσε σημείο αναφοράς και δεύτερο εφελτήριο για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τμήματος Γεωλογίας, για την βοήθεια και την στήριξη που μου παρείχαν από την αρχή των ακαδημαϊκών μου χρόνων. Ειδική μνεία θα ήθελα να κάνω στον κ. Αλέξανδρο Χατζηπέτρο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, για την βοήθεια και την επιστημονική του καθοδήγηση στην γεωλογική διερεύνηση επί του θέματος, που παρουσιάζεται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Ευχαριστώ θερμά τον εξαίρετο επιστήμονα, φίλο και υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, Ευστράτιο Καραντανέλλη, για την επιστημονική καθοδήγηση και τις πληροφορίες που μου παρείχε σχετικά με την διερεύνηση κατολισθητικών φαινομένων με τεχνικές Τηλεπισκόπησης, όπως η εφαρμογή της τρέχουσας τεχνολογίας των συστημάτων, μη επανδρωμένων εναέριων αεροσκαφών (UAV) που παρουσιάζεται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Πολλά, ευχαριστώ, στον ιδιοφυή, φίλο και υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Πληροφορικής ΑΠΘ, Ελευθεριάδη Χαράλαμπο, για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου παρείχε στο πλαίσιο εργασιών για την αυτοματοποιημένη εξαγωγή πρόσθετων γεωμορφολογικών δεδομένων από τα ήδη υπάρχοντα, μέσω της καινοτομικής εφαρμογής μεθόδων Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), όπως της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis), που επίσης παρουσιάζεται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Ακόμα θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, στους δύο φίλους, συνοδοιπόρους και στενούς επιστημονικούς συνεργάτες, Σπάχο Γεώργιο, MSc Τεχνικό Γεωλόγο, και Παπατσικουράκη Δημήτριο, MSc Τεχνικό Γεωλόγο, για την αδιάκοπη ηθική και επιστημονική υποστήριξη τους, τόσο κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος, όσο και κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ στον αδερφό μου, Χατζηθεοδοσίου Δημήτριο, Οικονομολόγο - Σκηνοθέτη (MFA, MBA, MPAM(c), BA). Η συνεχής ενθάρρυνση, η κριτική αναθεώρηση του κειμένου και η ανιδιοτελής συμπαράσταση του, καθ' όλη την διάρκεια της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής, αποτέλεσαν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά ευγνωμοσύνη προς τον πατέρα μου, Χατζηθεοδοσίου Πασχάλη, Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό, για την καθοδήγηση και την ηθική και υλική υποστήριξη σε όλα τα στάδια της ζωής μου, και για όλες τις θυσίες που έχει κάνει, ώστε να έχω την δυνατότητα να ασχοληθώ απεριόριστα και απρόσκοπτα με το επιστημονικό μου έργο.

Η διατριβή αυτή δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση ολόκληρης της οικογένειάς μου, η οποία στάθηκε δίπλα μου, υποστηρίζοντας με καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, και που την ευχαριστώ πραγματικά από την καρδιά μου.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή επικεντρώνεται στην τεχνικογεωλογική έρευνα μιας εκτεταμένης σύνθετης κατολίσθησης στους πρόποδες της ανατολικής πλευράς του ορεινού όγκου Τυμφρηστού του Νομού Ευρυτανίας, λίγα χιλιόμετρα Δυτικά του χωριού Τυμφρηστός, κατά μήκος του οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου, με την χρήση Συστημάτων μη Επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV). Το ερευνητικό πλαίσιο της ανάλυσης του κατολισθητικού φαινομένου, εστιάζεται στην πλήρη αξιολόγηση της ευρύτερης αστάθειας του εδάφους στην περιοχή, και στη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, αποτελούμενης από χάρτες, εκθέσεις και επισημάνσεις αναφορικά με την αναδιαμόρφωση της περιοχής, από κατολισθητικά φαινόμενα, με απώτερο σκοπό την παρακολούθηση και πρόγνωση της μετέπειτα εξέλιξης του φαινομένου στο μέλλον.

Ιστορικά, η περιοχή μελέτης, λόγω του έντονου αναγλύφου της αλλά κυρίως εξαιτίας των δυσμενών γεωλογικών και κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν σ' αυτήν, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς την δημιουργία κατολισθητικών φαινομένων, ενώ ως αντικείμενο μελέτης απασχόλησε πολλούς ερευνητές και μελετητές. Στο παρελθόν, οι μελέτες για την διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, συντελέστηκαν με συμβατικές μεθόδους έρευνας, όπως η μελέτη τοπογραφικών χαρτών, η χαρτογράφηση πεδίου, και η εκτέλεση γεωερευνητικού προγράμματος γεωτρήσεων με τοποθέτηση οργάνων παρακολούθησης, που όμως περιορίστηκαν στην κλίμακα μιας επιμέρους μικρότερης οριοθετημένης κατολίσθησης, εντός του ευρύτερου, σύνθετου κατολισθητικού χώρου.

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνικών Τηλεπισκόπησης (Remote Sensing), άνοιξε νέους δρόμους για τη μελέτη κατολισθητικών φαινομένων. Τα υψηλής ανάλυσης μοντέλα εδάφους HRDSM (High Resolution Digital Surface Models), ως παράγωγα της ψηφιακής σάρωσης του εδάφους από συστήματα μη Επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV), προσφέρουν ένα σύνολο μετρικών και ποιοτικών πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών μετακινήσεων του εδάφους αλλά και για την αποτύπωση μιας κατολίσθησης με σχετική ακρίβεια.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκαν αφενός οι συνήθεις κανονικές εργασίες παραγωγής και επεξεργασίας, τεσσάρων ψηφιακών μοντέλων εδάφους, από αποτυπώσεις της περιοχής, με τεχνικές UAV για την περίοδο 2018 – 2020, με ιδιαίτερη λεπτομέρεια και αφετέρου ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων της οπτικής ερμηνείας τους με ένα παλαιότερο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής όπως αυτή αποτυπώθηκε με τεχνικές ALS (Airborne Laser Scanning) το έτος 2007. Επιπροσθέτως, έγινε απόπειρα ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας όλων των διαθέσιμων μοντέλων, που πραγματοποιήθηκε μέσω της καινοτομικής εφαρμογής μεθόδων Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), διά της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis) που επέτρεψε την απομείωση των γεωαναλυτικών πληροφοριών του εκάστοτε μοντέλου, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, και την αυτοματοποιημένη εξαγωγή πρόσθετης επαυξημένης γεωμορφολογικής πληροφορίας.

Η ανάπτυξη της μεθόδου PCA, τα στάδια της οποίας αναλύονται βήμα προς βήμα παρέχοντας στον αναγνώστη σαφή εικόνα της διαδικασίας, επέτρεψε την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας των πλαγιών, και την λεπτομερή αναγνώριση μορφολογικών ενδείξεων κατολισθήσεων, που σε συνδυασμό με τις επιτόπου παρατηρήσεις και επισημάνσεις στο πεδίο, πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου, οδήγησαν στην οριοθέτηση ολόκληρης της κατολίσθησης, καθώς και των επιμέρους κατολισθήσεων που την αποτελούν, και στην αποτύπωση των ορίων τους σε όλους τους θεματικούς χάρτες και τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν για αυτή.

Ο ευρύτερος χώρος, της εν λόγω κατολίσθησης, βρίσκεται υπό την συνεχή επίδραση δυναμικών παραγόντων αποσταθεροποίησης, τόσο από διαδικασίες όπως η διάβρωση και αποσάθρωση που δρουν στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και από την περιστασιακή ενεργοποίηση της κατολίσθησης, που ενεργοποιείται αφενός από μια πιθανή εκδήλωση αργής βαθιάς ολίσθησης της βάσης της, και αφετέρου από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις. Η κατολίσθηση δεν φαίνεται να έχει ανακτήσει κάποια, έστω υποβαθμισμένη, μακροχρόνια ισορροπία αλλά αντίθετα κατά καιρούς και ιδιαίτερα σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων εμφανίζει περεταιίρω αστάθειες. Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης της εμφανίζονται σποραδικά ή και εποχιακά και έχουν σταδιακά αποτελέσματα, και για αυτό τον λόγο ο προσδιορισμός ενός σαφούς μηχανισμού αστοχίας είναι δύσκολος. Παράλληλα, μικρότερες τοπικές αστοχίες εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, όπως επιφανειακές ολισθήσεις μικρότερης κλίμακας, ροές εδαφών και κορημάτων, και προϊόντα από βραχοκαταπτώσεις, στα πιο σταθερά τμήματα της, συμβάλλουν στην περεταιίρω ενεργοποίηση του φαινομένου, αναδιαμορφώνοντας την γεωμετρία της πλαγιάς και φορτίζοντας με πρόσθετο υλικό την κατολίσθηση.

Όσον αφορά την ενεργότητα, για να διαπιστωθεί αν υπάρχει ένα σταθερό μοτίβο εμφάνισης αστοχιών εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, επιτελέστηκαν ορισμένες συγκριτικές αναλύσεις. Οι αναλύσεις αυτές αφορούν, τόσο την ποιοτική οπτική ερμηνεία δορυφορικών εικόνων της περιοχής που αφορούν χρονικό διάστημα εννέα ετών (2010 – 2019), όσο και την αυτοματοποιημένη εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων, σε σχέση με τις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ δύο εξεταζόμενων ψηφιακών μοντέλων, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, διά της εφαρμογής υπολογιστικών πράξεων, ανάμεσα σε δύο εξεταζόμενα μοντέλα, και την αποτύπωση των μορφολογικών αλλαγών (Change Detection), σε ένα νέο ψηφιακό μοντέλο διαφοράς ονομαζόμενο ως DEM of Difference (DoD) αποτελούμενο από εικονοστοιχεία (pixel) με τιμές που αντιστοιχούν στη διαφορά των τιμών των εισαγόμενων μοντέλων. Τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων, έδειξαν πως στην περιοχή δεν υπάρχει ένα σταθερό μοτίβο εμφάνισης αστοχιών καθώς πολλά τμήματα της δεν είναι αμέσως προφανή ως προς την πιθανή ενεργοποίησή τους, και η αστοχία του εδάφους, εντός αυτών των περιοχών δεν συμβαίνει σε τακτική βάση. Παρόλα αυτά, στο δυτικό τμήμα της υπάρχει μια επιμέρους πλήρως ενεργή κατολίσθηση χαρακτηριζόμενη από έντονες εκδηλώσεις εδαφικών ασταθειών, από επιφανειακές ολισθήσεις, εδαφικούς ερπυσμούς και ροές κορημάτων, μέχρι και λασποροές στα κατώτερα τμήματα της, η οποία φαίνεται να είναι υπεύθυνη για την ευρύτερη ενεργοποίηση του φαινομένου.

Συμπερασματικά τα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής έχουν προβληματίσει στο παρελθόν και ενδέχεται να συνεχίσουν να προβληματίζουν και στο μέλλον, αποτελώντας ουσιαδώς ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο σύστημα αστάθειας που εξελίσσεται με τον χρόνο, και γι' αυτόν τον λόγο η έρευνά της περιοχής θα πρέπει να συμπληρώνεται και να αναθεωρείται συνεχώς.

Τέλος, η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε, στην παρούσα διατριβή, για την διερεύνηση της κατολίσθησης, αποτελεί μια φθηνή και αποτελεσματική λύση για την παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου, και γι' αυτόν τον λόγο θα ήταν εύλογο, έρευνες, υπό το ίδιο ή παραπλήσιο ερευνητικό πλαίσιο, να εκτελούνται συστηματικά για την περιοχή, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο. Παράλληλα, διά της εφαρμογής εξειδικευμένων τεχνικών και μεθόδων της επιστήμης της πληροφορικής, στο ερευνητικό αυτό πλαίσιο, δόθηκε επιπροσθέτως, η ευκαιρία αξιολόγησης του βαθμού απόδοσης τέτοιων μεθόδων σε θέματα έρευνας της γήινης επιφάνειας και στην παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων με αυτοματοποιημένο τρόπο.

Λέξεις κλειδιά: Τυμφρηστός Ευρυτανίας, Ράχη Τυμφρηστού, Κατολισθητικά φαινόμενα σε περιβάλλον φλύσχη, Μητρώα κατολισθήσεων, UAV, PCA, Change Detection, DEM of Difference.



SUMMARY

The present thesis focuses on the geological engineering investigation of an extensive complex landslide, at the foot of the eastern side of the mountain range of Tymfristos in the Prefecture of Evrytania, a few kilometers west of the village Tymfristos, along the road network of Lamia – Karpenisi, with the use of Unmanned Aerial Vehicles Systems (UAV). This research, emphasizes on the complete assessment of the wider soil instability in the area, and the creation of a database, consisting of maps, reports, and markings regarding the surface deformation of the area, due to landslides phenomena, which will provide useful data for monitoring and forecasting the subsequent development of the phenomenon in the future.

Historically, the area under examination, due to its intense relief but mainly due to the adverse geological and climatic conditions that prevail in it, is of particular interest in the creation of landslides, and has occupied many researchers and scholars.

In the past, landslide surveys in the area have been conducted using conventional survey methods, such as topographic maps inspections, field mapping investigations and execution of geo-research drilling programs with the purpose of application instruments to monitor the soil movements of the area, but they were limited to a smaller scale landslide, within the wider, complex landslide area. In recent years, rapid development of Remote Sensing techniques opened new avenues for the study of landslides. High Resolution Digital Surface Models (HRDSM), as derivatives of digital ground scanning by unmanned aerial vehicles (UAVs), offer wealthy sums of metric and quality information that can be used to detect ground movement characteristics as well as to capture landslides with relative accuracy.

In this master's thesis took place, on the one hand, the usual normal flow of work for the production and processing of four digital terrain models, from surveys of the area with UAV techniques, referring to a time period from 2018 to 2020, was conducted with detail, and on the other hand, the results of their visual interpretation were compared with an older digital terrain model of the area as it was captured by ALS (Airborne Laser Scanning) techniques in 2007. Additionally, an attempt to enhance the visual interpretation of all available models, has been executed through the innovative application of Machine Learning methods, through the PCA (Principal Component Analysis) method that allowed the reduction of the geo-analytical information of each model, and the automated extraction of additional augmented geomorphological information.

The development of the PCA method, whose stages are analyzed step by step offering the reader a clear picture of the process, allowed the detailed evaluation of the morphology of the slopes, and the detailed identification of morphological signs of landslides, which in combination with on-site observations and markings in the field, before and after the application of the method, led to the final recording of the boundaries for the whole landslide, as well as the individual landslides that compose it, and to the mapping of their limits in all the thematic maps and the models made for it.

The wider area of this landslide is under the constant influence of dynamic destabilizing factors, both from processes such as erosion and disintegration acting on the soil surface, and from the occasional activation of the landslide, which is triggered by a possible slow occurrence deep slipping of its base, as well as from superficial successive slides.

The landslide has not regained even a degraded long-term stability but on the contrary at times and especially in periods of heavy rainfall it shows further instabilities. The mechanisms of its activation appear sporadically or seasonally and have gradual effects, and for this reason it is difficult to identify a clear mechanism of failure. At the same time, smaller local failures within the wider landslide area, such as smaller-scale rotational slide, soil and debris flows, and rockfall products from failures in its most stable parts, contribute to the further activation of the phenomenon, by reshaping the geometry of the slope and charging the landslide with additional material.

In terms of activity, some comparative analyzes were performed to determine whether there is a consistent pattern of failures within the wider landslide area. These analyzes concern both the qualitative visual interpretation of satellite images of the area referring to a period of nine years (2010 - 2019), as well as the automated export of quantitative results, in relation to altitude differences between two examined digital models, through the application of computational operations, between the two of them, and the recording of morphological changes (Change Detection), in a new digital model called DEM of Difference (DoD) consisting of pixels with values corresponding to the differences of the two imported models.

The results showed that there is no fixed pattern of failures in the area, as many parts of it are not immediately obvious in terms of their possible activation, and ground failure does not occur on a regular basis. However, in the western part of the total landslide there is an fully active individual landslide characterized by intense manifestations of soil instability, from surface landslides, soil creeps and steep flows, up to mudflows in the lower parts of the landslide, which seems to be responsible for the reactivation of the total phenomenon.

In conclusion, the landslide of the area has been a problem in the past and may continue to be a problem in the future, being essentially an ever-changing system of instability that evolves over time, and therefore the research of the region should be constantly supplemented and revised.

The methodology applied in the present thesis, for landslide investigation is a cheap and effective solution for monitoring the evolution of the phenomenon, and therefore additional research for the area, under the same or similar research framework, must be performed in regular bases, both at academic and research level.

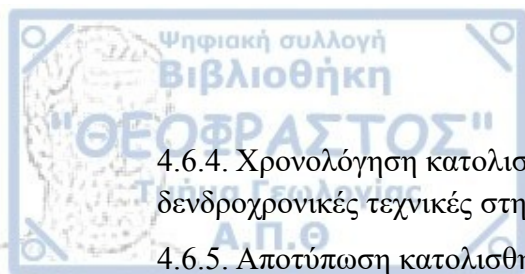
Finally, through the application of specialized techniques and methods of computer science, in this research context, the opportunity to evaluate the efficiency of such methods in matters of earth's surface investigation and landslide monitoring in an automated way was additionally and successfully given.

Key words: Tymfristos Evrytania, Rahi Tymfristou, Landslides in flysch environment, Landslides database, UAV, PCA, Change Detection, DEM of Difference.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
SUMMARY	viii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xvii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xxx
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	xxxiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1. Αντικείμενο	2
1.2. Περιοχή Μελέτης	3
1.3. Σκοπός.....	7
1.4. Ερευνητικά ερωτήματα	8
1.5. Πρόγραμμα αξιολόγησης	9
1.6. Μεθοδολογία.....	9
1.6.1. Εργασίες γραφείου	9
1.6.2. Εργασίες πεδίου	12
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	15
2.1. Γενικά.....	15
2.2. Ορισμοί	16
2.3. Ταξινόμηση κατολισθήσεων	16
2.4. Κατηγορίες κατολισθήσεων	19
2.5. Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων	24
2.6. Φαινόμενα κατολισθήσεων σε σχηματισμό φλύσχη.....	26
2.7. Τεχνικογεωλογικό πρότυπο φλύσχη	26
2.8. Μελέτη περιπτώσεων	29
3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UAV	34
3.1. Γενικά.....	34
3.2. Μελέτη κατολισθήσεων με την χρήση τεχνικών Τηλεπισκόπησης.....	35
3.3. Μελέτη κατολισθήσεων με την χρήση Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών	36

3.4. Βασικές αρχές – Μεθοδολογία UAV	37
3.5. Αυτοματοποιημένες εφαρμογές συστημάτων UAV για την μελέτη κατολισθήσεων	38
3.6. Ταυτοποίηση κατολισθήσεων μέσω της οπτικής ερμηνείας ψηφιακών μοντέλων	38
3.6.1. Υψόμετρο (Elevation)	39
3.6.2. Κλίση (Slope)	39
3.6.3. Προσανατολισμός κλιτών (Aspect).....	39
3.6.4. Σκιασμένο ανάγλυφο (Hillshade).....	39
3.6.5. Τραχύτητα (Roughness)	40
3.6.6. Τοπογραφικό Άνοιγμα (Openness)	40
3.6.7. Καμπυλότητα κάτοψης και κατατομής (Plan and Profile curvature).....	40
3.6.8. Δείκτης τοπογραφικής θέασης (Topographic position index TPI)	40
3.6.9. Αναλογία επιφανειακού αναγλύφου (Surface Relief Ratio SRR).....	41
3.7. Μελέτη περίπτωσης	41
3.7.1. Principal Component Analysis (PCA)	44
3.7.2. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα	47
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	50
4.1. Γεωμορφολογικές – Τοπογραφικές συνθήκες	50
4.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη περιοχής	53
4.2.1. Γεωτεκτονική θέση.....	53
4.2.2. Λιθοστρωματογραφία	54
4.2.3. Τεκτονική	54
4.3. Γεωλογικό καθεστώς ευρύτερης περιοχής.....	55
4.4. Υδρογεωλογικό καθεστώς ευρύτερης περιοχής.....	60
4.4.1. Κλίμα.....	60
4.4.2. Υδρολογικό ισοζύγιο.....	63
4.4.3. Υδρολιθολογικό καθεστώς σχηματισμών	71
4.5. Στοιχεία σεισμικότητας.....	72
4.6. Κατολισθητικά φαινόμενα στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού	75
4.6.1. Γενικά.....	75
4.6.2. Η κατολίσθηση Τυμφρηστού	76
4.6.3. Ιστορική καταγραφή κατολισθητικών φαινομένων στη περιοχή Ράχη Τυμφρηστού....	77



4.6.4. Χρονολόγηση κατολισθητικών φαινομένων με δενδρογεωμορφολογικές και δενδροχρονικές τεχνικές στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού	79
4.6.5. Αποτύπωση κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής Ράχη Τυμφρηστού με την χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV)	81
4.6.6. Εκτίμηση γεωτεχνικών ιδιοτήτων της ευρύτερης βραχώμαζας στη περιοχή Ράχη Τυμφρηστού	82
4.7. Συμπεράσματα ανάλυσης συνθηκών ευρύτερης περιοχής	84
5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	88
5.1. Ερευνητικό πλαίσιο και στάδια μεθοδολογίας της έρευνας	88
5.2. Προσέγγιση με την χρήση εναέριων συστημάτων UAV	89
5.2.1. Πρωτογενή ψηφιακά δεδομένα – Μεθοδολογία κατασκευής ψηφιακών μοντέλων εδάφους	89
5.2.2. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του 2018	89
5.2.3. Ψηφιακά μοντέλα εδάφους του 2019 – 2020	91
5.2.4. Ψηφιακό μοντέλου εδάφους του 2007	94
5.2.5. Πρώτη επεξεργασία δεδομένων	95
5.2.6. Ερμηνεία ψηφιακών μοντέλων εδάφους – κατασκευή χαρτών	95
5.3. Γεωμορφολογική ανάλυση επιφανείας	96
5.3.1. Μορφολογία εδάφους.....	96
5.3.2. Αποτύπωση σύνθετης κατολίστησης Τυμφρηστού	98
5.3.3. Αποτύπωση επιμέρους κατολισθήσεων	100
5.4. Γεωμορφολογική διερεύνηση επιφανείας στο πεδίο	102
5.4.1. Γενικό πλαίσιο έρευνας στο πεδίο	102
5.4.2. Αποτύπωση ορίων ευρύτερης κατολίστησης.....	103
5.4.3. Ενδείξεις περιστροφικών ολισθήσεων	104
5.4.4. Αποτύπωση επιφανειών κατακρημνίσεων	106
5.4.5. Αποτύπωση περιοχών βραχοκαταπτώσεων – ενδείξεις ροών κορημάτων	107
5.4.6. Ενδείξεις εδαφικών ερπυσμών – αποτύπωση μείζονων ρωγμών και διαρρήξεων	108
5.4.7. Υδρογεωλογικό καθεστώς – αποτύπωση περιοχών διήθησης και πηγών.....	109
5.4.8. Χάρτης αποτύπωσης κατολισθητικών φαινομένων	110
5.5. Τεχνικογεωλογική διερεύνηση επιφανείας	112
5.5.1. Τεκτονική περιοχής μελέτης	112

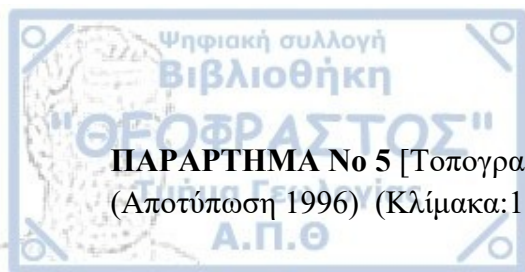
5.5.2. Τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση - Αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής ..	113
5.5.3. Χαρακτηριστικοί επιμέρους τύποι φλύσχη	113
5.5.4. Επιφανειακές αποθέσεις Τεταρτογενούς.....	119
5.6. Γεωλογική – Γεωτεχνική ανάλυση υπεδάφους.....	121
5.6.1. Δεδομένα γεωτρήσεων	122
5.6.2. Ενδεικτικές τομές	123
5.6.3. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων.....	133
5.6.4. Γεωτεχνικό προσομοίωμα	133
5.7. Συμπεράσματα τεχνικογεωλογικής διερεύνησης περιοχής μελέτης.....	135
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	139
6.1. Γενικό πλαίσιο.....	139
6.2. Εφαρμογή της μεθόδου PCA για πρόσθετη ενίσχυση της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων υψηλής ανάλυσης (HRDEM)	139
6.2.1. Μεθοδολογία.....	141
6.2.2. Αποτελέσματα	143
6.2.3. Συμπεράσματα.....	160
6.3. Διερεύνηση χρονικής εξέλιξης κατολισθητικών φαινομένων	161
6.3.1. Μεθοδολογία.....	161
6.3.2. Αποτελέσματα	165
6.3.3. Συμπεράσματα.....	167
6.4. Μηχανισμοί αστοχίας κατολισθήσεων περιοχής Ράχης Τυμφρηστού.....	169
6.4.1. Μηχανισμός αστοχίας ευρύτερης κατολίσθησης.....	169
6.4.2. Εξέλιξη φαινομένου	170
6.4.3. Επιμέρους μηχανισμοί αστοχίας	173
6.5. Ενδεικτικές διερευνητικές αναλύσεις ευστάθειας έναντι ολίσθησης	176
6.5.1. Μεθοδολογία.....	176
6.5.2. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα	179
6.6. Αναλυτικά μητρώα κατολισθήσεων.....	184
6.7. Συμπεράσματα ανάλυσης κατολισθητικών συνθηκών περιοχής μελέτης	193

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	197
7.1. Συμπεράσματα	197
7.1.1. Συμπεράσματα για: την αποτύπωση της ευρύτερης κατολίσθησης.....	197
7.1.2. Συμπεράσματα για: την εξαγωγή πρόσθετων δεδομένων, χρήση εφαρμογών μηχανικής μάθησης, όπως η μέθοδος PCA, από τα ήδη υπάρχοντα	198
7.1.3. Συμπεράσματα για: τα αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου επαυξημένης ανάλυσης και την τελική οριοθέτηση της κατολίσθησης	199
7.1.4. Συμπεράσματα για: τον μηχανισμό αστοχίας του εδάφους στην περιοχή.....	200
7.1.5. Συμπεράσματα για: την συχνότητα εμφάνισης των αστοχιών.....	201
7.1.6. Συμπεράσματα για: τους παράγοντες που δρουν στην περιοχή και είναι υπεύθυνοι για την γένεση κατολισθητικών φαινομένων.....	202
7.2. Ενδεικτικά μέτρα σταθεροποίησης και ελέγχου της κατολίσθησης.....	203
7.2.1. Για το σύνολο της κατολίσθησης	203
7.2.2. Παρακολούθηση της κατολίσθησης.....	204
7.2.3. Τοπικές επιφανειακές επεμβάσεις.....	204
7.2.4. Πιθανή διέλευση νέου οδικού δικτύου.....	207
7.2.5. Πρόληψη και περιβαλλοντική διαχείριση κατολισθήσεων.....	208
7.3. Προτάσεις νέας έρευνας.....	209

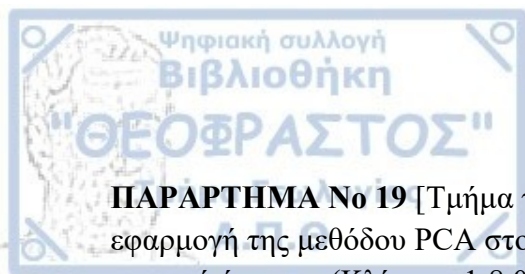
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	210
Διεθνή βιβλιογραφία	210
Ελληνική βιβλιογραφία.....	217
Διαδικτυακές πηγές.....	218
Λογισμικά	218

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ (Παρατίθενται σε ξεχωριστό τεύχος)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 1 [Αναλυτικά μητρώα γεωτρήσεων].....	223
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 2 [Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής (Κλίμακα:1:50.000)]	239
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 3 [Ψηφιοποιημένο τμήμα γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου (Κλίμακα:1:50.000)]	241
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 4 [Χάρτης κατεΐσδυσης ευρύτερης περιοχής (Κλίμακα:1:50.000)]	243



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 5 [Τοπογραφικός χάρτης πρώτης οριοθέτησης κατολισθήσεων (Αποτύπωση 1996) (Κλίμακα:1:8.000)]	245
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 6 [Τοπογραφικός χάρτης αποτύπωσης κατολισθήσεων (Αποτύπωση 2003) (Κλίμακα:1:8.000)]	247
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 7 [Ψηφιακός ορθοφωτογραφικός χάρτης περιοχής (Αποτύπωση Νοεμβρίου 2019) (Κλίμακα:1:8.000)]	249
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 8 [Ψηφιακός ορθοφωτογραφικός χάρτης περιοχής (Αποτύπωση Νοεμβρίου 2020) (Κλίμακα:1:7.000)]	251
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 9 [Χάρτης υψομέτρου (Από μοντέλο ALS 2007) (Κλίμακα:1:8.000)]	253
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 10 [Χάρτης προσανατολισμού κλιτύων (Από μοντέλο ALS 2007) (Κλίμακα:1:8.000)]	255
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 11 [Χάρτης κλίσεων (Από μοντέλο ALS 2007) (Κλίμακα:1:8.000)]	257
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 12 [Χάρτης πολλαπλού σκιασμένου αναγλύφου (MSR) (Από μοντέλο ALS 2007) (Κλίμακα:1:8.000)]	259
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 13 [Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου (Hillshade) (Από μοντέλο UAV 2019) (Κλίμακα:1:8.000)]	261
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 14 [Τοπογραφικός χάρτης αποτύπωσης κατολισθητικών φαινομένων (Αποτύπωση 2020) (Κλίμακα:1:8.000)]	263
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 15 [Αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου, για την περιοχή μελέτης (Κλίμακα:1:8.000)]	265
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 16 [Θεματικά επίπεδα δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο (ALS) του 2007]	267
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 17 [Θεματικά επίπεδα δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του 2019]	269
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 18 [Χάρτης ενισχυμένου αναγλύφου ευρύτερης περιοχής μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο (ALS) του έτους 2007 (Κλίμακα:1:25.000)]	271



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 19 [Τμήμα του χάρτη ενισχυμένου αναγλύφου ευρύτερης περιοχής μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο (ALS) του έτους 2007, αναφερόμενο στην περιοχή έρευνας (Κλίμακα:1:8.000)].....273

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 20 [Χάρτης ενισχυμένου αναγλύφου περιοχής έρευνας μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο (UAV) του έτους 2019 (Κλίμακα:1:8.000)].....275

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 21 [Χάρτης DEM of DIFFERENCE (DoD) της περιοχής μελέτης που απεικονίζει τις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2007 (ALS) και 2019 (UAV), για χρονική ανάλυση δώδεκα χρόνων (Κλίμακα:1:8.000)]277

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 22 [Εννοιολογικό προσομοίωμα ευρύτερης περιοχής].....279

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο 23 [Εννοιολογικό προσομοίωμα υπό μελέτη κατολίστησης].....281

Εικόνα 1.1 Η Εξεταζόμενη περιοχή σε διάφορους χάρτες. **1)** Σε περιβάλλον Google Earth, όπου με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της εξεταζόμενης κατολίσθησης. **2)** Σε γενικό χάρτη της Ελλάδος. **3)** Σε χάρτη Δημοτικής διαίρεσης του διαμερίσματος της Στερεάς Ελλάδας, όπου με κόκκινο σημειώνεται ο Δήμος Μακρακώμης. 4

Εικόνα 1.2 Μορφολογία περιοχής έρευνας. Τμήμα τοπογραφικού χάρτη Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) της ευρύτερης περιοχής, κλίμακας: 1:25.000. 4

Εικόνα 1.3 Χαρακτηριστική απουσία βλάστησης στο κεντρικό τμήμα της πλαγιάς. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό μελέτη κατολίσθηση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η βλάστηση είναι αρκετά αραιή εντός των ορίων της κατολίσθησης (Περιβάλλον Google earth)..... 5

Εικόνα 1.4 Τμήμα Γεωλογικού χάρτη, από ΙΓΜΕ φύλλο ΚΑΡΠΙΕΝΗΣΙ, Κλίμακας: 1:25.000. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό μελέτη κατολίσθηση..... 5

Εικόνα 1.5 Τα οδικά δίκτυα για την προσπέλαση της περιοχής και η σήραγγα του Τυμφρηστού που παρακάμπτει τα ανώτερα υψόμετρα του παλαιού οδικού δικτύου (Σε περιβάλλον Google Maps)..... 6

Εικόνα 1.6 Η σήραγγα Τυμφρηστού σε περιβάλλον Google Earth. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό εξέταση κατολίσθηση, με πράσινο η πρώτη οριοθέτηση της κατολίσθησης το 1996 και με κίτρινο χρώμα οι θέσεις του γεωερευνητικού προγράμματος 15 γεωτρήσεων που εκτελέστηκε για την μελέτη της. Τέλος, στην εικόνα φαίνονται 2 φωτογραφίες η μία από την είσοδο και η άλλη από την έξοδο της σήραγγας (Φωτογραφίες από τον συγγραφέα). 7

Εικόνα 1.7 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής το έτος 2020. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομοσαϊκός Χάρτης (DOM) (μορφή Raster). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM) (μορφή Raster). 10

Εικόνα 1.8 Αποτελέσματα της μεθόδου PCA κατά την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους του Νοεμβρίου 2019. Δημιουργία μιας νέας σύνθετης εικόνας αποτελούμενης από τρία κύρια συστατικά (PC). 11

Εικόνα 1.9 Φωτογραφία κατά την χαρτογράφηση πεδίου. Μέτρηση τεκτονικών στοιχείων σε σχηματισμό ψαμίτη (μέλος φλυσχικού σχηματισμού), στην δυτική πτέρυγα της εν λόγω κατολίσθησης, με στόχο την κατασκευή τεκτονικού διαγράμματος. 12

Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση Βραχοκαταπτώσεων (τροποποιημένο από USGS, 2004 & Varnes, 1978)..... 19

Εικόνα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση Ανατροπών (τροποποιημένο από USGS, 2004 & Varnes, 1978)..... 19

Εικόνα 2.3 Χαρακτηριστικά τμήματα περιστροφικής ολίσθησης (Varnes, 1978 τροποποιημένο).... 20

Εικόνα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση Μεταθετικών ολισθήσεων. **Αριστερά** η μάζα της κατολίσθησης κινείται κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας με μια μικρή περιστροφή και κάμψη.

Δεξιά η κινούμενη μάζα αποτελείται από μια ή μερικές στενά συνδεδεμένες μονάδες που κινούνται προς τα κάτω ως μια σχετικά συνεκτική μάζα. (Varnes, 1978 τροποποιημένο).	21
Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση Επίπεδων ολισθήσεων (τροποποιημένο από Highland & Bobrowsky, 2008).....	21
Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση Σφηνοειδών ολισθήσεων (τροποποιημένο από Highland & Bobrowsky, 2008).....	21
Εικόνα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση Εξαπλώσεων (τροποποιημένο από USGS, 2004 & Varnes, 1978).	22
Εικόνα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση Ροής κορημάτων (Varnes, 1978 τροποποιημένο).	22
Εικόνα 2.9 Ταξινόμηση παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων (WP/WLI 1994).	24
Εικόνα 2.10 Παράδειγμα μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς με το χρόνο (WP/WLI 1994).	26
Εικόνα 2.11 Άποψη της κατολίσθησης Slano Blato, και του χωριού Locavec (από Petkonšek et al., 2013).	29
Εικόνα 2.12 Απλοποιημένη γεωλογική τομή της κατολίσθησης (από Petkonšek et al., 2013).	29
Εικόνα 2.13 Εναέρια άποψη της κατολίσθησης Slano Blato και η εξέλιξή του φαινομένου με την πάροδο του χρόνου (από Petkonšek et al., 2013).	30
Εικόνα 2.14 Γεωλογικός χάρτης εξεταζόμενης περιοχής. 1. Παλαιογενής φλύσσης, 2. Αλλουβιακοί σχηματισμοί, 3. Ασβεστόλιθοι, 4. Ρήγματα. Με μπλε τελείες αποτυπώνονται οι περιοχές των κατολισθήσεων (από Arbanas et al., 2013).	30
Εικόνα 2.15 Γεωλογική τομή περιοχής μελέτης. 1. Παλαιογενείς ασβεστόλιθοι, 2. Αργιλίτης, 3. Παλαιογενής φλύσσης, 4. Τεταρτογενείς αποθέσεις (από Arbanas et al., 2013).	31
Εικόνα 2.16 Φωτογραφίες των διάφορων κατολισθήσεων στην περιοχή (από Arbanas et al., 2013).	31
Εικόνα 3.1 Η εξεταζόμενη περιοχή σε 1) Δορυφορική εικόνα Google Earth. 2) Δορυφορική εικόνα Landsat.	35
Εικόνα 3.2 1) Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα. 2) Τηλεχειριστήριο και οθόνη παρακολούθησης (από Yu et al., 2017).	36
Εικόνα 3.3 Structure for Motion (SfM). Λήψη φωτογραφιών με μεγάλη επικάλυψη από πολλαπλές θέσεις (Westoby, 2012).	37

Εικόνα 3.4 Τυπική ροή εργασιών για την απόκτηση και επεξεργασία των δεδομένων UAV (Nex & Remondino, 2004).....	38
Εικόνα 3.5 Περιοχή μελέτης και θέσεις των κατολισθήσεων που μελετήθηκαν (Pawluszek, 2018). 42	
Εικόνα 3.6 Θεματικά επίπεδα που κατασκευάστηκαν για την κατολίσηση No 1. (Pawluszek, 2018).	43
Εικόνα 3.7 Διακύμανση αθροιστικών ιδιοτιμών ανάλογα με τον αριθμό των κύριων συστατικών PCs (Pawluszek, 2018).....	45
Εικόνα 3.8 Παλέτα χρωμάτων και αντίστοιχων τοπογραφικών πληροφοριών που εφαρμόζονται στα τρία κύρια PCs (Pawluszek, 2018).	46
Εικόνα 3.9 Αναπαράσταση των τριών κύριων συστατικών PC.....	46
Εικόνα 3.10 Σύνθεση PCA και μορφολογικά χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν για τις κατολισθήσεις No 1 και No 2 (Pawluszek, 2018).	47
Εικόνα 4.1 Η Εξεταζόμενη περιοχή σε διάφορους χάρτες. 1) Σε περιβάλλον Google Earth, όπου με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της εξεταζόμενης κατολίσησης. 2) Σε γενικό χάρτη της Ελλάδος. 3) Σε χάρτη Δημοτικής διαίρεσης του διαμερίσματος της Στερεάς Ελλάδας, όπου με κόκκινο σημειώνεται ο Δήμος Μακρακώμης.	50
Εικόνα 4.2 Η κορυφή Βελούχι, πάνω από την πόλη του Καρπενησίου.	50
Εικόνα 4.3 Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής (Κλίμακα: 1:50.000), με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίσησης (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο Παράρτημα No 2).	51
Εικόνα 4.4 Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου ευρύτερης περιοχής με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίσησης.	52
Εικόνα 4.5 Χαρακτηριστική απουσία βλάστησης στη δυτική πλαγιά της κοιλάδας. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό μελέτη κατολίσηση (Περιβάλλον Google earth).....	52
Εικόνα 4.6 Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας, με Ροζ χρώμα σημειώνεται η ζώνη Ωλονού – Πίνδου, ενώ με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η θέση της περιοχής μελέτης (Μουντράκης, 2010 τροποποιημένο).....	53
Εικόνα 4.7 Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη, αντιπροσωπευτική της Ζώνης Ωλονού – Πίνδου (από τον χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου).	54
Εικόνα 4.8 Ψηφιοποιημένο τμήμα γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου (Κλίμακας: 1:50.000) με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίσησης. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο Παράρτημα No 3).	56

Εικόνα 4.9 1) Ερυθροί σχιστόλιθοι της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης. 2) Πελαγικοί, πλακώδεις ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού. 3) Περιοχή σε περιβάλλον Google Earth πάνω στην οποία σημειώνεται η περιοχή των παραπάνω φωτογραφιών.....57

Εικόνα 4.10 1) Αργιλικός σχιστόλιθος. 2) Έντονα τεκτονισμένος έως αποσαθρωμένος ιλυόλιθος με λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών. 3) Περιοχή σε περιβάλλον Google Earth πάνω στην οποία σημειώνεται η περιοχή των παραπάνω φωτογραφιών.....57

Εικόνα 4.11 1) Παχυστρωματώδης ψαμμίτης με λεπτές παρεμβολές ιλυολίθων 2) Εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και λεπτοστρωματώδων ιλυολίθων - αργιλικών σχιστολίθων. 3) Εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και έντονα αποσαθρωμένων ιλυολίθων, οι ψαμμίτες εμφανίζονται με χαρακτηριστική κρεμμυδοειδή σφαιρική μορφή ως αποτέλεσμα της μηχανικής και χημικής αποσάθρωσης. 4) Πλευρικά κορήματα ψαμμιτικής σύστασης προσμειγμένα με μικρό ποσοστό αργιλοίλους.....58

Εικόνα 4.12 1) Αλλουβιακό ριπίδιο λίγα χιλιόμετρα ανατολικά της ερευνηθείσας περιοχής, πάνω στο οποίο είναι κτισμένη η πόλη του Καρπενησίου. 2) Περιοχή σε περιβάλλον Google Earth πάνω στην οποία σημειώνεται η περιοχή της φωτογραφίας.....59

Εικόνα 4.13 Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο γεωλογίας ευρύτερης περιοχής, με μαύρο πλαίσιο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίστησης (Για το μοντέλο ισχύει το υπόμνημα του χάρτη της **Εικόνας 4.8**).60

Εικόνα 4.14 Χάρτης κλιματικής ταξινόμησης του ελλαδικού χώρου κατά Koppen – Geiger, (1936) (από Beck et al., 2018).....61

Εικόνα 4.15 Χάρτης συνολικής κατακρήμνισης στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm).....62

Εικόνα 4.16 Χάρτης μέσης θερμοκρασίας στον ελλαδικό χώρο62

Εικόνα 4.17 Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών. Οι σταθμοί σημειώνονται με το σύμβολο του σύννεφου, ενώ με άσπρο πλαίσιο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίστησης (Περιβάλλον Google earth).....63

Εικόνα 4.18 Διάγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για κάθε σταθμό ανά έτος.65

Εικόνα 4.19 Γραμμική συσχέτιση του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης με το υψόμετρο για την ευρύτερη περιοχή μελέτης.66

Εικόνα 4.20 Χάρτης συντελεστή κατείδυσης της υπό εξέταση περιοχής με μαύρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίστησης (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 4**).70

Εικόνα 4.21 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, με κόκκινο σημειώνεται η περιοχή μελέτης (από ηλεκτρονική σελίδα ΟΑΣΠ. Σύνδεσμος: <http://www.oasp.gr>).....73

Εικόνα 4.22 Γενικευμένος χάρτης σκιασμένου αναγλύφου που δείχνει τις κύριες δομές που ελέγχουν τη λεκάνη του Σπερχειού και την προτεινόμενη σχέση μεταξύ του Συστήματος Ρηγμάτων του Σπερχειού (SFS) με άλλα συστήματα ρηγμάτων της ευρύτερης Στερεάς Ελλάδας, όπως αυτό του Συστήματος Ρηγμάτων Καλλίδρομου (KFS). Τα βέλη υποδεικνύουν τις διαφορετικές κινηματικές (συμπίεση, έκταση, οριζόντια ολίσθηση) (Από Kiliyas et al., 2008). 73

Εικόνα 4.23 Χάρτης σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή μελέτης τα τελευταία 50 χρόνια (από την ηλεκτρονική ιστοσελίδα του Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Σύνδεσμος: www.gein.noa.gr. Ημερομηνία ανάκτησης 15/06/2021). 74

Εικόνα 4.24 Περιοχή κατολισθητικών φαινομένων στους ανατολικούς πρόποδες του όρους Τυμφρηστού μερικά χιλιόμετρα Δυτικά του χωριού Τυμφρηστός. 76

Εικόνα 4.25 Τοπογραφικός χάρτης πρώτης οριοθέτησης κατολισθήσεων στη περιοχή το 1996. Πάνω στο χάρτη σημειώνονται οι θέσεις 15 γεωερευνητικών γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν το 1996 και το 1999 για τη γεωτεχνική μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων της εν λόγω περιοχής (Ο χάρτης συντάχθηκε από την εταιρία ΟΔΟΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗ Ε.Ε) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 5**). 77

Εικόνα 4.26 Τα εν λόγω υλικά κατολίσησης, όπως αυτά εντοπίστηκαν στην περιοχή κατά την επιτόπου αυτοψία. **1)** Εντός ενεργής κατολίσησης περιστροφικού χαρακτήρα. **2)** Εντός μεμονωμένης ανενεργής παλαιοκατολίσησης. 79

Εικόνα 4.27 Μοντέλο κατολίσησης όπως προέκυψε από τις έρευνες στην περιοχή, τις περιόδους 1996 και 1999 (από Καβουνίδης et al., 2010). 79

Εικόνα 4.28 Τοπογραφικός χάρτης αποτύπωσης κατολισθήσεων (2003) και των δενδρογεωμορφολογικών δειγμάτων (1 – 23). Τα δείγματα 18 – 23 εντοπίζονται εντός σταθερής επιφάνειας (Papadopoulos et al., 2007 – με τροποποιήσεις του γράφοντος) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 6**). 80

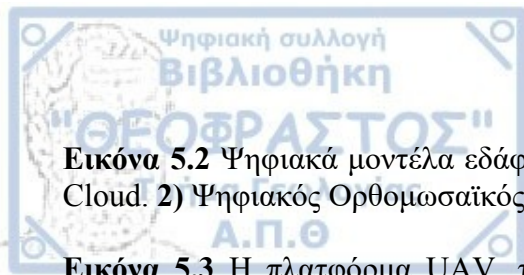
Εικόνα 4.29 Χάρτης ορίων της κατολίσησης και φωτογραφίες από την υπαίθρια αποτύπωση (από Δανδίκια, 2018). 82

Εικόνα 4.30 Η σήραγγα Τυμφρηστού σε περιβάλλον Google Earth. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό εξέταση κατολίσηση, με πράσινο η πρώτη οριοθέτηση της κατολίσησης το 1996 και με αστεράκια οι θέσεις του γεωερευνητικού προγράμματος 15 γεωτρήσεων που εκτελέστηκε για την μελέτη της. Τέλος, στην εικόνα φαίνονται 2 φωτογραφίες η μία από την είσοδο και η άλλη από την έξοδο της σήραγγας (Φωτογραφίες από τον συγγραφέα). 83

Εικόνα 4.31 Τυπική διατομή σχηματισμού φλύσχη, αποτελούμενο από ιλυόλιθο με πυκνές παρεμβολές αργιλικού σχιστολίθου, μέσα στη σήραγγα Τυμφρηστού (από Kontogianni et al., 2016). 83

Εικόνα 4.32 Εννοιολογικό προσομοίωμα ευρύτερης περιοχής 86

Εικόνα 5.1 Η πλατφόρμα UAV, τύπου DJI Phantom 3 Professional, που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση της περιοχής το έτος 2018. 90



Εικόνα 5.2 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής το έτος 2018. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM)..... 90

Εικόνα 5.3 Η πλατφόρμα UAV, τύπου DJI Phantom 4 Pro V2.0, που χρησιμοποιήθηκε για τις αποτυπώσεις της περιοχής τα έτη 2019 και 2020. 91

Εικόνα 5.4 Σχέδιο πτήσης στη περιοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τις θέσεις των 867 φωτογραφιών. Η πράσινη γραμμή καθορίζει την πορεία που ακολουθήθηκε με αφετηρία την μεγάλη μπλε τελεία (από report της επεξεργασίας κατασκευής του ψηφιακού μοντέλου στο λογισμικό Pix4D mapper). 91

Εικόνα 5.5 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής τον Ιούλιο του 2019. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM). 92

Εικόνα 5.6 Σχέδιο πτήσης στη περιοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τις θέσεις των 844 φωτογραφιών. Η πράσινη γραμμή καθορίζει την πορεία που ακολουθήθηκε με αφετηρία την μεγάλη μπλε τελεία (από report της επεξεργασίας κατασκευής του ψηφιακού μοντέλου στο λογισμικό Pix4D mapper). 92

Εικόνα 5.7 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής τον Ιούλιο του 2019. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM). 93

Εικόνα 5.8 Σχέδιο πτήσης στη περιοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τις θέσεις των 844 φωτογραφιών. Η πράσινη γραμμή καθορίζει την πορεία που ακολουθήθηκε με αφετηρία την μεγάλη μπλε τελεία (από report της επεξεργασίας κατασκευής του ψηφιακού μοντέλου στο λογισμικό Pix4D mapper). 93

Εικόνα 5.9 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής τον Νοέμβριο του 2020. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM). 94

Εικόνα 5.10 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ευρύτερης περιοχής για το έτος 2007, τμήμα του οποίου αποτελεί η περιοχή μελέτης. Με κόκκινο πλαίσιο απεικονίζεται η θέση και το πολλαπλό σκιασμένο ανάγλυφο MSR (Θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου) της ερευνηθείσας περιοχής (Μοντέλο από Εθνική Υπηρεσία Κτηματολογίου Ελλάδος)..... 94

Εικόνα 5.11 Ψηφιακός ορθοφωτογραφικός χάρτης περιοχής έρευνας, όπως αυτή αποτυπώθηκε την περίοδο Νοεμβρίου 2019. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 7**). 95

Εικόνα 5.12 Ψηφιακός ορθοφωτογραφικός χάρτης περιοχής έρευνας, όπως αυτή αποτυπώθηκε την περίοδο Νοεμβρίου 2020 (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 8**). 96

Εικόνα 5.13 Τοπογραφικός χάρτης στενής περιοχής μελέτης, με ισοδιάσταση 4 m (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 9**). 97

Εικόνα 5.14 Χάρτης προσανατολισμού των κλιτύων της στενής περιοχής μελέτης (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης

κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 10**)..... 98

Εικόνα 5.15 Χάρτης κλίσεων στενής περιοχής μελέτης (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 11**)..... 99

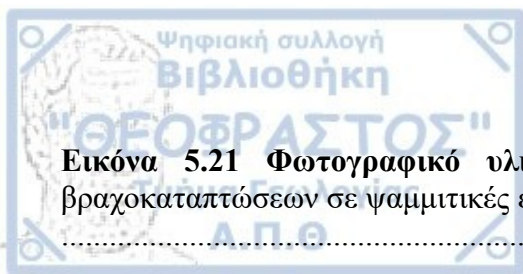
Εικόνα 5.16 Χάρτης πολλαπλού σκιασμένου αναγλύφου της περιοχής μελέτης πάνω στον οποίο αποτυπώνονται χαρακτηριστικά τμήματα της ευρύτερης κατολίστεσης (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 12**)..... 101

Εικόνα 5.17 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1) Τμήμα της δυτικής πτέρυγας της ευρύτερης κατολίστεσης. Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται το πιο σταθερό ψαμμιτικής σύστασης φλυσχικό υπόβαθρο. **2)** Στέψη ευρύτερης κατολίστεσης. **3)** Τμήμα της ανατολικής πτέρυγας της ευρύτερης κατολίστεσης, και σε αυτή την περιοχή αυτή εμφανίζεται το πιο σταθερό ψαμμιτικής σύστασης φλυσχικό υπόβαθρο. **4)** Τμήμα από το δυτικό όριο ευρύτερης κατολίστεσης, στο τμήμα αυτό εμφανίζεται πάλι το πιο σταθερό υπόβαθρο. **5)** Τμήμα της ανατολικής πτέρυγας της ευρύτερης κατολίστεσης. Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται το ιλυολιθικό κομμάτι του φλυσχικού υποβάθρου, παρόλο που ο σχηματισμός εμφανίζει έναν μεγάλο αποσαθρωμένο μανδύα και μια ανοιχτή δομή λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης, φαίνεται να βρίσκεται στην θέση του και να ισορροπεί υπό μεγάλη κλίση. **6)** Σταθερή ράχη ψαμμιτικής σύστασης στην περιοχή του πόδα της κατολίστεσης. **7)** Ανώτερο τμήμα της κεντρικής ράχης στην περιοχή του πόδα. Στο τμήμα αυτό εμφανίζεται πάλι το ιλυολιθικό τμήμα του φλυσχικού υποβάθρου και οι συνθήκες ισορροπίας είναι παραπλήσιες με αυτές της περίπτωσης 5. **8)** Κεντρική σταθερή ράχη ψαμμιτικής σύστασης στην περιοχή του πόδα της ευρύτερης κατολίστεσης. **Σημείωση:** Οι περιοχές των περιπτώσεων 6, 7 και 8, είναι πιθανό να μην συμμετέχουν στις κατολισθητικές κινήσεις της περιοχής, υπάρχει όμως και μια πιθανότητα να γλιστράνε στην βάση τους με έναν πολύ αργό ρυθμό, για αυτά τα τμήματα απαιτείται παραπάνω μελέτη και έρευνα..... 103

Εικόνα 5.18 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1 – 4) Περιοχές εντός της κύριας κατολίστεσης όπου εμφανίζονται ενδείξεις ύπαρξης περιστροφικών ολισθήσεων. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από μια ανώμαλη τοπογραφία με πολλές μικρολοφώδεις επιφάνειες καθώς και από απότομες επιπεδώσεις, βυθίσματα και φουσκώματα του αναγλύφου. **5, 6)** Περιοχές εντός παλαιοκατολισθήσεων. Οι παλαιοκατολισθήσεις της ευρύτερης περιοχής μπορούν να ταξινομηθούν ως παλαιές ρηχές ολισθήσεις χωρίς ενδείξεις πρόσφατης ενεργότητας..... 104

Εικόνα 5.19 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1 – 6) Περιοχές εντός του ενεργού τμήματος της κύριας κατολίστεσης όπου παρατηρείται μια πιο ακατάστατη μορφολογία του εδάφους, με έντονες ενδείξεις ενεργότητας αποτελούμενης από πολλές μικρότερης κλίμακας περιστροφικές ολισθήσεις..... 105

Εικόνα 5.20 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1) Δευτερεύουσα επιφάνεια κατακρήμνισης της κύριας κατολίστεσης. **2 - 6)** Κύριες επιφάνειες κατακρήμνισης μικρότερων κατολισθήσεων εντός του ευρύτερου χώρου της κύριας κατολίστεσης..... 106



Εικόνα 5.21 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1, 2 ,5, 6) Περιοχές βραχοκαταπτώσεων σε ψαμμιτικές εμφανίσεις του υποβάθρου. **3, 4)** Περιοχές απόθεσης κορημάτων. 107

Εικόνα 5.22 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1, 6) Εμφανίσεις κορμών δέντρων με κοίλη καμπυλότητα προς τα ανάντη, χαρακτηριστικό σημάδι ερπυστικών κινήσεων (Sharpe, 1938). **3)** Μετατοπισμένο τοίχιο σκυροδέματος. **2)** Εφελκυστικές ρωγμές επί του οδοστρώματος. Ο προσανατολισμός της ρωγμής είναι σχεδόν παράλληλος με την διεύθυνση της κίνησης, συνεπώς είναι ένα δείγμα οριοθέτησης κοντά στην κεφαλή της κύριας κατολίσθησης. **4, 5)** Εμφανίσεις ρωγμών και μείζονων διαρρήξεων στην επιφάνεια του εδάφους. 108

Εικόνα 5.23 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1, 2) Ταπεινώσεις του αναγλύφου γεμάτες με νερό (λήψη φωτογραφίας 1 Νοέμβριος 2019, λήψη φωτογραφίας 2 Μάιος 2021. **3, 4, 5)** Περιοχές εμφάνισης πηγών και στάσιμων νερών. **6)** Εγκάρσιο ρέμα του ποταμού Κατή. 110

Εικόνα 5.24 Τοπογραφικός χάρτης αποτύπωσης κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής (Κλίμακα 1:8.000) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 14**). 111

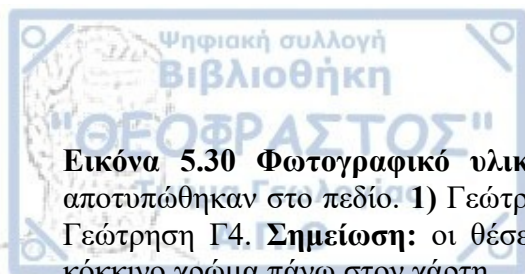
Εικόνα 5.25 1) Χαρακτηριστικές πτυχές τύπου Knick. **2)** Δυσαρμονικές μικροπτυχώσεις. 112

Εικόνα 5.26 Αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου, για την περιοχή μελέτης (Κλίμακα 1:8.000) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 15**). 114

Εικόνα 5.27 Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. 1 - 3) Χαρακτηριστικές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου III στο δυτικό (1,2) και ανατολικό (3) όριο, (9) και τοπικά στην σταθερή ράχη εντός της ευρύτερης κατολίσθησης. **4,5)** Τεκτονικά διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για εμφανίσεις κατά μήκος της δυτικής πτέρυγας. **6, 8, 10)** Χαρακτηριστικές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου VII σε διάφορες θέσεις εντός της ευρύτερης κατολισθητικής περιοχής. **7)** Ταξινόμηση επιμέρους πιο ψαμμιτικών μελών του φλύσχη κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη (V. Marinis, 2017). **Σημείωση:** οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη. 116

Εικόνα 5.28 Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. 1 - 3) Χαρακτηριστικές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου IX. **4)** Έντονα διατμημένος αργιλικός σχιστόλιθος ο οποίος τεμαχίζεται σε φυλλάρια. **6 - 8)** Πιθανές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου VIII στα όρια της ανατολικής πτέρυγας και τοπικά στο ανώτερο τμήμα της κεντρικής ράχης επί του νέου οδικού δικτύου Λαμίας - Καρπενησίου. **5)** Ταξινόμηση επιμέρους πιο ιλυολιθικών μελών του φλύσχη κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη (V. Marinis, 2017). **Σημείωση:** οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη. 119

Εικόνα 5.29 Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. 1 - 3) Υλικά κατολίσθησης αποτελούμενα από ένα μίγμα ψαμμιτικών ογκολίθων, λατύπων, μικρότερων ψαμμιτικών και ιλυολιθικών θραυσμάτων και αργιλοϊλύς, εντός της κύριας κατολίσθησης **4)** Πιθανά υλικά κατολίσθησης αποτελούμενα από ένα μίγμα αργιλοϊλύς και γωνιωδών ψαμμιτικών θραυσμάτων εντός παλαιοκατολίσθησης. **5 - 8)** Περιοχές εναπόθεσης ψαμμιτικών κορημάτων. **Σημείωση:** οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη. 121



- Εικόνα 5.30** Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. Οι γεωτρήσεις που αποτυπώθηκαν στο πεδίο. **1)** Γεώτρηση Γ5. **2)** Γεώτρηση Γ1. **3)** Γεώτρηση Γ2. **4)** Γεώτρηση Γ3. **5)** Γεώτρηση Γ4. **Σημείωση:** οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη. 123
- Εικόνα 5.31** Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μελέτης πάνω στον οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις των ενδεικτικών τομών. 124
- Εικόνα 5.32** Ενδεικτική διατομή Α – Α1 κατά μήκος του άξονα της κύριας κατολίσθησης. 128
- Εικόνα 5.33** Ενδεικτική διατομή Β – Β1 κατά μήκος της περιοχής των παλαιοκατολισθήσεων 1 και 2. 129
- Εικόνα 5.34** Ενδεικτική διατομή Γ – Γ1 κατά μήκος της παλαιοκατολίσθησης 3. 130
- Εικόνα 5.35** Ενδεικτική τομή Δ – Δ1 κάθετα προς τους κύριους άξονες της ευρύτερης συνολικής κατολίσθησης. 131
- Εικόνα 5.36** Ενδεικτικό τρισδιάστατο προσομοίωμα ευρύτερης κατολίσθησης Τυμφρηστού. 132
- Εικόνα 5.37** Υπόμνημα συμβόλων γεωτεχνικού προσομοιώματος. 133
- Εικόνα 5.38** Ενδεικτικό γεωτεχνικό προσομοίωμα του υπεδάφους. 134
- Εικόνα 5.39** Εννοιολογικό προσομοίωμα υπό μελέτη κατολίσθησης. 137
- Εικόνα 6.1** Συνοπτικό οργανόγραμμα εργασιών που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής μελέτης. 140
- Εικόνα 6.2** Ροή εργασιών ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων υψηλής ανάλυσης (HRDEM). 142
- Εικόνα 6.3** Θεματικά επίπεδα δεδομένων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (ALS) του 2007. (Παρατίθενται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 16**). 148
- Εικόνα 6.4** Θεματικά επίπεδα δεδομένων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Νοεμβρίου 2019. (Παρατίθενται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 17**). 149
- Εικόνα 6.5** Αθροιστική διακύμανση ιδιοτιμών περιεχόμενων Κύριων Συστατικών PCs (Principal Components) 150
- Εικόνα 6.6** Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου ALS για το έτος 2007. 152
- Εικόνα 6.7** Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για το έτος 2018. 152

Εικόνα 6.8 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για την περίοδο Ιουλίου 2019. 153

Εικόνα 6.9 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για την περίοδο Νοεμβρίου 2019. 153

Εικόνα 6.10 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για την περίοδο Νοεμβρίου 2020. 154

Εικόνα 6.11 Ενισχυμένη εικόνα, ανάλυσης 5 x 5 [m/ pixel], της μορφολογίας της ευρύτερης περιοχής μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης (ALS) του έτους 2007. Με κόκκινο πλαίσιο απεικονίζεται η θέση της ερευνηθείσας περιοχής. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 18**). 155

Εικόνα 6.12 Ενδεικτικές χρωματικές τομές πάνω στις οποίες αποτυπώνονται οι τοπογραφικές αναπαραστάσεις της επιφάνειας. Οι θέσεις των εν λόγω τομών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα στην **Εικόνα 6.13**. 156

Εικόνα 6.13 Τμήμα ενισχυμένης εικόνας, ανάλυσης 5 x 5 [m/ pixel], της μορφολογίας της ευρύτερης περιοχής μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης (ALS) του έτους 2007, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν, καθώς και οι θέσεις των δύο παραπάνω ενδεικτικών χρωματικών τομών. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 19**). 157

Εικόνα 6.14 Τοπογραφική αναπαράσταση επιφάνειας τριών κύριων συστατικών PCs. **1) Μπλέ κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το τρίτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (TPI, SRR, PROFILE και PLAN CURVATURE, OPENNESS). **2) Κόκκινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το πρώτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας, το οποίο δεν φαίνεται να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία και περιγράφει στο ~97% τον προσανατολισμό των κλιτύων της περιοχής (ASPECT). **3) Πράσινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το δεύτερο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας, στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (ROUGHNESS, SLOPE, ELEVATION, MSR). 157

Εικόνα 6.15 Ενισχυμένη εικόνα, ανάλυσης 1 x 1 [m/ pixel] της μορφολογίας της περιοχής μελέτης μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης (UAV) της περιόδου Νοεμβρίου 2019, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 20**). 158

Εικόνα 6.16 Τοπογραφική αναπαράσταση επιφάνειας τριών κύριων συστατικών PCs. **1) Μπλέ κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το τρίτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (SRR). **2) Κόκκινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το πρώτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας,

στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (SLOPE, MSR). **3) Πράσινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το δεύτερο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας, το οποίο δεν φαίνεται να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία και περιγράφει στο ~91% τον προσανατολισμό των κλιτύων της περιοχής (ASPECT).
..... 159

Εικόνα 6.17 Ενδεικτική αναπαράσταση της διαδικασίας κατασκευής του μοντέλου DoD, διά της εφαρμογής της εντολής Minus, σε περιβάλλον ArcMap, μέσω της αφαίρεσης των τιμών pixel του DEM του 2007 (ALS) από τις τιμές pixel του DEM του 2019 (UAV), κατά την διαδικασία σύγκρισης του κάθε pixel ξεχωριστά (Οι πίνακες της εικόνας από την επίσημη ιστοσελίδα των κατασκευαστών του προγράμματος ArcMap, στην διεύθυνση: <https://desktop.arcgis.com/>). 163

Εικόνα 6.18 Ροή εργασιών για την διερεύνηση της εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής μελέτης..... 164

Εικόνα 6.19 Δορυφορικές εικόνες της υπό μελέτη περιοχής για τα έτη 2010, 2016 και 2019 πάνω στις οποίες αναζητήθηκαν μεταβολές της μορφολογίας του εδάφους με στόχο την διερεύνηση της χρονικής εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, για χρονική ανάλυση εννέα ετών (2010 – 2019). Με κόκκινο αποτυπώνονται τα όρια της ευρύτερης κατολίστεσης και οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν αλλαγές του αναγλύφου, ενώ με μαύρο τα όρια των επιμέρους κατολισθήσεων που την αποτελούν..... 165

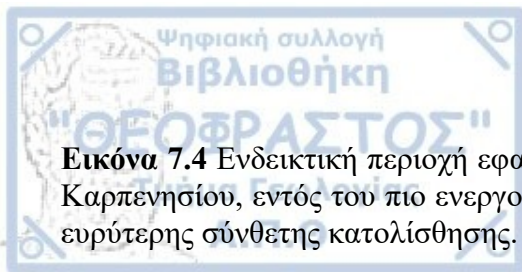
Εικόνα 6.20 Χάρτης DEM of DIFFERENCE (DoD) της περιοχής μελέτης, που απεικονίζει τις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2007 (ALS) και 2019 (UAV), για χρονική ανάλυση δώδεκα χρόνων. Επί του χάρτη με κόκκινο αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολίστεσης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 21**)..... 166

Εικόνα 6.21 Χάρτης DEM of DIFFERENCE (DoD) της περιοχής μελέτης, που απεικονίζει τις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2007 (ALS) και 2019 (UAV), για χρονική ανάλυση δώδεκα χρόνων, όπου επαληθεύονται εκτιμήσεις πρότερων αναλύσεων σχετικά με την εξέλιξη των κατολισθήσεων. Επί του χάρτη με κόκκινο αποτυπώνονται τα τελικά όρια της σύνθετης κατολίστεσης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την συνθέτουν (1,2,3 μεμονωμένες παλαιοκατολισθήσεις), καθώς και τα χαρακτηριστικά επιμέρους τμήματα της. 168

Εικόνα 6.22 Διάγραμμα σταδίων κατολισθήσεων, ανάλογα με τον ρυθμό της κίνησης και τον χρόνο εξέλιξης του φαινομένου (Legoueil, et al., 1996 – με τροποποιήσεις του γράφοντος)..... 171

Εικόνα 6.23 Ενδεικτικό προσομοίωμα της πιθανής εξέλιξης της ευρύτερης κατολίστεσης Τυμφρηστού. **α)** Πρώτη εκδήλωση επιφανειακής περιστροφικής ολίσθησης. **β)** Σταδιακή διάδοση του φαινομένου τόσο επιφανειακά όσο και βαθύτερα σε όλη την έκταση της περιοχής, καθώς και στα ανώτερα τμήματα της πλαγιάς, από την εκδήλωση διαδοχικών επιφανειακών και βαθύτερων ολισθήσεων, τόσο προοδευτικού όσο και οπισθοδρομικού χαρακτήρα. **γ)** Σταδιακή ανάκτηση της ισορροπίας του συστήματος της κατολίστεσης. Οι εκδηλώσεις των αστοχιών περιορίζονται τοπικά σε περιορισμένης έντασης μικρότερες τοπικές ολισθήσεις, ροές εδαφών και κορημάτων, καθώς και σε βραχοκαταπτώσεις στα πιο σταθερά τμήματα της. **δ)** Σημερινή κατάσταση της κατολίστεσης. Ενεργοποίηση της επιμέρους κύριας κατολίστεσης, εξαιτίας πιθανών αργών βαθιών ολισθήσεων

στην βάση της, όσο και από διαδοχικές επιφανειακές ολισθήσεις προοδευτικού στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου στα κατώτερα τμήματα της.	171
Εικόνα 6.24 Ενδεικτικό προσομοίωμα εξέλιξης του μηχανισμού αστοχίας της σύνθετης κατολίσθησης Τυμφρηστού.	172
Εικόνα 6.25 Ενδεικτικό προσομοίωμα μηχανισμού βραχοκαταπτώσεων περιοχής μελέτης.	174
Εικόνα 6.26 Χάρτης DEM of DIFFERENCE (DoD) της περιοχής μελέτης, αναφερόμενος στις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2007 (ALS) και 2019 (UAV), για χρονική ανάλυση δώδεκα ετών, πάνω στον οποίο αποτυπώνονται, οι θέσεις των εκτιμημένων επιμέρους μηχανισμών αστοχίας της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης. Επί του χάρτη με κόκκινο αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολίσθησης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την αποτελούν.	175
Εικόνα 6.27 Γεωλογικό προσομοίωμα υπολογιστικής διατομής A – A1.	179
Εικόνα 6.28 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για στατικές συνθήκες. Υπολογιστική διατομή A – A1.	179
Εικόνα 6.29 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για δυναμικές συνθήκες σεισμού. Υπολογιστική διατομή A – A1.	181
Εικόνα 6.30 Γεωλογικό προσομοίωμα υπολογιστικής διατομής B – B1.	182
Εικόνα 6.31 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για στατικές συνθήκες. Υπολογιστική διατομή B – B1.	182
Εικόνα 6.32 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για δυναμικές συνθήκες σεισμού. Υπολογιστική διατομή B – B1.	182
Εικόνα 6.33 Γεωλογικό προσομοίωμα υπολογιστικής διατομής Γ – Γ1.	183
Εικόνα 6.34 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για στατικές συνθήκες. Υπολογιστική διατομή Γ – Γ1.	183
Εικόνα 6.35 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για δυναμικές συνθήκες σεισμού. Υπολογιστική διατομή Γ – Γ1.	183
Εικόνα 6.36 Εννοιολογικό προσομοίωμα υπό μελέτη κατολίσθησης.	195
Εικόνα 7.1 Υφιστάμενη κατάσταση σωλήνων αποκλισιομέτρων εντός των γεωτρήσεων.	204
Εικόνα 7.2 Ενδεικτική τομή και κάτοψη προτεινόμενης λύσης.	205
Εικόνα 7.3 Τρισδιάστατο προσομοίωμα προτεινόμενης λύσης και κατασκευαστικές λεπτομέρειες.	206

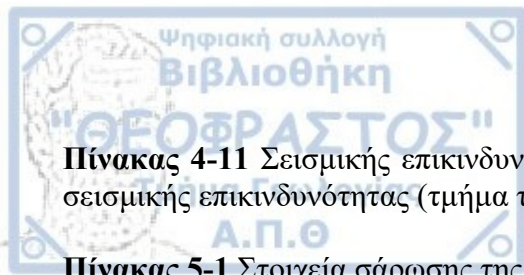


Εικόνα 7.4 Ενδεικτική περιοχή εφαρμογής της εν λόγω λύσης επί του νέο οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου, εντός του πιο ενεργού τμήματος της κύριας κατολίσθησης κοντά στο δυτικό όριο της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης.206

Εικόνα 7.5 Ρωγμές και αστοχίες επί του οδοστρώματος από την δράση κατολισθητικών φαινομένων και καθιζήσεων, σε περιοχή εντός της κύριας κατολίσθησης, επί του παλαιού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου.207

Εικόνα 7.6 Ενδεικτικές αστοχίες επί των ήδη υφιστάμενων έργων υποδομής. **1)** Αστοχίες και παραμορφώσεις σε τεχνικό αντιστήριξης με σαρζανέτια, σε περιοχή ρέματος, εντός της κύριας κατολίσθησης, επί του παλαιού οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου. **2)** Αστοχίες συρματοκυβωτίων επί λιθόρριπτου τοίχου αντιστήριξης σε περιοχή εντός της κύριας κατολίσθησης, επί του παλαιού οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου. **3)** Μετατοπισμένα τοιχία σκυροδέματος σε περιοχή ανάντη του παλαιού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου, επί της τοπικής οδού, στα ανώτερα τμήματα της κύριας κατολίσθησης.207

Πίνακας 2-1 Τύπος υλικών που συμμετέχουν σε μια κατολίσθηση (από Hungr et al., 2014).	17
Πίνακας 2-2 Συμπληρωματικοί όροι υλικού βασισμένοι σε γεωμορφολογικές αναλύσεις (από Hungr et al., 2014).	18
Πίνακας 2-3 Ταξινόμηση κατολισθητικών κινήσεων Varnes (1978).....	18
Πίνακας 2-4 Γενικευμένος πίνακας κατολισθήσεων (Varnes 1978, τροποποιημένο από τους Cruden & Varnes 1996).....	23
Πίνακας 2-5 Οι πιο σημαντικοί παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI 1994).	25
Πίνακας 2-6 Περιγραφή και βαθμονόμηση αντιπροσωπευτικών τύπων φλύσχη (V. Marinis, 2017).	27
Πίνακας 2-7 Τύποι βραχομαζών φλύσχη (V. Marinis, 2017).....	28
Πίνακας 3-1 Πίνακας συσχέτισης των αρχικών PCs και των αρχικών παραγώγων HRDEM (Pawluszek, 2018).....	46
Πίνακας 4-1 Εξεταζόμενοι μετεωρολογικοί σταθμοί.	64
Πίνακας 4-2 Συνολική βροχόπτωση σε κάθε μετεωρολογικό σταθμό ανά έτος.	64
Πίνακας 4-3 Δεδομένα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (mm) και υψομέτρου (m) για τους 3 μετεωρολογικούς σταθμούς.....	65
Πίνακας 4-4 Υπολογισμός του συνολικού όγκου νερού.	67
Πίνακας 4-5 Τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ανά έτος.	68
Πίνακας 4-6 Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή κατείδυσης ανάλογα με το είδος του υποβάθρου (από Βουδούρη, 2013)	69
Πίνακας 4-7 Υπολογισμός του συντελεστή κατείδυσης για κάθε γεωλογικό σχηματισμού του ψηφιοποιημένου χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου και του Πίνακα 4 – 6	70
Πίνακας 4-8 Υδρολογικό ισοζύγιο ερευνηθείσας περιοχής.	71
Πίνακας 4-9 Καταγεγραμμένοι σεισμοί μεγέθους $M_s \geq 4.5$, από το εθνικό σεισμολογικό δίκτυο, για τα τελευταία 50 χρόνια δηλαδή από το 1971 έως σήμερα για μια ακτίνα 100km (ταξινόμηση σε σχέση με το μέγεθος σεισμού).....	74
Πίνακας 4-10 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους: $A = a \cdot g$ (g: επιτάχυνση βαρύτητας) (από ΕΑΚ, 2004).	75



Πίνακας 4-11 Σεισμικής επικινδυνότητας των Νομών Ευρυτανίας και Φθιώτιδας βάσει του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (τμήμα του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2004).	75
Πίνακας 5-1 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Μαρτίου 2018.	90
Πίνακας 5-2 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Ιουλίου 2019.	91
Πίνακας 5-3 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Νοεμβρίου 2019.	92
Πίνακας 5-4 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Νοεμβρίου 2020.	93
Πίνακας 5-5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ευρύτερης κατολίσθησης.	100
Πίνακας 5-6 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιμέρους κατολισθήσεων.	101
Πίνακας 5-7 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου III.	115
Πίνακας 5-8 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου VII.	116
Πίνακας 5-9 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου VII.	117
Πίνακας 5-10 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου XI.	118
Πίνακας 5-11 Στοιχεία και συντεταγμένες γεωτρήσεων.	122
Πίνακας 5-12 Στάθμες υδροφόρου ορίζοντα από μετρήσεις του μετά την ολοκλήρωση των γεωτρήσεων.	124
Πίνακας 6-1 Συνοπτική περιγραφή των θεματικών επιπέδων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.	143
Πίνακας 6-2 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (ALS) του 2007.	144
Πίνακας 6-3 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (ALS) του 2007.	144
Πίνακας 6-4 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Μαρτίου 2018.	145
Πίνακας 6-5 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Μαρτίου 2018.	145
Πίνακας 6-6 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Ιουλίου 2019.	145
Πίνακας 6-7 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Ιουλίου 2019.	146

Πίνακας 6-8 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Νοεμβρίου 2019.....	146
Πίνακας 6-9 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Νοεμβρίου 2019.....	146
Πίνακας 6-10 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Νοεμβρίου 2020.....	147
Πίνακας 6-11 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Νοεμβρίου 2020.....	147
Πίνακας 6-12 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.....	151
Πίνακας 6-13 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.....	152
Πίνακας 6-14 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.....	152
Πίνακας 6-15 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.....	153
Πίνακας 6-16 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.....	153
Πίνακας 6-17 Οι τιμές ενεργών αντοχών c' και ϕ' , και του συντελεστή πίεσης πόρων r_u , που δόθηκαν στους σχηματισμούς, για την εκτέλεση ενδεικτικών διερευνητικών αναλύσεων ευστάθειας, έναντι ολίσθησης.....	178
Πίνακας 6-18 Αναλυτικό μητρώο Κύριας κατολίσθησης.....	186
Πίνακας 6-19 Αναλυτικό μητρώο Ενεργού τμήματος Κύριας κατολίσθησης.....	188
Πίνακας 6-20 Αναλυτικό μητρώο επιμέρους τοπικών Παλαιοκατολισθήσεων.....	190
Πίνακας 6-21 Αναλυτικό μητρώο Ευρύτερης Κατολίσθησης Τυμφορηστού.....	192

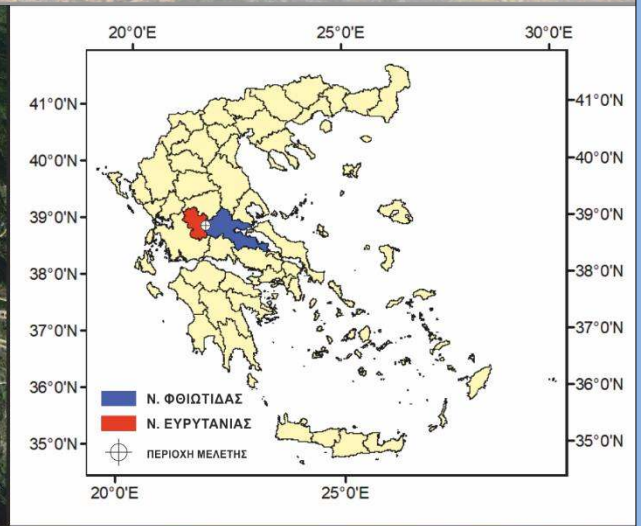
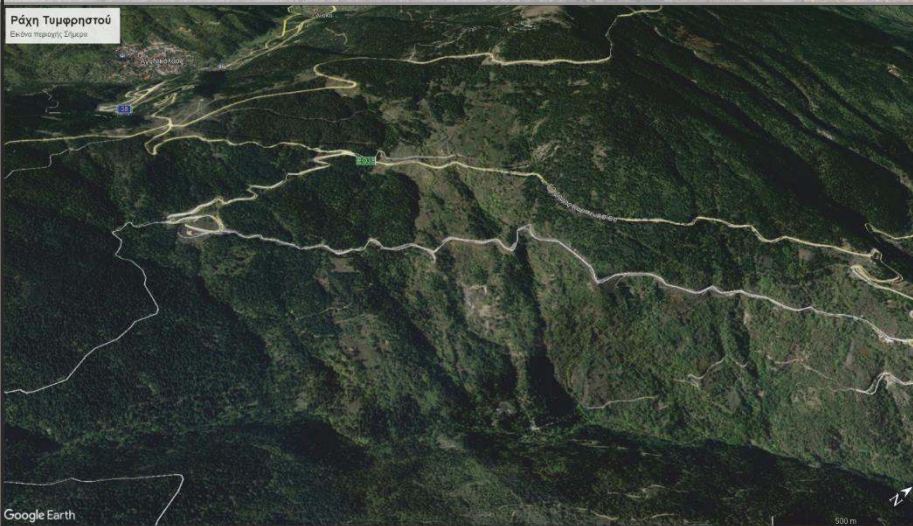
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ALS	Airborne Laser Scanning
DEM	Digital Elevation Model
DoD	DEM of Difference
DOM	Digital Orthophoto Map
DSM	Digital Surface Model
GPS	Global Positioning System
GSI	Geological Strength Index
HD	High Definition
HRDEM	High Resolution Digital Elevation Models
HRDSM	High Resolution Digital Surface Model
LCF	Landslide Controlling Factor
MSR	Multiple Shaded Relief
PCA	Principal Component Analysis
PC	Principal Component
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale Invariant Feature Transformation
SRR	Surface Relief Ratio
TPI	Topographic position index
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
ULS	Ultimate Limit State method
USCS	Unified Soil Classification System
USGS	United States Geological Survey
WP/WLI	Working Party on World Landslide Inventory
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
EAK	Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
ΕΓΣΑ	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς
ΙΓΜΕ	Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών
ΟΑΣΠ	Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Άποψη της εξεταζόμενης περιοχής Ράχη Τυμφρηστού από την Νέα Εθνική Οδό Λαμίας – Καρπενησίου.





1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας, στον κλάδο ειδίκευσης Τεχνικής Γεωλογίας και Περιβάλλοντος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η διατριβή επικεντρώνεται στη μελέτη μιας εκτεταμένης σύνθετης κατολίσθησης στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού, Δυτικά του χωριού Τυμφρηστός του Νομού Φθιώτιδας, κατά μήκος του οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου, με την χρήση Συστημάτων μη Επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV). Τα εκτεταμένα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής απασχολούν μέχρι και σήμερα την τοπική κοινότητα και διοίκηση της Περιφέρειας του Νομού Φθιώτιδας. Χαρακτηριστικές είναι οι καταστροφές στο οδικό δίκτυο της περιοχής, εξαιτίας τόσο των συχνών μετακινήσεων που αναδιαμορφώνουν και αναπλάθουν συνεχώς την επιφάνεια του αναγλύφου του εδάφους, όσο και των υλικών κατάπτωσης που συσσωρεύονται στο πόδα των πρηνών και στο οδόστρωμα των παρακείμενων οδών, φαινόμενα που εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους για την ασφάλεια των κινούμενων οχημάτων επί των οδών αυτών. Οι συνεχείς καθαρισμοί, επισκευές και επανακατασκευές του οδοστρώματος δεν λύνουν το πρόβλημα και ο κίνδυνος για σοβαρά ατυχήματα παραμένει και μεγιστοποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες από την αντίστοιχη αύξηση διαβρωτικών παραγόντων κατά τις περιόδους αυτές.

Ιστορικά, η περιοχή Ράχη Τυμφρηστού, λόγω του έντονου αναγλύφου της αλλά κυρίως εξαιτίας των δυσμενών γεωλογικών και κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν σ' αυτήν, παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη δημιουργία κατολισθητικών φαινομένων, ενώ ως αντικείμενο μελέτης απασχόλησε πολλούς ερευνητές και μελετητές.

Οι πρώτες έρευνες στην περιοχή έλαβαν χώρα το 1996, από μελετητική ομάδα της εταιρίας ΕΔΑΦΟΣ. Ε.Π.Ε, στα πλαίσια μελέτης οδοποιίας της Ανατολικής πρόσβασης της Σήραγγας Τυμφρηστού, ονόματι Σήραγγα Μπακογιάννη, η οποία αποτελεί τμήμα της Εθνικής Οδού Λαμίας – Καρπενησίου. Κατά την έρευνα των μελετητών οριοθετήθηκε εκτεταμένη ενεργή κατολίσθηση στην δυτική πλευρά της περιοχής και εξετάστηκε κατά πόσο μπορεί να επηρεάσει το τμήμα που συνδέει το ανατολικό μέτωπο της σήραγγας με το χωριό Τυμφρηστός. Το 2003, μια άλλη ομάδα ερευνητών (Papadopoulos et al., 2007) οριοθέτησε μια ευρύτερη κατολίσθηση στην εκτεταμένη ασταθή περιοχή, ονόματι κατολίσθηση Τυμφρηστού, την οποία επίσης μελέτησε χρησιμοποιώντας δένδρογεωμορφολογικές παρατηρήσεις, χρονολογώντας μάλιστα τα κατολισθητικά γεγονότα με την χρήση δένδροχρονικών τεχνικών. Τέλος, το 2018 στα πλαίσια άλλης διπλωματικής εργασίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, η περιοχή ερευνήθηκε ξανά, αυτή την φορά με τη χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους UAV, έχοντας ως στόχο την αποτύπωση των ορίων μιας ενιαίας σύνθετης κατολίσθησης, μεγαλύτερης σε έκταση σε σχέση με παλιότερες αποτυπώσεις και αποτελούμενης από πολλές μικρότερες ολισθήσεις (Δανδίκια, 2018). Στόχος εκείνης της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η σύγκριση των ευρημάτων κίνησης με τοπογραφικές αποτυπώσεις του παρελθόντος.

Στο παρελθόν, οι μελέτες για τον χαρακτηρισμό των γεωμορφολογικών συνθηκών της περιοχής, συντελέστηκαν με συμβατικές μεθόδους έρευνας, όπως η μελέτη τοπογραφικών χαρτών, η χαρτογράφηση πεδίου, και η εκτέλεση γεωερευνητικού προγράμματος γεωτρήσεων με τοποθέτηση οργάνων παρακολούθησης, που όμως περιορίστηκαν μόνο στην κλίμακα της έως τότε οριοθετημένης κατολίσθησης και μάλιστα σε αντίθεση με τις θεωρητικές μεθοδολογικές ερευνητικές

ανάγκες, για περιορισμένο χρόνο και σε μη βελτιστοποιημένες θέσεις παρακολούθησης, όπως προκύπτει από την μετέπειτα διάγνωση του ευρύτερου κατολισθητικού φαινομένου στην περιοχή όπως αποκαλύφθηκε αργότερα. Οι περισσότερες ερευνητικές ομάδες, πιθανώς εξαιτίας του περιορισμένου χρόνου μελέτης, της δυσμενούς πρόσβασης, λόγω του έντονου αναγλύφου, σε ορισμένα σημεία της περιοχής, ή ακόμα και λόγω έλλειψης πόρων, οριοθέτησαν και αξιολόγησαν μεμονωμένα τμήματα της ευρύτερης ασταθούς περιοχής.

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνικών Τηλεπισκόπησης (Remote Sensing), άνοιξε νέους δρόμους για τη μελέτη κατολισθητικών φαινομένων. Τα υψηλής ανάλυσης μοντέλα εδάφους HRDSM (High Resolution Digital Surface Models), ως παράγωγα της ψηφιακής σάρωσης του εδάφους από συστήματα μη Επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV), προσφέρουν ένα σύνολο μετρικών και ποιοτικών πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών μετακινήσεων του εδάφους αλλά και για την αποτύπωση μιας κατολίσθησης με σχετική ακρίβεια, όπως εφαρμόστηκε και στην έρευνα του 2018 (Δανδίκια).

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκαν αφενός οι συνήθεις κανονικές εργασίες παραγωγής και επεξεργασίας, τεσσάρων ψηφιακών μοντέλων εδάφους, από αποτυπώσεις της περιοχής, με τεχνικές UAV για την περίοδο 2018 – 2020, με ιδιαίτερη λεπτομέρεια και αφετέρου ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων της οπτικής ερμηνείας τους με ένα παλαιότερο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής όπως αυτή αποτυπώθηκε με τεχνικές ALS (Airborne Laser Scanning) το έτος 2007.

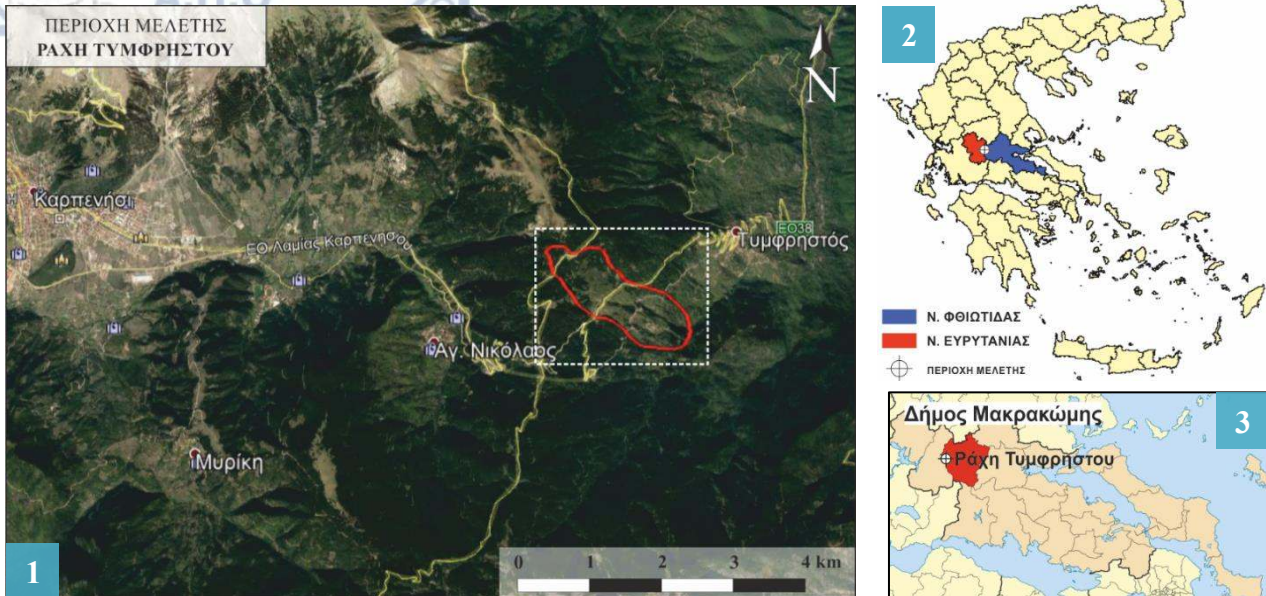
Επιπροσθέτως, έγινε απόπειρα ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας όλων των διαθέσιμων μοντέλων, που πραγματοποιήθηκε μέσω της καινοτομικής εφαρμογής μεθόδων Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), διά της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis) και της παραμετροποίησης της γεωαναλυτικής πληροφορίας του εκάστοτε μοντέλου, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, για την αυτοματοποιημένη εξαγωγή πρόσθετης επαυξημένης γεωμορφολογικής πληροφορίας. Η ανάπτυξη της εν λόγω μεθοδολογίας επέτρεψε την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας των πλαγιών και την λεπτομερή αναγνώριση μορφολογικών "υπογραφών" κατολισθήσεων έτσι ώστε να εκτιμώνται η πρόσφατη αλλά και μελλοντική κατολισθητική δραστηριότητα της περιοχής.

Εν κατακλείδι, η περιοχή μελέτης αποτελεί μια ευρεία ζώνη αστάθειας, όπου μεγάλα τμήματα των φυσικών κλιτύων της βρίσκονται είτε σε οριακή κατάσταση ισορροπίας, είτε εμφανίζουν παλαιές και νέες ενεργές ολισθήσεις με ταυτόχρονα φαινόμενα ερπυσμού (Μαλδέρος et al., 1999a). Παρόλα αυτά, πολλά τμήματα της δεν είναι αμέσως προφανή ως προς την πιθανή ενεργοποίησή τους, και η αστοχία του εδάφους δεν συμβαίνει σε τακτική βάση. Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης, εμφανίζονται σποραδικά ή και εποχιακά και έχουν σταδιακά αποτελέσματα. Τα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής έχουν προβληματίσει στο παρελθόν και ενδέχεται να συνεχίσουν να προβληματίζουν και στο μέλλον, αποτελώντας ουσιαδώς ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο σύστημα αστάθειας που εξελίσσεται με τον χρόνο, και γι' αυτόν τον λόγο η έρευνά της περιοχής θα πρέπει να συμπληρώνεται και να αναθεωρείται συνεχώς.

1.2. Περιοχή Μελέτης

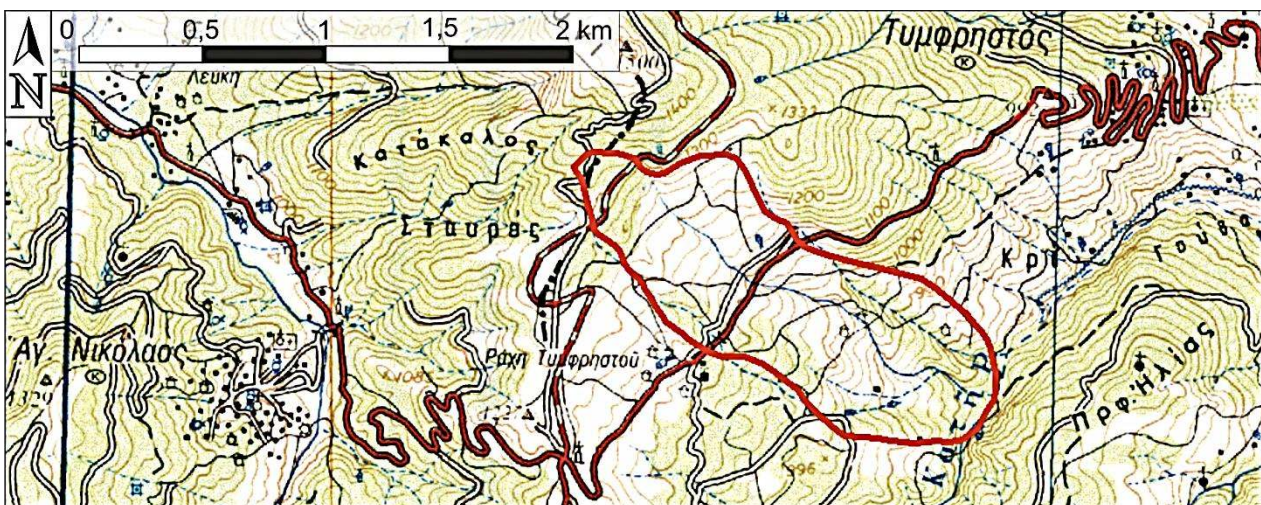
Η ερευνηθείσα περιοχή, Ράχη Τυμφρηστού, ανήκει στο Γεωγραφικό Διαμέρισμα της Στερεάς Ελλάδας, και βρίσκεται στα όρια των Νομών Φθιώτιδας – Ευρυτανίας. Πιο αναλυτικά, η περιοχή τοποθετείται 1,5 km ΔΝΔ από τον οικισμό Τυμφρηστό της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας και περίπου 2 km ΑΒΑ από το χωριό Άγιος Νικόλαος της Περιφερειακής Ενότητας Ευρυτανίας.

Διοικητικά υπάγεται στη δημοτική ενότητα του Δήμου Μακρακώμης, και απέχει από την πλησιέστερη πόλη του Καρπενησίου 17 km.



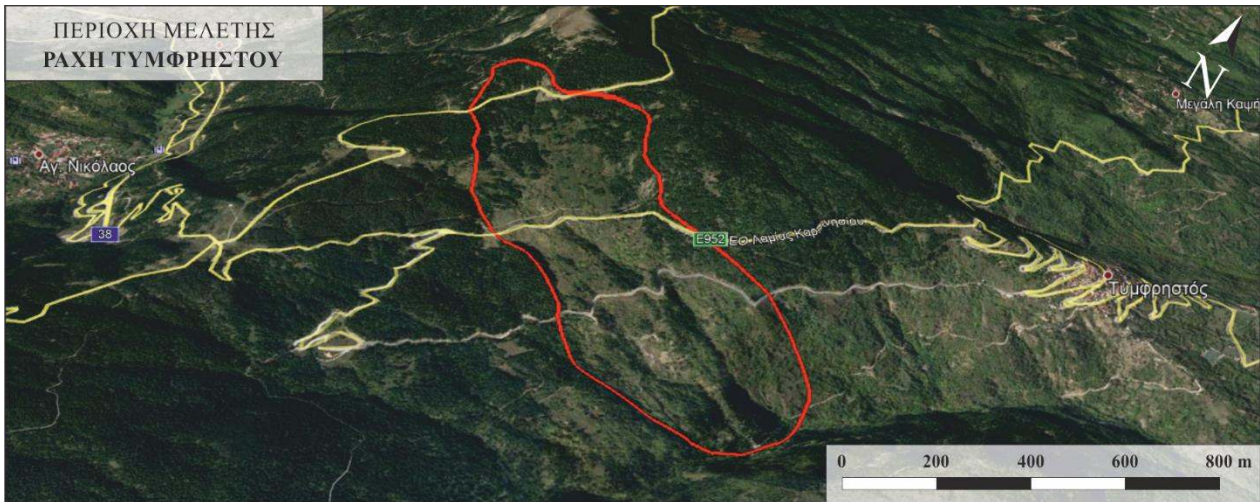
Εικόνα 1.1 Η Εξεταζόμενη περιοχή σε διάφορους χάρτες. **1)** Σε περιβάλλον Google Earth, όπου με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης και με κόκκινο τα όρια της εξεταζόμενης κατολίσθησης. **2)** Σε γενικό χάρτη της Ελλάδας. **3)** Σε χάρτη Δημοτικής διαίρεσης του διαμερίσματος της Στερεάς Ελλάδας, όπου με κόκκινο σημειώνεται ο Δήμος Μακρακώμης.

Γεωμορφολογικά, η περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια σύνθετη πλαγιά, τοξοειδούς σχήματος με γενική διεύθυνση προσανατολισμού προς τα Α – ΝΑ. Παρουσιάζει έντονο ορεινό ανάγλυφο, με μεγάλες υψομετρικές διαφορές και έντονες μορφολογικές κλίσεις. Τα υψόμετρα έχουν τιμές που κυμαίνονται περίπου από 600 – 1400 m, ενώ οι φυσικές κλιτύες της διακόπτονται συχνά από χειμάρρους και ρέματα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κατή (παραπόταμος Σπερχειού), διαταράσσοντας με αυτό τον τρόπο, διαμέσου των διεργασιών της επιφανειακής διάβρωσης και υποσκαφής, το εντατικό πεδίο και την ισορροπία του φυσικού αναγλύφου.



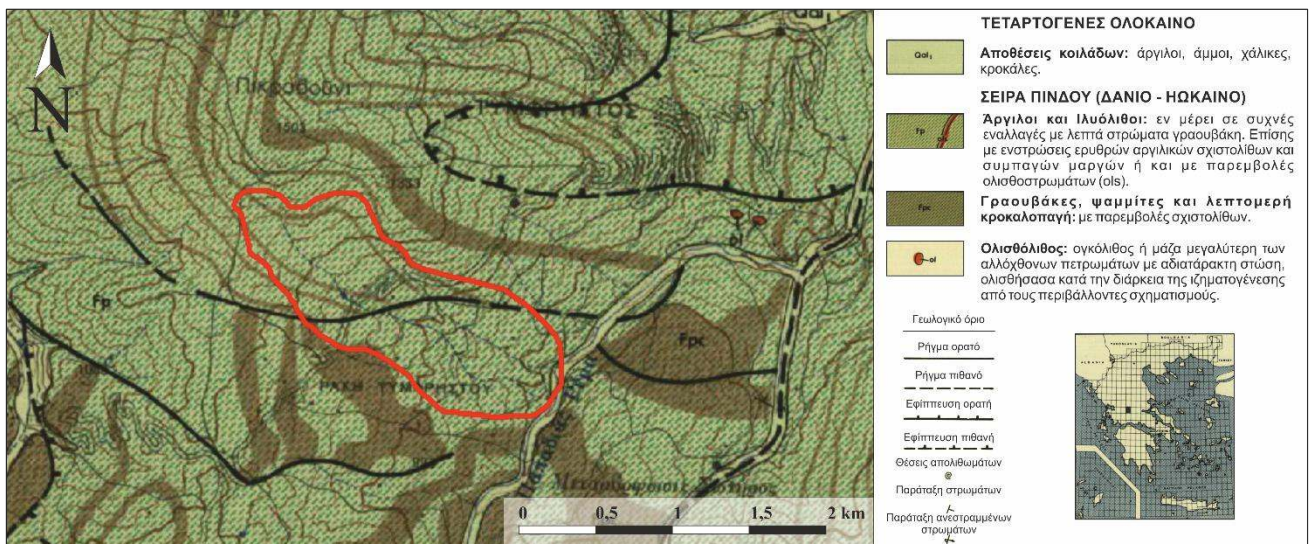
Εικόνα 1.2 Μορφολογία περιοχής έρευνας. Τμήμα τοπογραφικού χάρτη Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) της ευρύτερης περιοχής, κλίμακας: 1:25.000.

Το μεγαλύτερο τμήμα της ευρύτερης περιοχής παρουσιάζει μια πυκνή ξυλώδη βλάστηση, αποτελούμενη από ένα είδος υβριδογενούς ελάτης στα ανώτερα υψόμετρα, και από πλατύφυλλη βελανιδιά στα κατώτερα. Αντίθετα, σε αρκετά τμήματα στο κεντρικό μέτωπο της πλαγιάς, η βλάστηση είτε απουσιάζει είτε εμφανίζεται αρκετά αραιή σε σχέση με την πυκνότητά της στο σύνολο της περιοχής. Αυτή η χαρακτηριστική απουσία της βλάστησης αποτελεί ένα πρώτο σημάδι ένδειξης μιας γενικής αστάθειας που επικρατεί στην περιοχή.



Εικόνα 1.3 Χαρακτηριστική απουσία βλάστησης στο κεντρικό τμήμα της πλαγιάς. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό μελέτη κατολίσθηση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η βλάστηση είναι αρκετά αραιή εντός των ορίων της κατολίσθησης (Περιβάλλον Google earth).

Όσον αφορά τη γεωλογική δομή της περιοχής, αυτή εντάσσεται στη Γεωτεκτονική ζώνη Ωλονού – Πίνδου, και συγκροτείται εντός φλυστικών σχηματισμών. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας και ποικιλίας που εμφανίζει ο σχηματισμός του φλύσχη ως προς την λιθολογία, την δομή και την τεκτονική του καταπόνηση, η μηχανική συμπεριφορά του προσδίδει γενικά φτωχές μηχανικές ιδιότητες δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα σε σχέση με την ευστάθεια της περιοχής.



Εικόνα 1.4 Τμήμα Γεωλογικού χάρτη, από ΓΓΜΕ φύλλο ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ, Κλίμακας: 1:25.000. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό μελέτη κατολίσθηση.

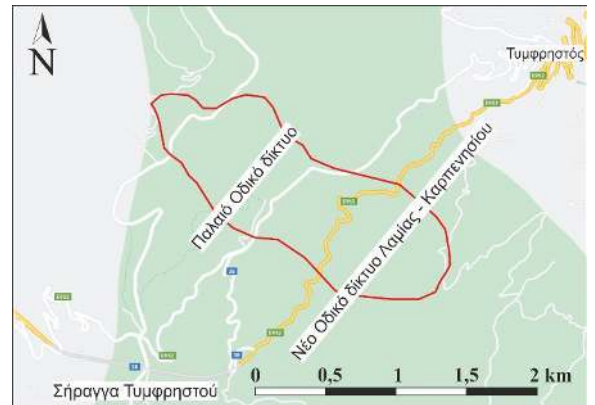
Τέλος, η προσπελασιμότητα της περιοχής επιτυγχάνεται μέσω του Νέου και Παλαιού Οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου. Κατά το παρελθόν, η προσπέλαση από την περιοχή ήταν εφικτή μόνο από το παλαιό οδικό δίκτυο, που βρίσκεται ανάντη του νέου και σε υψόμετρο 1100 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Εξαιτίας του μεγάλου υψόμετρου, της κακής βατότητας και των πολλαπλών ελιγμών του υφιστάμενου δρόμου, καθώς και τις συχνές διακοπές της κυκλοφορίας λόγω δυσμενών καιρικών και περιβαλλοντικών συνθηκών για μεγάλο διάστημα της χειμερινής περιόδου (χιονοπτώσεις, κατολισθήσεις), σχεδιάστηκε νέο οδικό δίκτυο, σε χαμηλότερο υψόμετρο με ευνοϊκότερη διάταξη, έχοντας ως στόχο την συνεχή και ασφαλή κυκλοφορία των διερχόμενων οχημάτων.

Η νέα χάραξη του δρόμου παρακάμπει, τις ανώτερες αυτές υψομετρικές θέσεις της περιοχής και τα προβλήματα που επικρατούν εκεί, με μια σήραγγα διπλής κατεύθυνσης 1400 m που διέρχεται μέσα από τον ορεινό όγκο της περιοχής Ράχη Τυμφρηστού.

Η ολοκλήρωση της κατασκευής της σήραγγας ήταν αναγκαία και επείγουσα παρουσιάζοντας ιδιαίτερα μεγάλα προβλήματα, λόγω του έντονου αναγλύφου της περιοχής, των δυσμενών γεωλογικών, κλιματολογικών (χιόνια, παγετός) και των εν γένει ευαίσθητων περιβαλλοντικών συνθηκών. Η σήραγγα ξεκίνησε να κατασκευάζεται το 1991 και ολοκληρώθηκε το έτος 2000, έχει διάμετρο περίπου 10 m και είναι κατασκευασμένη εντός του γεωλογικού σχηματισμού του φλύσχη της ζώνης Ωλονού – Πίνδου. Κατά την μελέτη της περιοχής και σε διάστημα νωρίτερα της ενάρξεως των εργασιών κατασκευής της σήραγγας, εκτιμήθηκε ύστερα από γεωλογική έρευνα, ότι η σήραγγα είναι τοποθετημένη σε σχηματισμούς που αποτελούνται κυρίως από εναλλαγές φυλλοειδών αργιλικών σχιστολίθων χαμηλής αντοχής και συνεκτικών έως ισχυρών ιλυολίθων, κατά τόπους διαστρωμένων με φακούς ψαμμιτοπαγούς και μικρολατυτοπαγούς πολύ χαμηλής αντοχής. Τεκτονικά όλος ο σχηματισμός εμφανιζόταν έντονα πτυχωμένος και καταπονημένος από πτυχωσιγενείς μικροεπιπέυσεις, αποκολλήσεις λεπίων και διαρρήξεις. Στην πλευρά εξόδου της σήραγγας (προς Τυμφρηστό - Λαμία) αλλά και σε όλη την διαδρομή μεταξύ των δύο στομιών, καταγράφηκαν μικροκατολισθήσεις τοπικού χαρακτήρα και υδροφορία παρ' όλη την ύπαρξη πυκνής ελάτης (Κωστόπουλος et al., 1996). Η πρώτη επίσημη καταγραφή κίνησης στην περιοχή, έγινε την χρονιά 1996, όπου η μελετητική ομάδα της εταιρίας ΕΔΑΦΟΣ. Ε.Π.Ε, κατά την εκτέλεση γεωλογικής – γεωτεχνικής έρευνας στην περιοχή, οριοθέτησε μία εκτεταμένη ενεργή ζώνη αστάθειας μεταξύ της Σήραγγας και του χωριού Τυμφρηστός και εξέτασε κατά πόσο ενδέχεται να επηρεάσει την κατασκευή και ασφαλή λειτουργία της σήραγγας. Η εν λόγω κατολίπηση τοποθετείται εντός των ορίων της σημερινής αποτύπωσης και θα εξεταστεί αναλυτικότερα στο 4^ο Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής (Βλ. Κεφάλαιο 4 «4.6. Κατολισθητικά φαινόμενα στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού»).

Συμπερασματικά, η περιοχή μελέτης εμφανίζει ένα μοναδικό σύνολο συνθηκών, τοπογραφικών γεωλογικών, περιβαλλοντικών και άλλων, που διαμηνύουν την ύπαρξη μιας γενικής αστάθειας, και αποτελεί πρόκληση τόσο στην εμφάνιση, αναγνώριση, επεξεργασία και κατανόηση όσο και στην αντιμετώπιση των καθυστερών κατολισθητικών φαινομένων. Η παρουσία όχι ενός αλλά δύο οδικών



Εικόνα 1.5 Τα οδικά δίκτυα για την προσπέλαση της περιοχής και η σήραγγα του Τυμφρηστού που παρακάμπει τα ανώτερα υψόμετρα του παλαιού οδικού δικτύου (Σε περιβάλλον Google Maps).

δικτύων εντός της προαναφερθείσας ζώνης, καθώς και κάθε πιθανής νέας διέλευσης δρόμου από την περιοχή, αποτελεί παράγοντας υψηλής τρωτότητας (Vulnerability), γεγονός που σε συνδυασμό με την υψηλή επικινδυνότητα (Hazard) ενεργοποίησης μεταπτώσεων – ροών – ολισθήσεων του εδάφους, αυξάνουν τον δείκτη διακινδύνευσης (Risk) της περιοχής, και καθιστούν τα κινούμενα επί των οδών αυτών οχημάτων σε μεγάλο κίνδυνο.



Εικόνα 1.6 Η σήραγγα Τυμφρηστού σε περιβάλλον Google Earth. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό εξέταση κατολίσθηση, με πράσινο η πρώτη οριοθέτηση της κατολίσθησης το 1996 και με άσπρα αστέρια οι θέσεις του γεωερευνητικού προγράμματος 15 γεωτρήσεων που εκτελέστηκε για την μελέτη της. Τέλος, στην εικόνα φαίνονται 2 φωτογραφίες η μία από την είσοδο και η άλλη από την έξοδο της σήραγγας (Φωτογραφίες από τον συγγραφέα).

1.3. Σκοπός

Ο στόχος της παρούσας διατριβής εστιάζεται στην πλήρη αξιολόγηση της γενικής αστάθειας του εδάφους στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού, και στη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, αποτελούμενης από χάρτες, εκθέσεις και επισημάνσεις αναφορικά με την αναδιαμόρφωση της περιοχής, τόσο μέσω εργασιών πεδίου όσο και μέσω εξειδικευμένων επεξεργασιών και αναλύσεων με την χρήση σύγχρονης τεχνολογίας Μηχανικής Μάθησης, με απώτερο σκοπό την παρακολούθηση και πρόγνωση της μετέπειτα εξέλιξης του φαινομένου στο μέλλον.

Η περιοχή της κατολίσθησης, όπως προαναφέρθηκε δεν εξελίσσεται ως μια ραγδαία ενιαία κατολίσθηση, αλλά αποτελεί μια ευρύτερη σύνθετη ζώνη αστάθειας, κλίμακας πλαγιάς, που αποτελείται από πολλές μικρότερες κατολισθήσεις, οπισθοδρομικού συνήθως χαρακτήρα (Καβουνίδης et al., 2010) με διαφορετικούς μηχανισμούς εναύσματος και αστοχίας.

Με γνώμονα ένα από τα θεμελιώδη αξιώματα των αρχών της γεωλογίας, ότι το παρελθόν είναι το κλειδί για το μέλλον, μπορεί να υποστηριχθεί ότι η μελλοντική εξέλιξη της πλαγιάς δύναται να προκύψει ως αποτέλεσμα των ίδιων ή παρόμοιων γεωλογικών, γεωμορφολογικών και υδρολογικών συνθηκών που οδήγησαν σε αστοχίες στο παρελθόν και στο παρόν.

Γι' αυτό το λόγο, η παρούσα διατριβή προσανατολίζεται κυρίως στην αποτύπωση και έρευνα της έκτασης, του τύπου, των μηχανισμών, της συχνότητας εμφάνισης και των συνθηκών των αστοχιών του εδάφους, έτσι ώστε σε μελλοντικό χρόνο να μπορούν να προβλεφθούν κίνδυνοι, τόσο από νέες

εμφανίσεις κίνησης, όσο και από μια επικείμενη ενεργοποίηση ολόκληρης της ασταθούς περιοχής και να κατασκευαστούν στοχευμένα έργα υποδομής για την αποτροπή των εκάστοτε καταστροφών. Η συνεισφορά της τρέχουσας τεχνολογίας των συστημάτων UAV για αυτό το εγχείρημα υπήρξε καθοριστική, παρέχοντας ορθοφωτογραφίες και ψηφιακά μοντέλα ανύψωσης DEM (Digital Elevation Model) υψηλής ανάλυσης, από διαφορετικές χρονικά σαρώσεις της περιοχής, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο τις υποθέσεις για την ερμηνεία και εξέλιξη του φαινομένου.

Τέλος, στην προσπάθεια ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας των μορφολογικών χαρακτηριστικών του ψηφιακού μοντέλων εδάφους εφαρμόστηκε μέθοδος επεξεργασίας και ανάλυσης τεχνολογίας αιχμής (State of the Art) βασισμένη στην μέθοδο PCA, που μετασχηματίζει μεμονωμένες τοπογραφικές πληροφορίες σε μια νέα σύνθεση δεδομένων που επιτρέπει την αναλυτικότερη αξιολόγηση μορφολογικών χαρακτηριστικών κατολισθήσεων. Διά της πρακτικής εφαρμογής του τελευταίου, δίνεται επιπροσθέτως η ευκαιρία αξιολόγησης του βαθμού απόδοσης τέτοιων μεθόδων Μηχανικής Μάθησης σε εφαρμογές Τεχνικής Γεωλογίας.

1.4. Ερευνητικά ερωτήματα

Με άλλα λόγια, ο οδικός χάρτης στοχοθεσίας της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής συνοψίζεται στα εξής ερευνητικά ερωτήματα τα οποία θα αποπειραθεί να απαντήσει:

1. Ποια είναι η αποτύπωση της έκτασης της κατολίσθησης βάσει της ερμηνείας και μελέτης χαρτών, δορυφορικών εικόνων, επίσημων εκθέσεων και ερευνών που συγκεντρώθηκαν για την περιοχή, καθώς και από επιτόπιες αυτοψίες, παρατηρήσεις και ποιοτικές επισημάνσεις του υποκείμενου ερευνητή στο πεδίο;
2. Πως μπορούν να εξαχθούν αυτοματοποιημένα πρόσθετα δεδομένα, με την εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης, όπως με την εφαρμογή της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis), από τα ήδη υπάρχοντα;
3. Ποια πρόσθετα δεδομένα προέκυψαν από την "επαυξημένη" ανάλυση και τι διαφορές έχουν από τα αρχικά δεδομένα;
4. Ποιος είναι ο μηχανισμός αστοχιών του εδάφους στην περιοχή;
5. Ποιο είναι το μοτίβο συχνότητας εμφάνισης των αστοχιών;
6. Ποιοι είναι οι δυσμενείς παράγοντες που δρουν στην περιοχή και είναι υπεύθυνοι για την γένεση κατολισθητικών φαινομένων;
7. Τι είδους στοχευμένα έργα προτείνονται για την αποτροπή πιθανών μελλοντικών αστοχιών – καταστροφών;
8. Ποιος είναι ο ιδανικός τρόπος συστηματικής παρακολούθησης των κατολισθητικών συνθηκών και φαινομένων της περιοχής και τι άλλες πρόσθετες μελέτες προτείνεται να εκτελεστούν;

1.5. Πρόγραμμα αξιολόγησης

Με την ανάθεση της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε άμεσα ο προγραμματισμός αξιολόγησης της ερευνηθείσας περιοχής, έτσι ώστε να καθοριστεί το γενικό πλαίσιο της έρευνας του φαινομένου, τόσο με εργασίες γραφείου, όσο και με επιτόπου αυτοψία στο πεδίο, και να αναζητηθούν, συν τω χρόνω, "σκιές" και κενά στα συλλεγόμενα δεδομένα.

1.6. Μεθοδολογία

1.6.1. Εργασίες γραφείου

A. Βιβλιογραφική επισκόπηση

Οι εργασίες γραφείου αρχικά επικεντρώθηκαν στην αναζήτηση βιβλιογραφικών στοιχείων και δευτερογενών πηγών που σχετίζονται με την κατολίσθηση, από προγενέστερες μελέτες και επιστημονικές έρευνες, τόσο για το φαινόμενο όσο και για την ευρύτερη περιοχή. Η λεπτομερής μελέτη γεωλογικών, τοπογραφικών υδρογεωλογικών και χαρτών σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής, καθώς και η ανάλυση δορυφορικών εικόνων, παρείχαν σημαντικές πληροφορίες, δίνοντας μια πρώτη εικόνα της έκτασης και γεωμετρίας του φαινομένου.

Πιο αναλυτικά, αναζητήθηκαν σε πρώτο στάδιο, σπερματικά ακαδημαϊκά άρθρα από τον επιστημονικό ακαδημαϊκό τύπο σχετικά με την εν λόγω κατολίσθηση (Papadopoulos et al., 2007; Δανδίκια, 2018) αλλά και άλλες ομοιογενής κατολισθήσεις, σε αναλογία με την υπό εξέταση, ανά τον κόσμο, όπως οι κατολισθήσεις σε σχηματισμούς φλύσχη στα Καρπάθια Όρη της Πολωνίας (Pawluszek, 2018). Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν μελέτες επί του θέματος από μελετητικές ομάδες του εμπορικού, βιομηχανικού και τεχνικού πεδίου (Κωστόπουλος et al., 1996; Μαλδέρος et al., 1999a; Aggistalis & Malios, 2000).

Για την θεωρητική θεμελίωση και συσχέτιση του θέματος αναζητήθηκαν τεχνικά συγγράμματα της παγκόσμιας βιβλιογραφίας (Fookes, Lee & Griffiths, 2007; Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007; Lollino et al., 2015), ενώ για την εφαρμογή του μοντέλου μηχανικής μάθησης που θα παρουσιαστεί παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονα ακαδημαϊκά άρθρα εφαρμογής της επιστήμης της πληροφορικής σε θέματα γεωλογίας (McKean & Roering, 2004; Van Den Eeckhaut & Hervás, 2012; Pawluszek & Borkowski, 2016).

Τέλος, αναζητήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν γεωλογικοί και τοπογραφικοί χάρτες οι οποίοι αλιεύτηκαν από τις υπηρεσίες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ), και της Εθνικής Υπηρεσίας Κτηματολογίου Ελλάδος, αλλά επίσης και κατ' επέκταση και από άλλα βιομηχανικά έγγραφα και μελέτες. Η λεπτομερής, συγκριτική και μεθοδική ανάλυση των οποίων ήταν που ουσιαστικά οδήγησε σε μια πρώτη σκιαγράφηση της διαχρονικής προβληματικής κατάστασης της περιοχής.

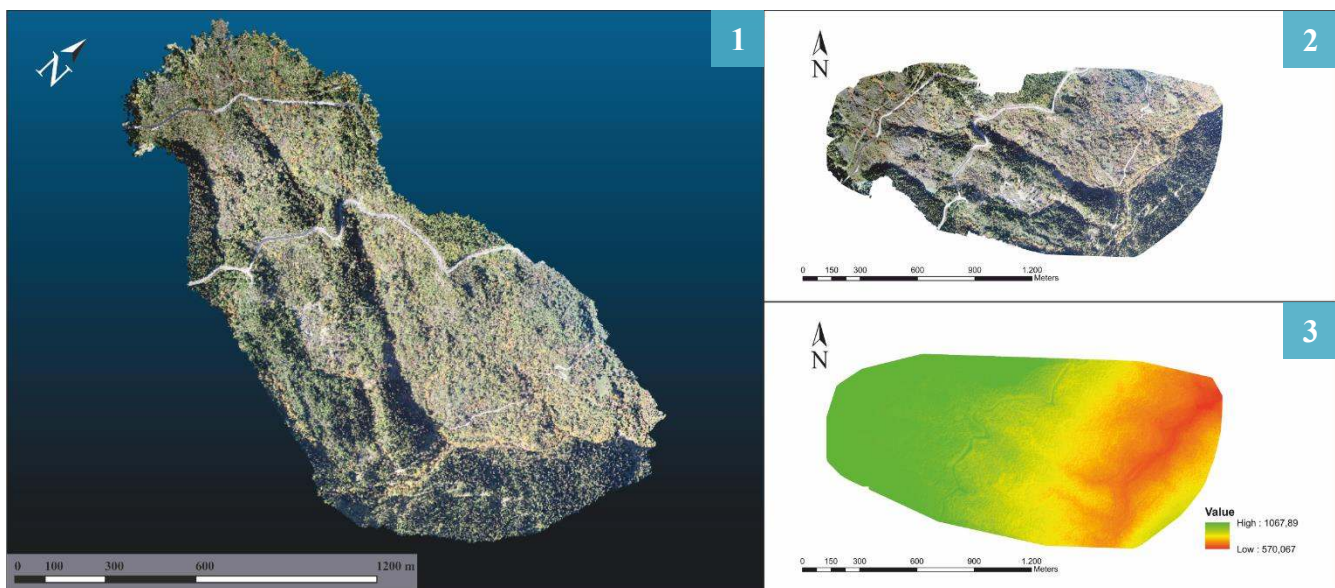
B. 1^η αυτοψία και χαρτογράφηση, δειγματοληψία σαρώσεως

Στη συνέχεια, και μετά από μια πρώτη επίσκεψη και χαρτογράφηση πεδίου στην περιοχή, την περίοδο Νοεμβρίου 2019, όπου επιστημάνθηκαν και αξιολογήθηκαν διάφορες αστοχίες και σημάδια ύπαρξης κατολίσθησης, οι εργασίες γραφείου προσανατολίστηκαν στην οπτική ανάλυση και

επεξεργασία τεσσάρων σαρώσεων της περιοχής από αποτυπώσεις, με την χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους UAV, του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, τις περιόδους Μαρτίου του 2018, Ιουλίου και Νοέμβριου του 2019 και Νοεμβρίου του 2020.

C. Ανάλυση και επεξεργασία

Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν με την χρήση UAV, αποτελούν ουσιαστικά ένα σύνολο αλληλοκαλυπτόμενων φωτογραφιών της περιοχής. Οι φωτογραφίες αυτές εισήχθησαν στο ειδικό λογισμικό Pix4D mapper και μέσω της εφαρμογής φωτογραμμετρίας Structure from Motion (SfM), ενώθηκαν και συνέθεσαν γεωαναφερμένα ορθομωσαϊκά και ψηφιακά μοντέλα εδάφους υψηλής ανάλυσης HRDEM (High Resolution Digital Elevation Models), απεικονίζοντας την περιοχή σε αρχεία μορφής Raster (μορφή εικόνας) και Point Cloud (τρισεδιάστατο νέφος σημείων) για κάθε εξεταζόμενο έτος αντίστοιχα.



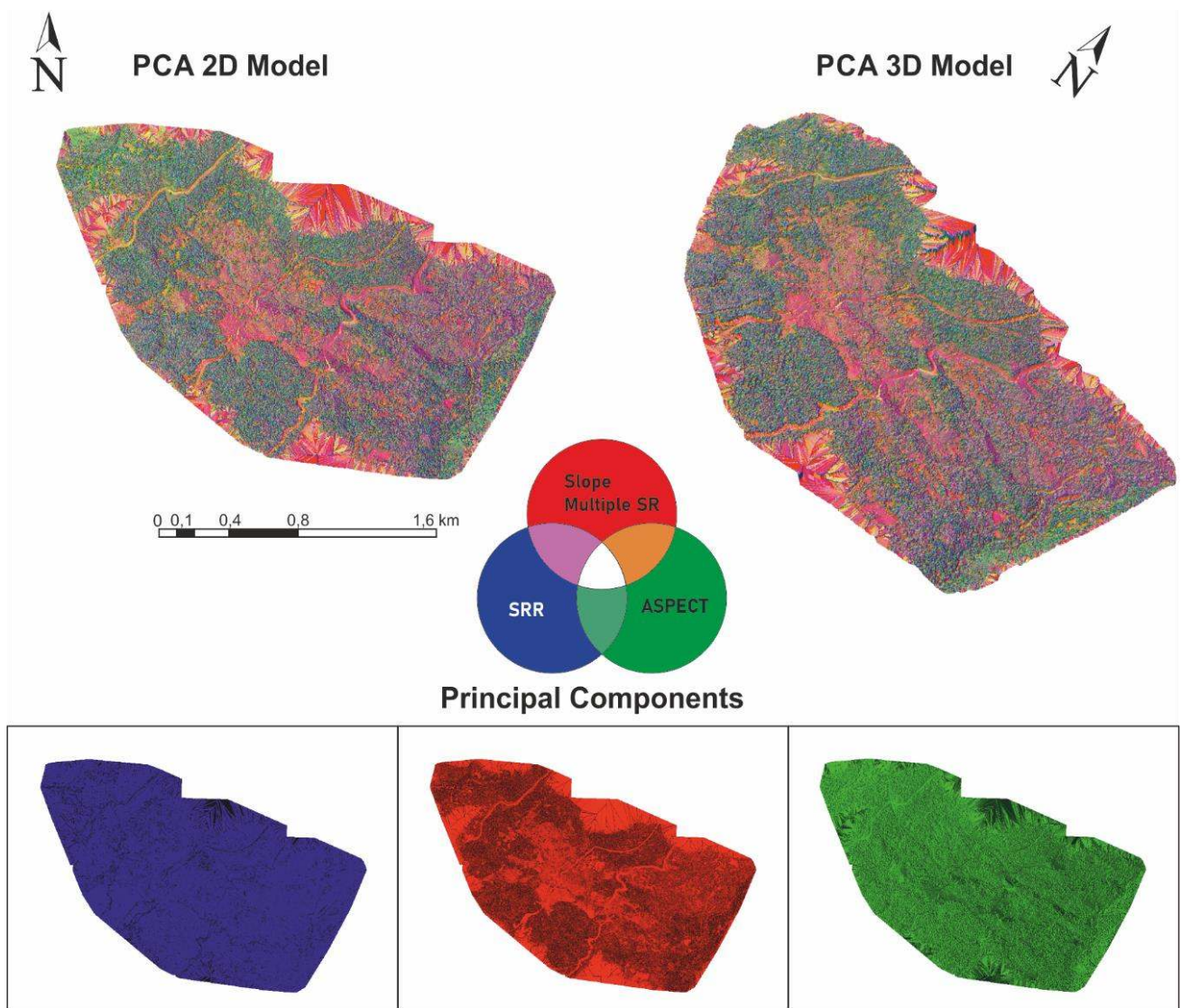
Εικόνα 1.7 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής το έτος 2020. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM) (μορφή Raster). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM) (μορφή Raster).

Για την περαιτέρω ανάλυση και ενίσχυση της οπτικής ερμηνείας των μοντέλων της περιοχής, κατασκευάστηκαν δέκα θεματικά επίπεδα δεδομένων (Layers) που αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές ρύθμισης των κατολισθήσεων, ήτοι: Υψόμετρο (Elevation), βαθμός Κλίσης (Slope), Προσανατολισμός κλιτύων (Aspect), Πολλαπλό Σκιασμένο Ανάγλυφο (Multiple Shaded Relief), δείκτης Τραχύτητας (Roughness index), Τοπογραφικό Ανοιγμα επιφανείας (Topographic Openness), Καμπυλότητα κατατομής και κάτοψης (Profile and Plan Curvature), Τοπογραφικός Δείκτης Θέσης TPI (Topographic Position Index) (Dilts TE, 2015) και Αναλογία Επιφανειακού αναγλύφου SRR (Surface Relief Ratio) (Evans et al., 2014).

Τα επίπεδα αυτά, ουσιαστικά αντανακλούν τους παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για το έναυσμα κατολισθητικών κινήσεων, και μπορούν εύκολα να εξαχθούν από ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και να επεξεργαστούν διαμέσου του εξειδικευμένου λογισμικού ArcMap ESRI. Κάθε ένα από τα παράγωγα του ψηφιακού μοντέλου παρείχε διαφορετικές ενδείξεις σχετικά με τη φύση της τοπογραφίας και για αυτό τον λόγο η παρατήρηση κάθε παραγώγου μεμονωμένα ήταν περίπλοκη, ενώ η σύνδεση του με χαρακτηριστικά κατολισθήσεων δεν μπορούσε εύκολα να παρατηρηθεί.

D. Παραμετροποίηση λογισμικού προς εφαρμογή της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis) για πρόσθετη ανάλυση

Από τα παραπάνω προέκυψε η ανάγκη για τον μετασχηματισμό όλων αυτών των μορφολογικών πληροφοριών σε μια σύνθεση δεδομένων που θα παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία και θα επιτρέπει τον εντοπισμό διαφορετικών μορφολογικών κατολισθήσεων. Ο μετασχηματισμός αυτός επιτεύχθηκε, με την βοήθεια τεχνικών μηχανικής μάθησης και πιο συγκεκριμένα μέσω της εφαρμογής της μεθόδου PCA. Η μέθοδος PCA είναι μια μαθηματική τεχνική, ένας ορθογωνικός γραμμικός μετασχηματισμός, ο οποίος αναλύει ένα σύνολο δεδομένων, όπου οι παρατηρήσεις αντιπροσωπεύονται από διάφορες συσχετιζόμενες ή μη ποσοτικές μεταβλητές, και επιτρέπει την απομείωση αυτών των πληροφοριών σε μια νέα εικόνα, ως αποτέλεσμα της σύνθεσης πολλών στρωμάτων, χαρακτηριζόμενη από κάποια βασικά κύρια συστατικά (Principal Components). Κάθε μια νέα ενισχυμένη εικόνα για το εκάστοτε εξεταζόμενο ψηφιακό μοντέλο, παρέχει σημαντικές πληροφορίες τόσο για την αναγνώριση κατολισθητικών φαινομένων, όσο και για την χαρτογράφηση της ευρύτερης μορφολογίας του εδάφους.



Εικόνα 1.8 Αποτελέσματα της μεθόδου PCA κατά την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους του Νοεμβρίου 2019. Δημιουργία μιας νέας σύνθετης εικόνας αποτελούμενης από τρία κύρια συστατικά (PC).

Ε. Ανάλυση χρονικής εξέλιξης φαινομένου – παραγωγή μοντέλου DoD

Παράλληλα με τις προαναφερθείσες εργασίες, επιτελέστηκαν ορισμένες συγκριτικές αναλύσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σχέση με την ενεργότητα και εξέλιξη του φαινομένου. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού και λόγω ότι τα δεδομένα πρωτογενούς αναφοράς περιορίζονταν σε στενό χρονικό διάστημα τριών χρόνων, διάστημα σχετικά μικρό για την εξέλιξη του φαινομένου, αναζητήθηκε από την Εθνική Υπηρεσία Κτηματολογίου Ελλάδος, ψηφιακό μοντέλο της περιοχής όπως αυτή αποτυπώθηκε με τεχνικές ALS (Airborne Laser Scanning) το έτος 2007. Στη συνέχεια και διαθέτοντας πλέον ένα σύνολο πέντε ψηφιακών μοντέλων ως δεδομένα, εξετάστηκαν ποιοτικά αλλά και με την βοήθεια λογισμικών, μέσω εφαρμογής της μεθόδου ανίχνευσης μορφολογικών αλλαγών, Change Detection, οι υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαθέσιμων εξεταζόμενων μοντέλων εδάφους, οι οποίες αποτυπώθηκαν με την μορφή ενός νέου ψηφιακού μοντέλου επονομαζόμενου DEM of Difference (DoD) (Ψηφιακό μοντέλο διαφοράς) το οποίο κατέδειξε την χρονική εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής και επέτρεψε την ποσοτική αξιολόγηση των μεταβολών της μορφολογίας του εδάφους.

Απώτερος σκοπός όλων των παραπάνω εργασιών ήταν ο εντοπισμός, η κατηγοριοποίηση και η αποτύπωση των μορφολογικών πληροφοριών που σχετίζονται με κατολισθητικά φαινόμενα, σε μια ψηφιακή βάση δεδομένων αποτελούμενη από αναλυτικούς θεματικούς χάρτες, μεγάλης κλίμακας, που επέτρεψαν στη συνέχεια της έρευνας την αναλυτικότερη και πιο στοχευμένη εργασία στο πεδίο.

1.6.2. Εργασίες πεδίου

Κατά την εκπόνηση της τρέχουσας διατριβής εκτελέστηκε ένα ευρύ φάσμα εργασιών στο πεδίο, από μεμονωμένες επισκέψεις στην περιοχή για την αναγνώριση του φαινομένου και την αποτύπωση της με την χρήση συστημάτων UAV, μέχρι και την τελική πολυήμερη εργασία τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης που αποσκοπούσε στη συλλογή όλων των πολύτιμων δεδομένων σχετικά με τις γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές ιδιότητες αλλά και των χαρακτηριστικών εκείνων που σχετίζονται άμεσα και έμμεσα, με την αξιολόγηση της σταθερότητας της περιοχής.

Πιο αναλυτικά, σκοποί όλων των εργασιών πεδίου αποτέλεσαν:

1. Ο προσδιορισμός του γεωδυναμικού καθεστώτος της περιοχής στο οποίο υπαισέρχονται η μελέτη της γεωλογικής δομής στη στενή περιοχή και η εξέταση όλων εκείνων των συνθηκών που συντελούν στην εξέλιξη του φαινομένου .
2. Η αποτύπωση των μορφολογικών εμφανίσεων που συνδέονται με κατολισθητικά φαινόμενα, όπως μετατοπίσεις, ρωγμές, εξάρσεις – θραύσεις του αναγλύφου και ολισθήσεων σε τοπογραφικούς χάρτες.
3. Η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης περιοχής, που ουσιαστικά αντανακλούν και προδιαγράφουν τα αναμενόμενα προβλήματα μιας πιθανής ενεργοποίησης ενός κατολισθητικού φαινομένου.



Εικόνα 1.9 Φωτογραφία κατά την χαρτογράφηση πεδίου. Μέτρηση τεκτονικών στοιχείων σε σχηματισμό ψαμμίτη (μέλος φλυσχικού σχηματισμού), στην δυτική πτέρυγα της εν λόγω κατολίθησης, με στόχο την κατασκευή τεκτονικού διαγράμματος.

4. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας των κατολισθητικών κινήσεων, με βάση την αξιολόγηση των παραμέτρων που υφίστανται στο πρόβλημα.
5. Η κατασκευή του χάρτη αποτύπωσης των κατολισθήσεων της περιοχής, υπό κλίμακα 1:8.000.
6. Και τέλος, η διατύπωση συγκεκριμένων προτάσεων, όπου αυτό είναι δυνατό με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, σχετικά με τη παρακολούθηση και σταθεροποίηση των ασταθών περιοχών, καθώς και της ασφαλούς λειτουργίας των υφιστάμενων έργων, και ο προσδιορισμός περαιτέρω ερευνών και μελετών που απαιτούνται για την επίτευξη των παραπάνω αυτών στόχων.

Η συνεισφορά της πρότερης ανάλυσης και επεξεργασίας των ψηφιακών μοντέλων του εδάφους της περιοχής, υπήρξε καθοριστική στην επιτόπου αναγνώριση και αποτύπωση της κατολίσθησης, και τα αποτελέσματα της επαληθεύτηκαν κατά έναν αποδεκτό βαθμό στο πεδίο.

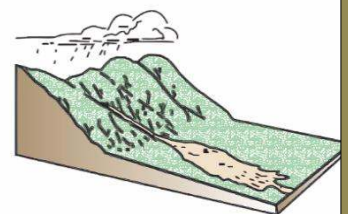
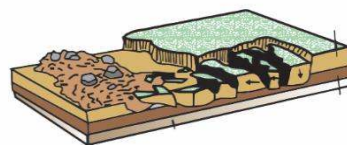
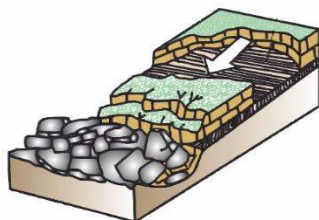
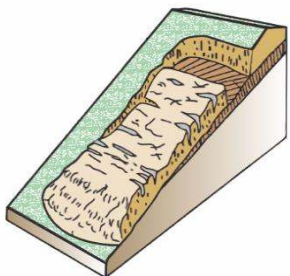
Η αναλυτική παρουσίαση των παραπάνω στοιχείων, η παράθεση των αποτελεσμάτων των επιμέρους αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και τα συμπεράσματα της επιτόπου αυτοψίας στην περιοχή, αναλύονται λεπτομερέστατα στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής.

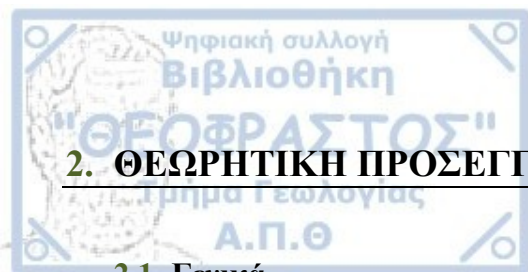
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ



Τμήμα περιστροφικής κατολίσθησης στην περιοχή μελέτης όπου παρατηρούνται αλλεπάλληλες επιπεδώσεις, αναθλώσεις και ανορθώσεις του εδάφους.





2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

2.1. Γενικά

Ως κατολισθήσεις ονομάζονται γενικά οι απροσδόκητες κινήσεις εδάφους, πετρωμάτων και οργανικών υλικών υπό την επίδραση της βαρύτητας, σε τεχνητά ή φυσικά πρανή. (Highland & Bobrowsky, 2008). Αποτελούν ένα γεωλογικό φαινόμενο που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα κινήσεων του υπεδάφους, και κατατάσσονται μεταξύ των πιο επικίνδυνων και καταστροφικών φυσικών κινδύνων (Wang & Peng, 2009).

Ήδη τις περασμένες δεκαετίες ο κίνδυνος από κατολισθητικά φαινόμενα έχει αυξηθεί σημαντικά, λόγω επέκτασης των κατοικημένων περιοχών, συνακόλουθης της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού, με την δημιουργία νέων οικισμών σε περιοχές που τοποθετούνται σε άμεση γειτνίαση με απότομες πλαγιές ή / και σε περιοχές ακατάλληλης θεμελίωσης σε ότι αφορά τη δομή και τη σταθερότητα του εδάφους (Guzzetti et al., 1999). Ωστόσο, οι αρνητικές συνέπειες των κατολισθήσεων δεν περιορίζονται μόνο στον κίνδυνο απώλειας ανθρώπινων ζώων, αλλά περιλαμβάνουν μια σειρά διεργασιών που μπορούν να οδηγήσουν σε δυσάρεστες κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις. Καταστροφές σε υποδομές, μείωση της καλλιεργήσιμης και κατοικήσιμης γης, απώλεια παραγωγικότητας για τις πληγείσες περιοχές, και απρόβλεπτες αλλαγές στο φυσικό ανάγλυφο είναι λίγα παραδείγματα των αρνητικών αυτών επιπτώσεων. Καθώς οι άνθρωποι συνεχίζουν να δραστηριοποιούνται μέσα σε επικίνδυνες ζώνες, η πρακτική ανάγκη πρόβλεψης και αποκατάστασης κατολισθητικών φαινομένων έχει αυξηθεί σημαντικά.

Παρότι οι κατολισθήσεις αποτελούν στην πραγματικότητα ένα περίπλοκο φαινόμενο, η συμπεριφορά τους διέπεται από βασικούς νόμους της φυσικής και μηχανικής (Blasio, 2011). Σε ευρύτερο και υπό γενική θεώρηση πλαίσιο, οι κατολισθήσεις ενεργοποιούνται όταν το έδαφος ωθείται, από την φυσική του θέση προς τα έξω και προς τα κάτω, λόγω δράσης βαρυτικών, υδροστατικών και σεισμικών δυνάμεων, οι οποίες υπερβαίνουν τις δυνάμεις αντίστασης της κίνησης (Bell, 2007). Με άλλα λόγια η κίνηση των κατολισθήσεων μπορεί να ερμηνευτεί με όρους και εξισώσεις γνωστών νόμων τριβής, συνοχής και βαρύτητας. Η φαινομενικά περίπλοκη και απρόβλεπτη συμπεριφορά τους οφείλεται περισσότερο στην έλλειψη δεδομένων και γνώσης σχετικά με τις φυσικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά των δεδομένων των γεωυλικών που προκάλεσαν ή μπορούν να προκαλέσουν μια κατολίσθηση, παρά στην έλλειψη γνώσης για τους βασικούς φυσικούς νόμους της μηχανικής.

Η ποσοτικοποίηση των παρατηρήσιμων γεγονότων που χαρακτηρίζουν ένα κατολισθητικό φαινόμενο σε συνδυασμό με την συγγραφή των εξισώσεων κίνησης που το περιγράφουν καθώς και η δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης της μελλοντικής εξέλιξης του, συνθέτουν την περιπτωσιολογική ταυτότητα του φαινομένου και αποτελούν στοιχεία που μπορούν μέσω σχεδιασμού των κατάλληλων μέτρων προστασίας, που έχοντας ως στόχο την πρόληψη και μετριασμό καταστροφών καθώς και την μείωση του παράγοντα κινδύνου να ενεργοποιήσουν τον σχεδιασμό και την υλοποίηση αριστοτεχνικών έργων υποδομής, που τελικά θα οδηγήσουν στην διάσωση ανθρώπινων ζώων.

Συνοπτικά οι κατολισθήσεις αποτελούν φυσικά φαινόμενα με υψηλό παράγοντα διακινδύνευσης. Η αυξανόμενη συνειδητοποίηση της κοινωνικοοικονομικής σημασίας των κατολισθήσεων παρείχε σημαντικά κίνητρα για την συστηματική παρακολούθηση και μελέτη τέτοιων φαινομένων. Παρόλο που η εμπειρία στην έρευνα τέτοιων φυσικών κινδύνων έχει ενισχυθεί σημαντικά, εντούτοις η

πολυπλοκότητα και πολυπαραγοντικότητα του φαινομένου αποφέρει σημαντικές δυσχέρειες τόσο στην παρατήρηση και διερεύνηση του όσο και στην κρίσιμης σημασίας πρόβλεψη της μελλοντικής δραστηριότητάς του.

2.2. Ορισμοί

Η **κατολίσθηση** είναι ένα φυσικό σύστημα που αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου σε διάφορα στάδια (π.χ. Terzaghi 1950; Leroueil et al. 1996). Ο Terzaghi, 1950 όρισε με τον όρο κατολίσθηση «μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω». Οι Skempton και Hutchinson (1969), αναθεώρησαν τον ορισμό του Terzaghi διαχωρίζοντας χρονικά την ιστορία μιας μαζικής κίνησης σε παραμορφώσεις πριν από την αστοχία, την ίδια την αστοχία και σε μετατοπίσεις μετά την αστοχία.

Πολλές κατολισθήσεις παρουσιάζουν διάφορα επεισόδια κίνησης, διαχωρισμένα με μεγάλες ή μικρές περιόδους σχετικής αδράνειας. Ο όρος αστοχία περιγράφει το πιο σημαντικό επεισόδιο κίνησης στη γνωστή ή αναμενόμενη ιστορία μιας κατολίσθησης, η οποία συνήθως περιλαμβάνει τον πρώτο σχηματισμό μιας πλήρως ανεπτυγμένης επιφάνειας ρήξης ως ασυνέχεια μετατόπισης ή παραμόρφωσης (Morgenstern και Tchalenko 1967). Ο βαθμός απώλειας της αντοχής κατά τη διάρκεια μιας αστοχίας καθορίζει την ταχύτητα μετά την αποτυχία της κατολίσθησεως. Το στάδιο αστοχίας μπορεί να περιλαμβάνει μια κινηματική αλλαγή από την ολίσθηση στη ροή ή την πτώση, η οποία σχετίζεται επίσης με τη συμπεριφορά μετά την αποτυχία και την καταστροφή της κατολισθήσεως.

Ο επικρατέστερος ορισμός για ένα κατολισθητικό φαινόμενο από το 1978 μέχρι και σήμερα, δόθηκε από τον Varnes (1978) με τον όρο **Mass Wasting** «μετακίνηση των μαζών». Ουσιαστικά η ευρύτερη έννοια του όρου περιλαμβάνει κάθε αλλαγή της επιφάνειας μιας κλιτύος με ταυτόχρονη μετακίνηση της μάζας του εδάφους όπως πτώσεις, ολισθήσεις, ανατροπές, εκτάσεις, ροές.

2.3. Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των κατολισθητικών συστημάτων και έχοντας την ανάγκη κατανόησης και μελέτης αυτών των συστημάτων, πολλοί ερευνητές πρότειναν διάφορα συστήματα ταξινόμησης των κατολισθητικών κινήσεων, με βασικό κίνητρο την πρόληψη και τον μετριασμό των καταστροφών και την μείωση του κινδύνου. Από όλες τις ταξινομήσεις που έχουν προταθεί το σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων που επινοήθηκε από τον αείμνηστο D.J. Varnes αποτελεί το επικρατέστερο και πιο διαδεδομένο σύστημα που εφαρμόζεται με επιτυχία έως και σήμερα, φυσικά με πρόσθετες τροποποιήσεις και αναθεωρήσεις που έχουν γίνει με την πάροδο του χρόνου (Cruden και Varnes (1996); Hungr et al. (2014)) που αντικατοπτρίζουν τις πρόσφατες εξελίξεις στην κατανόηση των κατολισθητικών κινήσεων, όπως επίσης και των υλικών και των μηχανισμών που εμπλέκονται σε αυτές.

Σύμφωνα με την εν λόγω ταξινόμηση, ένα κατολισθητικό φαινόμενο εξαρτάται υπό την ευρεία έννοια από δύο βασικές παραμέτρους, την φύση του υλικού που συμμετέχει στην κίνηση και τον τύπο της κίνησης.

Ο τύπος υλικού αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κατολισθήσεων. Ο Varnes διαίρεσε τον τύπο του υλικού που συμμετέχει σε ένα κατολισθητικό φαινόμενο σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- 1. Βραχώδες υπόβαθρο (Bedrock):** ορίζεται μια σταθερή ή σκληρή μάζα η οποία πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης ήταν άθικτη στη φυσικής της θέση.
- 2. Έδαφος (Soil):** ορίζεται ένα σύνολο χαλαρών ή ασθενώς συνδεδεμένων στερεών σωματιδίων – ορυκτών – πετρωμάτων, που έχουν προκύψει από την αποσάθρωση και διάβρωση των προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Τα αέρια ή τα υγρά που γεμίζουν τους πόρους του εδάφους αποτελούν και αυτά μέρος του εδάφους.
- 3. Κορήματα (Debris):** με τον όρο «κορήματα» περιγράφεται το εδαφικό υλικό που περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό χονδρόκοκκου υλικού. Το 20% του υλικού αποτελείται από σωματίδια που είναι μεγαλύτερα από 2 mm ενώ το υπόλοιπο 80% είναι μικρότερο από 2 mm.

Ωστόσο, η τριπλή αυτή διαίρεση υλικού που πρότείνει ο Varnes (1978), δεν είναι συμβατή ούτε με τη γεωλογική ορολογία των υλικών που διακρίνονται από την προέλευση, ούτε με τις γεωτεχνικές ταξινομήσεις που βασίζονται σε μηχανικές ιδιότητες.

Γι' αυτό τον λόγο η ταξινόμηση των υλικών που συμμετέχουν σε μια κατολίσθηση αναθεωρήθηκαν και πλέον περιγράφονται με σαφής γεωλογικούς – γεωτεχνικούς όρους όπως φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 2-1 Τύπος υλικών που συμμετέχουν σε μια κατολίσθηση (από Hungr et al., 2014).

Material name	Character descriptors (if important)	Simplified field description for the purposes of classification	Corresponding unified soil classes	Laboratory indices (if available)
Rock	Strong	Strong—broken with a hammer		UCS>25 MPa
	Weak	Weak—peeled with a knife		2<UCS<25 MPa
Clay	Stiff	Plastic, can be molded into standard thread when moist, has dry strength	GC, SC, CL, MH, CH, OL, and OH	$I_p > 0.05$
	Soft			
	Sensitive			
Mud	Liquid	Plastic, unsorted remolded, and close to Liquid Limit	CL, CH, and CM	$I_p > 0.05$ and $I_L > 0.5$
Silt, sand, gravel, and boulders	Dry	Nonplastic (or very low plasticity), granular, sorted. Silt particles cannot be seen by eye	ML	$I_p < 0.05$
	Saturated		SW, SP, and SM	
	Partly saturated		GW, GP, and GM	
Debris	Dry	Low plasticity, unsorted and mixed	SW-GW	$I_p < 0.05$
	Saturated		SM-GM	
	Partly saturated		CL, CH, and CM	
Peat		Organic		
Ice		Glacier		

Πίνακας 2-2 Συμπληρωματικοί όροι υλικού βασισμένοι σε γεωμορφολογικές αναλύσεις (από Hungr et al., 2014).

Rock	Intrusive, volcanic, metamorphic, strong sedimentary, (carbonatic or arenaceous) and weak sedimentary (argillaceous)
Soil	Residual, colluvial, alluvial, lacustrine, marine, aeolian, glacial, volcanic, organic, random anthropogenic fills, engineered anthropogenic fills, mine tailings, and sanitary waste

Όσον αφορά τους τύπους κίνησης ενός κατολισθητικού φαινομένου, οι Cruden και Varnes (1996) πρότειναν ξεχωριστά ονόματα για τον τρόπο κίνησης σε κάθε στάδιο μιας συγκεκριμένης κατολίσθησης, και διαίρεσαν τις κινήσεις αυτές σε 6 διαφορετικές κατηγορίες, όπως φαίνεται παρακάτω:

- 1) Πτώσεις (Falls)
- 2) Ανατροπές (Toppling)
- 3) Ολισθήσεις (Slides)
- 4) Εξάπλωσεις (Spreads)
- 5) Ροές (Flows)
- 6) Σύνθετες μετακινήσεις (Complex movements)

Όλες οι κατηγορίες των κατολισθητικών κινήσεων κατά Varnes συναθροίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2-3 Ταξινόμηση κατολισθητικών κινήσεων Varnes (1978)

ΤΥΠΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ		
	Βραχώδεις υπόβαθρο	Εδάφη	
		Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Καταπτώσεις	Καταπτώσεις βράχων	Καταπτώσεις κορημάτων	Καταπτώσεις γαιών
Ανατροπές	Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπή γαιών
Ολίσθηση	Περιστροφική	Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων
Πλευρική εξάπλωση	Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροή	Ροή βραχώδους υποβάθρου (Ερπυσμός)	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
		(Ερπυσμός εδάφους)	
Σύνθετη	Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων		

2.4. Κατηγορίες κατολισθήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για τα είδη των μετακινήσεων και τις κατηγορίες των κατολισθήσεων, όπως αυτά περιγράφονται στην σχετική βιβλιογραφία (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996).

Καταπτώσεις βράχων (rock falls): με τον όρο «καταπτώσεις βράχων» περιγράφονται οι αποκολλήσεις ενός ή παραπάνω τμημάτων ενός πετρώματος ή μέρους συνεκτικού εδάφους από ένα απότομο πρανές, κατά μήκος μια επιφάνειας με σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή, που κατέρχεται προς τα κατόντη είτε με ελεύθερη πτώση είτε με την μορφή της κύλισης και της αναπήδησης.

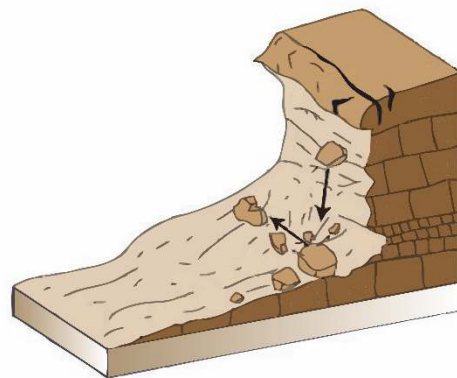
Ανατροπές βράχων (rock topples): ως «ανατροπή» ορίζεται η προς τα έξω εμπρόσθια περιστροφική κίνηση εδαφικών ή βραχωδών υλικών ενός πρανούς η οποία οφείλεται σε βαρυτικές τάσεις, ή σε πιέσεις πόρων (ρωγμές πληρωμένες με νερό), που προκαλούν περιστροφή προς τα έξω, γύρω από ένα σημείο ή άξονα που εντοπίζεται κάτω από το κέντρο βάρους του πρανούς. Ανάλογα με τη γεωμετρία της κινούμενης μάζας, τη γεωμετρία της επιφάνειας διαχωρισμού, τον προσανατολισμό και την έκταση των κινηματικά ενεργών ασυνεχειών, το φαινόμενο μπορεί σταδιακά να εξελιχθεί σε κατάπτωση ή ακόμη και σε ολίσθηση της μετακινούμενης μάζας (Cruden & Varnes, 1996).

Ολισθήσεις (slides): Δια του όρου «ολίσθηση», αναφέρεται η προς τα κατόντη κίνηση μιας αποσπώμενης μάζας από ένα βραχώδες ή εδαφικό πρανές που προϋποθέτει τη διατμητική παραμόρφωση, μετατόπιση ή θραύση του υλικού κατά μήκος επιφανειών θραύσης ή ζωνών διάτμησης.

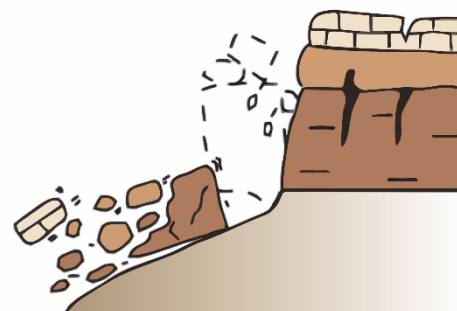
Ειδικότερα, οι ολισθήσεις ταξινομούνται σε περιστροφικές και μεταθετικές:

Περιστροφικές ολισθήσεις (rotational slides): αφορά ολισθήσεις που πραγματοποιούνται κατά μήκος μιας κεκλιμένης επιφάνειας, κοίλης προς τα επάνω με μικρή παραμόρφωση στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας. Στη βάση της μετακινούμενης μάζας παρατηρείται ανύψωση (φούσκωμα), ενώ το ανώτερο τμήμα της κινείται σχεδόν κατακόρυφα προς τα κάτω με μια μικρή κάμψη προς τα πίσω λόγω της περιστροφικής κίνησης. Η περιστροφική ολίσθηση πραγματοποιείται πάνω σε μια κυλινδρική επιφάνεια, με άξονα παράλληλο στον άξονα γύρω από τον οποίο η μάζα ολισθαίνει (Varnes, 1978).

Μία περιστροφικού χαρακτήρα κατολίσθηση αποτελείται από τα εξής μέρη τα οποία παρουσιάζονται και στην **Εικόνα 2.3**:

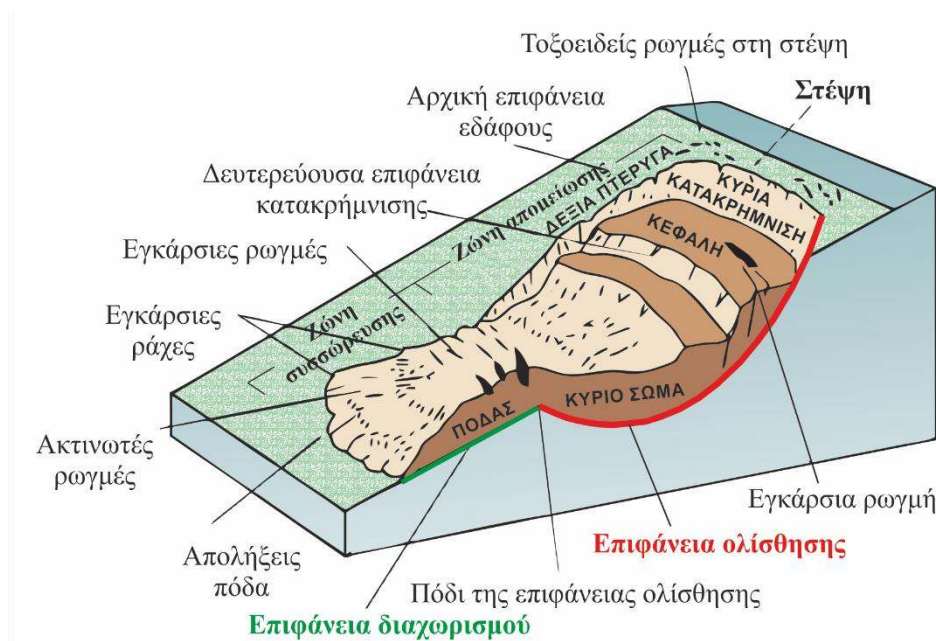


Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση Βραχοκαταπτώσεων (τροποποιημένο από USGS, 2004 & Varnes, 1978)



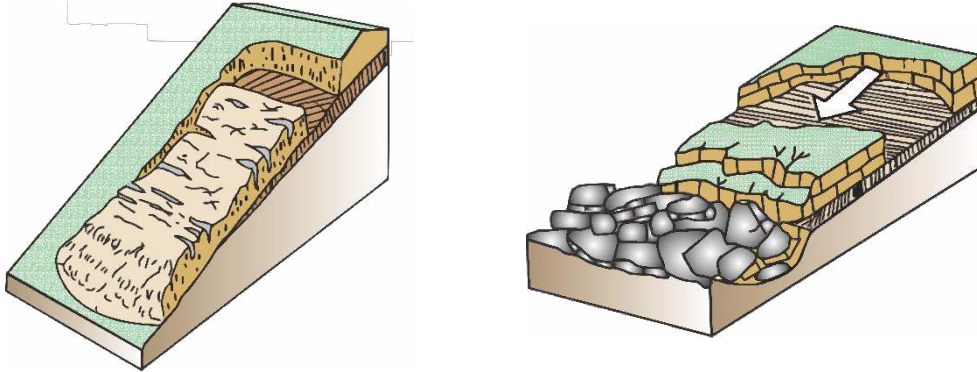
Εικόνα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση Ανατροπών (τροποποιημένο από USGS, 2004 & Varnes, 1978)

- 1) **Στέψη (crown):** Καλείται το ανώτερο σταθερό τμήμα του φυσικού εδάφους, το πλησιέστερο προς την κύρια κατακρήμνιση.
- 2) **Κύρια κατακρήμνιση (main scarp):** Πρόκειται για το απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της ολίσθησης (δηλαδή την στέψη), που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
- 3) **Κορυφή (top):** Καλείται το υψηλότερο σημείο επαφής μεταξύ της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.
- 4) **Κεφαλή (head):** Ονομάζονται τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης, κατά μήκος της διεπαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.
- 5) **Δευτερεύουσα κατακρήμνιση (minor scarp):** Αποτελεί μια δευτερεύουσα επιφάνεια θραύσης της μετακινούμενης μάζας που προήλθε από διαφορετικές μετακινήσεις της μάζας αυτής.
- 6) **Κύριο σώμα (main body):** Καλείται το τμήμα της μετακινούμενης μάζας που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης, μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης και της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης.
- 7) **Πόδας (foot):** Ονομάζεται το τμήμα της κατολίσθησης που έχει κινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης και το οποίο υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
- 8) **Απόληξη (toe):** Είναι το κατώτερο, συνήθως κυρτό όριο της μετακινούμενης μάζας. Ουσιαστικά αποτελεί το τμήμα της κατολίσθησης που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της.
- 9) **Επιφάνεια ολίσθησης (surface of rupture):** Αποκαλείται η επιφάνεια που αποτελεί επέκταση της κύριας κατακρήμνισης υπό της κατολίσθησης, πάνω στην οποία γίνεται η ολίσθηση.
- 10) **Επιφάνεια διαχωρισμού (surface of separation):** Αποτελεί το τμήμα της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους που καλύπτεται από τον πόδα της κατολίσθησης.
- 11) **Αρχική επιφάνεια εδάφους (original ground surface):** Ονομάζεται η επιφάνεια του εδάφους πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης.



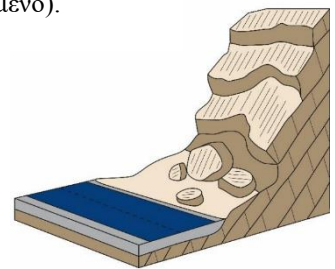
Εικόνα 2.3 Χαρακτηριστικά τμήματα περιστροφικής ολίσθησης (Varnes, 1978 τροποποιημένο).

Μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides): στις μεταθετικές ολισθήσεις η μετακινούμενη μάζα που αποχωρίζεται από το πρηνές μετακινείται προς τα έξω κατά μήκος μιας επίπεδης ή ομαλά κυματοειδούς επιφάνειας με πολύ μικρή έως καθόλου περιστροφική κίνηση ή κάμψη. Η μετακινούμενη αυτή μάζα ολισθαίνει και μετακινείται παράλληλα στην επιφάνεια ολίσθησης.



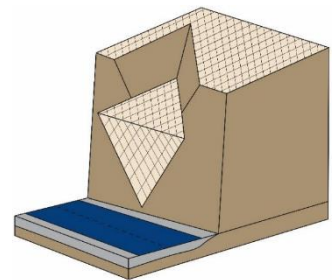
Εικόνα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση Μεταθετικών ολισθήσεων. **Αριστερά** η μάζα της κατολίσθησης κινείται κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας με μια μικρή περιστροφή και κάμψη. **Δεξιά** η κινούμενη μάζα αποτελείται από μια ή μερικές στενά συνδεδεμένες μονάδες που κινούνται προς τα κάτω ως μια σχετικά συνεκτική μάζα. (Varnes, 1978 τροποποιημένο).

Επίπεδες ολισθήσεις: Οι μεταθετικές ολισθήσεις σε βραχώδη πρηνή ονομάζονται «επίπεδες ολισθήσεις» και ο τύπος της μετακίνησης τους εξαρτάται από τον προσανατολισμό της ελεύθερης επιφάνειας του πρηνούς σε σχέση με τις ασυνέχειες της βραχομάζας (Hocking, 1976, Cruden, 1978).



Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση Επίπεδων ολισθήσεων (τροποποιημένο από Highland & Bobrowsky, 2008)

Σφηνοειδείς ολισθήσεις: Αν η επιφάνεια αστοχίας δημιουργείται από δύο οικογένειες ασυνεχειών, και η μετακίνηση της μάζας περιορίζεται κατά μήκος της τομής αυτών των ασυνεχειών, τότε δημιουργείται αστοχία τύπου σφήνας.

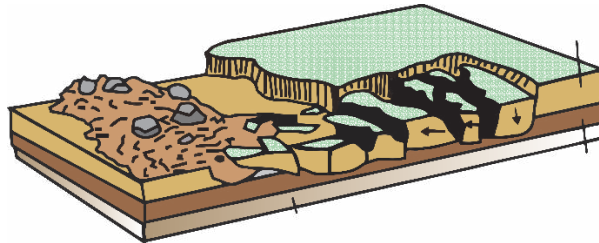


Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση Σφηνοειδών ολισθήσεων (τροποποιημένο από Highland & Bobrowsky, 2008)

Εξαπλώσεις – εκτάσεις (spreads): Με τον όρο «εξάπλωση – εκτάσεις» περιγράφεται η πλευρική κίνηση συνεκτικών υλικών τα οποία υπέρκεινται μαλακών υλικών.

Εξάπλωση τεμαχών (block spreads): Υπό τον όρο αυτό, ορίζεται η πλευρική μετατόπιση μιας βραχώμαζας, που υπέρκειται άλλων ασθενέστερων σχηματισμών συνήθως συνεκτικών εδαφών, λόγω σύνθλιψης του υποκείμενου ορίζοντα. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα, χωρίς όμως την δημιουργία μιας καλά καθορισμένης επιφάνειας διάτμησης ή κάποιας ζώνης πλαστικής ροής που να ελέγχει τη μετακίνηση, και η οποία τις περισσότερες φορές είναι εξαιρετικά αργή, αλλά η έκταση της κατά κανόνα πολύ μεγάλη.

Εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads): Αποκαλούνται οι πλευρικές μετατοπίσεις και η έκταση μεγέθους βραχώμαζας ή συνεκτικού υλικού, που υπέρκειται ενός ασθενέστερου σχηματισμού, και οφείλονται στη ρευστοποίηση ή πλαστική ροή του υποκείμενου αυτού ασθενέστερου ορίζοντα.

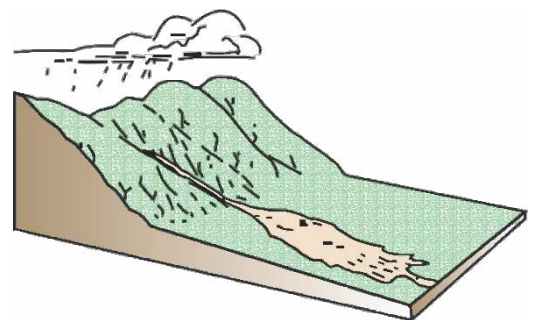


Εικόνα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση Εξαπλώσεων (τροποποιημένο από USGS, 2004 & Varnes, 1978).

Ροές εδαφών: οι ροές εδαφών είναι φαινόμενα συνεχών σχετικών μετακινήσεων στο χώρο που εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά αλλά και σε βραχώδες υπόβαθρο, και μπορούν να είναι γρήγορες ή αργές, ξηρές ή υγρές.

Ροές βραχώδους υποβάθρου (bedrock flows): οι ροές σε ένα βραχώδες υπόβαθρο περιλαμβάνουν τις πολύ αργές παραμορφώσεις που κατανέμονται μέσα στη μάζα του πετρώματος και προέρχονται από κάμψη, πτύχωση ή διόγκωση. Αυτές οι παραμορφώσεις κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές και μικρές ή μεγάλες ρωγμές – διακλάσεις ή ακόμη μικρορωγμές, χωρίς τη δημιουργία μιας καλά ανεπτυγμένης επιφάνειας ολίσθησης. Γενικά είναι εξαιρετικά αργές και λίγο πολύ σταθερές στο χρόνο.

Ροές κορημάτων (debris flows): Οι ροές κορημάτων αφορούν μετακινήσεις χαλαρών υλικών. Είναι εύκολα αναγνωρίσιμες καθώς οι μετατοπίσεις είναι μεγάλες και ιδιαίτερα ευκρινείς. Οι επιφάνειες ολίσθησης εντός της μετακινούμενης μάζας δεν είναι ορατές.



Εικόνα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση Ροής κορημάτων (Varnes, 1978 τροποποιημένο).

Ερπυσμός (creep): Ο ερπυσμός αποτελεί μια ιδιαίτερα βραδεία κίνηση των εδαφικών σχηματισμών ή των υλικών της ζώνης αποσάθρωσης και των πετρωμάτων που έχουν υποστεί ισχυρό κερματισμό. Εξαιτίας της αργής αυτής κίνησης δεν είναι δυνατή η δημιουργία μια καλά ανεπτυγμένης επιφάνειας ολίσθησης.

Σύνθετες μετακινήσεις πρανών (composite slides): τέλος όλα τα είδη των κατολισθήσεων που περιλαμβάνουν παραπάνω από ένα τύπο κίνησης και μπορούν να δρουν ταυτόχρονα σε διαφορετικά μέρη της επιφάνειας δράσης και να εξελίσσονται με διαφορετικές διαδικασίες ονομάζονται σύνθετες μετακινήσεις.

Όλες οι κατηγορίες των κατολισθητικών κινήσεων που αναλύθηκαν παραπάνω, συναθροίζονται στον παρακάτω γενικευμένο πίνακα:

Πίνακας 2-4 Γενικευμένος πίνακας κατολισθήσεων (Varnes 1978, τροποποιημένο από τους Cruden & Varnes 1996).

Movement type	Material		
	ROCK	DEBRIS	EARTH
FALLS	<p>Rock fall</p>	<p>Debris fall</p>	<p>Earth fall</p>
TOPPLES	<p>Rock topple</p>	<p>Debris topple</p>	<p>Earth topple</p>
SLIDES	<p>Single rotational slide (slump)</p>	<p>Multiple rotational slide</p>	<p>Successive rotational slides</p>
	<p>Rock slide</p>	<p>Debris slide</p>	<p>Earth slide</p>
SPREADS	<p>e.g. cambering and valley bulging</p>		<p>Earth spread</p>
FLOWS	<p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	<p>Debris flow</p>	<p>Earth flow (mud flow)</p>
COMPLEX	<p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p>		<p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>

2.5. Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις όπως προαναφέρθηκε αποτελούν ένα περίπλοκο μεταβαλλόμενο σύστημα αστάθειας που εξελίσσεται συνεχώς με τον χρόνο. Συνιστούν δηλαδή, ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο που προκαλείται από μια συνδυασμένη δράση πολλών παραγόντων. Η μετάβαση από μια κατάσταση ισορροπίας σε ένα καθεστώς οριακής ισορροπίας ή αστάθειας είναι αποτέλεσμα από μια σειρά γεγονότων που αφορούν φυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες ή ακόμη από έναν συνδυασμό των δύο αυτών παραγόντων.

Οι κύριοι **φυσικοί παράγοντες** που είναι υπεύθυνοι για το έναυσμα της κίνησης (trigger factor), εκείνοι δηλαδή που δρουν ως τελικός παράγοντας ενεργοποίησης μιας κατολίσθησης, είναι η δράση του νερού και η σεισμική ή και ηφαιστειακή δραστηριότητα. Φυσικά η διάρκεια, ο ρυθμός, ο μηχανισμός και η ένταση της κίνησης σε ένα μεγάλο βαθμό εξαρτώνται και από άλλους, τρίτους, παράγοντες, όπως η απότομη κλίση, η μορφολογία ή το σχήμα του εδάφους, ο τύπος του εδάφους, η υποκείμενη γεωλογία κ.α. Αντίθετα οι **ανθρωπογενείς παράγοντες** περιλαμβάνουν όλες εκείνες τις ανθρώπινες διεργασίες, κοινωνικοοικονομικών και τεχνικών δραστηριοτήτων, που συντελούν ή ενεργοποιούν δυνητικά μια κατολίσθηση.

Ένα χαρακτηριστικό μοντέλο για την κατανόηση της πολυπλοκότητας του μηχανισμού ενεργοποίησης μιας κατολίσθησης είναι η ταξινόμηση που πρότεινε η Ομάδα Εργασίας της UNESCO (Working Party on World Landslide Inventory WP/WLI 1994).

Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή οι παράγοντες διαιρούνται με βάση το αποτέλεσμα και τον βαθμό επίδρασης τους σε προκαταρτικούς παράγοντες και σε παράγοντες εναύσματος της κίνησης, ενώ με βάση την προέλευσή τους υποδιαιρούνται σε παράγοντες που αναφέρονται σε:

1. Εδαφικές συνθήκες
2. Γεωμορφολογικές διεργασίες
3. Φυσικές διεργασίες
4. Ανθρώπινες διεργασίες



Εικόνα 2.9 Ταξινόμηση παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων (WP/WLI 1994).

Αναλυτικά οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2-5 Οι πιο σημαντικοί παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI 1994).

ΕΛΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

1	Πλαστικό υλικό χαμηλής αντοχής
2	Ευαίσθητο υλικό
3	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
4	Αποσαθρωμένο υλικό
5	Διατμημένο υλικό
6	Ρωγματομένο ή διακλασμένο υλικό
7	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)
8	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)
9	Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα
10	Διαφοροποιήσεις στη δυσκαμψία (στιφρό ή πυκνό υλικό υπερκείμενο πλαστικού υλικού)

ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

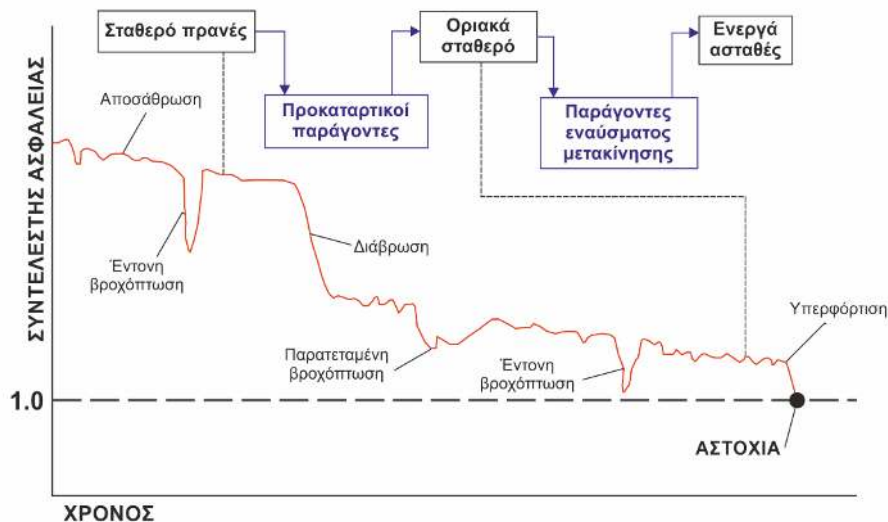
1	Τεκτονική ανύψωση
2	Ανύψωση λόγω ηφαιστειών
3	Επίδραση παγετώνων
4	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρανούς
5	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρανούς
6	Διάβρωση της βάσης του πρανούς από παγετώνα
7	Διάβρωση των πλευρών του πρανούς
8	Εσωτερική διάβρωση
9	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρανούς
10	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης (από πυρκαγιά, διάβρωση κλπ.)

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 διάγκωση και συρρίκνωση εδαφών

ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

1	Εκσκαφές στη βάση (πόδα) του πρανούς
2	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω 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.)



Εικόνα 2.10 Παράδειγμα μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς με το χρόνο (WP/WLI 1994).

2.6. Φαινόμενα κατολισθήσεων σε σχηματισμό φλύσχη

Ο φλύσχη αποτελεί έναν ιδιαίτερο σχηματισμό και η συμμετοχή του στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων είναι πολύ συχνή. Το σημαντικότερο διακριτικό χαρακτηριστικό εντοπίζεται στο γεγονός του ότι δεν συνιστά έναν μεμονωμένο πετρογραφικό σχηματισμό αλλά μια ετερογενή βραχώμαζα που αποτελείται από εναλλαγές πετρωμάτων κυρίως ιλυολίθων, λεπτόκοκκων έως αδρόκοκκων ψαμμιτών και σπανιότερα κροκαλοπαγών. Ο έντονα ετερογενής του χαρακτήρας οφείλεται κυρίως στην γεωλογική του προέλευση και στην μετέπειτα τεκτορογενετική του εξέλιξη.

Ο φλύσχη, εμφανίζεται στις περισσότερες τεκτονικές ζώνες του Ελληνικού χώρου και αντιπροσωπεύει διάφορες εποχές απόθεσης με ηλικία που μειώνεται από Ανατολή προς Δύση. Οι σημαντικότερες εμφανίσεις φλύσχη υπάρχουν στην Δυτική Ελλάδα στις γεωλογικές ζώνες του Ιονίου, της Τρίπολης και της Πίνδου. Η ζώνη της Πίνδου κατά τη διάρκεια της Αλπικής Ορογένεσης υπέστη μια έντονη πτυχωσιγενή τεκτονική που προκάλεσε αλληπάλληλες πτυχές (σύγκλινα, αντίκλινα), οι οποίες στην συνέχεια αποκολλήθηκαν, εφιπτεύθηκαν και επωθήθηκαν με κυρίαρχη διεύθυνση κίνησης από τα ανατολικά προς τα δυτικά επί των δυτικότερων αυτής παρακείμενων ζωνών Ιονίου και Γαβρόβου.

Οι τεκτονικές αυτές λεπιώσεις είχαν ως αποτέλεσμα την έντονη διαταραχή των πλαστικών κυρίως μελών του φλύσχη (ιλυόλιθοι, αργιλικόι σχιστόλιθοι, λεπτοστρωματώδεις εναλλαγές ψαμμίτη – ιλυόλιθου), δημιουργώντας μια σειρά από ζώνες με έντονα κερματισμένα, καταπονημένα και διατημημένα υλικά.

2.7. Τεχνικογεωλογικό πρότυπο φλύσχη

Από πλευράς γεωτεχνικής κατάστασης, η μηχανική συμπεριφορά του φλύσχη ελέγχεται κυρίως από το ποσοστό και τον τρόπο εναλλαγής των πετρωμάτων που των απαρτίζουν, από τις διάφορες φάσεις καταπόνησης του, όπως είναι οι διεργασίες γένεσης, απόθεσης, διαγένεσης ή μεταμόρφωσης, και τεκτονισμού, από τις μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών που τον συνιστούν και τέλος από την κατάσταση και την γεωμετρία που παρουσιάζουν οι ασυνέχειες του σχηματισμού. Τα στρώματα του συχνά παρουσιάζουν έντονα ίχνη τεκτονικών παραμορφώσεων.

Όσον αφορά τα επιμέρους συστατικά του, δηλαδή τις λιθολογικές φάσεις του φλύσχη, οι ψαμμίτες, σε υγρή κατάσταση, διαθέτουν σχετικά ικανή αντοχή σε μηχανική καταπόνηση, μικρή υδροαπορροφητικότητα και αντιστέκεται ικανοποιητικά σε διάβρωση – αποσάθρωση λόγω ύδατος και λοιπών εξωγενών παραγόντων. Αντίθετα, οι ιλυόλιθοι έως και αργιλικοί σχιστόλιθοι είναι υλικά ευπρόσβλητα στις διεργασίες της διάβρωσης και αποσάθρωσης και σημαντικά λιγότερο ανθεκτικά σε μηχανικές καταπονήσεις.

Επίσης, στους σχηματισμούς αυτούς παρατηρείται σχάση σε λεπτά φυλλάρια. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία που παρουσιάζουν οι ιλυόλιθοι και οι αργιλικοί σχιστόλιθοι στις μεταβολές της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του παγετού στα ελεύθερα μέτωπα πρηνών με αποτέλεσμα την καταστροφή του ιστού τους από τους επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης – ύγρανσης και διαστολής του πάγου μέσα στις ρωγμές.

Ο σχηματισμός στο σύνολο του μπορεί να χαρακτηριστεί γενικά στεγανός με εξαίρεση την επιφανειακή σαθρή και κερματισμένη ζώνη του όπου δημιουργούνται πικροπηγές, συνήθως στο όριο μεταξύ κερματισμένου πετρώματος ή μανδύα αποσάθρωσης και υγιούς πετρώματός. Τα επιφανειακά στρώματα του εμφανίζουν κατά κανόνα μέτρια έως ισχυρή αποσάθρωση και πυκνό δίκτυο ασυνεχειών που προκαλούν έντονη δευτερογενή χαλάρωση και ταπείνωση των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Εξαιτίας της λιθολογικής πολυπλοκότητας και της γεωτεχνικής ιδιαιτερότητας που παρουσιάζει ο σχηματισμός του φλύσχη προτάθηκε το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη, όπου διαιρούνται οι λιθολογικές φάσεις του φλύσχη σε 11 τύπους (I έως XI) με βάση τα ποσοστά συμμετοχής των ψαμμιτικών και των ιλυολιθικών μελών του, αλλά και βάσει της τεκτονικής τους διαταραχής (V. Marinos, 2017).

Πίνακας 2-6 Περιγραφή και βαθμονόμηση αντιπροσωπευτικών τύπων φλύσχη (V. Marinos, 2017).

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗ (B. Marinos, 2007)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (επιφανειακό επίπεδο στρώσης)	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τροχιές, υγιείς, μη αποσβασμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τροχιές, ελαφρώς αποσβασμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Μέτρια, μετρίως αποσβασμένες και εβελωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λίγες, κατά περίπτωση ολιγοπύλες επιφάνειες με αυστηρά επιπονώματα ή υλικά πλήρωσης με γωνιατά θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολιγοπύλες επιφάνειες ή πολύ αποσβασμένες με μαλακό αφητικό υλικό πλήρωσης ή επιπλοκή
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ							
	ΤΥΠΟΣ I. Αδαμάρκτος, μισοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικά πολύ λεπτούς υμένους ιλυόλιθου. Σε αβασθεί στρώσεις ή πρηνή αν ο μηχανισμός στάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμπόδιου (χαλαρή δομή), έχει κινητικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσεις τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI		80	I	II	N/A	N/A
	ΤΥΠΟΣ III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με λιγυρές ενταρίσεις ιλυόλιθων		70				
	ΤΥΠΟΣ IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώδης που αποτελείται από αναλλαγές ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες		60	III	IV	V	VI
	ΤΥΠΟΣ V. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με ενταρίσεις ψαμμιτών		50				
	ΤΥΠΟΣ VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραιές ενταρίσεις ψαμμιτών		40				
	ΤΥΠΟΣ VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώδης, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από αναλλαγές ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες		30			VII	VIII
	ΤΥΠΟΣ VIII. Έντονα διαταραγμένη-πτυχωμένη βραχώδης, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί-διατηρεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο ή και αργιλικό σχιστόλιθο με ενταρίσεις ψαμμίτη		20			IX	X
	ΤΥΠΟΣ IX. Αποδιοργανωμένη βραχώδης που αποτελείται συνήθως σε μεγάλες ζώνες ρηγματώσεων ή/και έντονης αποσάθρωσης. Στον τύπο αυτό απαντώνται κυρίως φθόβρα γευυλικά με διαταραγμένα ιλυολιθικά υλικά ανάστροφα		10				
	ΤΥΠΟΣ X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με καταστραμμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή. Οι στρώσεις του ψαμμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιλυόλιθου		0				XI
	ΤΥΠΟΣ XI. Τεκτονικός ισχυρά διατημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα ψαμμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένο πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Ορισκά ή συμπεπερασμένα των γεωλυκίων μπορεί να προσομοιωθεί με εδαφικά						

N/A Σημειώνει γεωλογικός αδύνατος συνδυασμός. Αλλού, εκτός των σκιασμένων περιοχών, περιπτώσεις όχι αδύνατες αλλά πολύ σπάνιες να υπάρχουν
→ Φορά τεκτονικής διαταραχής αντιστοίχη λιθολογίας

Πίνακας 2-7 Τύποι βραχομαζών φλύσχη (V. Marinos, 2017).



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



Τύπος II. Αδιατάρακτος ιλυόλιθος με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις φαμμίτη



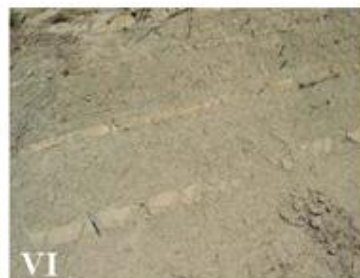
Τύπος III. Μέτρια διαταραγμένος φαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου



Τύπος IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχόμαζα αποτελούμενη από εναλλαγές φαμμίτη-ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες



Τύπος V. Μέτρια διαταραγμένη βραχόμαζα αποτελούμενη από ιλυόλιθο με ενστρώσεις φαμμίτη



Τύπος VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραιές λεπτές ενστρώσεις φαμμίτη



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



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



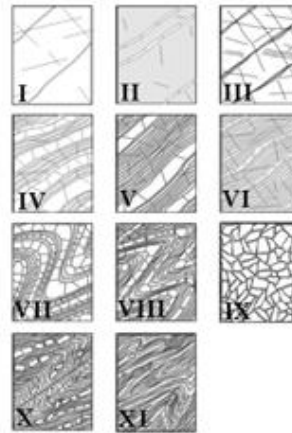
Τύπος IX. Αποδιοργανωμένη – Κατακερματισμένη βραχόμαζα



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



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



2.8. Μελέτη περιπτώσεων

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές για εκδηλώσεις κατολισθητικών φαινομένων σε σχηματισμούς φλύσχη, στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα κατολισθήσεων σε περιβάλλον φλύσχη έτσι ώστε να αναλυθούν περαιτέρω η γεωτεχνική του συμπεριφορά και ο μηχανισμός αστοχίας του.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατολισθήσεων σε περιβάλλον φλύσχη αποτελεί η κατολίσθηση Slano Blato που είναι μία από τις παλαιότερες, μεγαλύτερες και πιο ενεργές κατολισθήσεις στη Σλοβενία, με όγκο άνω του ενός εκατομμυρίου m³ (Petkovšek et al., 2013). Η κεφαλή της κατολίσθησης βρίσκεται στα 700 m ενώ το πόδι της στα 270 m. Το μήκος της κατολίσθησης είναι περίπου 1.400 m ενώ το πλάτος της κυμαίνεται από 70 m έως 300 m.

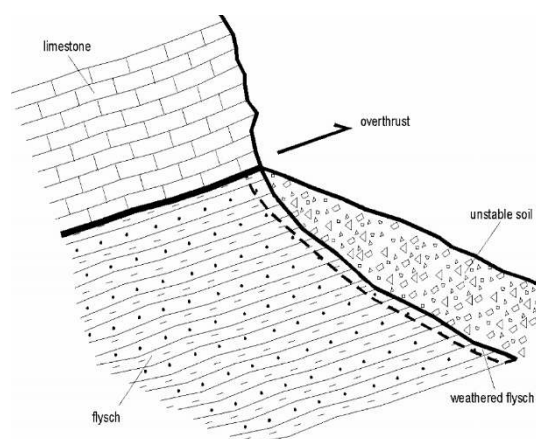


Εικόνα 2.11 Άποψη της κατολίσθησης Slano Blato, και του χωριού Lokavec (από Petkovšek et al., 2013).

Κατά την διάρκεια κυρίως των ξηρών περιόδων η κατολίσθηση συμπεριφέρεται ως ένα σύνολο αποτελούμενο από πολλές ανεξάρτητες, αργές κατολισθήσεις, αντίθετα σε υγρές περιόδους μετακινείται ως μια αργού ρυθμού ροή με μεμονωμένα περιστατικά ταχείας λασπορροής.

Η γεωλογική δομή της περιοχής χαρακτηρίζεται από Μεσοζωικά ανθρακικά πετρώματα (κυρίως ασβεστόλιθοι και δολομίτες) τα οποία υπέρκεινται πάνω από τον Ηωκαινικό φλύσχη για μεγάλη απόσταση.

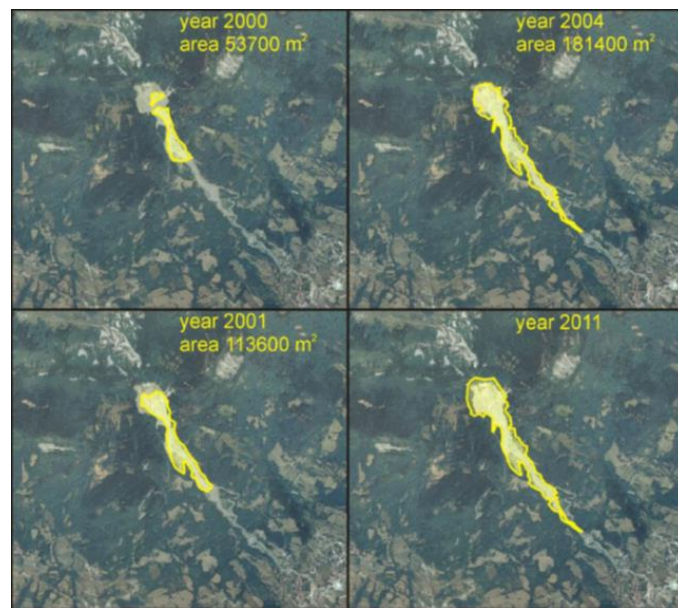
Η κατολίσθηση εμφανίζει δύο επίπεδα που ολισθαίνουν, το πρώτο επίπεδο ολίσθησης βρίσκεται στην επαφή μεταξύ του αποδιοργανωμένου εδάφους, το οποίο προέρχεται από την αποσάθρωση του φλύσχη, και τον φλύσχη ενώ το δεύτερο επίπεδο ολίσθησης είναι μέσα στο τεκτονισμένο υπόστρωμα του φλύσχη.



Εικόνα 2.12 Απλοποιημένη γεωλογική τομή της κατολίσθησης (από Petkovšek et al., 2013).

Αίτια κατολίσθησης:

Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την ενεργοποίησή των κατολισθήσεων, την ταχύτητά τους, το βάθος της ολίσθησης, το επίπεδο ολίσθησης και τη συμπεριφορά της ολίσθησης του υλικού, πέρα από τις έντονες βροχοπτώσεις και την επακόλουθη άνοδο της στάθμης των υπογείων υδάτων, που αποτελούν τον παράγοντα εναύσματος της κίνησης, είναι η ταχεία αποδιοργάνωση του «σταθερού» στρώματος του φλύσχη. Το φλυσχικό υπόστρωμα που ξεπροβάλλει στην επιφάνεια του εδάφους αλλοιώνεται πολύ γρήγορα και μεταμορφώνεται από βραχώδες σε αργιλώδες μέσα σε σχετικά μικρή περίοδο. Τα κορήματα που συσσωρεύονται μέσα στη ζώνη "εξάντλησης" του φλύσχη παρουσιάζουν μια ανεξάντλητη πηγή για πιθανές ροές κορημάτων και λασποροές. Τα υλικά αυτά έρχονται με αργό ρυθμό προς τα κατάντη, ακόμα και σε πρηνή με μικρές κλίσεις (15° - 20°) ενώ μπορεί να ενεργοποιούνται και σε περιόδους που δεν υπάρχουν έντονες βροχοπτώσεις.

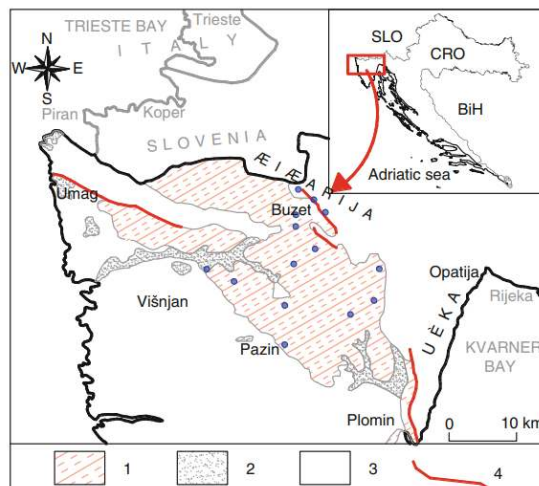


Εικόνα 2.13 Εναέρια άποψη της κατολίσθησης Slano Blato και η εξέλιξή του φαινομένου με την πάροδο του χρόνου (από Petkovšek et al., 2013).

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό παράδειγμα κατολισθήσεων σε περιβάλλον φλύσχη είναι αυτό των κατολισθήσεων στο βορειοανατολικό τμήμα της χερσονήσου Ιστρία της Κροατίας.

Με βάση τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων των κατολισθήσεων που ερευνήθηκαν. Οι κατολισθήσεις αυτές είναι ως επί το πλείστον περιστροφικού χαρακτήρα αστοχίες, πτώσεις και ροές κορημάτων (Arbanas et al., 2013).

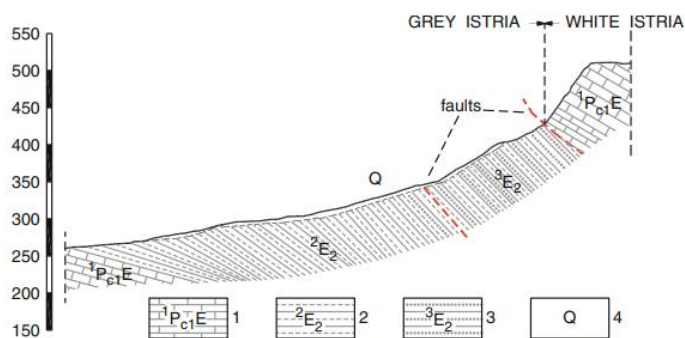
Η επιφάνεια ολίσθησης των εξεταζόμενων κατολισθήσεων τοποθετείται στην επαφή των επιφανειακών αποθέσεων και του υποκείμενου στρώματος του φλύσχη. Λόγω των αντίξοων γεωλογικών συνθηκών, των μακροχρόνιων εντατικών βροχοπτώσεων και της ανθρωπογενούς επίδρασης κυρίως κατά την περίοδο κατασκευής οδικού δικτύου, η φυσική ισορροπία της ευρύτερης περιοχής διαταράχθηκε και σημειώθηκαν αστάθειες.



Εικόνα 2.14 Γεωλογικός χάρτης εξεταζόμενης περιοχής. 1. Παλαιογενής φλύσχη, 2. Αλλουβιακοί σχηματισμοί, 3. Ασβεστόλιθοι, 4. Ρήγματα. Με μπλε τελείες αποτυπώνονται οι περιοχές των κατολισθήσεων (από Arbanas et al., 2013).

Αίτια αστοχίας:

Αναλύοντας τα αίτια και τους παράγοντες ενεργοποίησης των ολισθήσεων, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σχεδόν όλες οι κατολισθήσεις στην περιοχή που διερευνήθηκαν, προκλήθηκαν από την άνοδο της στάθμης των υπόγειων υδάτων στις πλαγιές, λόγω διείσδυσης νερού σε μεγάλες χρονικές περιόδους βροχών και κατά συνέπεια από τη μείωση της ενεργού αντοχής των σχηματισμών που προκλήθηκε από την αύξηση της πίεσης πόρων.

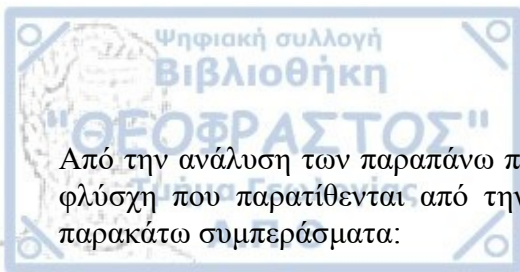


Εικόνα 2.15 Γεωλογική τομή περιοχής μελέτης. **1.** Παλαιογενείς ασβεστόλιθοι, **2.** Αργιλίτης, **3.** Παλαιογενής φλύσχης, **4.** Τεταρτογενείς αποθέσεις (από Arbanas et al., 2013).

Ταυτόχρονα ένας ορισμένος αριθμός κατολισθήσεων προκλήθηκαν από την επίδραση ανθρωπογενών παραγόντων που «βοήθησαν» στο να οδηγηθούν και να διατηρηθούν τα επιφανειακά αυτά νερά εντός της ολισθαίνουσας ζώνης με αποτέλεσμα την εντατική διαβροχή και διήθηση.



Εικόνα 2.16 Φωτογραφίες των διάφορων κατολισθήσεων στην περιοχή (από Arbanas et al., 2013).



Από την ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων μελέτης και έρευνας κατολισθήσεων σε περιβάλλον φλύσχη που παρατίθενται από την διεθνή βιβλιογραφία, μπορούν με ασφάλεια να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Η αστάθεια του εδάφους σε σχηματισμούς φλύσχη αποτελεί ως επί το πλείστον περιστροφικές ολισθήσεις, καταπτώσεις και ροές εδάφους.
2. Οι δυσμενείς γεωμορφολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες είναι τα κύρια αίτια εμφάνισης κατολισθήσεων, ενώ οι βροχοπτώσεις και οι ανθρωπογενείς επιδράσεις είναι οι κύριοι παράγοντες ενεργοποίησης.
3. Οι κατολισθήσεις προκαλούνται κυρίως από την διείσδυση νερού στις πλαγιές, την αύξηση της στάθμης των υπόγειων υδάτων και την μείωση της αντοχής ως συνέπεια της αύξησης της πίεσης του νερού πόρων.
4. Τέλος, μπορεί να υποθεθεί ότι νέες κατολισθήσεις σε σχηματισμό φλύσχη μπορούν να ξανασημειωθούν υπό τις ίδιες ή παρόμοιες συνθήκες.

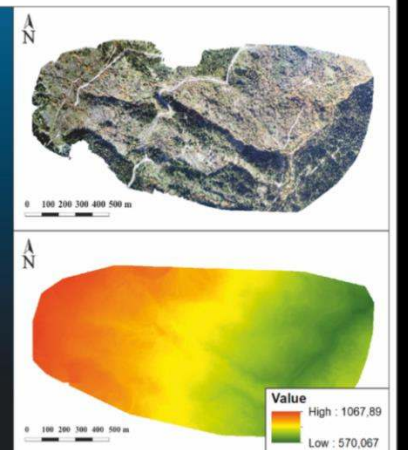
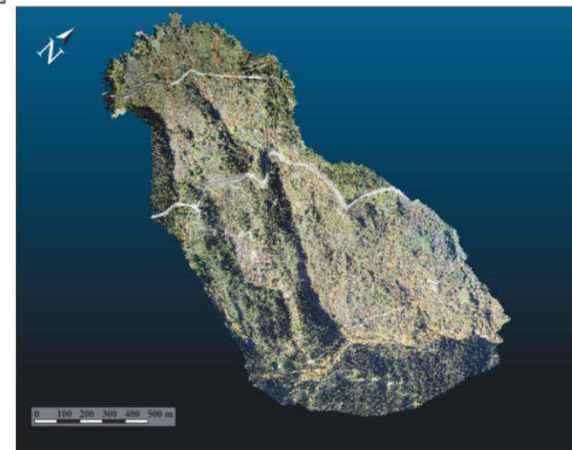
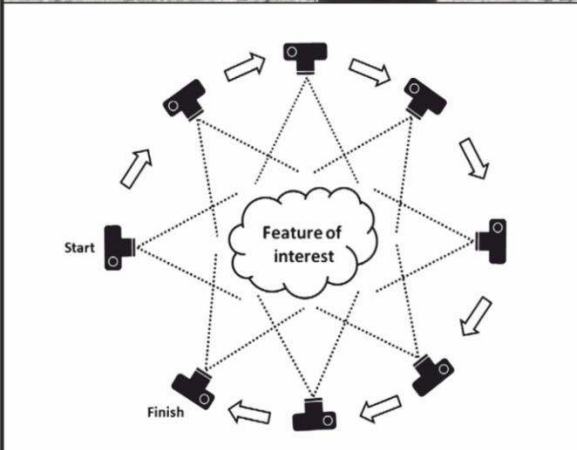
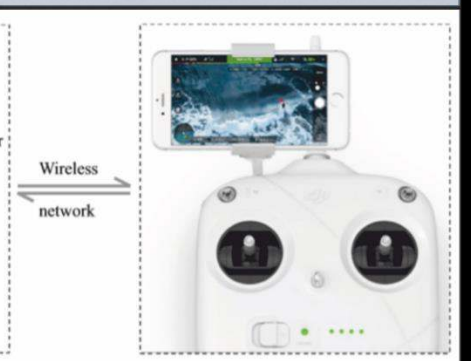
Οι κατολισθήσεις σε περιβάλλον φλύσχη φέρουν έναν υψηλό βαθμό επικινδυνότητας και οι εργασίες αποκατάστασης τους συνήθως προβλέπεται ιδιαίτερα απαιτητική. Έτσι λοιπόν, δημιουργείται η ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης τέτοιου είδους μετακινήσεων, είτε με επιτόπου έρευνες είτε με την εφαρμογή νέων σύγχρονων μεθόδων Τηλεπισκόπησης, έτσι ώστε να μπορούν να προβλεφθούν και να εξυγιανθούν πολύ πριν αστοχήσουν.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UAV



Η πλατφόρμα UAV, DJI Phantom 4 Pro V2.0, που χρησιμοποιήθηκε για τις αποτυπώσεις της περιοχής.



3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UAV

3.1. Γενικά

Οι κατολισθήσεις, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούν φυσικά φαινόμενα που επηρεάζουν και αναδιαμορφώνουν το φυσικό περιβάλλον προκαλώντας παράλληλα σημαντικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις σε ολόκληρο τον κόσμο. Οι συνέπειες αυτών των φαινομένων δύναται να είναι μακροπρόθεσμα αρνητικές τόσο στο φυσικό, όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον, και όταν αυτές έχουν αντίκτυπο στην ανθρώπινη δραστηριότητα, τότε χαρακτηρίζονται ως φυσικές καταστροφές (Bathrellos et al., 2017).

Σήμερα, θεωρούνται ως ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς κινδύνους παγκοσμίως και η δραστηριότητα τους προβλέπεται αρκετά δύσκολα. Ένας από τους μεγαλύτερους περιοριστικούς παράγοντες στην πρόβλεψη και χαρτογράφηση κατολισθητικών φαινομένων είναι η έλλειψη κατανόησης των εξαρτώμενων από την κλίμακα του φαινομένου διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την δραστηριοποίησή τους (Glenn et al. 2006). Διεργασίες, όπως η διάβρωση και αποσάθρωση, αποτελούν σημαντικές γεωμορφολογικές διαδικασίες, οι οποίες μεταβάλλουν το φυσικό αναγλύφου και συχνά αποκρύπτουν σημαντικές πληροφορίες κατά την αξιολόγηση κατολισθητικών γεγονότων.

Γι' αυτό το λόγο, υπάρχει ανάγκη βελτίωσης του τρόπου προσέγγισης και κατανόησης των κατολισθητικών διαδικασιών, η οποία επί του παρόντος ικανοποιείται δια της ανάπτυξης νέων ευέλικτων και αξιόπιστων μεθόδων παρακολούθησης της γήινης επιφάνειας (Lucieer et al., 2014).

Η συστηματική παρακολούθηση μιας κατολίστησης προσφέρει πολύτιμη εικόνα για τον μηχανισμό και την δυναμική εξέλιξη του φαινομένου (Gunn et al., 2013). Παράλληλα, η ταχεία και ακριβής ταυτοποίηση νέων κατολισθήσεων καθώς και η συνεχής άντληση σχετικών πληροφοριών, αποτελούν τη βάση για την εκτίμηση και ανακούφιση των πιθανών επακόλουθων καταστροφών (Lin et al., 2017).

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη τεχνικών Τηλεπισκόπησης (Remote Sensing), άνοιξε νέους δρόμους στον τομέα αναγνώρισης, αποτύπωσης και παρακολούθησης κατολισθητικών φαινομένων.

Τα υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα εδάφους ως παράγωγα εφαρμογών Τηλεπισκόπησης παρέχουν ένα ευρύ σύνολο δεδομένων που μπορούν εύκολα να αξιολογηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή χαρτών επιδεκτικότητας σε κατολισθήσεις αλλά και για τον άμεσο εντοπισμό πιθανών δυνητικών αστοχιών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρές καταστροφές.

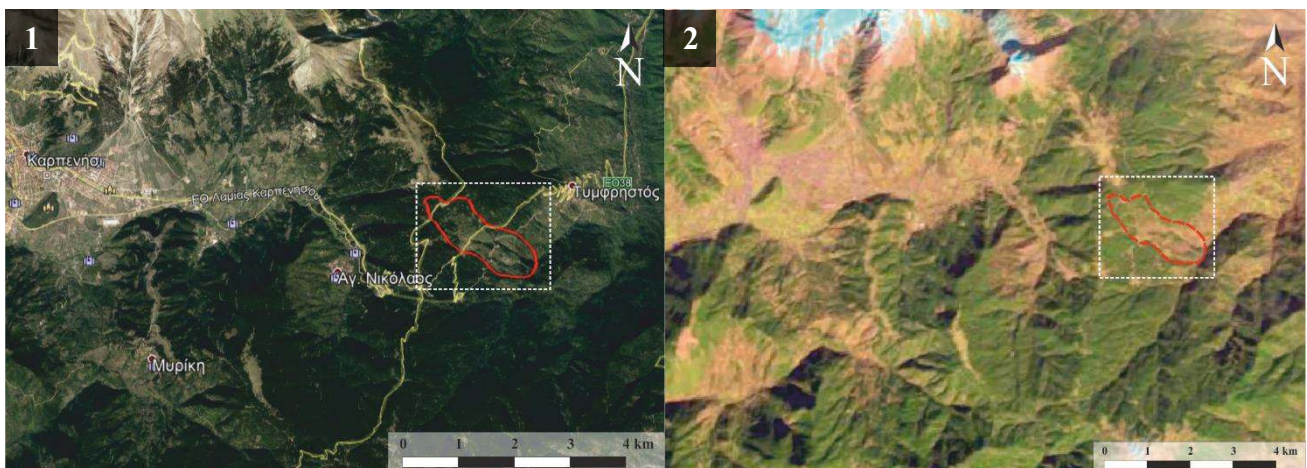
Παράλληλα, η εφαρμογή της επιστήμης της πληροφορικής σε θέματα έρευνας της γήινης επιφάνειας εμφανίζει πολλές προοπτικές τόσο στην ανίχνευση όσο και στην παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων με αυτοματοποιημένο τρόπο, και οι επιτόπου επιχειρήσεις εκτελούνται κυρίως στο πλαίσιο υποστήριξης και ενσωμάτωσης τηλεπισκοπικών τεχνικών, παρότι κατά το παρελθόν το κέντρο βάρους της έρευνας έπεφτε στις παραδοσιακές μεθόδους χαρτογράφησης και καταγραφής κατολισθήσεων (Scaioni et al, 2014).

3.2. Μελέτη κατολισθήσεων με την χρήση τεχνικών Τηλεπισκόπησης

Σε παρελθοντικούς χρόνους, η μελέτη των κατολισθήσεων γινόταν αποκλειστικά με την μελέτη χαρτών και την επιτόπου έρευνα στο πεδίο. Η ανάλυση χαρτών είναι συνήθως ένα από τα πρώτα βήματα μιας έρευνας κατολισθήσεων. Η εμπειρική γνώση των ιδιοτήτων των γεωλογικών υλικών που συμμετέχουν στο φαινόμενο, σε συνδυασμό με την μελέτη θεματικών χαρτών της περιοχής δίνει το γενικό πλαίσιο ευπάθειας μιας περιοχής σε κατολισθήσεις. Οι κατολισθήσεις όμως είναι φαινόμενα τα όποια μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, έτσι τα πιο ανεπαίσθητα σημάδια κίνησης τους δεν μπορούν να εντοπιστούν σε χάρτες. Συνεπώς, η αναγνώριση τους στο πεδίο και η κριτική αξιολόγησή τους ήταν και θα είναι πάντα υποχρεωτική.

Στις μέρες μας όμως, η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης, άνοιξε νέους, πρόσθετους δρόμους για τη μελέτη κατολισθητικών φαινομένων, και αποτελεί αναπόσπαστη μέθοδο έρευνας κατολισθήσεων, με πολλές διαφορετικές τεχνικές (Mantovani et al., 1996). Η τεχνικές της αφορούν στην απόκτηση μετρητικής και ποιοτικής πληροφορίας ενός φαινομένου ή ενός αντικείμενου από απόσταση, χωρίς δηλαδή φυσική επαφή με το υπό μελέτη φαινόμενο ή αντικείμενο. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπει την παρακολούθηση των κινήσεων της γης, έτσι ώστε να ανιχνευθούν οι πρόσφατες κινήσεις της, να καθοριστούν περιοχές ευπαθείς σε κατολισθητικά φαινόμενα και να παρακολουθείται η άμεση και μελλοντική τους εξέλιξη.

Οι παραδοσιακές τεχνικές της βασίζονται κυρίως στην μελέτη αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων (Henry et al., 2002). Η ανάλυση αεροφωτογραφιών είναι μια γρήγορη και πολύτιμη τεχνική για τον εντοπισμό κατολισθήσεων, και αυτό γιατί παρέχει μια τρισδιάστατη επισκόπηση του εδάφους. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα πολλών τύπων εναέριων εικόνων (δορυφορική, υπέρυθρη, ραντάρ κ.ο.κ.) καθιστά την εναέρια αναγνώριση πολύ ευέλικτη, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις το κόστος είναι απαγορευτικό.



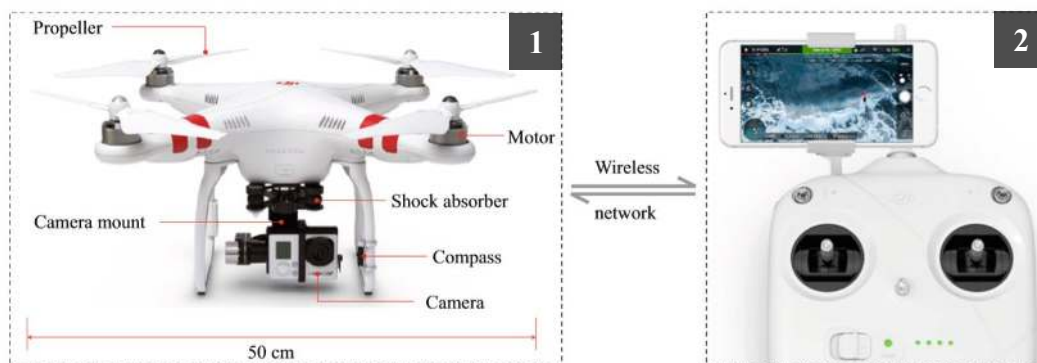
Εικόνα 3.1 Η εξεταζόμενη περιοχή σε 1) Δορυφορική εικόνα Google Earth. 2) Δορυφορική εικόνα Landsat.

Παρόλα αυτά, τα δεδομένα που συλλέγονται με αυτές τις μεθόδους στερούνται επαρκούς αναλύσεως για τον εντοπισμό και την επίλυση της εξέλιξης μικρότερης κλίμακας κατολισθήσεων, ή ακόμα και ενδείξεων παρουσίας κατολισθήσεων, όπως ρωγμές ή μικρές μετατοπίσεις, οι οποίες μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την ευρύτερη δυναμική της ερευνηθείσας περιοχής και για αυτό τον λόγο τα τελευταία χρόνια η χρήση εναλλακτικών συστημάτων αεροφωτογράφισης, όπως είναι τα Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) ή αλλιώς UAV (Unmanned Aerial

Vehicle) εφαρμόζονται ως μια εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους για την απόκτηση δεδομένων υψηλής ανάλυσης.

3.3. Μελέτη κατολισθήσεων με την χρήση Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Οι τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία της εφαρμοσμένης Τηλεπισκόπησης, παρουσιάζουν μια δραματική αύξηση στη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τα UAV, γνωστά και ως μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα (UAS) ή drones, περιλαμβάνουν συνήθως ένα σύστημα αεροσκαφών που ελέγχεται από έναν χειριστή στο έδαφος ή από ένα προγραμματισμένο αυτόνομο πιλοτικό σύστημα (Antonio, 2016). Πρόκειται ουσιαστικά για μια πλατφόρμα η οποία μπορεί να φέρει φωτογραφική ή θερμική κάμερα, σύστημα GPS και είναι σε θέση να εκτελέσει μια πτήση με σκοπό να ληφθούν οι απαιτούμενες σε κάθε περίπτωση εικόνες.



Εικόνα 3.2 1) Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα. 2) Τηλεχειριστήριο και οθόνη παρακολούθησης (από Yu et al., 2017).

Οι εφαρμογές τέτοιων συστημάτων, μη επανδρωμένων εναέριων αεροσκαφών (UAV) σε μελέτες κατολισθήσεων, όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αυξηθεί σημαντικά και αποτελούν μια πολύτιμη πηγή δεδομένων για θέματα αναγνώρισης, χαρτογράφησης και απεικόνισης γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών που συνδέονται με κατολισθητικά φαινόμενα. Ένα από τα μεγαλύτερα οφέλη της χρήσης των συστημάτων UAV είναι η σημαντική μείωση του χρόνου στο πεδίο λόγω της ικανότητας ταχείας έρευνας μεγάλων αλλά και δύσβατων περιοχών, παρέχοντας πλήθος οπτικών, ερευνητικών δεδομένων και αεροφωτογραφιών.

Πιο αναλυτικά, τα συστήματα UAV έχουν την δυνατότητα περισυλλογής δεδομένων σε στενή επαφή με το αντικείμενο μελέτης και από πολλαπλές γωνίες παρέχοντας εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης (Lazzari & Gioia, 2017). Παράλληλα, λόγω της υψηλής κινητικότητας και της παραγωγής εικόνας σε πραγματικό χρόνο, η χρήση των UAV είναι κατάλληλη για έκτακτες ανάγκες αμέσως μετά από καταστροφές. Η δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων υψηλής ανάλυσης μέσω της χρήσης λογισμικών ανοιχτού κώδικα, από φωτογραφίες που λαμβάνονται από πολλαπλές γωνίες, είναι ένα πολύτιμο εργαλείο οπτικοποίησης και ταυτόχρονα ένα ιδανικό εργαλείο για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας (Lucier et al., 2014).

Τέλος, η χρήση των συστημάτων UAV αντιπροσωπεύει μια φθηνή και γρήγορη λύση για την κατά παραγγελία λήψη λεπτομερών εικόνων μιας περιοχής ενδιαφέροντος και τη δημιουργία λεπτομερών τρισδιάστατων μοντέλων και ορθοφωτογραφιών (Giordan et al., 2020). Το χαμηλό λειτουργικό κόστος, σε συνδυασμό με την γρήγορη συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης, καθιστούν τις

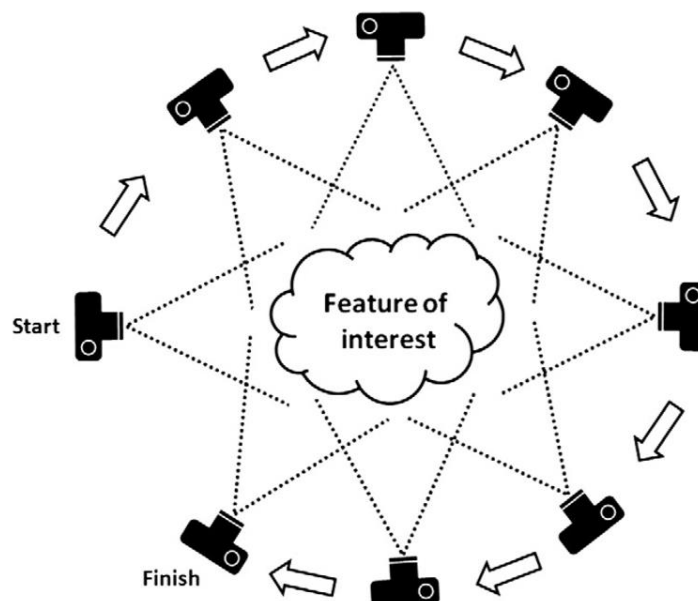
έρευνες με την χρήση UAV, ως ένα πολύτιμο εργαλείο για την ταχεία αναγνώριση και εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με κατολισθήσεις κάτω από δύσκολες φυσικές συνθήκες.

3.4. Βασικές αρχές – Μεθοδολογία UAV

Την τελευταία δεκαετία περίπου από την εμφάνιση της εναέριας και αυτοματοποιημένης λήψης ψηφιακών φωτογραφιών, η μέθοδος της Φωτογραμμετρίας έχει γίνει ένα ισχυρό και ευρέως χρησιμοποιημένο εργαλείο για την τρισδιάστατη τοπογραφική απεικόνιση. Με τον όρο **Φωτογραμμετρία** ορίζεται η τεχνική απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών του σχήματος, της διάστασης και της θέσης οποιουδήποτε αντικειμένου στο χώρο και στο περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής και μέτρησης σε μία ή περισσότερες εικόνες (ISPRS, 2015). Η ανάπτυξη του Τριγωνισμού αντιγράφων και οι αλγόριθμοι εξαγωγής εικόνων εδάφους έχουν ενισχύσει ριζικά την ποιότητα των δεδομένων εδάφους που μπορούν να προκύψουν από επικαλύψεις στερεο-ζευγών (Chandler, 1999; Lane et al, 2000).

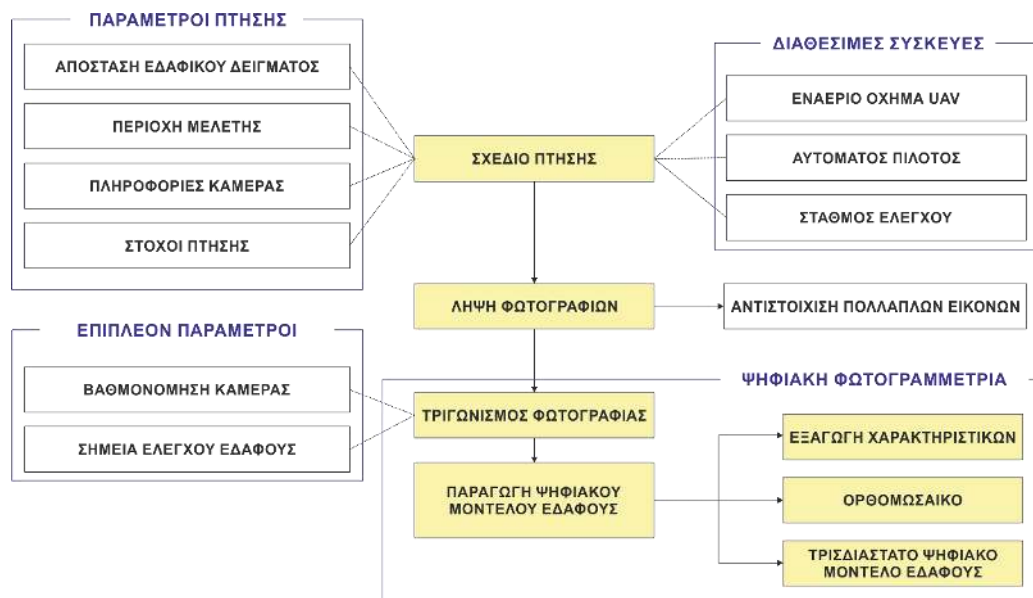
Σε συνδυασμό με την τεχνολογία UAV εφαρμόζεται και η τεχνική **Structure for Motion (SfM)**. Η μέθοδος ξεκίνησε να αναπτύσσεται από το 1990 είναι μια τεχνική κατά την οποία λαμβάνονται τρισδιάστατες πληροφορίες χαρακτηριστικών μέσω δύο ή περισσότερων φωτογραφιών του ίδιου αντικειμένου από διαφορετικές γωνίες (Vasuki et al., 2014). Πρόκειται ουσιαστικά για μια τεχνική αυτόματης αναγνώρισης αντικειμένων από φωτογραφίες, όπου απεικονιζόμενα χαρακτηριστικά και αντικείμενα μπορούν να ανιχνευθούν και να ταυτιστούν και να αλληλεπικαλυφτούν μεταξύ τους αυτόματα μέσω της διαδικασίας **SIFT (Scale Invariant Feature Transformation)**. Στη συνέχεια οι φωτογραφίες αυτές μετασχηματίζονται με τεχνικές τριγωνισμού σε ένα πραγματικό σύστημα συντεταγμένων οδηγώντας στην δημιουργία 3-διάστατων νεφών σημείων. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για περισσότερες εικόνες δημιουργείται ένα **γεωαναφερόμενο αρχείο DEM** που στη συνέχεια θα δώσει το ορθομοσαϊκό (Turner et al., 2015; Lucier et al., 2014).

Σήμερα, οι δυνατότητες της μεθόδου SfM φαίνονται απεριόριστες και αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για έρευνα και εφαρμογή χαμηλού κόστους σε απρόσιτες περιοχές.



Εικόνα 3.3 Structure for Motion (SfM). Λήψη φωτογραφιών με μεγάλη επικάλυψη από πολλαπλές θέσεις (Westoby, 2012).

Για την παραγωγή των τελικών ψηφιακών μοντέλων και των αντίστοιχων ορθομοσαϊκών ακολουθείται μια σειρά διαδικασιών από την προετοιμασία έως την τελική ανάλυση των δεδομένων που λήφθηκαν. Ένα βασικό οργανόγραμμα εργασιών μαζί με τις ενδιαμέσες ενέργειες που συνδέουν τα βήματα μεταξύ τους παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 3.4 Τυπική ροή εργασιών για την απόκτηση και επεξεργασία των δεδομένων UAV (Nex & Remondino, 2004).

3.5. Αυτοματοποιημένες εφαρμογές συστημάτων UAV για την μελέτη κατολισθήσεων

Στις μέρες μας, τα τρισδιάστατα νέφη σημείων (3D Point Clouds), που προκύπτουν από εφαρμογές εναέριων συστημάτων UAV συνδυάζονται εύκολα με αυτοματοποιημένες μεθόδους στην αποτελεσματική ανίχνευση παλαιών ή νεοσχηματισμένων επιφανειών κατολισθήσεων, στην αξιολόγηση της εξέλιξης μιας κατολίσθησης και του ποσοστού μετατόπισης της, στην ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας της, και τέλος στην εκτίμηση του όγκου της μετακινούμενης μάζας (Zhao & Lu, 2018)

Αυτές οι αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις λαμβάνουν υπόψη τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά και τους γεωμορφολογικούς παράγοντες, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η κλίση κ.λπ., των 3D Point Clouds.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων αυτοματοποιημένων εφαρμογών στη διερεύνηση κατολισθήσεων, αποτελεί η μελέτη των Karantanellis et al. (2020), όπου αναπτύχθηκε μια ημιαυτόματη διαδικασία ανάλυσης εικόνας, βάσει αντικειμένου, για τον εντοπισμό, τον χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση κατολισθήσεων χρησιμοποιώντας παράγωγα εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης που αποκτήθηκαν από συστήματα UAV.

3.6. Ταυτοποίηση κατολισθήσεων μέσω της οπτικής ερμηνείας ψηφιακών μοντέλων

Οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνικές τηλεπισκόπησης και η δυνατότητα απόκτησης ψηφιακών μοντέλων εδάφους υψηλής ανάλυσης (HRDEM) άνοιξε νέους δρόμους διερεύνησης και μελέτης των κατολισθητικών φαινομένων (Jaboyedoff et al. 2012). Οι υψηλής ανάλυσης εικόνες, που λαμβάνονται από UAV, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ορθο-ψηφιδωτών υψηλής ανάλυσης,

συνθέτοντας ένα HRDEM, που αποτελεί μια απαραίτητη πηγή πληροφοριών για την ποσοτική χωροθέτηση της ευαισθησίας σε κατολισθήσεις, και την εκτίμηση του πιθανού κινδύνου, μιας περιοχής (Van Den Eeckhaut & Hervás 2012).

Κατά μελέτη ενός HRDEM μιας τυπικής κατολίσθησης, μπορούν εύκολα να διακριθούν και να ποσοτικοποιηθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και διαφορετικές μορφολογικές υπογραφές, οι οποίες ουσιαστικά αντανακλούν τους παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για το έναυσμα κατολισθητικών κινήσεων. Αυτό επιτυγχάνεται από την κατασκευή θεματικών επίπεδων δεδομένων (Layers), όπως το υψόμετρο, ο βαθμός κλίσης, ο προσανατολισμός των κλιτών κ.α. Τα επίπεδα αυτά, προσφέρουν ένα σύνολο μετρητικών και ποιοτικών πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών μετακινήσεων του εδάφους αλλά και για την αποτύπωση μιας κατολίσθησης, και μπορούν εύκολα να συλλεχθούν και να επεξεργαστούν διαμέσου ψηφιακών πόρων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πιο διαδομένα θεματικά επίπεδα που μπορούν εύκολα να εξαχθούν από ένα HRDEM με την χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και είναι ευρέως εφαρμοσμένα σε μελέτες κατολισθήσεων.

3.6.1. Υψόμετρο (Elevation)

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες ελέγχου των κατολισθήσεων (Landslide Controlling Factor – LCF) είναι το υψόμετρο. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές που πιστοποιούν ότι η εμφάνιση των κατολισθήσεων συνδέεται άμεσα με το υψόμετρο στο οποίο εντοπίζονται. Επισημαίνεται πως όλοι οι LCF είναι συνάρτηση του υψομέτρου.

3.6.2. Κλίση (Slope)

Η κλίση αποτελεί έναν από τους κρισιμότερους παράγοντες ρύθμισης μιας κατολίσθησης, και αυτό γιατί η ολίσθηση ενός υλικού είναι άμεσα συνυφασμένη με την κλίση του εδάφους (Pawluszek & Borkowski, 2017). Σαν όρος, περιγράφει τις αλλαγές υψομέτρου ανά συγκεκριμένη μονάδα και μπορεί να αναπαρασταθεί σε ποσοστό ή μοίρες. Έχει εύρος 0° - 90° , όπου οι 0° αντιπροσωπεύουν μια οριζόντια περιοχή ενώ οι 90° μια κάθετη περιοχή.

3.6.3. Προσανατολισμός κλιτών (Aspect)

Ο προσανατολισμός απεικονίζει την οριζόντια κατεύθυνση μιας επιφάνειας, ταξινομείται σε οκτώ κλάσεις που αντιστοιχούν σε οκτώ γεωγραφικές κατευθύνσεις και μια πρόσθετη κλάση για επίπεδο έδαφος και παίρνει τιμές από 0° - 360° . Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αναφορές για σαφή σχέση μεταξύ του προσανατολισμού των κλιτών και την εμφάνιση κατολισθήσεων παρόλα αυτά σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές λαμβάνεται υπόψη ως ρυθμιστικός παράγοντας εδάφους (Pawluszek & Borkowski, 2017).

3.6.4. Σκιασμένο ανάγλυφο (Hillshade)

Το σκιασμένο ανάγλυφο περιγράφει μια υποθετική τιμή φωτισμού της επιφάνειας όπου εφαρμόζοντας την κατάλληλη τιμή της κατεύθυνσης του ηλιακού αζιμουθίου και του ύψους του φωτός, απεικονίζονται φωτιζόμενες και σκιασμένες περιοχές, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο την οπτικοποίηση της μορφολογίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αποκτήθηκαν πολλαπλά σκιασμένα ανάγλυφα φωτίζοντας το εκάστοτε DEM από οκτώ διαφορετικές κατευθύνσεις του ήλιου και στη συνέχεια συνδυάστηκαν σε ένα στρώμα αθροίζοντας τα επιμέρους οκτώ στρώματα, δημιουργώντας έτσι ένα **πολλαπλό σκιασμένο ανάγλυφο MSR (Multiple Shaded Relief)**. Οι πολλαπλές αυτές σκιασμένες ανάγλυφες εικόνες βρίσκουν ευρείας εφαρμογής στην εξερεύνηση των ιδιαίτερων μορφομετρικών πληροφοριών που παρέχονται από ένα DEM (Guzzetti et al. 2012).

3.6.5. Τραχύτητα (Roughness)

Είναι σαφές ότι η επιφάνεια των περιοχών που έχουν πληγεί από κατολισθήσεις παρουσιάζει μεγαλύτερη τραχύτητα από τις παρακείμενες πλαγιές που δεν επηρεάζονται (McKean & Roering, 2004). Ο δείκτης τραχύτητας είναι το μέτρο της τοπογραφικής ετερογένειας του εδάφους, που χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες κατολισθήσεων, έχοντας ως στόχο την εκτίμηση της ηλικίας των κατολισθήσεων και τη δημιουργία χαρτών απογραφής (McKean & Roering 2004). Ο δείκτης τραχύτητας μπορεί να υπολογιστεί με διαφορετικούς τρόπους και μια περίληψη αυτών μπορεί να βρεθεί στο Gaddis & Plant, 2001.

3.6.6. Τοπογραφικό Άνοιγμα (Openness)

Με τον όρο τοπογραφικό άνοιγμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ ενός αρχικού DEM και του DEM_{Ki}, όπου DEM_{Ki} ορίζεται ένα ομαλοποιημένο αρχικό DEM στο οποίο κάθε κελί του πλέγματος του αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή υψομέτρου ενός κινούμενου παραθύρου με γνωστές διαστάσεις (Pawluszek, 2018). Ο δείκτης του τοπογραφικού ανοίγματος, προσφέρει μια σαφή διάκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών του αναγλύφου και της γύρω τοπογραφίας, αναδεικνύοντας τόσο το υψηλότερο όσο και το χαμηλότερο τμήμα των χαρακτηριστικών αυτών.

3.6.7. Καμπυλότητα κάτοψης και κατατομής (Plan and Profile curvature)

Ο όρος καμπυλότητα, θεωρητικά ορίζεται ως ο ρυθμός αλλαγής κλίσης ή του προσανατολισμού, συνήθως ως προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση (Wilson & Gallant 2000).

Η καμπυλότητα κάτοψης είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Οι θετικές της τιμές απεικονίζουν επιφάνειες που είναι πλευρικά κυρτές ενώ οι αρνητικές επιφάνειες που είναι πλευρικά κοίλες. Χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τον προσδιορισμό επιφανειακών μορφών όπως κορυφογραμμές, κοιλάδες (Tarolli et al. 2012).

Αντίθετα η καμπυλότητα κατατομής είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης και περιγράφει την ταχύτητα αλλαγής της κλίσης κατά μήκος του προφίλ μιας επιφάνειας. Οι αρνητικές τιμές της περιγράφουν επιφάνειες που είναι κυρτές τα πάνω ενώ οι θετικές τιμές της επιφάνειες που είναι κοίλες προς τα πάνω. Η παράμετρος αυτή αποτελεί επίσης έναν από τους βασικότερους παράγοντες ρύθμισης μιας κατολίσθησης (Pawluszek, 2018).

3.6.8. Δείκτης τοπογραφικής θέασης (Topographic position index TPI)

Ο δείκτης τοπογραφικής θέασης TPI χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των τοπογραφικών θέσεων αλλαγής της κλίσης και ορίζεται ως η διαφορά σε ένα DEM μεταξύ του υψομέτρου ενός κελιού και του μέσου υψομέτρου των γειτονικών κελιών (Pawluszek, 2018).

Εφαρμόζοντας συγκεκριμένα όρια για τις τιμές του TPI επιτρέπεται ο εντοπισμός διαφορετικών τοπογραφικών μορφών εδάφους, όπως κορυφογραμμές, κοιλάδες και απότομες αλλαγές της κλίσης. Δεδομένου ότι οι επιφάνειες κατακρημνίσεων των κατολισθήσεων εμφανίζονται κυρίως στις κορυφογραμμές, ο δείκτης TPI μπορεί να θεωρηθεί κι αυτός ως ένας από τους σημαντικούς γεωμορφολογικούς παράγοντες ρύθμισης των κατολισθήσεων (Jebur et al. 2014; Pourghasemi et al. 2014).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο δείκτης TPI υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας λογισμικά πακέτα με εργαλεία τοπογραφίας από τους Dilts T.E. (2015).

3.6.9. Αναλογία επιφανειακού αναγλύφου (Surface Relief Ratio SRR)

Ο δείκτης SRR περιγράφει και αυτός την τραχύτητα του εδάφους, με την διαφορά ότι υπολογίζεται για μια συνεχή επιφάνεια Raster και εντός ενός καθορισμένου παραθύρου (Pike & Wilson 1971). Παίρνει τιμές από 0 - 1 και ορίζεται ως εξής:

$$SRR = (z (\text{mean}) - z (\text{min})) / ((z (\text{max}) - z (\text{min})))$$

Όπου:

z = υψόμετρο.

Οι χαμηλές τιμές SRR μπορεί να αντιπροσωπεύουν εξαιρετικά κοίλα και ανθεκτικά χαρακτηριστικά ή υπερβολικές τιμές. Ενώ αντίθετα οι υψηλές τιμές υψηλότερες τιμές μπορεί να αντιπροσωπεύουν εξαιρετικά κυρτά τραχεία χαρακτηριστικά, αλλά και εντελώς επίπεδα χαρακτηριστικά χωρίς καμία κλίση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο δείκτης SRR υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας λογισμικά πακέτα με εργαλεία τοπογραφίας από τους Evans et al. (2014).

Όλα τα παραπάνω θεματικά επίπεδα μπορούν εύκολα να εξαχθούν από ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και να επεξεργαστούν διαμέσου των εξειδικευμένων λογισμικών ArcMap και Global Mapper.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έχοντας ως στόχο την περαιτέρω ανάλυση και ενίσχυση της οπτικής ερμηνείας των μοντέλων της περιοχής που λήφθηκαν, κατασκευάστηκαν όλα τα παραπάνω θεματικά επίπεδα δεδομένων κάθε ένα από τα οποία παρείχε διαφορετικές ενδείξεις σχετικά με τη φύση της τοπογραφίας.

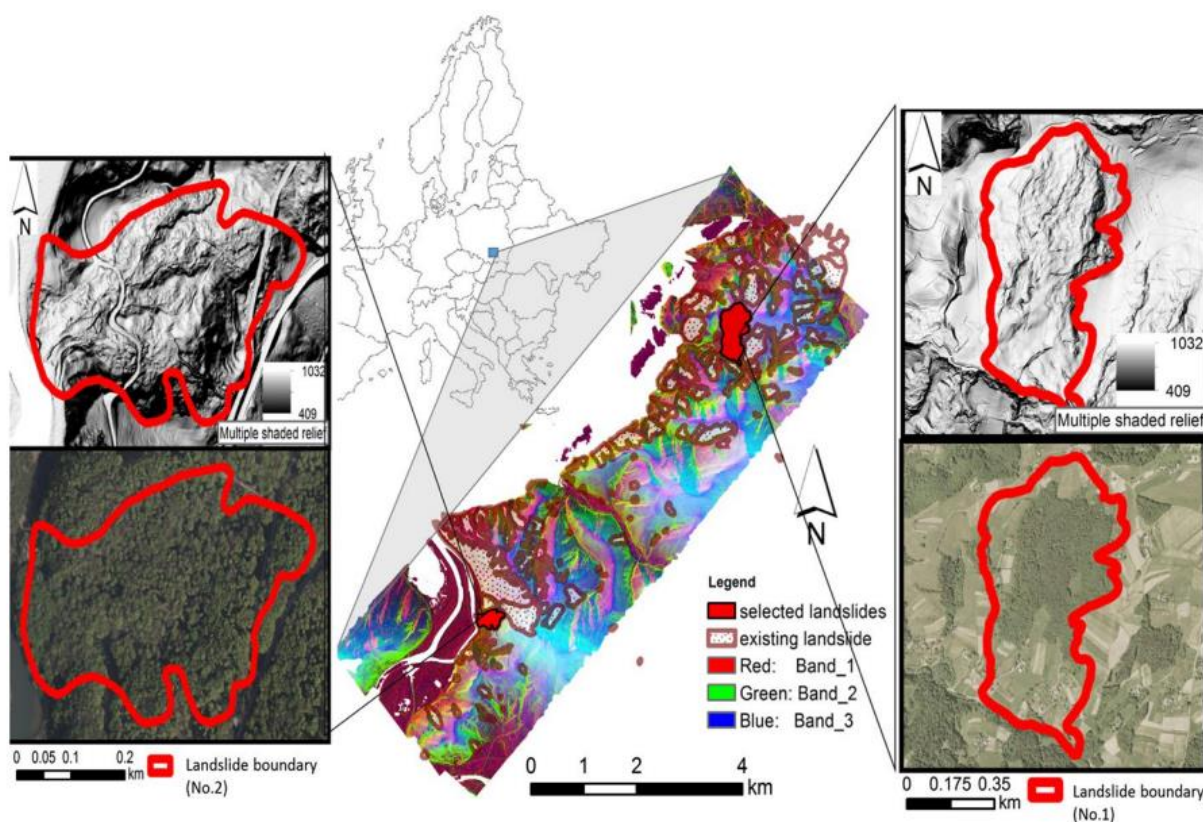
3.7. Μελέτη περίπτωσης

Πολλές είναι οι αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία, όπου ερευνητές προσπάθησαν να εκμεταλλευτούν τα υψηλής ανάλυσης μοντέλα του εδάφους και να χαρτογραφήσουν χαρακτηριστικά κατολισθήσεων και να διερευνήσουν τη μορφολογία του εδάφους (Guzzetti et al. 2012).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα έρευνας κατολισθήσεων μέσω της οπτικής ερμηνείας των μορφολογικών χαρακτηριστικών ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους HRDEM αποτελεί η μελέτη δυο περιοδικά ενεργών κατολισθήσεων σε σχηματισμούς φλύσχη στα Καρπάθια Όρη της Πολωνίας (Pawluszek, 2018).

Την περίοδο 2010 η ενεργοποίηση πολυάριθμων κατολισθήσεων ως αποτέλεσμα έντονων βροχοπτώσεων προκάλεσε μαζικές μετακινήσεις που οδήγησαν σε ζημιές και καταστροφές κατοικιών και εμπορικών κτιρίων, υποδομών μεταφορών καθώς και αγροτικών και δασικών περιοχών του δήμου Małorzeczka, όπου κρίθηκε απαραίτητη η μόνιμη παρακολούθηση του για την εκτίμηση του κινδύνου.

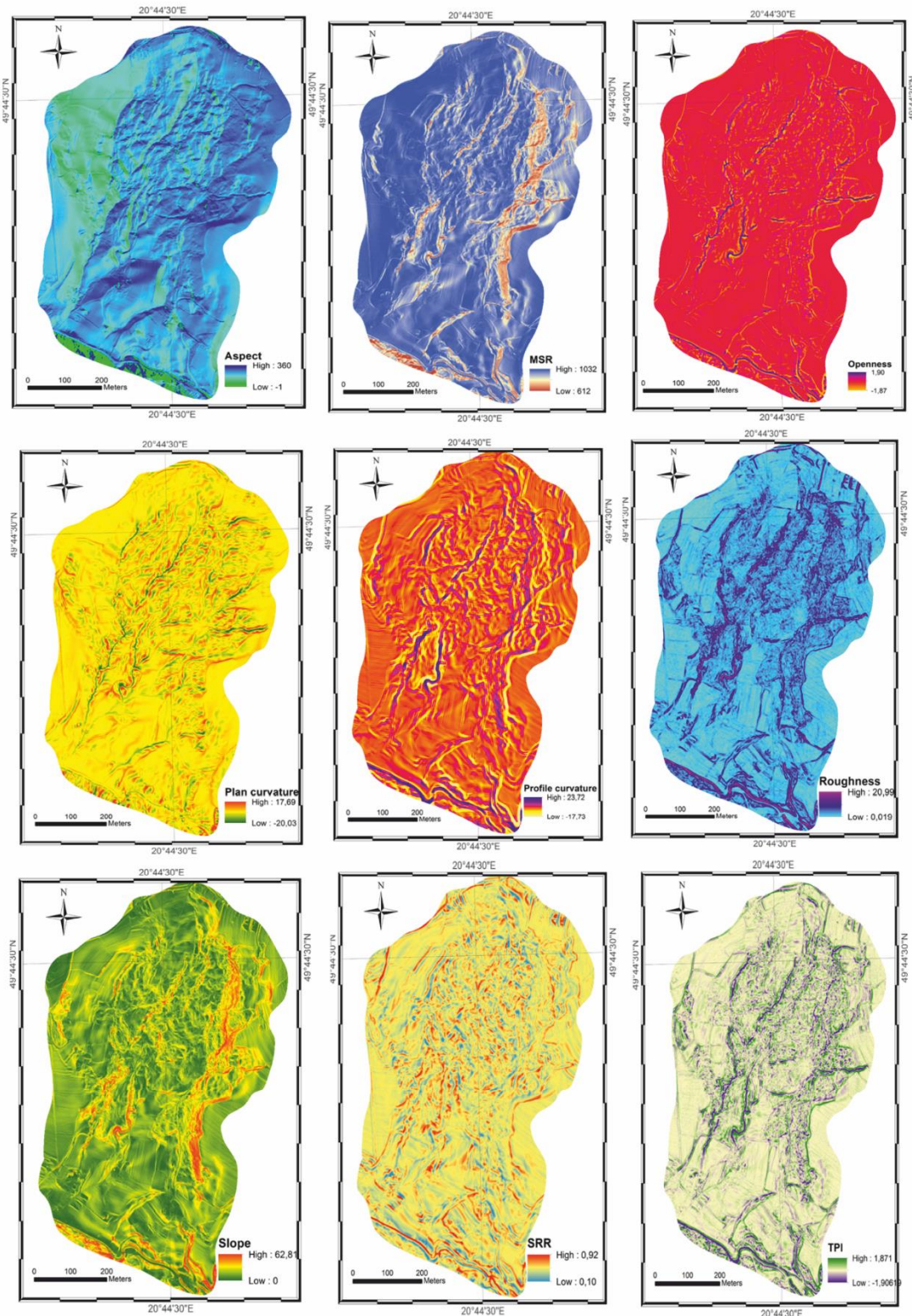
Από πλευράς γεωλογίας οι δύο κατολισθήσεις εντοπίζονται εντός φλυσχικών σχηματισμών που αποτελούνται κυρίως από άργιλο μαζί με χάλικες ηλικίας Τεταρτογενούς, και ψαμίτες μαζί με σχιστόλιθους της ηωκαινικής περιόδου (Wójcik & Krawczyk, 2010). Οι κατολισθήσεις ταξινομήθηκαν κατά Varnes (1978) και της επακόλουθης ενημέρωσης από τους Hungr et al. (2014), ως περιστροφικού τύπου κατολισθήσεις σε υλικά αργίλου - ιλύος (Τύπος 11). Είναι περιοδικά ενεργές και έτσι μπορούν να παρατηρηθούν διάφορες καταστάσεις δραστηριότητας. Ωστόσο, σημαντικό μέρος τους καλύπτεται από δάσος και ως εκ τούτου είναι πολύ περίπλοκο να διερευνηθεί στο πεδίο.



Εικόνα 3.5 Περιοχή μελέτης και θέσεις των κατολισθήσεων που μελετήθηκαν (Pawluszek, 2018).

Κατά την έρευνα των εξεταζόμενων κατολισθήσεων λόγω της έντονης φυτοκάλυψης η ερμηνεία αεροφωτογραφιών, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για καταγραφή κατολισθήσεων, δεν ήταν κατάλληλη για την ερμηνεία της τοπογραφικής επιφάνειας. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν εναέριες τεχνικές με λέιζερ ALS (Aerial laser scanning) που παρείχαν ένα μοντέλο εδάφους υψηλής ανάλυσης με ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία που θα επέτρεπε τον εντοπισμό διαφορετικών μορφολογιών κατολισθήσεων.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν διάφορα θεματικά επίπεδα του HRDEM έτσι ώστε να μεγιστοποιηθούν οι μορφολογικές πληροφορίες και να ενισχυθεί την οπτική ερμηνεία. Κάθε ένα από τα παράγωγα του HRDEM παρέχει διαφορετικές ενδείξεις για τη φύση της τοπογραφίας.



Εικόνα 3.6 Θεματικά επίπεδα που κατασκευάστηκαν για την κατολίθηση No 1. (Pawluszek, 2018).

Όμως, η παρακολούθηση κάθε παραγώγου του HRDEM μεμονωμένα ήταν περίπλοκη και δεν ήταν εύκολο να παρατηρηθεί κάποια σύνδεση μεταξύ των χαρακτηριστικών κατολίσθησης. Οι ερευνητές για να εξερευνήσουν βαθύτερα τις μορφολογικές πληροφορίες και να κατανοήσουν καλύτερα τις σχέσεις μεταξύ μορφολογικών δομών, χρησιμοποίησαν ένα συνδυασμό όλων των παραγώγων του HRDEM σε μία νέα σύνθεση πολλαπλών στρωμάτων.

Η προσέγγιση αυτή επιτεύχθηκε χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και με την βοήθεια τεχνικών μηχανικής μάθησης δια της εφαρμογής της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis).

3.7.1. Principal Component Analysis (PCA)

Το PCA (Principal Component Analysis) είναι μια τεχνική, κατά την οποία αναλύεται ένα σύνολο δεδομένων όπου οι παρατηρήσεις αντιπροσωπεύονται από πολλές αλληλένδετες μη συσχετιζόμενες ποσοτικές μεταβλητές (Abdi & Williams, 2010). Πρόκειται ουσιαστικά για μια μέθοδο απομείωσης όπου επιτρέπει τη συμπύκνωση όλων των πληροφοριών που περιέχονται στα πλήρη δεδομένα σε μερικές ζώνες που ονομάζονται "Κύρια Συστατικά" ή Principal Components (PCs).

Η μέθοδος έχει διάφορες εφαρμογές. Αρχικά, απομειώνει τον αριθμό των στοιχείων που είναι απαραίτητα για την περιγραφή μεγάλου αριθμού αλληλένδετων μεταβλητών (Abdi & Williams, 2010), και στη συνέχεια εντοπίζει στοιχεία κανονικότητας μεταξύ αυτών των μεταβλητών. Από μαθηματική άποψη, το PCA περιστρέφει το σύστημα συντεταγμένων των δεδομένων και δημιουργεί έναν νέο σύστημα, στο οποίο μεγιστοποιείται η διακύμανση των αρχικών συντεταγμένων. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον χώρο, το μέγεθος των δεδομένων μπορεί να μειωθεί σημαντικά (Jolliffe, 2002).

Με λίγα λόγια η PCA είναι ένας ορθογωνικός γραμμικός μετασχηματισμός αλληλένδετων μεταβλητών σε ένα νέο σύνολο μη συσχετισμένων μεταβλητών (νέο σύστημα συντεταγμένων), οι οποίες ονομάζονται **Κύρια Συστατικά PCs** και είναι διατεταγμένα κατά φθίνουσα σειρά.

Στην έρευνα του 2018 (Pawluszek), εφαρμόστηκε ανάλυση κύριων συστατικών (PCA) για να συνδυαστούν τα παράγωγα του HRDEM σε μία σύνθεση. Τα διαφορετικά θεματικά επίπεδα του HRDEM είχαν διαφορετικά εύρη δεδομένων, επομένως πριν από την εφαρμογή του PCA ήταν απαραίτητη η ομαλοποίηση των δεδομένων. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ArcGIS, ήταν απαραίτητο να κανονικοποιηθεί κάθε θεματικό επίπεδο του HRDEM ανεξάρτητα.

Στη συνέχεια η μέθοδος PCA εφαρμόστηκε σε όλα τα κανονικοποιημένα πλέον θεματικά επίπεδα του ψηφιακού μοντέλου τα οποία συλλέχτηκαν σε έναν πίνακα X , διαστάσεων n , όπου το σύνολο n το σύνολο των διαφορετικών θεματικών επιπέδων του HRDEM.

Η σύσταση των κύριων συστατικών PC της νέας σύνθεσης υπολογίστηκε κατά Jolliffe, 2002 από τον παρακάτω τύπο:

$$PCs = X \cdot V \dots\dots (1)$$

Όπου:

V ορίζεται ένας πίνακας όπου οι στήλες του είναι τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα συνδιακύμανσης C (Covariance matrix).

Ενώ, ως πίνακας συνδιακύμανσης C ορίζεται ένας τετραγωνικός πίνακας που δίνει τη συνδιακύμανση μεταξύ κάθε ζεύγους στοιχείων ενός δεδομένου τυχαίου διανύσματος, και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$C = X^T X / (n - 1) \dots\dots (2)$$

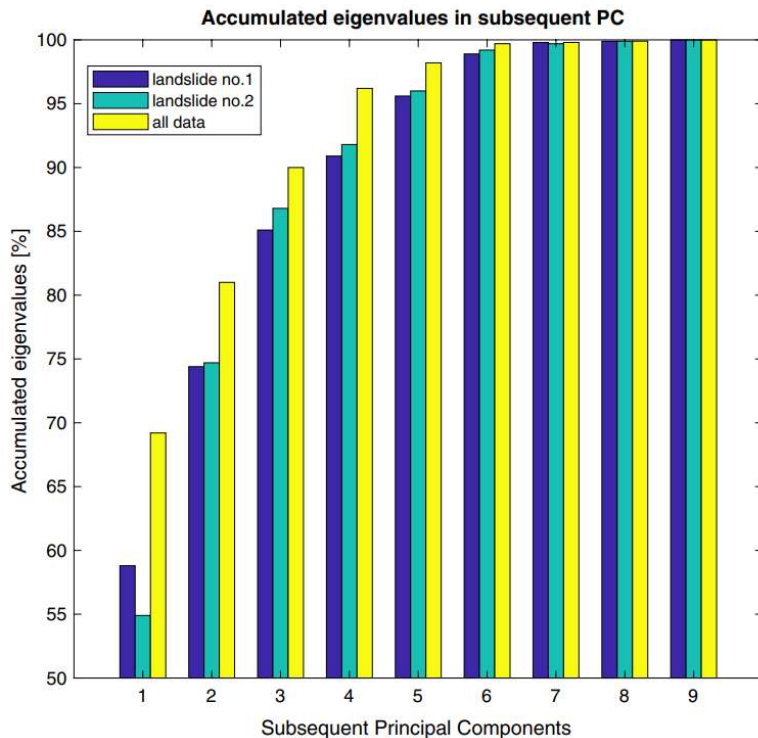
Η εναλλακτικά από την σχέση:

$$C = V \Lambda V^T \dots\dots (3)$$

Όπου:

Λ ορίζεται ο διαγώνιος πίνακας των ιδιοτιμών.

Η PCA χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για τη μετατροπή της συνολικής διακύμανσης από 10 αρχικά παράγωγα του HRDEM σε τρεις ζώνες. Με βάση τον δείκτη συσχέτισης των μεταβλητών, παρατηρήθηκε ότι ορισμένα από τα παράγωγα του HRDEM παρείχαν περιττές πληροφορίες σχετικά με τη μορφολογία της επιφάνειας, και για αυτό τον λόγο ο αριθμός τους απομειώθηκε σε τρία κύρια συστατικά PCs πληρώνοντας το εμπειρικό κριτήριο για τη μείωση των κύριων συστατικών που απαιτεί τα κύρια συστατικά να παρέχουν τουλάχιστον το 80% της συνολικής διακύμανσης (Solanas Pérez et al., 2011).



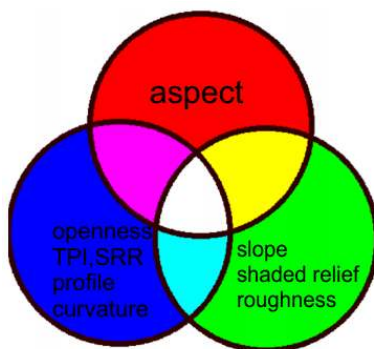
Εικόνα 3.7 Διακύμανση αθροιστικών ιδιοτιμών ανάλογα με τον αριθμό των κύριων συστατικών PCs (Pawluszek, 2018).

Η εφαρμογή επέτρεψε τον συνδυασμό αυτών των τριών PCs σε μία εικόνα ως σύνθεση Κόκκινου – Πράσινου – Μπλε (RGB). Οι μορφολογικές πληροφορίες που αντιστοιχούσαν στα τρία αρχικά PCs υπολογίστηκαν από τον πίνακα συσχέτισης μεταξύ των αρχικών παραγώγων HRDEM και των τριών PCs λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβλητές με συντελεστή συσχέτισης μεγαλύτερο από 0,5 (από Pawluszek, 2018).

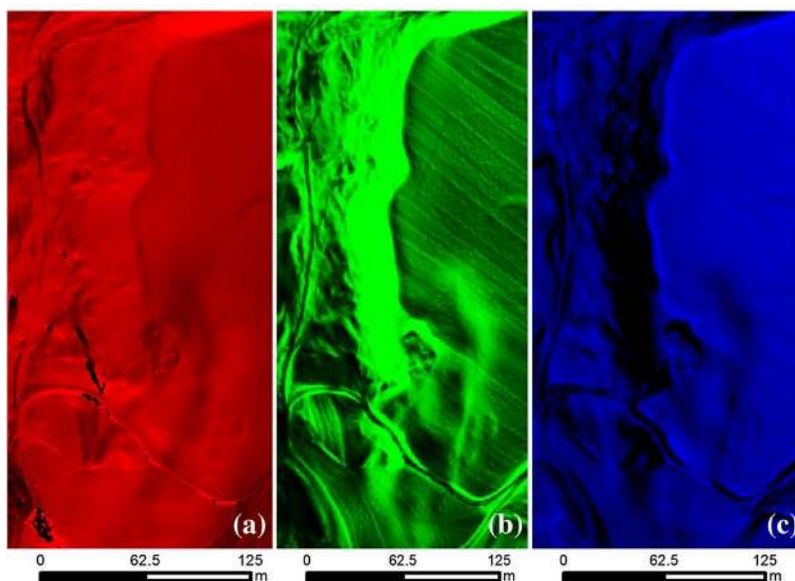
Πίνακας 3-1 Πίνακας συσχέτισης των αρχικών PCs και των αρχικών παραγώγων HRDEM (Pawluszek, 2018).

	The first principal component (red)	The second principal component (green)	The third principal component (blue)
Aspect	1.00	0.00	0.00
Multiple shaded relief	-0.12	0.83	-0.12
Openness	0.00	-0.11	-0.84
Elevation	0.17	0.24	0.07
Planar curvature	0.00	0.10	0.39
Profile curvature	-0.01	-0.11	-0.54
Slope	-0.02	-0.96	0.09
Roughness	-0.03	-0.58	-0.03
SRR	0.00	0.06	0.74
TPI	0.00	0.11	0.93

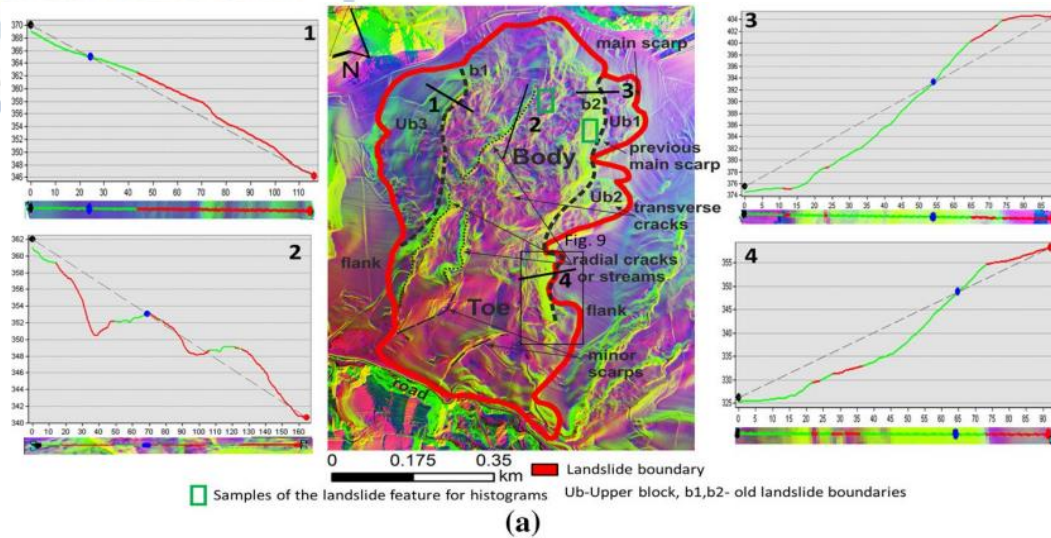
Βάσει του παραπάνω πίνακα το πρώτο PC αντιστοιχούσε στον προσανατολισμό (Aspect) το δεύτερο στην κλίση (slope), το πολλαπλό σκιασμένο ανάγλυφο (MSR) και την τραχύτητα (Roughness) ενώ το τρίτο στο τοπογραφικό άνοιγμα (Openness), την καμπυλότητα κατατομής (Profile Curvature) και τους δείκτες SRR και TPI.



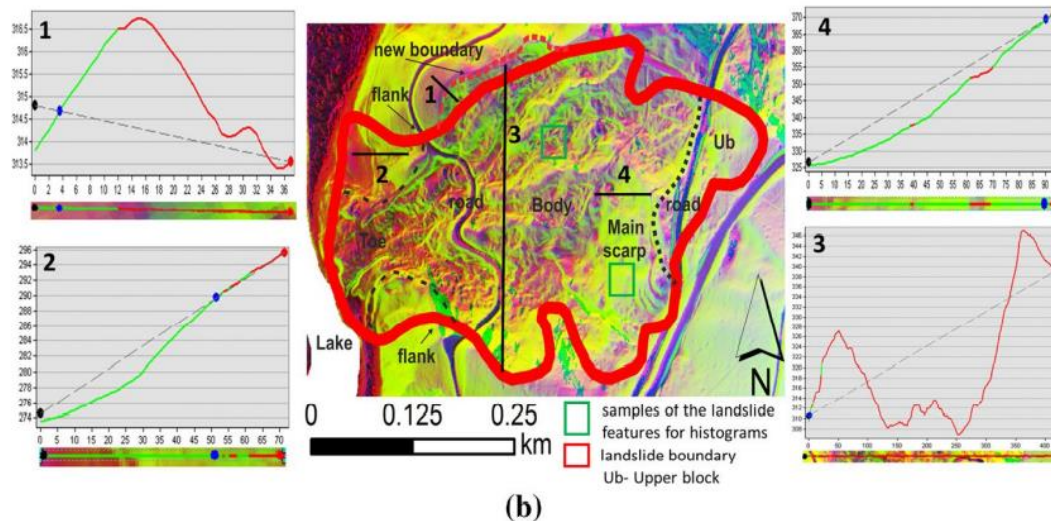
Εικόνα 3.8 Παλέτα χρωμάτων και αντίστοιχων τοπογραφικών πληροφοριών που εφαρμόζονται στα τρία κύρια PCs (Pawluszek, 2018).



Εικόνα 3.9 Αναπαράσταση των τριών κύριων συστατικών PC.



(a)



(b)

Εικόνα 3.10 Σύνθεση PCA και μορφολογικά χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν για τις κατολισθήσεις No 1 και No 2 (Pawluszek, 2018).

3.7.2. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Οι ερευνητές (Pawluszek, 2018) έχοντας πλέον στα χέρια τους μια νέα ενισχυμένη εικόνα της τοπογραφίας, ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της PCA, μπόρεσαν εύκολα να χαρτογραφήσουν τα κύρια χαρακτηριστικά και την έκταση των κατολισθήσεων, καθώς και τη διαφοροποίηση των μορφολογικών υπογραφών εντός αυτών, με μη αυτοματοποιημένα μέσα, από απλές οπτικές ερμηνείες και παρατηρήσεις της εικόνας και από την συσχέτιση της χρωματικής σύνθεσης της με την μορφολογία και τις ιδιότητες του εδάφους.

Οι μέθοδος με τη βοήθεια υπολογιστή και την εφαρμογή της τεχνικής PCA επέτρεψε τη διαφοροποίηση των μορφολογικών υπογραφών εντός των κατολισθήσεων από απόσταση παρέχοντας τη δυνατότητα διερεύνησης του χαρακτήρα και της δραστηριότητάς τους. Είναι ιδιαίτερα επωφελής σε δυσπρόσβατες περιοχές καλυμμένες από πυκνή βλάστηση, όπου η ερμηνεία των αεροφωτογραφιών που συνήθως εφαρμόζεται δεν αποτελεί αποτελεσματικό εργαλείο.

Η προαναφερθείσα τεχνική εμφανίζει σαφώς και περιορισμούς. Χαρακτηριστικά, περιοχές που τροποποιήθηκαν από ανθρώπινες ή και περιβαλλοντικές δραστηριότητες καθώς και περιοχές παλαιότερων κατολισθήσεων δεν ήταν εμφανείς στη σύνθεση του RGB και αυτό γιατί δεν αντιπροσωπεύουν μια «φρέσκια μορφολογία». Οι διαδικασίες της επιφάνειας της Γης, που συμβαίνουν σε μια πλαγιά, αλλάζουν την τοπογραφία με την πάροδο του χρόνου δημιουργώντας μια απογυμνωμένη τοπογραφία, όπου τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων δεν είναι εύκολα εμφανή (Pawluszek, 2018).

Ωστόσο, αποτελεί μια ευπροσάρμοστη μεθοδολογία που μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για τη διερεύνηση άλλων επιφανειακών διαδικασιών της Γης στις αντίστοιχες κλίμακες και αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την αυτοματοποιημένη εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκαν αφενός οι συνήθεις κανονικές εργασίες παραγωγής και επεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, ενώ στη συνέχεια, λόγω της ομοιότητας των ευρύτερων συνθηκών και των γεωυλικών που συμμετέχουν στην κατολίσθηση της εξεταζόμενης περιοχής με αυτές των κατολισθήσεων στα Καρπάθια Όρη της Πολωνίας (Pawluszek, 2018), έγινε απόπειρα ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας του μοντέλου δια της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis) υπό τις ίδιες ή παραπλήσιες και τροποποιημένες τεχνικές επεξεργασίας με αυτές της έρευνας του 2018 (Pawluszek).

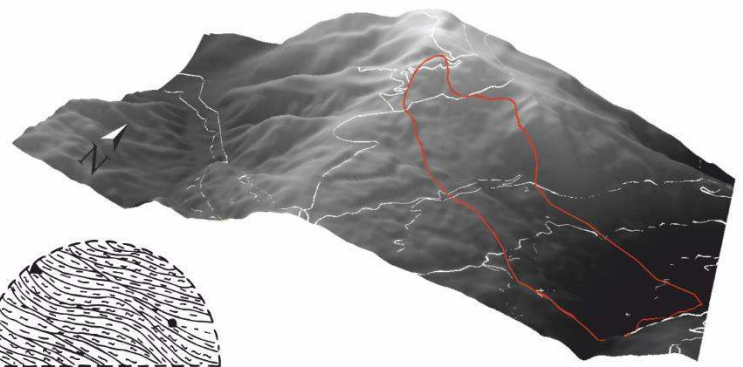
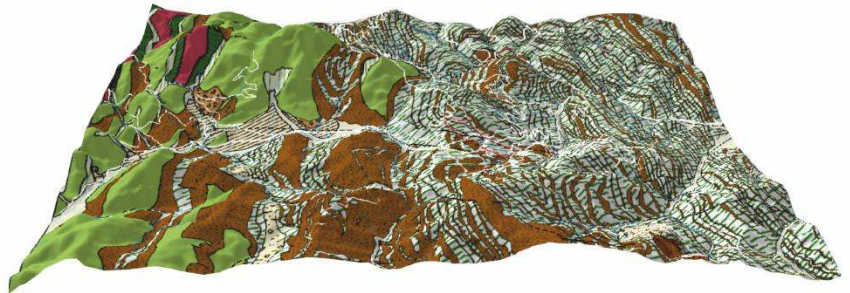
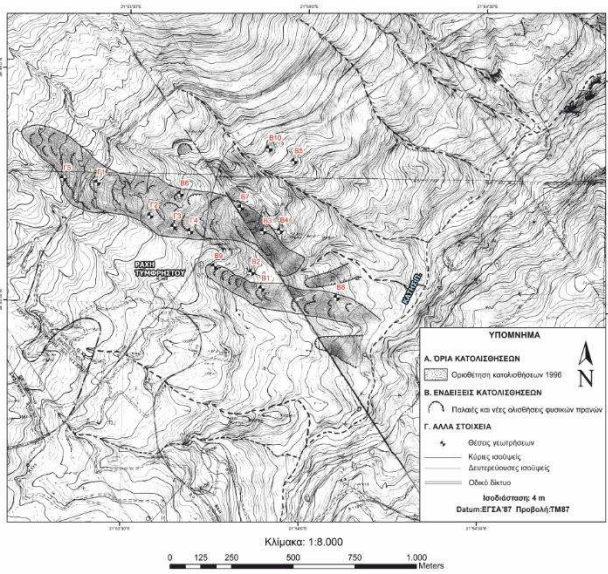
Η ανάπτυξη της εν λόγω μεθοδολογίας δια τροποποιήσεων και η εφαρμογή της στο ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επέτρεψε την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας των πλαγιών και την λεπτομερή αναγνώριση μορφολογικών "υπογραφών" κατολισθήσεων έτσι ώστε να εκτιμηθεί η πρόσφατη αλλά και μελλοντική κατολισθητική δραστηριότητα της υπό έρευνα περιοχής, και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Εν κατακλείδι, δια αυτής της πρακτικής εφαρμογής της μεθόδου, δόθηκε επιπροσθέτως, δυναμική ευκαιρία αξιολόγησης του βαθμού απόδοσης τέτοιων μεθόδων Μηχανικής Μάθησης για διαφορετικές περιοχές με παρόμοιο γεωλογικό πλαίσιο και παρεμφερή κατολισθητικά χαρακτηριστικά.

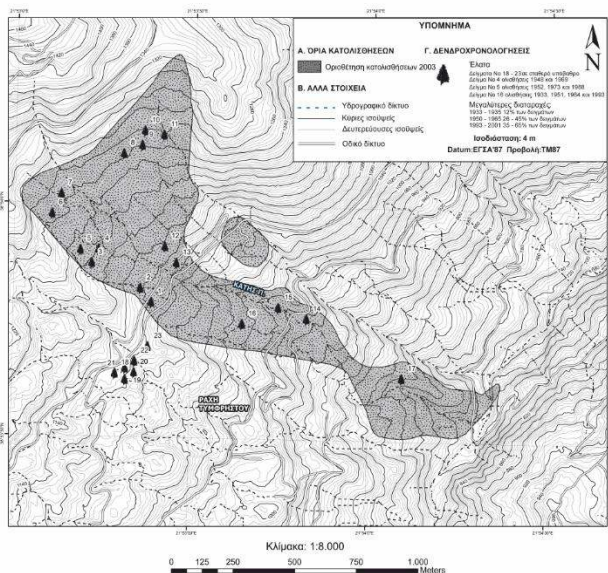
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Αλλουβιακό ριπίδιο στους πρόποδες του όρους Τυμφρηστού, πάνω στο οποίο είναι κτισμένη η πόλη του Καρπενησίου.



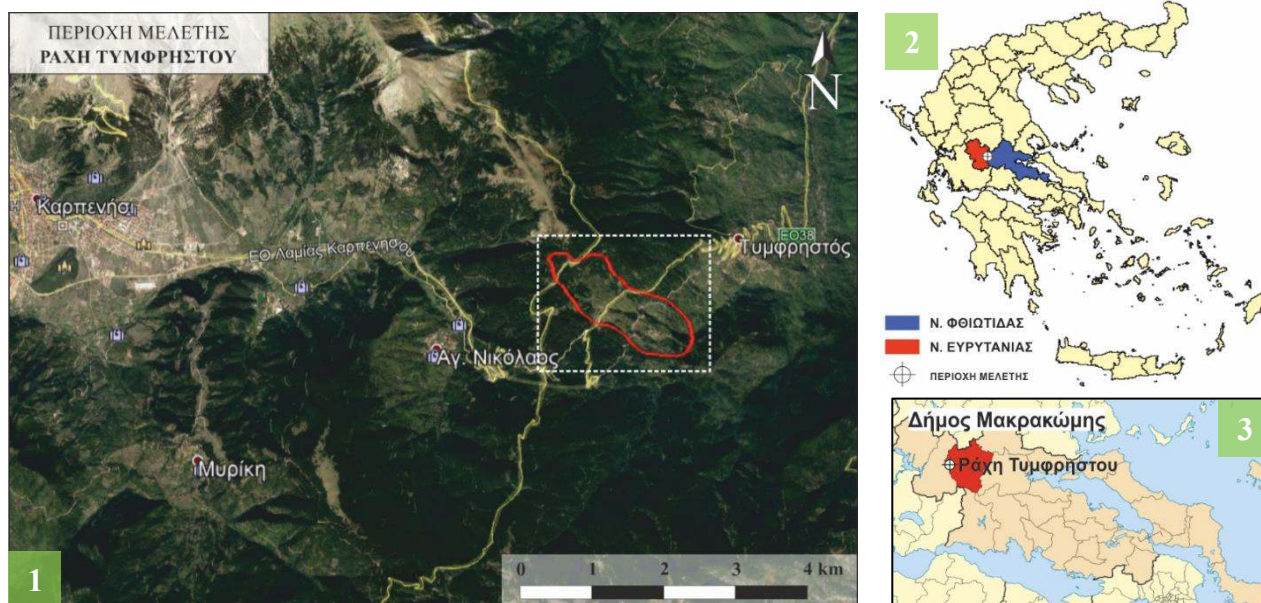
Τυπική διατομή σήραγγας Τυμφρηστού



4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

4.1. Γεωμορφολογικές – Τοπογραφικές συνθήκες

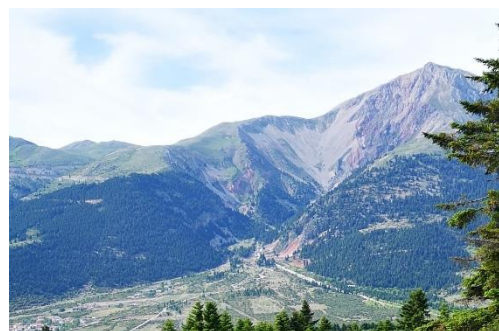
Όπως προαναφέρθηκε, η διερευνούμενη περιοχή, Ράχη Τυμφρηστού, τοποθετείται 1,5 km ΔΝΔ από τον οικισμό Τυμφρηστό της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας και περίπου 2 km ΑΒΑ από το χωριό Άγιος Νικόλαος της Περιφερειακής Ενότητας Ευρυτανίας. Διοικητικά υπάγεται στη δημοτική ενότητα του Δήμου Μακρακώμης, και απέχει από την πλησιέστερη πόλη του Καρπενησίου 17 km.



Εικόνα 4.1 Η Εξεταζόμενη περιοχή σε διάφορους χάρτες. 1) Σε περιβάλλον Google Earth, όπου με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της εξεταζόμενης κατολίσθησης. 2) Σε γενικό χάρτη της Ελλάδος. 3) Σε χάρτη Δημοτικής διαίρεσης του διαμερίσματος της Στερεάς Ελλάδας, όπου με κόκκινο σημειώνεται ο Δήμος Μακρακώμης.

Αναλυτικότερα, η υπό μελέτη περιοχή αφορά τους πρόποδες της ανατολικής πλευράς του ορεινού όγκου Τυμφρηστού, το υψόμετρο του οποίου στην κορυφή «Βελούχι» φθάνει τα 2.315 m.

Το όρος Τυμφρηστός αποτελεί τμήμα της οροσειράς της Πίνδου και χαρακτηρίζεται ως το τρίτο ψηλότερο όρος της Στερεάς Ελλάδας. Καταλαμβάνει ένα μεγάλο τμήμα των νομών Ευρυτανίας και Φθιώτιδας και περικλείεται στα βόρεια από την οροσειρά των Άγραφων, στα νότια από το σύμπλεγμα βουνών Βαρδούσια και Καλιακούδα και στα ανατολικά από τον κάμπο του Σπερχειού. Από το όρος πηγάζουν οι ποταμοί Σπερχειός και Καρπενησιώτης, ενώ στις νότιες πλαγιές του είναι κτισμένη η πόλη του Καρπενησίου.

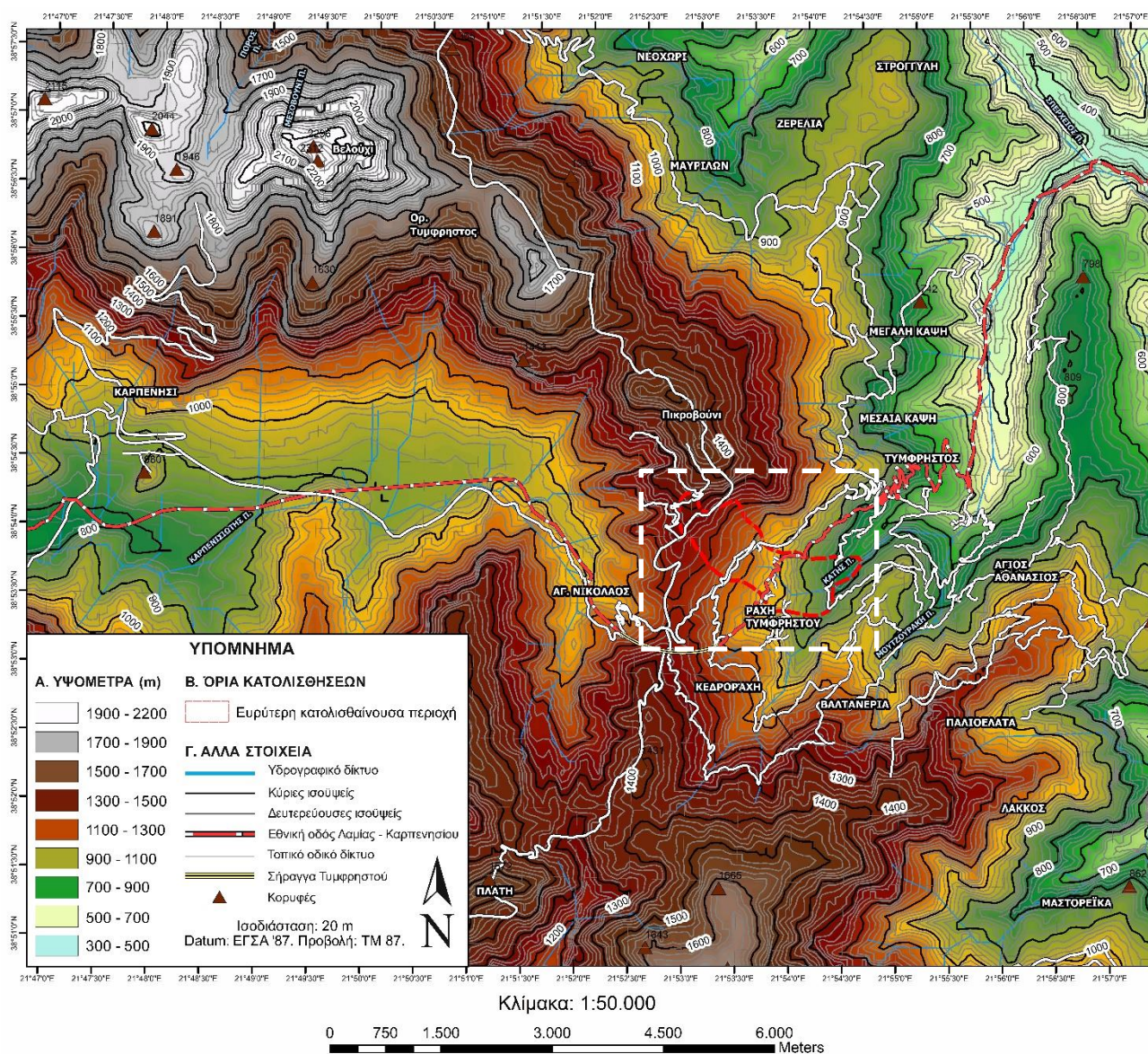


Εικόνα 4.2 Η κορυφή Βελούχι, πάνω από την πόλη του Καρπενησίου.

Γενικά, η ευρύτερη περιοχή στο σύνολό της είναι εξαιρετικά ορεινή. Χαρακτηρίζεται από ένα έντονα ορεινό ανάγλυφο με μεγάλες υψομετρικές διαφοροποιήσεις, έντονες μορφολογικές κλίσεις και από υψόμετρα της τάξεως 300 – 2200 m. Από άποψη γεωμορφολογικής εξέλιξης, η τοπογραφία της περιοχής βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας. Η τοπογραφία αποτελείται κυρίως από λόφους και

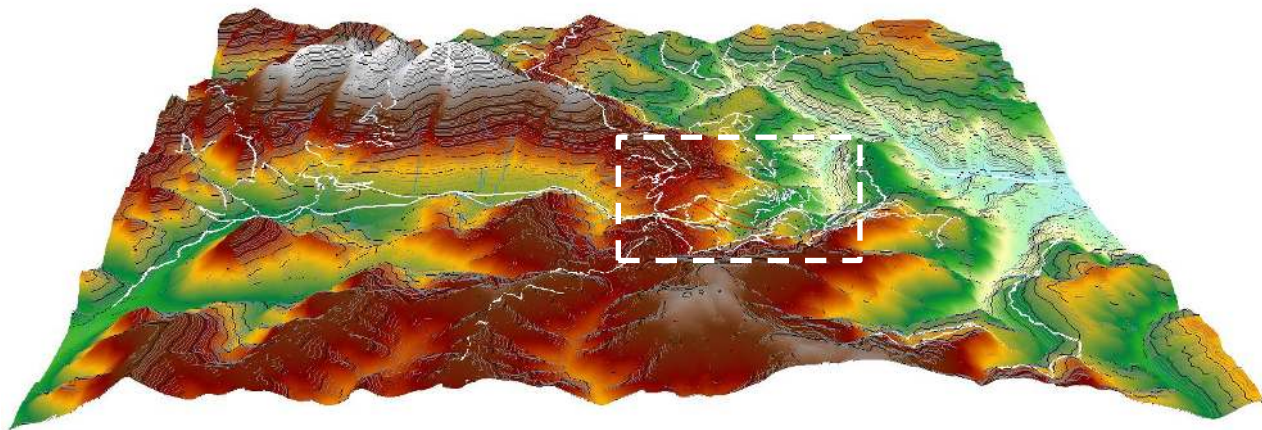
κοιλάδες, το ανάγλυφο είναι απότομο και ισχυρό, ενώ αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα στράγγισης. Η διαδικασία κατακόρυφης διάβρωσης διακόπτεται, και αναπτύσσεται καταστροφική πλευρική διαβρωτική διεργασία. Τα φυσικά πρνή της περιοχής συχνά διακόπτονται από πολλούς χείμαρρους, ρεματιές και μισγάγγειες, διαταράσσοντας με αυτό τον τρόπο, διαμέσου των διεργασιών της επιφανειακής διάβρωσης και υποσκαφής, το εντατικό πεδίο και την ισορροπία του φυσικού αναγλύφου.

Όσον αφορά την περιοχή της εξεταζόμενης κατολίθησης, αυτή τοποθετείται στους ανατολικούς πρόποδες του όρους Τυμφρηστού και πιο συγκεκριμένα στην δυτική πλευρά της κοιλάδας που διαμορφώνεται από την επίδραση των ρεμάτων Κατή και Ματζουράκη. Η κοιλάδα έχει διεύθυνση από τα ΝΔ (υψηλότερο τμήμα) προς τα ΒΑ (χαμηλότερο τμήμα). Η δυτική της πλευρά, δηλαδή η πλευρά στην οποία βρίσκεται το χωριό Τυμφρηστός, έχει ΝΑ προσανατολισμό και είναι προσήλια, ενώ η απέναντι ανατολική πλευρά της έχει ΒΔ προσανατολισμό και είναι ανήλια.



Εικόνα 4.3 Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής (Κλίμακα: 1:50.000), με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίθησης (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 2**).

Η δημιουργία της κοιλάδας της περιοχής οφείλεται κυρίως σε παράγοντες αποσάθρωσης, διάβρωσης και μεταφοράς, και δευτερευόντως σε νεοτεκτονικές επιδράσεις (Μαλδέρος et al., 1999b). Τα φυσικά πρηνή της πλαγιάς βρίσκονται γενικά ακόμα σε εξέλιξη και δεν έχουν σταθεροποιηθεί. Είναι απότομα και διασχίζονται από εγκάρσια ρέματα με ισχυρές και απότομες κατά μήκος κλίσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ισχυρή διαβρωτική ικανότητα των χειμαρρωδών ρεμάτων ειδικά σε περιοχές που είναι "γυμνές" από βλάστηση.



Εικόνα 4.4 Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου ευρύτερης περιοχής με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίσθησης.

Παράλληλα, το μεγαλύτερο τμήμα των φυσικών κλιτύων της περιοχής βρίσκονται σε οριακή κατάσταση ισορροπίας, εμφανίζοντας συχνά εδαφικούς ερπυσμούς και παλιές και νεότερες ενεργές κατολισθήσεις. Αυτό πάντως δεν έχει σχέση μόνο με την κλίση των φυσικών πρηνών αλλά και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η εδαφική σύσταση, οι βροχοπτώσεις – χιονοπτώσεις, η φυτοκάλυψη κ.α. (Μαλδέρος et al., 1999b).

Τέλος, ευρύτερα τμήματα της περιοχής είναι καλυμμένα από πυκνή δασώδη βλάστηση, κυρίως κωνοφόρων και ελάτης στα μεγαλύτερα υψόμετρα και δρύες στα χαμηλότερα. Αυτό κυρίως παρατηρείται στις πλαγιές με ΒΔ προσανατολισμό (ανήλιες) σε αντίθεση με τις ΝΔ (προσήλιες) πλαγιές όπου η βλάστηση είτε απουσιάζει είτε εμφανίζεται αρκετά αραιή σε σχέση με την πυκνότητά της στο σύνολο της περιοχής. Η εν λόγω δασική κάλυψη επιδρά ιδιαίτερα ευνοϊκά στη μείωση της διάβρωσης και στην αύξηση της ευστάθειας των απότομων φυσικών πρηνών της στενής περιοχής (Paradopoulos et al., 2007).



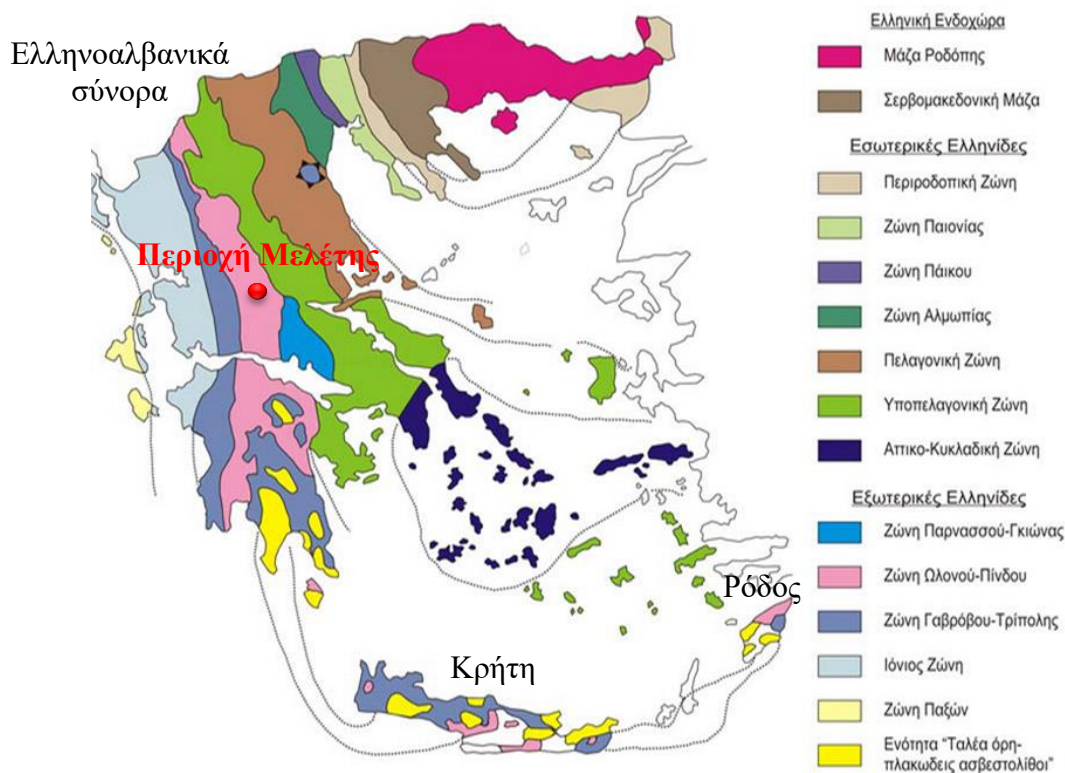
Εικόνα 4.5 Χαρακτηριστική απουσία βλάστησης στη δυτική πλαγιά της κοιλάδας. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό μελέτη κατολίσθηση (Περιβάλλον Google earth).

4.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη περιοχής

4.2.1. Γεωτεκτονική θέση

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου, και τη διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία, ιδιαίτερος δε το σύγγραμμα του Δημοσθένη Μουντράκη «Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας» (2010), η ευρύτερη περιοχή μελέτης εντάσσεται στην γεωτεκτονική ζώνη Ωλονού Πίνδου.

Γεωγραφικά, η ζώνη ξεκινάει από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα, εκτείνεται ως την κύρια ηπειρωτική Ελλάδα αποτελούμενη από την οροσειρά της Πίνδου και από τα επιμέρους βουνά Άγραφα, Αθαμανικά Όρη (Τζουμέρκα), Λάκμων (βόρεια Πίνδος), Αιτωλικό και Βαρδούσια της Στερεάς Ελλάδας και συνεχίζει μέχρι την Πελοπόννησο με τα βουνά Παναχαϊκό και Ωλονός. Τέλος εμφανίσεις της υπάρχουν και στα νησιά Κρήτη και Ρόδο (Μουντράκης, 2010).



Εικόνα 4.6 Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας, με Ροζ χρώμα σημειώνεται η ζώνη Ωλονού – Πίνδου, ενώ με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η θέση της περιοχής μελέτης (Μουντράκης, 2010 τροποποιημένο).

Η γεωτεκτονική θέση της ζώνης Ωλονού Πίνδου, ή πιο απλουστευμένα κατά Aubouin (1959) της ζώνης Πίνδου, είναι ιδιαίτερα αμφιλεγόμενη στην γεωλογική κοινότητα και αποτελεί θέμα έντονης επιστημονικής συζήτησης. Πολλοί ερευνητές θεωρούν την ζώνη ως ένα τμήμα ωκεάνιας λεκάνης που άνοιξε προοδευτικά λόγω της Περμο-Τριαδικής ηφαιστειακής ρήξης της Πανγαίας (Brunn, 1956; Mountrakis, 1986; Robertson et al., 1996; Rassios & Dilek, 2009; Rassios & Moores, 2006; Robertson, 2012) ή ως ένα τμήμα μιας στενής λεκάνης του ωκεανού που άνοιξε αρχικά κατά τη διάρκεια του Ανώτερου Κρητιδικού (Froitzheim et al., 2014), ή ακόμη κατά Robertson et al., από το 1996 ως μια λεκάνη που σχηματίστηκε σε λεπτό ηπειρωτικό φλοιό (από Kiliass et al., 2016).

Σύμφωνα με σύγχρονες απόψεις η ζώνη Ωλονού – Πίνδου αποτελεί τμήμα του παλιού κατεστραμμένου ωκεανού της Νέο – Τηθύος με κύριες δομές τους ασβεστόλιθους, τους σχιστοκερατόλιθους, τον φλύσχη και τους οφειόλιθους (Kilias et al., 2016).

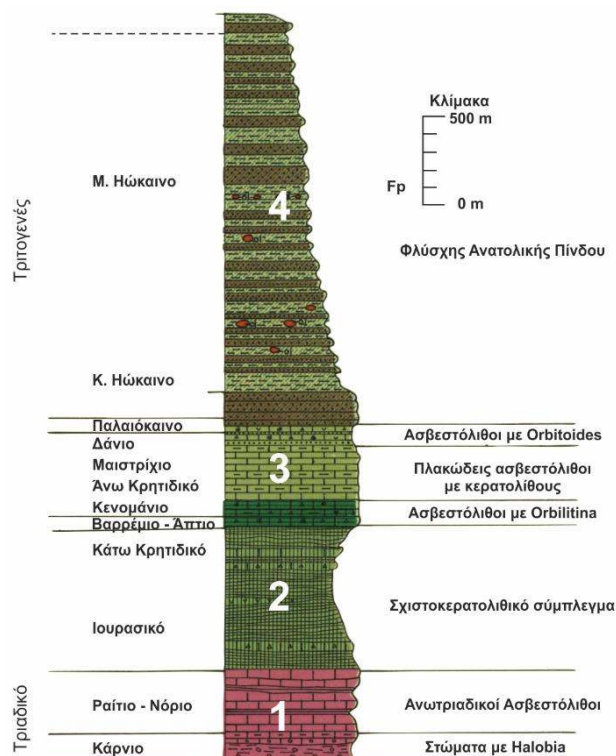
Παλαιογεωγραφικά, η ζώνη αποτέλεσε μια βαθιά υποθαλάσσια αύλακα μεταξύ των υβωμάτων της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης στα δυτικά και του υβώματος του Κόζιακα στα ανατολικά. Η αύλακα αυτή κατά τη διάρκεια του Μεσοζωικού πληρώθηκε από διάφορα ιζήματα κυρίως βαθιάς θάλασσας, το πάχος των οποίων υπερβαίνει τα 3.000 m (Μουντράκης, 2010).

4.2.2. Λιθοστρωματογραφία

Η ζώνη της Πίνδου από λιθολογικής άποψης χαρακτηρίζεται από μια πελαγική ιζηματογένεση πυριτικής και ανθρακικής σύστασης, κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης από το Τριαδικό μέχρι το ανώτατο Κρητιδικό και από την φλυσχογένεση κατά τη διάρκεια από το Παλαιόκαινο μέχρι το Μέσο Ηώκαινο.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης, αποτέθηκαν από τους παλαιότερους προς τους νεότερους οι παρακάτω σχηματισμοί:

1. Ασβεστόλιθοι ηλικίας Τριαδικού, πάχους 150 – 200 m.
2. Ραδιολαρίτες με παρεμβολές ασβεστολιθών (σχιστοκερατολιθική διάπλαση) ηλικίας Ιουρασικού – Κάτω Κρητιδικού, πάχους 800 m.
3. Πλακώδεις πελαγικοί ασβεστόλιθοι, ηλικίας Άνω Κρητιδικού, πάχους 500 – 600 m.
4. Φλύσχη ηλικίας Άνω Κρητιδικού – Κάτω Τριτογενούς, αποτελούμενος κυρίως από εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων, συνολικού πάχους μέχρι και 2.000 m.



Εικόνα 4.7 Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη, αντιπροσωπευτική της Ζώνης Ωλονού – Πίνδου (από τον χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου).

4.2.3. Τεκτονική

Μετά την πλήρωση της αύλακας της Πίνδου με τα προαναφερθέντα ιζήματα, η ζώνη περί το τέλος του Άνω Ηωκαίνου ξεκίνησε να δέχεται τις συμπιεστικές πλευρικές πιέσεις της Αλπικής Ορογένεσης που προκύψαν από την τελική ηπειρωτική σύγκρουση της Απουλίας πλάκας με την ενωμένη Ευρασία. Οι συμπιεστικές αυτές τάσεις είχαν σαν αποτέλεσμα την έντονη πτύχωση και ανάδυση (χέρσευση περιοχής) των σχηματισμών της ζώνης, καθώς και την επώθηση της προς τα

δυτικά πάνω στη ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, υπό τη μορφή τεκτονικού καλύμματος (ονομαζόμενο στη διεθνή βιβλιογραφία ως το "τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου"), με ταυτόχρονη λεπίωση των στρωμάτων της. Ο τεκτονισμός της ενότητας της Πίνδου διήρκησε μέχρι το Μέσο Ηώκαινο, δηλαδή περίπου 35 εκατομμύρια χρόνια (Μουντράκης, 2010).

Ουσιαστικά η ζώνη της Πίνδου αποτελεί ένα τεράστιο κάλυμμα που παρουσιάζει μεγάλη μετακίνηση και χαρακτηρίζεται από πολλές κλειστές, ανεστραμμένες πτυχές και επιπεύσεις. Κύριος χαρακτήρας της είναι η δομή κατά λέπια με μονοκλινικές ακολουθίες και περιοδικές επαναλήψεις των πτυχών (Kilias et al., 2016).

Μετά την πτυχωσιγενή τεκτονική (ορογένεση) ακολούθησε ασθενής σχετικά ρηξιγενής τεκτονική, η οποία έδωσε ρήγματα με κυρίαρχη διεύθυνση Β – Ν έως ΒΒΔ – ΝΝΑ και με δευτερεύουσα διεύθυνση Α – Δ έως και ΑΒΑ – ΔΝΔ. Η εφελκυστική αυτή τεκτονική προκάλεσε την κατάρρευση του ορογενούς.

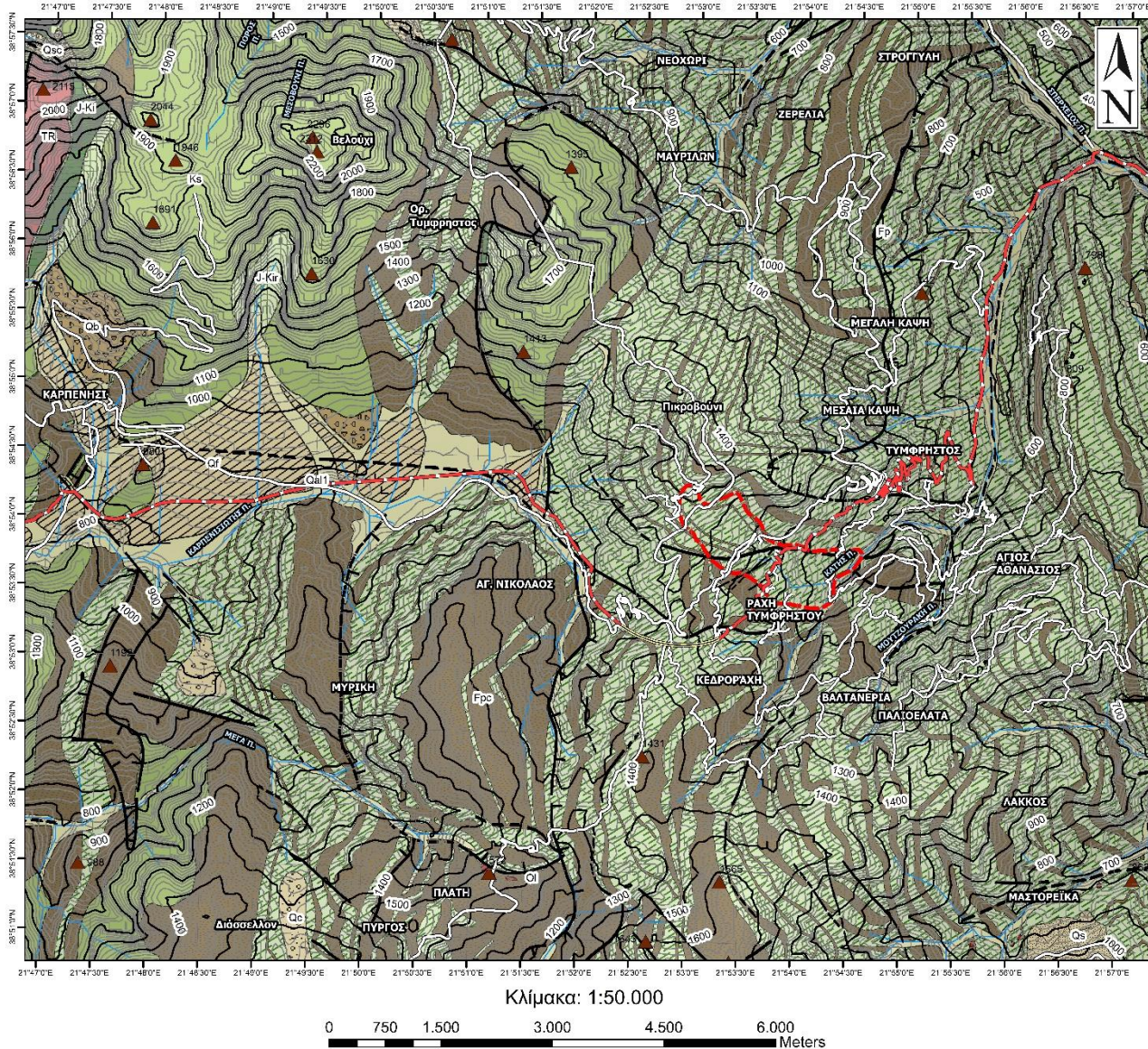
Τέλος, κατά τη διάρκεια του πρόσφατου γεωλογικού παρελθόντος (Τεταρτογενές) δημιουργήθηκε το σημερινό ανάγλυφο (κοιλάδες, όρη, υδρογραφικό δίκτυο κλπ.) της περιοχής μελέτης το οποίο, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο περί γεωμορφολογίας, βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη και είναι αποτέλεσμα κυρίως των παραγόντων αποσάθρωσης, διάβρωσης και μεταφοράς και σε πολύ μικρότερο βαθμό των τεκτονικών δομών και της λιθολογίας των σχηματισμών της περιοχής (Μαλδέρος et al., 1999b).

4.3. Γεωλογικό καθεστώς ευρύτερης περιοχής

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου, τη διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία, αναφορικά με εκτιμήσεις που προέκυψαν από γεωλογικές έρευνες στην ευρύτερη περιοχή, καθώς και από την επιτόπου αυτοψία και χαρτογράφηση πεδίου που εκτελέστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η ευρύτερη περιοχή δομείται κυρίως εντός φλυσχικών σχηματισμών, μεσοηωκαινικής ηλικίας, της ζώνης της Πίνδου. Αντίθετα, τα ιζήματα του υποβάθρου της ευρύτερης περιοχής εντάσσονται στους βαθύτερους ορίζοντες της πελαγικής ιζηματογένεσης του Τριαδικού – Κρητιδικού.

Πιο αναλυτικά, από τους παλαιότερους προς τους νεότερους στην ευρύτερη περιοχή εντοπίζονται οι παρακάτω σχηματισμοί:

1. **Ασβεστόλιθοι Τριαδικού:** φαιοί, παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι. Κάτω από αυτούς υπόκεινται πυριτικοί ασβεστόλιθοι, σχιστόλιθοι και ψαμμίτες. Εντοπίζονται στον ορεινό όγκο Τυμφρηστού δυτικά της κορυφής Βελούχι, και έχουν πάχος περίπου 200 - 400 m.
2. **Ραδιολαρίτες:** ποικιλόχρωμοι, ερυθροί, πράσινοι ή φαιοί και ερυθροί σχιστόλιθοι της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης (j-Kir) μαζί με παρενστρωμένους, πελαγικούς, σιφρούς, θραυσματογενείς και ωολιθικούς ασβεστόλιθους ποικίλου πάχους (j-Ki). Το πάχος του σχηματισμού εκτιμάται μεγαλύτερο των 800 m.
3. **Πρώτος φλύσχης:** Το ανώτατο τμήμα του σχηματισμού των ραδιολαριτών συνιστάται από εναλλαγές ερυθρών πυριτικών ασβεστολίθων, ψαμμιτικών ασβεστολίθων, πράσινων μαργαϊκών ψαμμιτών, μαργών και ερυθρών αργιλικών σχιστολίθων. Ο σχηματισμός αυτός ονομάζεται πρώτος φλύσχης της Πίνδου και έχει ένα πάχος από 5 – 40 m.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Α. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ ΟΛΟΚΑΙΝΟ

- Qal1** Αποθέσεις κοιλάδων: άργιλοι, άμμοι, χάλικες, κροκάλες.
- Qe** Κολλυβιακές αποθέσεις.
- Qs** Πλευρικά κορήματα: αδιαβάθμητες μεταπτώσεις κατολισθαίνουσας μάζας και ολισθητικών γαιών κυρίως αργιλικής σύστασης.
- Qd** Αδρομερείς αποθέσεις κλιτύων: προβολές αποθέσεων (γλώσσες) και παγετώδεις όγκοι γωνιωδών τεμαχίων ποικίλου μεγέθους, κυρίως ασβεστολίθου και γραουβάκη.
- qf** Αλλοιωματικά ρητίδια: άργιλοι, άμμοι και χάλικες μέσα σε κύρια κοιλάδα. Κώνοι κλαστικών υλικών σε δευτερεύουσα κοιλάδα. (Σύγχρονες αποθέσεις Κάτω Ολοκαίνου).
- Qal** Παλιές ποτάμιες αποθέσεις: άργιλοι, άμμοι και χάλικες χωρίς σύγχρονη τροφοδοσία αυτών. (Κάτω Ολοκαίνου).

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

- Qb** Ασβεστολιθικά λατυποπαγή: συγκολλημένα στις χαμηλές κλιτύες του ορεινού όγκου του Τυμφρηστού.

ΣΕΙΡΑ ΠΙΝΔΟΥ (ΔΑΝΙΟ - ΗΩΚΑΙΝΟ)

- Qd1** Φλύσχη: Άργιλοι και Ιαλύθοι: εν μέρει σε συχνές εναλλαγές με λεπτά στρώματα γραουβάκη. Επίσης με ενστρώσεις ερυθρών αργιλικών σχιστολίθων και συμπαγών μαργών ή και με παρεμβολές ολισθοστρωμάτων (Ols).
- Frc** Φλύσχη: Γραουβάκες, ψαμίτες και λεπτομερή κροκαλοπαγή με παρεμβολές σχιστολίθων.
- Ks** Πελαγικοί ασβεστόλιθοι: πλακώδεις συμπαγείς με ενστρώσεις κερατολίθων, σε συχνές εναλλαγές με κλαστικούς μικρολατυποπαγείς έως μικροκροκαλοπαγείς ασβεστόλιθους.
- J-Kir** Ραδιολαρίτες: ποικιλόχρωμοι, ερυθροί, πράσινοι ή φαιοί και ερυθροί σχιστόλιθοι της σχιστοκερατολιθικής διάταξης (J-Kir). Επίσης παρενστρωμένοι, πελαγικοί, σιφροί, θραυσματογενείς και ωλιθικοί ασβεστόλιθοι ποικίλου πάχους (J-Ki). Πάχος μεγαλύτερο των 800 m. Το ανώτατο μέρος συνιστάται από εναλλαγές από ερυθρούς πυριτικούς ασβεστόλιθους, ψαμμιτικούς ασβεστόλιθους, πράσινους μαργακούς ψαμίτες, μάργες και ερυθρούς αργιλικούς σχιστολίθους (Πρώτος φλύσχη της Πίνδου). Πάχος 5 - 40 m.

ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ

- TR** Ασβεστόλιθοι: φαιοί, παχυστρωματώδεις. Κάτω από αυτούς υπόκεινται πυριτικοί ασβεστόλιθοι, πυριτιμένοι ασβεστόλιθοι, ελασματοειδείς, χρωματός ελαιοπράσινου, σχιστόλιθοι και ψαμίτες. Πάχος στρωμάτων: 200 - 400 m περίπου.
- Oi** Ολισθόλιθος: ογκόλιθος ή μάζα μεγαλύτερη των αλλόθωνων πετρωμάτων με αδιατάρακτη σύσφιξη, ολισθησάσα κατά την διάρκεια της ιζηματογένεσης από τους περιβάλλοντες σχηματισμούς.

Β. ΌΡΙΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

- Ευρύτερη κατολισθαίνουσα περιοχή

Γ. ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- Ρήγμα ορατό
- Ρήγμα πιθανό
- Επίπτωση ορατή
- Επίπτωση πιθανή

Δ. ΆΛΛΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

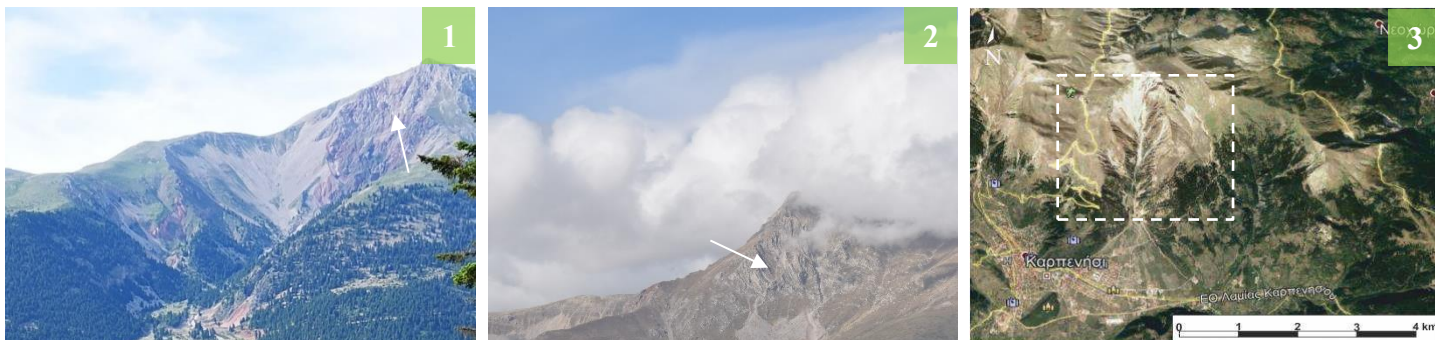
- Υδρογραφικό δίκτυο
- Κύριες ισοψείς
- Δευτερεύουσες ισοψείς
- Εθνική οδός Λαμίας - Καρπενησίου
- Τοπικό οδικό δίκτυο
- Σήραγγα Τυμφρηστού
- Κορυφές

Ισοδιάσταση: 20 m
Datum: ΕΓΣΑ'87 Προβολή: TM87



Εικόνα 4.8 Ψηφιοποιημένο τμήμα γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου (Κλίμακα: 1:50.000) με άσπρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίσθησης. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο Παράρτημα Νο 3).

4. **Πελαγικοί ασβεστόλιθοι:** πλακώδεις συμπαγείς ασβεστόλιθοι με ενστρώσεις κερατολίθων, σε συχνές εναλλαγές με κλαστικούς μικρολατυποπαγείς έως μικροκροκαλοπαγείς ασβεστολίθους.



Εικόνα 4.9 1) Ερυθροί σχιστόλιθοι της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης. 2) Πελαγικοί, πλακώδεις ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού. 3) Περιοχή σε περιβάλλον Google Earth πάνω στην οποία σημειώνεται η περιοχή των παραπάνω φωτογραφιών.

5. **Φλυσχικοί σχηματισμοί:** ηλικίας Άνω Κρητιδικού – Κάτω Τριτογενούς, αποτελούμενοι από ψαμμίτες και ιλυολίθους με κυμαινόμενη συμμετοχή των επιμέρους αυτών σχηματισμών. Από πλευράς ιζηματογένεσης οι φλυσχικοί σχηματισμοί της περιοχής μπορούν να διαχωριστούν σε δύο διακριτές φάσεις (Μαλδέρους et al., 1999b):

- a. Στην λεπτομερή ή ανώτερη φάση, που αποτελείται από αργιλικούς σχιστόλιθους και ιλυολίθους, τοπικά με συχνές παρεμβολές λεπτών ενστρώσεων ψαμμιτών, καθώς και με τοπικές παρεμβολές συμπαγών μαργών και ολισθοστρωμάτων.
- b. Και στην αδρομερή ή κατώτερη φάση, στην οποία γενικά συμμετέχουν ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, ενώ τοπικά μπορεί να παρεμβάλλονται και λεπτές ενστρώσεις αργιλικών σχιστολίθων και ιλυολίθων.

Η λεπτομερής ανώτερη φάση του φλύσχη, εφεξής καλούμενη ως «Ιλυολιθικός φλύσχης», καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της ευρύτερης περιοχής. Πρόκειται για έναν σχηματισμό που αποτελείται κυρίως από λεπτοστρωματώδεις ιλυολίθους έως και σχιστολιθικούς αργιλίτες, στους οποίους παρεμβάλλονται λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών. Ο σχηματισμός, κατά την χαρτογράφηση πεδίου, εμφανιζόταν συχνά επιφανειακά καλυμμένος από αργιλώδη αποσαθρώματα και κορήματα, αντανακλώντας έτσι την ιδιαίτερη ευαισθησία του σχηματισμού στις διεργασίες της αποσάθρωσης. Τα αποσαθρώματα αποτελούνται από ένα μίγμα αργιλοίλλος και μικρών ψαμμιτικών και ιλυολιθικών θραυσμάτων, ενώ το πάχος τους εκτιμάται της τάξης 1 - 2 m. Τα όρια του σχηματισμού εξαιτίας αυτού του επιφανειακού μανδύα αποσάθρωσης είναι γενικά ασαφή.



Εικόνα 4.10 1) Αργιλικός σχιστόλιθος. 2) Έντονα τεκτονισμένος έως αποσαθρωμένος ιλυόλιθος με λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών. 3) Περιοχή σε περιβάλλον Google Earth πάνω στην οποία σημειώνεται η περιοχή των παραπάνω φωτογραφιών.

Αντίθετα η αδρομερής κατώτερη φάση του φλύσχη, εφεξής καλούμενη ως «Ψαμμικός φλύσχης», εμφανίζεται στην ευρύτερη περιοχή με διάφορους χαρακτηριστικούς τύπους. Άλλοτε ως εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και λεπτοστρωματώδων ιλυολίθων - αργιλικών σχιστολίθων, και άλλοτε ως μεσοστρωματώδεις - παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με λεπτές παρεμβολές ιλυολίθων. Σε σημαντικά τοπικά τμήματα το υπόβαθρο της περιοχής καλύπτεται από πλευρικά κορήματα ψαμμιτικής σύστασης, τα οποία συνήθως είναι προσμειγμένα και με μικρό ποσοστό αργιλοίλους. Το πάχος των πλευρικών κορημάτων κυμαίνεται μεταξύ 2 – 4 m με επικρατέστερο πάχος αυτό των 2 m.

Τέλος, μια ακόμη χαρακτηριστική εμφάνιση του σχηματισμού αυτού εντοπίστηκε ως εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και έντονα αποσαθρωμένων ιλυολίθων, όπου οι ψαμμίτες εμφανίζονται με μια κρεμμυδοειδή σφαιρική μορφή ως αποτέλεσμα της έντονης θερμοκρασιακής μεταβολής που προκαλεί την αποφλοιώση των πετρωμάτων (διαδικασία αποσάθρωσης). Η γεωμετρία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι ψαμμίτες τέμνονται από διαφορετικές γεωμετρικά διακλάσεις που σε συνδυασμό με την επιφάνεια της στρώσης, διαιρούν το πέτρωμα σε κύβους. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο της αποφλοιώσης είναι εντονότερο και προσβάλλει τις επιφάνειες, με μεγαλύτερη δράση στις κορυφές και τις ακμές. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται μετά από διαδοχικές αποφλοιώσεις οι αντίστοιχες αυτές σφαιροειδείς μορφές. Το φαινόμενο αυτό επιταχύνεται και από χημικές διεργασίες, καθώς διαλύματα που εισέρχονται μέσω των διακλάσεων μέσα στην μάζα του πετρώματος, προκαλούν την χημική αποσάθρωση του.



Εικόνα 4.11 1) Παχυστρωματώδης ψαμμίτης με λεπτές παρεμβολές ιλυολίθων 2) Εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και λεπτοστρωματώδων ιλυολίθων - αργιλικών σχιστολίθων. 3) Εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και έντονα αποσαθρωμένων ιλυολίθων, οι ψαμμίτες εμφανίζονται με χαρακτηριστική κρεμμυδοειδή σφαιρική μορφή ως αποτέλεσμα της μηχανικής και χημικής αποσάθρωσης. 4) Πλευρικά κορήματα ψαμμιτικής σύστασης προσμειγμένα με μικρό ποσοστό αργιλοίλους.

6. **Ασβεστολιθικά λατυποπαγή:** πλειστοκαινικής ηλικίας, ισχυρά συγκολλημένα στις χαμηλές κλιτύς του ορεινού όγκου Τυμφρηστού.
7. **Παλαιές ποτάμιες αποθέσεις:** ηλικίας Κάτω Ολοκαίνου αποτελούμενες από αργίλους, άμμους και χάλικες χωρίς την σύγχρονη τροφοδοσία αυτών.
8. **Αλλουβιακά ριπίδια:** αποτελούν σύγχρονες αποθέσεις κλαστικών υλικών, άμμων, αργίλων και χαλικιών, ηλικίας Κάτω Ολοκαίνου, που εμφανίζονται με την μορφή κώνου (ριπιδίου) εντός της κοιλάδας του Καρπενησίου.



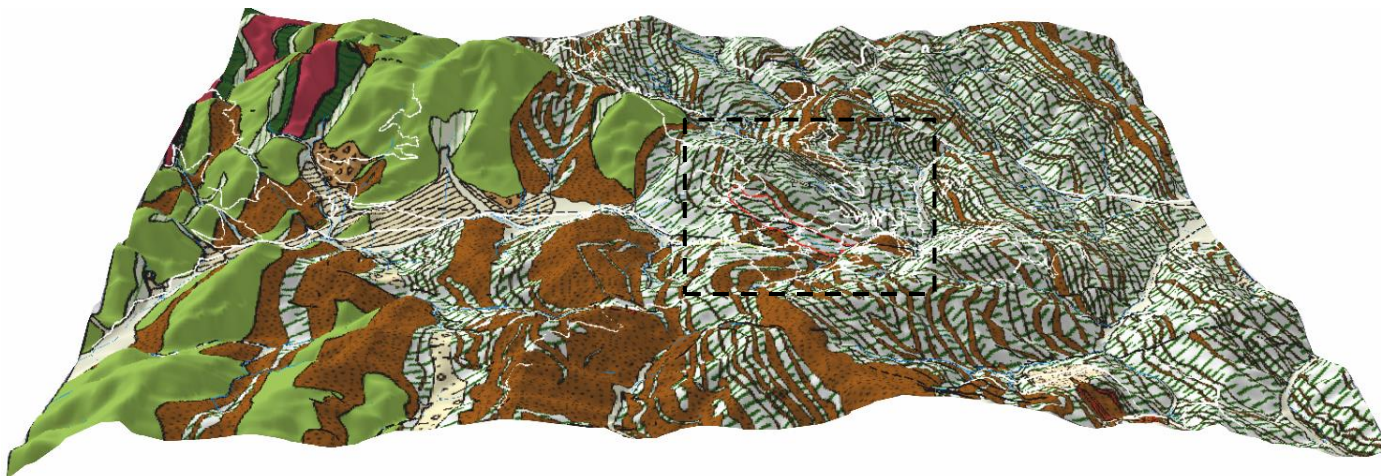
Εικόνα 4.12 1) Αλλουβιακό ριπίδιο λίγα χιλιόμετρα ανατολικά της ερευνηθείσας περιοχής, πάνω στο οποίο είναι κτισμένη η πόλη του Καρπενησίου. 2) Περιοχή σε περιβάλλον Google Earth πάνω στην οποία σημειώνεται η περιοχή της φωτογραφίας.

9. **Αδρομερείς αποθέσεις κλιτύων:** προβολές αποθέσεων (γλώσσες) και παγετώδεις όγκοι γωνιωδών τεμαχών ποικίλου μεγέθους, κυρίως ασβεστολίθου και ψαμμίτη.
10. **Πλευρικά κορήματα:** αδιαβάθμητες μεταπτώσεις κατολισθαίνουσας μάζας και ολισθαινόντων γαιών κυρίως αργλικής σύστασης.
11. **Κολλουβιακές αποθέσεις:** υλικά που συσσωρεύονται στα κατώτερα σημεία των πλαγιών αποτελούμενες κυρίως από άργιλο, άμμο και χάλικες.
12. **Αποθέσεις κοιλάδων:** αποτελούμενες από άργιλο, άμμο, χάλικες και κροκάλες.

Εν κατακλείδι, το γεωλογικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής, εντάσσεται στη γεωτεκτονική ζώνη Ωλονού – Πίνδου, και συγκροτείται κυρίως εντός φλύσικων σχηματισμών. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας που εμφανίζει ο σχηματισμός του φλύσχη ως προς την λιθολογία, την δομή και την τεκτονική του καταπόνηση, η μηχανική συμπεριφορά του προσδίδει γενικά φτωχές μηχανικές ιδιότητες δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα σε σχέση με την ευστάθεια της περιοχής.

Η παρούσα γεωλογία σε επόμενο κεφάλαιο αναθεωρείται, βάσει της τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης που επιτελέστηκε στο πεδίο, διαχωρίζοντας τις επιμέρους φάσεις του φλύσχη, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής των ψαμμιτών και των ιλυολίθων και δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στη μηχανική συμπεριφορά των επιμέρους αυτών σχηματισμών και λιγότερο στη στρωματογραφική τους θέση μέσα στην ενότητα του φλύσχη.

Τέλος, στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το τρισδιάστατο ψηφιακό γεωλογικό μοντέλο της ευρύτερης περιοχής, απεικονίζοντας την γεωλογική δομή της περιοχής σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου.



Εικόνα 4.13 Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο γεωλογίας ευρύτερης περιοχής, με μαύρο πλαίσιο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολισθησης (Για το μοντέλο ισχύει το υπόμνημα του χάρτη της Εικόνας 4.8).

4.4. Υδρογεωλογικό καθεστώς ευρύτερης περιοχής

Η επίδραση του νερού στην μορφολογία του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην ενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων (Highland & Bobrowsky, 2008). Έντονες βροχοπτώσεις – χιονοπτώσεις μεγάλης διάρκειας ή ακόμα και μέτριας έντασης σε παρατεταμένο διάστημα μπορούν να προκαλέσουν την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους και την εκδήλωση κατολισθήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γρήγορη κατείσδυση του νερού των κατακρημνισμάτων, προκαλεί κορεσμό του εδάφους, αύξηση του βάρους της εδαφικής μάζας και αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων. Παράλληλα, το νερό που προέρχεται από το λιώσιμο του χιονιού μπορεί να τροφοδοτεί τη ζώνη αποσάθρωσης των πετρωμάτων και τους εδαφικούς σχηματισμούς, με αποτέλεσμα την εκδήλωση μετακινήσεων. Τέλος, οι απότομες μεταβολές στη στάθμη του υπογείου ορίζοντα, μπορεί να προκαλούν την αύξηση της διατμητικής τάσης (απότομη πτώση) και την αύξηση της πίεσης των πόρων (απότομη άνοδος) με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής των εδαφών και την εκδήλωση αστοχιών (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί το υδρογεωλογικό πλαίσιο της ευρύτερης περιοχής, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η πολύ σημαντική επίδραση του νερού στον μηχανισμό γένεσης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.

4.4.1. Κλίμα

Ο ευρύτερος ελληνικός χώρος σύμφωνα με την κλιματική ταξινόμηση Korpen – Geiger, (1936) ανήκει στις μέτρια εύκρατες έως υποτροπικές κλιματικές ζώνες, χαρακτηριζόμενος από ένα τυπικό Μεσογειακό κλίμα, με κύρια χαρακτηριστικά, τους ήπιους και υγρούς χειμώνες με σχετικά υψηλούς ανέμους και τα ξηρά σχετικά θερμά καλοκαίρια.

Αναλύοντας των χάρτη κλιματικής ταξινόμησης του ελλαδικού χώρου, των Korpen – Geiger, (1936), παρατηρείται μια μεγάλη ποικιλία κλιματικών τύπων για τις διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έντονη τοπογραφική διαμόρφωση που παρουσιάζει η Ελλάδα. Οι οροσειρές Πίνδου και Ροδόπης καθώς και το ευρύτερο σύμπλεγμα βουνών της ορεινής επικράτειας, έχουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση του γενικού κλίματος της χώρας, διαμορφώνοντας ειδικότερα επιμέρους μικροκλίματα, τα οποία διατηρούν άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο ή και καθόλου το μεσογειακό χαρακτήρα.

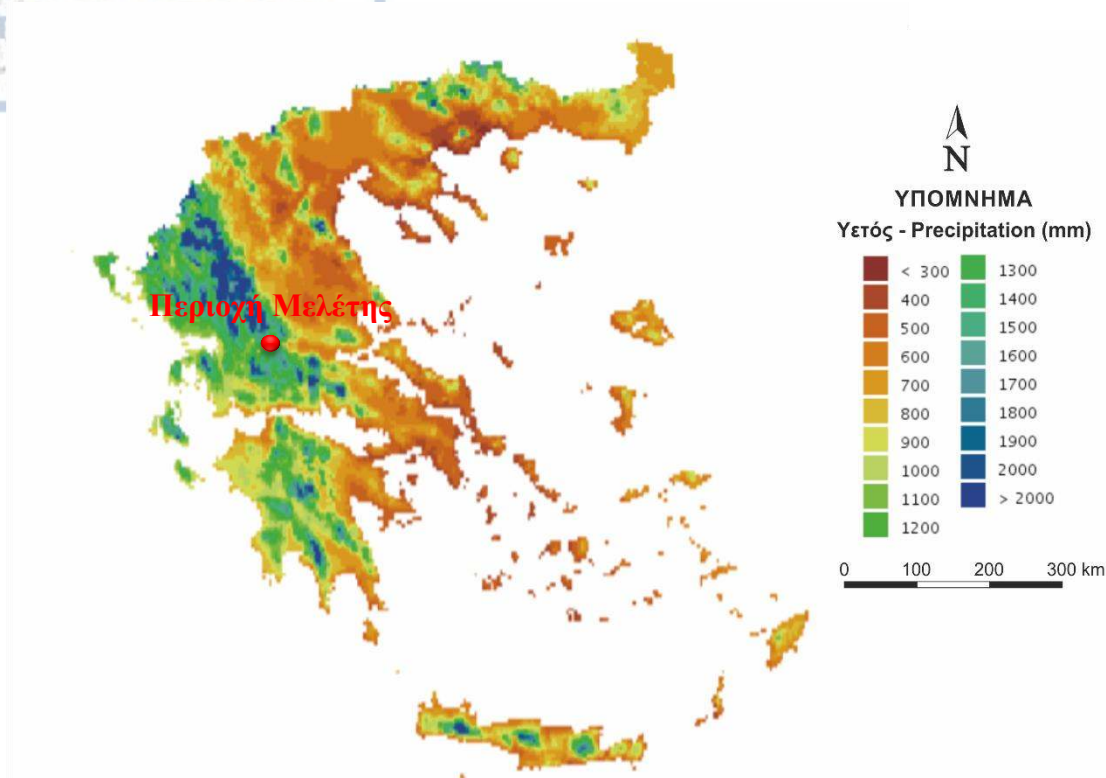


Εικόνα 4.14 Χάρτης κλιματικής ταξινόμησης του ελλαδικού χώρου κατά Korpen – Geiger, (1936) (από Beck et al., 2018).

Όσον αφορά την ευρύτερη περιοχή μελέτης, σύμφωνα με την κλιματική κατάταξη των Korpen – Geiger, (1936), αυτή παρουσιάζει ένα υγρό Ηπειρωτικό κλίμα, χαρακτηριζόμενο από πολλές συχνές βροχοπτώσεις, με ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής περί τα 1.500 mm, από δριμείς χειμώνες με έντονες χιονοπτώσεις και από δροσερά καλοκαίρια.

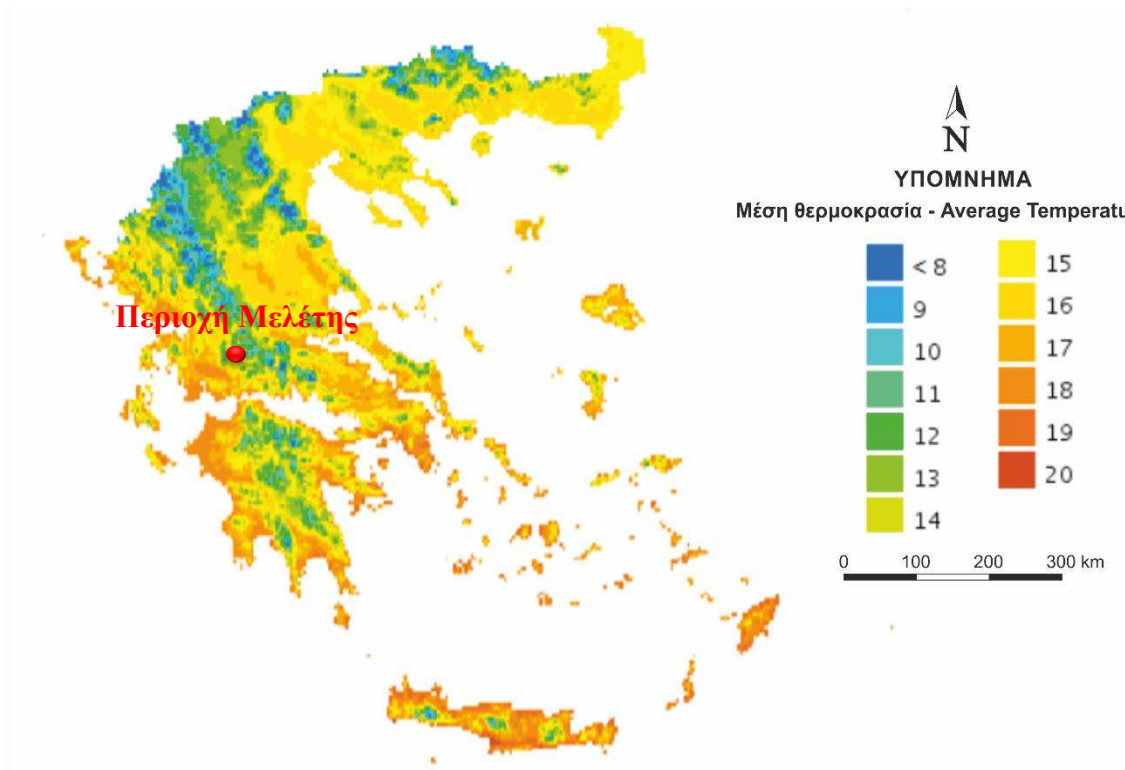
Η μέση θερμοκρασία της περιοχής είναι περίπου 11°C, ενώ κατά τους καλοκαιρινούς μήνες δεν ξεπερνά τους 28°C.

Παρακάτω ακολουθούν χάρτες του ελληνικού χώρου αναφερόμενοι σε στοιχεία κατακρημνίσεων, και μέσης θερμοκρασίας που περιγράφουν τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.



Εικόνα 4.15 Χάρτης συνολικής κατακρήμνισης στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm).

(Εικόνα από τον κλιματικό Άτλαντα της Ελλάδας, <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>).



Εικόνα 4.16 Χάρτης μέσης θερμοκρασίας στον ελλαδικό χώρο

(Εικόνα από τον κλιματικό Άτλαντα της Ελλάδας, <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>).

4.4.2. Υδρολογικό ισοζύγιο

Μια από τις εργασίες ανάλυσης του υδρογεωλογικού πλαισίου της ευρύτερης περιοχής ήταν η διερεύνηση του υδρολογικού ισοζυγίου της. Με λίγα λόγια το υδρολογικό ισοζύγιο αποτελεί μία έκφραση της αέναης κυκλοφορίας του νερού και την κατανομή αυτού σε μία λεκάνη απορροής (Βουδούρης, 2013). Η κύρια μορφή με την οποία εκφράζεται το φαινόμενο της κυκλοφορίας και της κατανομής του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη, ορίζεται κατά Βουδούρη (2013) με τον παρακάτω τύπο:

$$P = ET + R + I$$

Όπου:

P: τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Precipitation).

ET: η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration).

R: η επιφανειακή απορροή (Runoff).

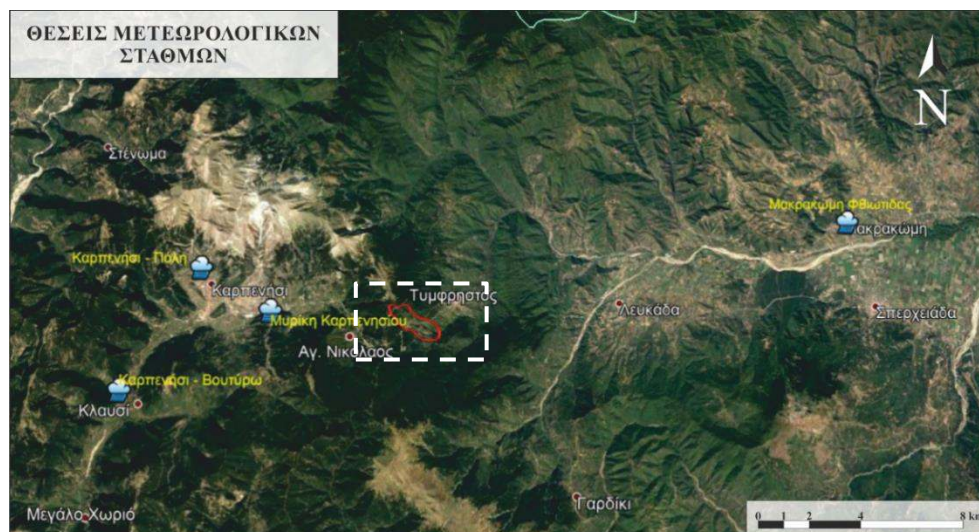
I: η κατεΐσδυση (Infiltration).

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν σε ισοδύναμο ύψος νερού (mm) ή σε όγκο νερού (m³) ή σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).

Για την υλοποίηση του παραπάνω εγχειρήματος, συλλέχθηκαν δεδομένα τεσσάρων μετεωρολογικών σταθμών, που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με την περιοχή μελέτης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συμπυκνωμένα και ενοποιημένα τα μεθοδολογικά βήματα, τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους και η ερμηνεία τους για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου, προκειμένου να αποφευχθεί η επί μακρῶν ανάλυση μεθοδολογίας εύρεσης υδρολογικού ισοζυγίου που ξεπερνά τα πλαίσια της παρούσας μελέτης αλλά και για την διατήρηση της αρμονικής και προσπελάσιμης νοηματικής συνοχής αυτής.

Βασική προϋπόθεση της μεθοδολογίας επιλογής των σταθμών, αποτέλεσε η γεωγραφική τους κατανομή, που έπρεπε να καλύπτει όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα την υπό διερεύνηση περιοχή, αλλά και η χρονική περίοδος παρακολούθησής τους, έτσι ώστε τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν να καλύπτουν ευρύ χρονικό διάστημα, επιτρέποντας μια πιο αξιόπιστη ανάλυση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής.



Εικόνα 4.17 Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών. Οι σταθμοί σημειώνονται με το σύμβολο του σύννεφου, ενώ με άσπρο πλαίσιο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίστησης (Περιβάλλον Google earth).

Πίνακας 4-1. Εξεταζόμενοι μετεωρολογικοί σταθμοί.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ		
	x (ΕΓΣΑ'87)	y (ΕΓΣΑ'87)	z
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ - ΠΟΛΗ	308102	4309543	998
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ - ΒΟΥΤΥΡΩ	304828	4304352	700
ΜΥΡΙΚΗ ΚΑΡΠΕΝΗΣΙΟΥ	311163	4307565	1045
ΜΑΚΡΑΚΩΜΗ ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	336634	4311241	125

Πιο αναλυτικά, συγκεντρώθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα των παραπάνω σταθμών, από την βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε και φιλοξενείται στο σύνδεσμο meteο.gr, που είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση και ανάλυση του δικτύου των μετεωρολογικών σταθμών που έχει συσταθεί από το [Meteο.gr](http://meteο.gr), το Ινστιτούτο Περιβαλλοντικής Έρευνας και Αειφόρου Ανάπτυξης (IERSD) και το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (NOA).

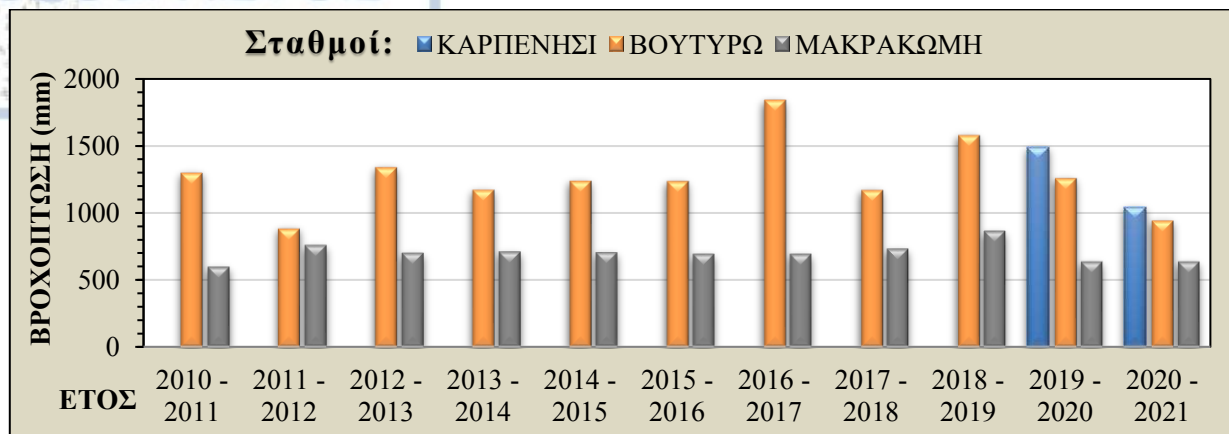
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η συνολική βροχόπτωση κάθε σταθμού για τα έτη στα όποια διατίθονταν δεδομένα:

Πίνακας 4-2 Συνολική βροχόπτωση σε κάθε μετεωρολογικό σταθμό ανά έτος.

ΕΤΗ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ			
	ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ	ΒΟΥΤΥΡΩ	ΜΥΡΙΚΗ	ΜΑΚΡΑΚΩΜΗ
2008 - 2009				
2009 - 2010				
2010 - 2011		1298.2	1138.2	596.2
2011 - 2012		881.6	910.8	756.4
2012 - 2013		1339.0	1038.2	699.6
2013 - 2014		1172.6	977.0	708.4
2014 - 2015		1238.4	915.0	702.8
2015 - 2016		1236.6	957.6	692.2
2016 - 2017		1841.8	1153.6	692.6
2017 - 2018		1169.0	841.0	730.6
2018 - 2019		1577.8	1079.8	862.0
2019 - 2020	1489.6	1256.6	884.4	633.4
2020 - 2021	1044.6	943.0	1073.4	633.4
Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)	1267.10	1268.60	997.18	700.69

Από τους παραπάνω 4 εξεταζόμενους μετεωρολογικούς σταθμούς, ο σταθμός Μυρίκη Καρπενησίου, παρόλο που βρίσκεται πιο κοντά στην περιοχή μελέτης, απορρίφθηκε από την περαιτέρω ανάλυση της διερεύνησης του υδρολογικού ισοζυγίου, λόγω των μεγάλων χρονικών κενών που παρατηρήθηκαν στα δεδομένα του, και πιο συγκεκριμένα σε δεδομένα που απουσίαζαν από μήνες "κλειδιά" όπου η αναμενόμενη βροχόπτωση είναι σχεδόν πάντα υψηλή, και αυτό γιατί τα δεδομένα του θα επηρέαζαν αρνητικά την εγκυρότητα της ανάλυσης.

Στη συνέχεια, προκειμένου να υπολογιστεί το ποσό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων της περιοχής, επιχειρήθηκε η εύρεση της μαθηματικής έκφρασης που συνδέει το ύψος βροχής σε συνάρτηση με το υψόμετρο, χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης, η οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.



Εικόνα 4.18 Διάγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για κάθε σταθμό ανά έτος.

Η μαθηματική αυτή έκφραση ονομάζεται βροχοβαθμίδα και εκφράζει το πόσο αυξάνει η βροχόπτωση ανάλογα με το υψόμετρο (Βουδούρης, 2013). Μαθηματικά ορίζεται με τη παρακάτω γραμμική σχέση:

$$y = a \cdot x + b$$

Όπου:

x: το υψόμετρο των σταθμών.

y: το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης ανά έτος.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί πως η εξίσωση της βροχοβαθμίδας δεν επιβεβαιώνεται πάντα, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο κανόνας διαψεύδεται από τις τοπικές γεωγραφικές και κλιματικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Γενικά υπολογίζεται σε περιοχές σχετικά μικρής έκτασης με παρόμοιο βροχομετρικό καθεστώς (Βουδούρης, 2013).

Πίνακας 4-3 Δεδομένα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (mm) και υψομέτρου (m) για τους 3 μετεωρολογικούς σταθμούς.

ΣΤΑΘΜΟΣ	X = ΥΨΟΜΕΤΡΟ Z (m)	Y = ΜΕΣΟ ΕΤΗΣΙΟ ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ (mm)
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ - ΠΟΛΗ	998	1267.10
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ - ΒΟΥΤΥΡΩ	700	1268.60
ΜΑΚΡΑΚΩΜΗ ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	125	700.69

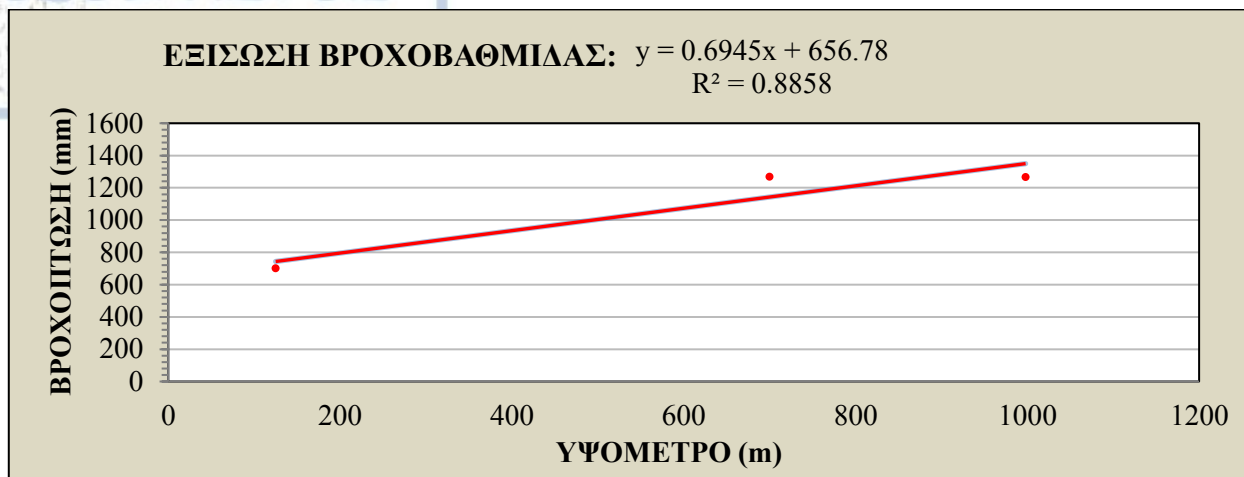
Από την επίλυση των ελαχίστων τετραγώνων για τιμές x, y όπως φαίνονται στον παραπάνω πίνακα, προέκυψε η παρακάτω εξίσωση βροχοβαθμίδας:

$$y = 0,6945 \cdot x + 656,78$$

Όπου:

a = 0,6945.

b = 656,78.



Εικόνα 4.19 Γραμμική συσχέτιση του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης με το υψόμετρο για την ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Η εξίσωση της βροχοβαθμίδας είχε ένα συντελεστή συσχέτισης R^2 ίσο με 0,8858 υποδηλώνοντας με αυτό τον τρόπο μια καλή συσχέτιση του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης, με το αντίστοιχο υψόμετρο, του σταθμού. Παράλληλα, από το σχήμα της **Εικόνας 4.19**, η κλίση της ευθείας, δηλαδή ο συντελεστής a δηλώνει μια αύξηση της βροχόπτωσης κατά περίπου 70 mm ανά 100 m.

Έπειτα, για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου υπολογίστηκαν μεμονωμένα οι παρακάτω παράμετροι:

1) Όγκος Βροχόπτωσης (P)

Ο όγκος βροχόπτωσης υπολογίστηκε με την βοήθεια της εξίσωσης της προαναφερθείσας βροχοβαθμίδας. Με βάση την εξίσωση αυτή κατασκευάστηκε χάρτης ισοϋετών καμπυλών, που αντιστοιχούσαν στις υπάρχουσες υψομετρικές καμπύλες. Η περιοχή ανάμεσα σε δύο ισοϋετείς καμπύλες θεωρήθηκε ότι δέχεται ποσότητα βροχόπτωσης ίση με το ημιάθροισμα των τιμών των δύο ισοϋετών καμπυλών.

Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια μεταξύ δύο ισοϋετών καμπυλών (υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού ArcMap) με το ημιάθροισμα των τιμών της βροχόπτωσης υπολογίστηκε ο όγκος νερού που δέχεται η συγκεκριμένη επιφάνεια. Τέλος, αθροίζοντας τα μερικά γινόμενα κάθε μιας τέτοιας επιφάνειας προέκυψε ο συνολικός όγκος νερού που δέχεται η περιοχή ενδιαφέροντος.

Συγκεκριμένα, το ύψος βροχής (mm) κάθε επιφάνειας προέκυψε από την εξίσωση της βροχοβαθμίδας:

$$P = 0,6945 \cdot x + 656,78$$

Όπου:

x: το μέσο υψόμετρο των δύο ισοϋών.

Ο όγκος του νερού (m^3) από βροχόπτωση προέκυψε από τον πολλαπλασιασμό του ύψους βροχής και της επιφάνειας.

Ο συνολικός μέσος ετήσιος όγκος νερού από βροχόπτωση που δέχεται η ερευνηθείσα περιοχή με εμβαδόν $E = 404,67 \text{ km}^2$ εκτιμήθηκε της τάξης των $P = 558.687 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ενώ σε ποσοστό αποτελεί το **100%** των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Πίνακας 4-4 Υπολογισμός του συνολικού όγκου νερού.

A/A	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΜΕΣΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ (mm)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (km ²)	ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ (·10 ⁶ m ³)
1	200 - 300	250	830.41	1.75	1.450
2	300 - 400	350	899.86	8.64	7.776
3	400 - 500	450	969.31	13.80	13.376
4	500 - 600	550	1038.76	17.56	18.238
5	600 - 700	650	1108.21	22.33	24.752
6	700 - 800	750	1177.66	36.78	43.309
7	800 - 900	850	1247.11	25.03	31.217
8	900 - 1000	950	1316.56	70.54	92.865
9	1000 - 1100	1050	1386.01	42.70	59.187
10	1100 - 1200	1150	1455.46	37.43	54.481
11	1200 - 1300	1250	1524.91	37.01	56.441
12	1300 - 1400	1350	1594.36	33.98	54.171
13	1400 - 1500	1450	1663.81	21.70	36.113
14	1500 - 1600	1550	1733.26	12.12	21.007
15	1600 - 1700	1650	1802.71	7.63	13.759
16	1700 - 1800	1750	1872.16	4.81	8.997
17	1800 - 1900	1850	1941.61	5.89	11.435
18	1900 - 2000	1950	2011.06	3.14	6.319
19	2000 - 2100	2050	2080.51	1.82	3.796
			Σύνολο:	404.67	558.687

Τέλος, το μέσο ύψος βροχής (mm) της περιοχής υπολογίστηκε διαιρώντας τον συνολικό μέσο ετήσιο όγκο νερού από βροχόπτωση δια της συνολικής επιφάνειας της περιοχής ενδιαφέροντος, όπως προκύπτει παρακάτω:

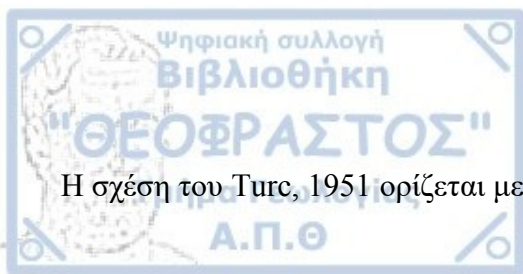
$$P = \frac{V}{E} = \frac{558,687 \cdot 10^{-3} \text{ (mm}^3\text{)}}{404,67 \cdot 10^{-6} \text{ (mm}^2\text{)}} = \mathbf{1380.61 \text{ mm}}$$

2) Εξατμισοδιαπνοή (ET)

Με τον όρο εξατμισοδιαπνοή ορίζεται η ποσότητα του νερού που επανέρχεται στην ατμόσφαιρα με τη συντονισμένη δράση της εξάτμισης και της διαπνοής. Επηρεάζεται άμεσα από μετεωρολογικούς κυρίως παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία εδάφους και αέρα, η υγρασία εδάφους και αέρα, η ταχύτητα ανέμου, η βαρομετρική πίεση, η ηλιακή ακτινοβολία, το πορώδες και κοκκομετρία του εδάφους αλλά και από το είδος της χλωρίδας. Ωστόσο ο υπολογισμός των επιδράσεων αυτών δεν είναι εύκολος (Βουδούρης, 2013).

Συνήθως εκτιμάται με εμπειρικές μεθόδους όπως αυτές του Thornthwaite, 1946 και Turc, 1951, οι οποίες όμως συχνά απαιτούν διόρθωση, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

Στη παρούσα εργασία ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής εκτιμήθηκε με τη μέθοδο του Turc, 1951, η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή για περιοχές με υψηλές βροχοπτώσεις και μικρές θερμοκρασίες.



Η σχέση του Turc, 1951 ορίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$Er = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (P/L)^2}}$$

Όπου:

Er: η πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή σε mm.

P: το μέσο ετήσιο ύψος βροχής σε mm.

T: η μέση ετήσια θερμοκρασία σε °C.

L: η σχέση $L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3$.

Επιλύοντας των παραπάνω τύπο για κάθε ένα από τους 3 εξεταζόμενους σταθμούς προκύπτει ο παρακάτω πίνακας με τις τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ανά έτος:

Πίνακας 4-5 Τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ανά έτος.

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ (Er) (mm)

ΕΤΗ	ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ	ΒΟΥΤΥΡΩ	ΜΑΚΡΑΚΩΜΗ
2010 - 2011		588.72	523.14
2011 - 2012		508.53	579.72
2012 - 2013		576.45	572.41
2013 - 2014		573.91	580.11
2014 - 2015		574.99	581.44
2015 - 2016		570.78	566.67
2016 - 2017		616.00	577.29
2017 - 2018		560.46	587.67
2018 - 2019		615.56	646.96
2019 - 2020	623.14	584.13	540.68
2020 - 2021	580.06	549.37	541.19
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	601.60	574.45	572.48
ΓΕΝΙΚΟΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ		582.84	

Από των παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι ο μέσος όρος του συνόλου της βροχόπτωσης που υπόκειται στη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής είναι ίσος με 582,84 mm. Πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με το εμβαδόν της ερευνηθείσας περιοχής $E = 404,67 \text{ km}^2$ εκτιμήθηκε ο μέσος όγκος νερού που υπόκειται στη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής της τάξης των $Er = 235.86 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ενώ στις άλλες δύο μορφές του υπολογίστηκε ίσος με $Er = 582.84 \text{ mm}$ και $Er = 42,22\%$ αντίστοιχα.

3) Κατείδυση (I)

Η κατείδυση αντιπροσωπεύει την ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνά κατακόρυφα την επιφάνεια του εδάφους, προστίθεται στα αποθέματα των υπόγειων υδροφορέων και συμμετέχει στις κινήσεις του υπόγειου νερού (Βουδούρης, 2013).

Μέτρο της κατείδυσης αποτελεί ο συντελεστής κατείδυσης ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεισδύει σε σχέση με την ετήσια βροχόπτωση και υπολογίζεται κατά Βουδούρη (2013) από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Συντελεστής Κατείδυσης} = \frac{I}{P} (\%)$$

Όπου:

I: η ετήσια κατείδυση σε mm.

P: η ετήσια βροχόπτωση σε mm.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ανάλογα με το είδος του υποβάθρου κάποιες χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή κατείδυσης:

Πίνακας 4-6 Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή κατείδυσης ανάλογα με το είδος του υποβάθρου (από Βουδούρη, 2013)

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ (%)
ΑΛΛΟΥΒΙΑ, ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	10 – 25
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	30 – 60
ΨΑΜΜΙΤΕΣ, ΜΟΛΑΣΣΕΣ	15 – 25
ΦΛΥΣΧΗΣ, ΦΥΛΛΙΤΕΣ, ΜΑΡΓΕΣ	3 – 10
ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ	4 – 8
ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	3 – 8
ΓΝΕΥΣΙΟΙ	3 – 7

Όταν το υπόβαθρο μιας περιοχής αποτελείται από περισσότερους του ενός σχηματισμούς τότε το δυναμικό της κατείδυσης υπολογίζεται μέσω του μέσου ενιαίου συντελεστή κατείδυσης I_{μ} (Βουδούρης, 2013) που εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$I_{\mu} = \frac{I_1 E_1 + I_2 E_2 + \dots + I_n E_n}{E_{ολ}}$$

Όπου:

I_{μ} : ο μέσος συντελεστής κατείδυσης της περιοχής.

E_1, E_2, \dots, E_n : το εμβαδόν της επιφάνειας των επιμέρους γεωλογικών σχηματισμών.

I_1, I_2, \dots, I_n : οι αντίστοιχοι συντελεστές κατείδυσης.

$E_{ολ}$: η συνολική επιφάνεια της περιοχής ενδιαφέροντος.

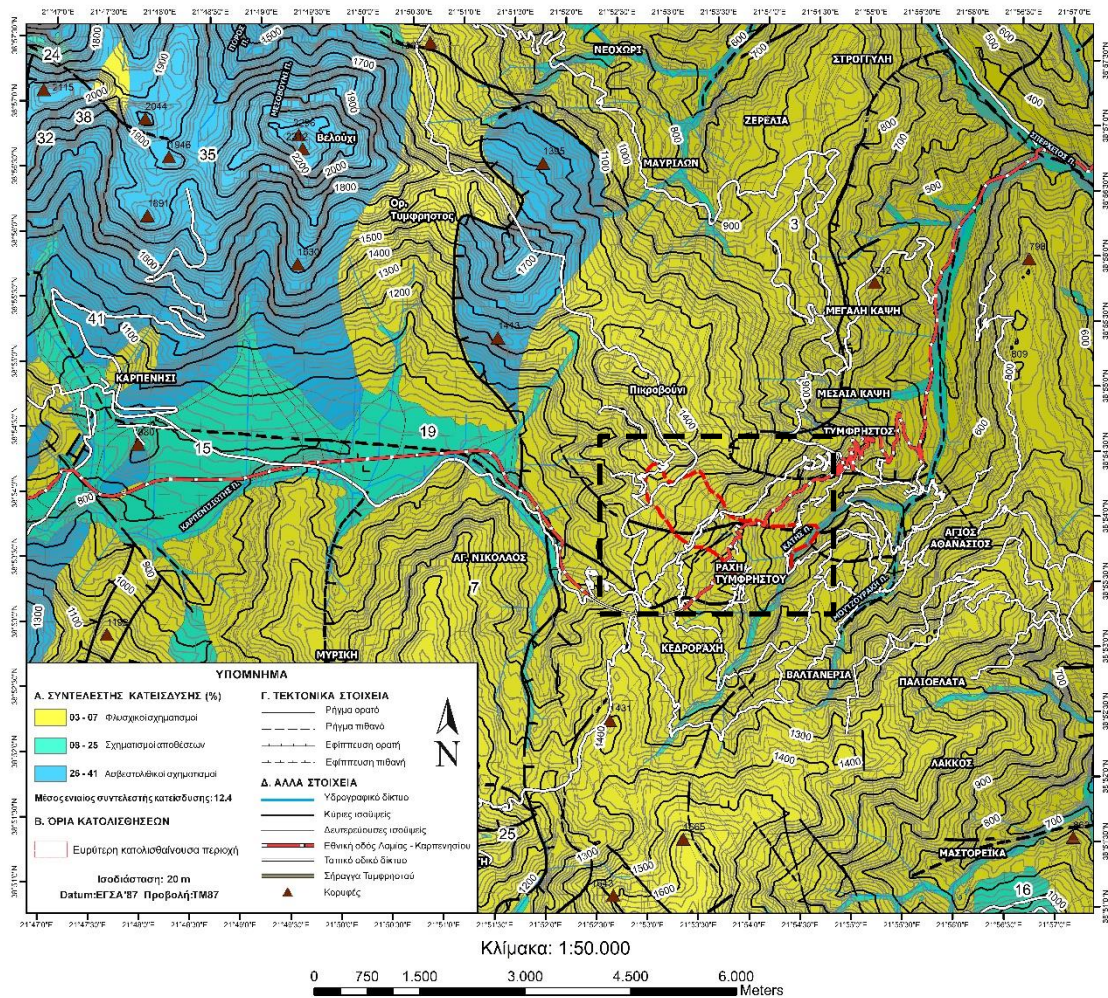
Στη παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της κατείδυσης, αρχικά εκτιμήθηκε βάσει του ψηφιοποιημένου χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου, και του **Πίνακα 4 – 6** ο συντελεστής κατείδυσης για κάθε ένα γεωλογικό σχηματισμό που εμφανίζεται στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, αφού υπολογίστηκε η επιφάνεια που καταλαμβάνει κάθε γεωλογικός σχηματισμός εκφρασμένη σε km^2 (υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού ArcMap), και επιλύοντας τον παραπάνω τύπο εκτιμήθηκε ο μέσος ενιαίος συντελεστής κατείδυσης $I_{\mu} = 12,4$ (Καθαρός αριθμός)

Τέλος, πολλαπλασιάζοντας τον μέσο ενιαίο συντελεστή κατείδυση I_{μ} με τον συνολικό μέσο ετήσιο όγκο νερού από βροχόπτωση υπολογίστηκε ο συνολικός μέσος όγκος νερού που κατεισδύει, που είναι ίσος με $I = 322.83 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ενώ στις άλλες δύο μορφές του υπολογίστηκε ίσος με $I = 171.19 \text{ mm}$ και $I = 12,40\%$ αντίστοιχα.

Πίνακας 4-7 Υπολογισμός του συντελεστή κατείσδυσης για κάθε γεωλογικό σχηματισμό του ψηφιοποιημένου χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου και του **Πίνακα 4 – 6**.

A/A	ID	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ (km ²)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ (%)
1	Qa1	Αποθέσεις κοιλάδων	26.256	19
2	Qc	Κολλουβιακές αποθέσεις	1.773	23
3	Qs	Πλευρικά κορήματα	1.479	16
4	Qsc	Αδρομερείς αποθέσεις κλιτύων	1.326	24
5	Qf	Αλλουβιακά ριπίδια	6.722	15
6	Qal	Παλαιές ποτάμιες αποθέσεις	0.197	20
7	Qb	Ασβεστολιθικά λατυποπαγή	1.332	41
8	Fp	Ιλυολιθικός φλύσχης	176.071	3
9	Fpc	Ψαμμιτικός φλύσχης	102.954	7
10	Ks	Πελαγικοί ασβεστόλιθοι	68.171	35
11	J-kir	Ραδιολαρίτες	6.216	32
12	J-Ki	Παρενστρωμένοι, πελαγικοί, ασβεστόλιθοι	6.148	38
13	TR	Τριαδικό Ασβεστόλιθοι	5.649	32
14	Oi	Ολισθόλιθοι	0.073	25
15	Ols	Ολισθοστρώματα	0.235	22
Σύνολο:			404.602	

ΜΕΣΟΣ ΕΝΝΙΑΙΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ I_μ: 12,4



Εικόνα 4.20 Χάρτης συντελεστή κατείσδυσης της υπό εξέταση περιοχής με μαύρο σημειώνεται η στενή περιοχή μελέτης, και με κόκκινο τα όρια της υπό μελέτη κατολίσθησης (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 4**).

4) Επιφανειακή Απορροή (R)

Με τον όρο επιφανειακή απορροή ορίζεται η ποσότητα του νερού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που φθάνει στην επιφάνεια της γης, και καταλήγει μέσω του υδρογραφικού δίκτυο σε λίμνες ή στη θάλασσα (Βουδούρης, 2013).

Στην παρούσα εργασία, ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που απορρέει στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίστηκε αλγεβρικά επιλύοντας την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου ($P = ET + R + I$) ως προς την απορροή R και εκτιμήθηκε της τάξης των $R = 253.56 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ενώ στις άλλες δύο μορφές του υπολογίστηκε ίσος με $R = 626,57 \text{ mm}$ και $R = 45,38\%$ αντίστοιχα.

5) Υδρολογικό ισοζύγιο

Βάσει των παραπάνω στοιχείων και των μεθόδων που ακολουθήθηκαν η εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου για την ευρύτερη ερευνηθείσα περιοχή παρουσιάζει τα παρακάτω στοιχεία:

Πίνακας 4-8 Υδρολογικό ισοζύγιο ερευνηθείσας περιοχής.

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΡΕΥΝΗΘΕΙΣΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

P = ET + R + I			
	Συμβολισμός	Τιμές	Ποσοστό (%)
ΕΜΒΑΔΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ km²	E	404,67	
ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ mm	P	1380.61	100
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ mm	Er	582.84	42.22
ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ mm	I	171.19	12.4
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ mm	R	626.57	45.38
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ 10⁶ m³	V_P	558.69	
ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΕΞΑΤΜΙΣΗ 10⁶ m³	V_{Er}	235.86	
ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ 10⁶ m³	V_I	322.83	
ΕΤΗΣΙΟΣ ΑΠΟΡΡΕΩΝ ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ 10⁶ m³	V_R	253.56	

Συνοπτικά, η ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι ιδιαίτερα πλούσια σε ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (βροχοπτώσεις – χιονοπτώσεις), και χαρακτηρίζεται από ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής που ανέρχεται περίπου σε 1380 mm. Από αυτά το 42% των κατακρημνισμάτων διαφεύγει στην ατμόσφαιρα ως εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και ως διαπνοή από τα φύλλα των φυτών, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό, ήτοι τα $P - Er = 1380,61 - 582,84 = 798 \text{ mm}$ απορρέουν επιφανειακά. Ένα μικρό μέρος του πλεονάζοντος αυτού νερού, ανάλογα με την περατότητα των σχηματισμών του υποβάθρου, την κλίση των φυσικών πρανών και τη φυτοκάλυψη της περιοχής διηθείται στο υπέδαφος, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του καταλήγει απευθείας στην επιφανειακή απορροή (χειμαρροί, ρέματα).

4.4.3. Υδρολιθολογικό καθεστώς σχηματισμών

Ο φλύσσης της περιοχής στο σύνολο του, από υδρολιθολογικής άποψης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας πρακτικά αδιαπέρατος σχηματισμός. Εξάιρεση αποτελεί η επιφανειακή, σαθρή και κερματισμένη ζώνη του, κυμαινόμενου πάχους 10 – 20 m, η οποία λόγω της έντονης αποσάθρωσης

και κερματισμού που παρουσιάζει, μπορεί να χαρακτηριστεί από ημιπερατή έως και υδροπερατή, επιτρέποντας παράλληλα την δημιουργία εποχικών επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων.

Οι ορίζοντες αυτοί φαίνεται να ακολουθούν την γενική κλίση του εδάφους και να αποστραγγίζονται με σχετικά αργό ρυθμό στην κοίτη των ρεμάτων της περιοχής. Παράλληλα, φαίνεται τοπικά να τροφοδοτούν και διάφορες μικροπηγές σε διάφορα υψόμετρα των φυσικών πρανών.

Εκτός από την επιφανειακά κερματισμένη και σαθρή ζώνη, κατά τις εργασίες κατασκευής της σήραγγας Τυμφρηστού, διαπιστώθηκε η κυκλοφορία του νερού, είτε η υπό μορφή νερού στάγδην είτε υπό μορφή αυξημένης υγρασίας, και σε μεγαλύτερα βάθη, με επιλεκτική ροή κατά μήκος διαρρήξεων και διακλάσεων του φλύσχη (Μαλδέρος et al., 1999b).

Όσον αφορά τα πετρώματα που συμμετέχουν στο σχηματισμό του φλύσχη, οι ιλυόλιθοι και γενικότερα οι εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών είναι κατά κύριο λόγο στεγανοί, ενώ αντίθετα οι καθαρά ψαμμιτικοί σχηματισμοί εκτιμήθηκαν από ημιπερατοί έως στεγανοί.

Σε αντιδιαστολή με τους φλυσχικούς σχηματισμούς, οι επιφανειακές αποθέσεις του Τεταρτογενούς, ήτοι, ποτάμιες αποθέσεις, κορήματα και προϊόντα κατολισθήσεων είναι γενικά υδροπερατές. Επ' αυτούς τους σχηματισμούς δημιουργούνται εποχικοί υδροφόροι ορίζοντες, οι οποίοι τοπικά τροφοδοτούν επίσης διάφορες μικροπηγές. Τέτοιες μικροπηγές είναι ιδιαίτερα εμφανείς τόσο εντός παλαιοκατολισθήσεων όσο ακόμα περισσότερο εντός νέων ενεργών κατολισθήσεων.

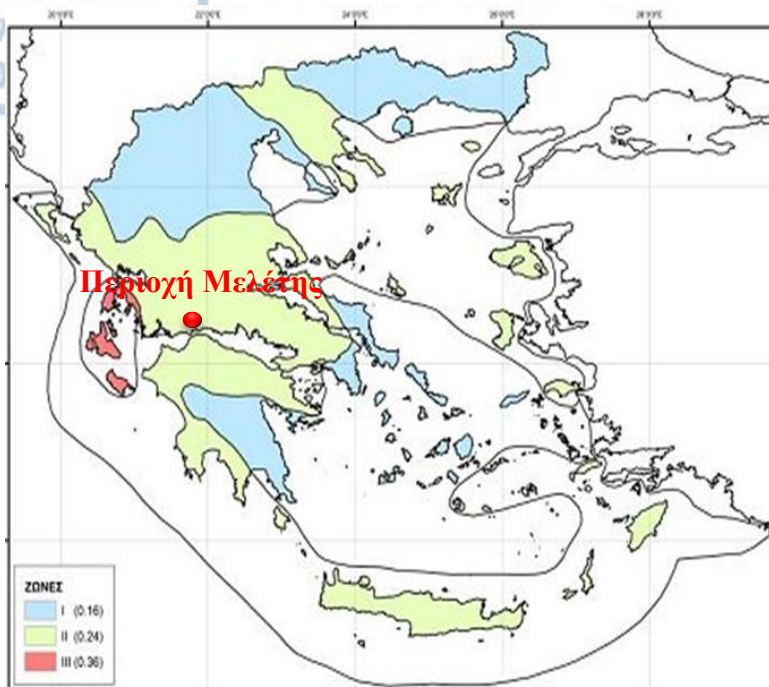
Λόγω των προαναφερθέντων επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, η ερευνηθείσα περιοχή, σε όλη την έκταση της επιφανειακά αποσαθρωμένης και κερματισμένης ζώνης του φλύσχη, καθώς και στις επιφανειακές αποθέσεις του Τεταρτογενούς, υφίσταται βραδεία κυκλοφορία νερού που εκφορτίζεται στην κοίτη των ρεμάτων και προκαλεί την εκδήλωση εδαφικών ροών σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Εν τέλει, κατά το χειμερινό διάστημα του έτους, δηλαδή της περιόδου όπου η ευρύτερη περιοχή είναι δέκτης ιδιαίτερα πλούσιων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχοπτώσεις – χιονοπτώσεις), είναι βέβαιο ότι για ένα μικρό έστω χρονικό διάστημα, επέρχεται σχεδόν πλήρης κορεσμός με το νερό της επιφανειακής ζώνης του υπεδάφους (αποτελούμενης από κορήματα και αποσαθρώματα, μαζί με την επιφανειακά κερματισμένη – αποσαθρωμένη ζώνη του φλύσχη). Ο κορεσμός αυτός, προκαλεί σημαντική μείωση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών της ζώνης και μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε εδαφικές αστάθειες, όπως ερπυσμοί, περιστροφικές ολισθήσεις και εδαφικές ροές.

4.5. Στοιχεία σεισμικότητας

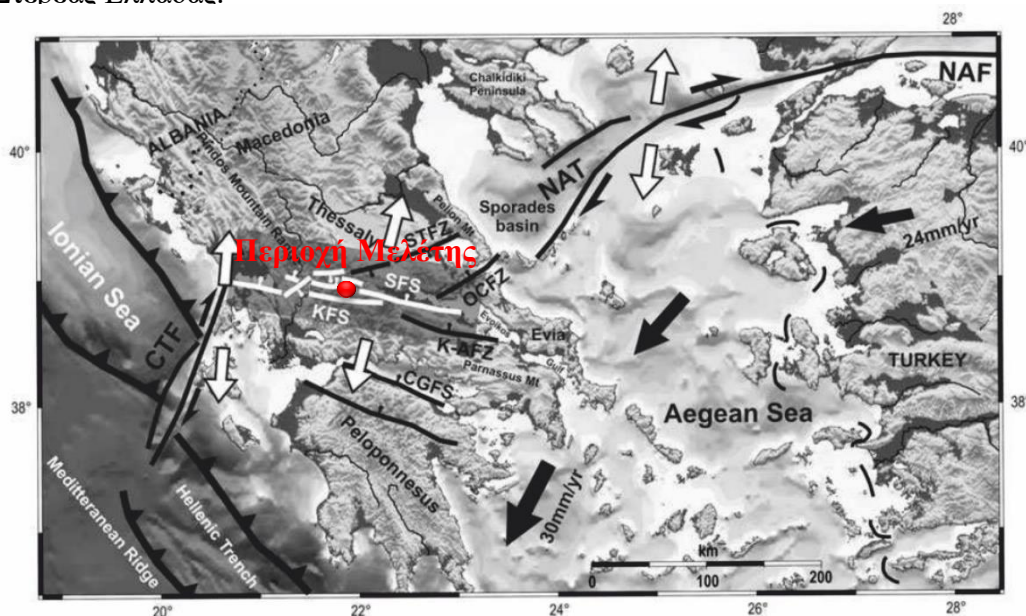
Σύμφωνα με τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) και το νέο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας, ο ελληνικός χώρος υποδιαιρείται στις τρεις παρακάτω ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας:

- Ζώνη I χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας με επιτάχυνση σχεδιασμού 0,16g.
- Ζώνη II μέσης σεισμικής επικινδυνότητας με επιτάχυνση σχεδιασμού 0,24g.
- Ζώνη III υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας με επιτάχυνση σχεδιασμού 0,36g.



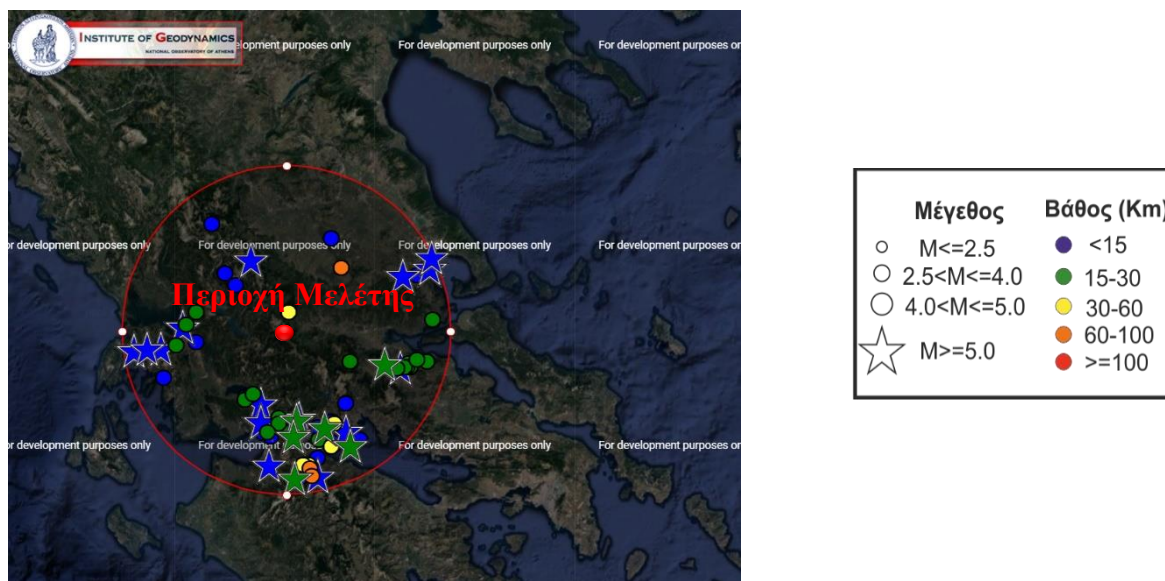
Εικόνα 4.21 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, με κόκκινο σημειώνεται η περιοχή μελέτης (από ηλεκτρονική σελίδα ΟΑΣΠ. Σύνδεσμος: <http://www.oasp.gr>).

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης, σύμφωνα με τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) και το νέο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας, από πλευράς σεισμικότητας ανήκει στην δεύτερη ζώνη (II) μέσης σεισμικής επικινδυνότητας (0,24g). Σε γενικές γραμμές οι περιοχή εμφανίζει γενικά σπανιότητα σε σεισμούς, φαίνεται όμως να επηρεάζεται από το Σύστημα Ρηγμάτων του Σπερχειού με ρήγματα ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΒΔ-ΝΑ παράταξης τα οποία και αποτυπώνονται στον παρακάτω χάρτη με τα νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της κεντρικής Στερεάς Ελλάδας.



Εικόνα 4.22 Γενικευμένος χάρτης σκιασμένου αναγλύφου που δείχνει τις κύριες δομές που ελέγχουν τη λεκάνη του Σπερχειού και την προτεινόμενη σχέση μεταξύ του Συστήματος Ρηγμάτων του Σπερχειού (SFS) με άλλα συστήματα ρηγμάτων της ευρύτερης Στερεάς Ελλάδας, όπως αυτό του Συστήματος Ρηγμάτων Καλλίδρομου (KFS). Τα βέλη υποδεικνύουν τις διαφορετικές κινηματικές (συμπίεση, έκταση, οριζόντια ολίσθηση) (Από Kiliyas et al., 2008).

Έχοντας ως στόχο την εύρεση των σεισμικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής μελέτης, αναζητήθηκαν καταγεγραμμένοι σεισμοί μεγέθους $M_s \geq 4.5$, από το εθνικό σεισμολογικό δίκτυο, για τα τελευταία 50 χρόνια δηλαδή από το 1971 έως σήμερα για μια ακτίνα 100km.



Εικόνα 4.23 Χάρτης σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή μελέτης τα τελευταία 50 χρόνια (από την ηλεκτρονική ιστοσελίδα του Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Σύνδεσμος: www.gein.noa.gr. Ημερομηνία ανάκτησης 15/06/2021).

Τα αποτελέσματα της αναζήτησης αναφερόμενα στους μεγαλύτερους σεισμούς της ευρύτερης περιοχής παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-9 Καταγεγραμμένοι σεισμοί μεγέθους $M_s \geq 4.5$, από το εθνικό σεισμολογικό δίκτυο, για τα τελευταία 50 χρόνια δηλαδή από το 1971 έως σήμερα για μια ακτίνα 100km (ταξινόμηση σε σχέση με το μέγεθος σεισμού).

Σεισμός	Μέγεθος σεισμού (ML)	Περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Εστιακό βάθος (km)	Απόσταση από το κέντρο (km)	Ημερομηνία γένεσης (GMT)
1	5.6	28.1 km ΝΔ του Βόλου	39.20°N	22.70°E	10	78.4	1980/07/09 02:35:50
2	5.4	20.6 km ΝΝΔ της Άμφισσας	38.35°N	22.30°E	13	70.8	2019/03/30 10:46:19
3	5.4	17.6 km Β της Πάτρας	38.40°N	21.70°E	10	57.4	1975/06/30 13:26:55
4	5.3	14.9 km ΝΝΔ του Βόλου	39.24°N	22.89°E	13	95.1	1985/04/30 18:14:12
5	5.2	23.3 km ΝΝΑ της Λαμίας	38.72°N	22.57°E	24	62.8	2008/12/13 08:27:19
6	5.2	28.2 km Δ της Αταλάντης	38.70°N	22.68°E	8	72.6	2013/08/07 09:06:51

Από την αναζήτηση των σεισμικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής μελέτης δεν διαπιστώνεται η ύπαρξη κάποιου μεγάλου σεισμού στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, πέρα του σεισμικού γεγονότος του 2008, 23.3 km NNA της Λαμίας, με μέγεθος σεισμού 5.2, που αποδεικνύει ότι παρόλο που περιοχή ανήκει στην ζώνη μέσης σεισμικής επικινδυνότητας, φαίνεται να επηρεάζεται αισθητά από τα ρήγματα της ευρύτερης ζώνης ρηγμάτων της λεκάνης του Σπερχειού.

Πίνακας 4-10 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους: $A = \alpha \cdot g$ (g: επιτάχυνση βαρύτητας) (από ΕΑΚ, 2004).

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
α	0.16	0.24	0.36

Πίνακας 4-11 Σεισμικής επικινδυνότητας των Νομών Ευρυτανίας και Φθιώτιδας βάσει του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (τμήμα του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2004).

α/α	ΝΟΜΟΣ	ΔΗΜΟΙ	ΖΩΝΗ	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (g)
15	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	Όλοι	II	0.24
48	ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	Όλοι	II	0.24

Ολοκληρώνοντας, η ευστάθεια των φυσικών και τεχνητών πρανών της περιοχής, σε καθεστώς σεισμού ελέγχεται με τη θεώρηση των ακόλουθων πρόσθετων ενεργών επιταχύνσεων:

- 1) κατά την οριζόντια διεύθυνση προκύπτει: $a_h = 0,5 \cdot a = 0,12g$.
- 2) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση προκύπτει: $a_v = 0,25 \cdot a = 0,06g$.

4.6. Κατολισθητικά φαινόμενα στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού

4.6.1. Γενικά

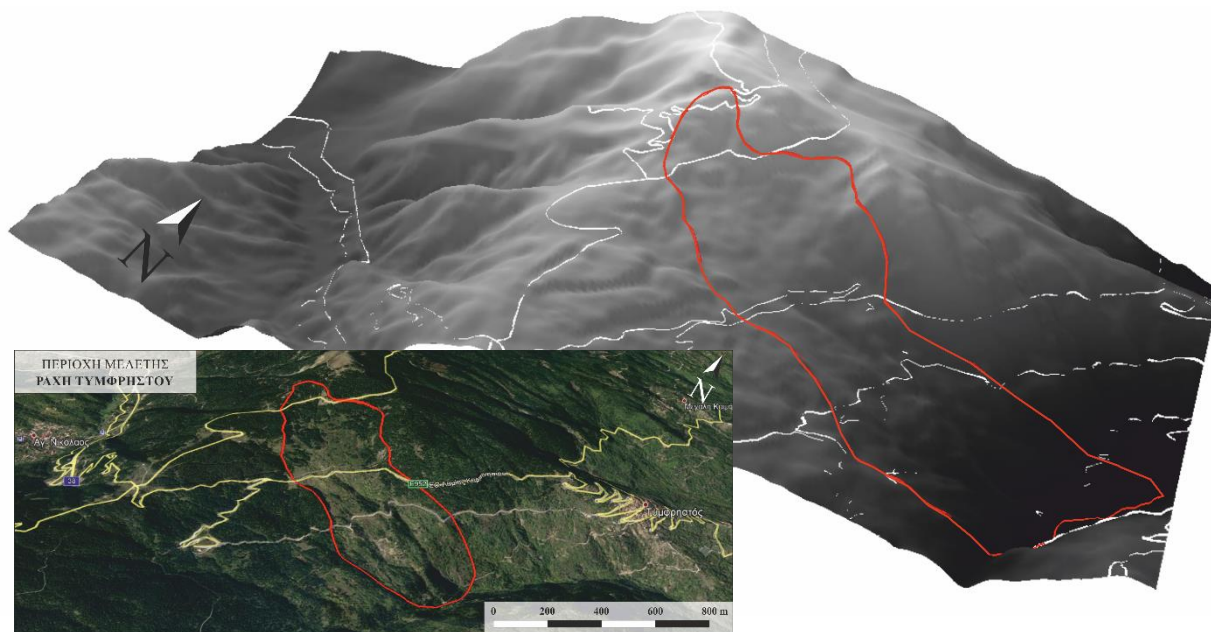
Ιστορικά, η περιοχή Ράχη Τυμφρηστού, λόγω του έντονου αναγλύφου της αλλά κυρίως εξαιτίας των δυσμενών γεωλογικών και κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν σ' αυτήν, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς δημιουργίας κατολισθητικών φαινομένων, ενώ ως αντικείμενο μελέτης απασχόλησε πολλούς ερευνητές/τριες και μελετητές/τριες.

Χαρακτηριστικές είναι οι καταστροφές στο οδικό δίκτυο της περιοχής, εξαιτίας τόσο των συχνών μετακινήσεων που αναδιαμορφώνουν και αναπλάθουν συνεχώς την επιφάνεια του αναγλύφου του εδάφους, όσο και των υλικών κατάπτωσης που συσσωρεύονται στο πόδα των πρανών και στο οδόστρωμα των παρακαίμενων οδών, τα δύο αυτά φαινόμενα εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους για την ασφάλεια των κινούμενων επί των οδών αυτών οχημάτων.

Οι συνεχείς καθαρισμοί, επισκευές και επανακατασκευές του οδοστρώματος δεν λύνουν το πρόβλημα και είναι ιδιαίτερα κοστοβόρες, ταυτόχρονα ο κίνδυνος για σοβαρά ατυχήματα παραμένει και μεγιστοποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες από την αντίστοιχη αύξηση διαβρωτικών παραγόντων κατά τις περιόδους αυτές.

4.6.2. Η κατολίσθηση Τυμφρηστού

Τα ευρύτερα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής, εντοπίζονται στους ανατολικούς πρόποδες του όρους Τυμφρηστού, στην δυτική πλευρά της κοιλάδας που διαμορφώνεται από την επίδραση των ρεμάτων Κατή και Ματζουράκη, εντός μιας εκτεταμένης ασταθούς περιοχής, συχνά ονομαζόμενης ως κατολίσθηση Τυμφρηστού.



Εικόνα 4.24 Περιοχή κατολισθητικών φαινομένων στους ανατολικούς πρόποδες του όρους Τυμφρηστού μερικά χιλιόμετρα Δυτικά του χωριού Τυμφρηστός.

Η εν λόγω κατολίσθηση αποτελεί μια σύνθετη και ενεργή κυρίως στο κατώτερο τμήμα της, κατολίσθηση που ανήκει στην κατηγορία μεγάλων κατολισθήσεων κλίμακας φυσικού πρανούς. Στην πραγματικότητα αποτελείται από πολλές μικρότερες κατολισθήσεις που μπορούν να δρουν ταυτόχρονα και να εξελίσσονται με διαφορετικές διαδικασίες σε διάφορα τμήματά της.

Στο σύνολό της, η κατολίσθηση Τυμφρηστού μπορεί να ταξινομηθεί, κατά Hungr et al. (2014), ως μια περιστροφικού τύπου κατολίσθηση σε υλικά αργίλου – ιλύος (Τύπος 11). Ο ρυθμός εκδήλωσης της εκτιμάται αρκετά αργός, με εξαίρεση κάποια τοπικά τμήματα της που μπορούν να ενεργοποιούνται εξαιρετικά ταχύτερα σε σχέση με το σύνολο της.

Επειδή όμως, πρόκειται για μια εκτεταμένως κατολισθαίνουσα περιοχή και όχι για μια μεμονωμένη ενιαία κατολίσθηση, η ταξινόμηση και η έρευνα της έκτασης, του τύπου, των μηχανισμών, της συχνότητας εμφάνισης και των συνθηκών των αστοχιών του εδάφους θα πρέπει να απορρέουν και να συντίθενται από την τμηματική ανάλυση των επιμέρους τοπικών κατολισθήσεων της.

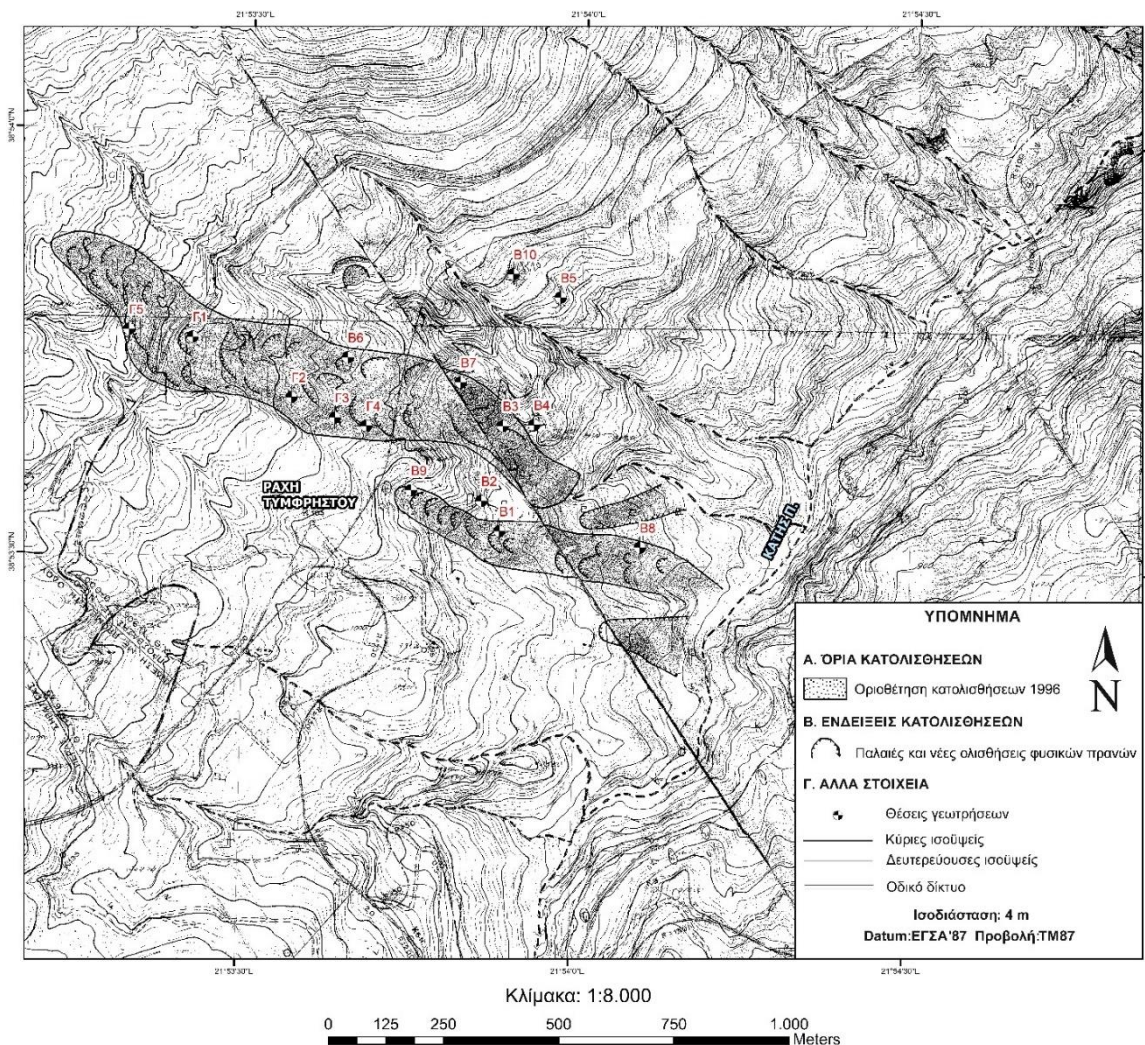
Συμπερασματικά, η κατολίσθηση Τυμφρηστού, αποτελεί μια ευρεία ζώνη αστάθειας, όπου μεγάλα τμήματα των φυσικών κλιτύων της βρίσκονται είτε σε οριακή κατάσταση ισορροπίας, είτε εμφανίζουν παλαιές και νέες ενεργές ολισθήσεις με ταυτόχρονα φαινόμενα ερπυσμού (Μαλδέρος et al., 1999a). Παρόλα αυτά, πολλά της τμήματα δεν είναι αμέσως προφανή ως προς την πιθανή ενεργοποίησή τους, και επιπροσθέτως η αστοχία του εδάφους δεν συμβαίνει σε τακτική βάση. Υπό την αίρεση αυτή, οι μηχανισμοί ενεργοποίησης, εμφανίζονται σποραδικά ή και εποχιακά και έχουν σταδιακά - συσσωρευτικά αποτελέσματα.

Τα εν λόγω κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής έχουν προβληματίσει στο παρελθόν και ενδέχεται να συνεχίσουν να προβληματίζουν και στο μέλλον, αποτελώντας ουσιαδώς ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο σύστημα αστάθειας που εξελίσσεται δυναμικά στον χρόνο.

4.6.3. Ιστορική καταγραφή κατολισθητικών φαινομένων στη περιοχή Ράχη Τυμφρηστού

Οι πρώτες έρευνες στην περιοχή έλαβαν χώρα το 1996, από μελετητική ομάδα της εταιρίας ΕΔΑΦΟΣ. Ε.Π.Ε, στα πλαίσια μελέτης χάραξης οδοποιίας της Ανατολικής πρόσβασης της Σήραγγας Τυμφρηστού, ονόματι Σήραγγα Μπακογιάννη, η οποία αποτελεί τμήμα της Εθνικής Οδού Λαμίας – Καρπενησίου.

Κατά την αναζήτηση βέλτιστης διέλευσης της οδού Λαμίας – Καρπενησίου από την περιοχή, οριοθετήθηκε μια εκτεταμένη ενεργή κατολίπηση στην δυτική πλευρά της περιοχής ανάμεσα στην ανατολική είσοδο της επικείμενης σήραγγας και το χωριό Τυμφρηστός και εξετάστηκε κατά πόσο αυτή μπορεί να επηρεάσει το τμήμα που συνδέει το ανατολικό μέτωπο της σήραγγας με το χωριό Τυμφρηστός.



Εικόνα 4.25 Τοπογραφικός χάρτης πρώτης οριοθέτησης κατολισθήσεων στη περιοχή το 1996. Πάνω στο χάρτη σημειώνονται οι θέσεις 15 γεωερευνητικών γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν το 1996 και το 1999 για τη γεωτεχνική μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων της εν λόγω περιοχής (Ο χάρτης συντάχθηκε από την εταιρία ΟΔΟΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗ Ε.Ε) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 5**).

Στο πλαίσιο της γεωτεχνικής μελέτης της κατολίσθησης αυτής, παράλληλα με τις συμβατικές μεθόδους έρευνας που επιτελέστηκαν, όπως η μελέτη τοπογραφικών χαρτών και η χαρτογράφηση πεδίου, εκτελέστηκαν επίσης 5 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (Γ1, Γ2, Γ3, Γ4, Γ5), έχοντας ως στόχο την στρωματογραφική διερεύνηση της περιοχής, την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών στα εδαφικά και βραχώδη δείγματα του υπεδάφους και την τοποθέτηση οργάνων παρακολούθησης.

Η έρευνα της περιοχής ολοκληρώθηκε το 1999, με την εκτέλεση 10 επιπλέον δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10) και την αναθεώρηση της πρώτης γεωλογικής – γεωτεχνικής έρευνας του 1996. (Τα μητρώα των συνολικών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν στην περιοχή παρατίθενται αναλυτικά στο **Παράρτημα Νο 1**).

Βάσει των αποτελεσμάτων της έρευνας στην περιοχή για τα έτη 1996 και 1999, η εν λόγω οριοθετημένη κατολίσθηση τοποθετείται εντός φλυσχικών σχηματισμών κυρίως ιλυολιθικής σύστασης με λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών.

Οι σχηματισμοί των ψαμμιτών είναι έντονα κερματισμένοι ενώ οι ιλυόλιθοι εμφανίζονται πτυχωμένοι ως αποτέλεσμα του έντονου τεκτονισμού που έχει υποστεί η περιοχή. Εξαιτίας της μεγάλης συμμετοχής του ιλυολίθου, αναπτύσσεται επιφανειακά ένας εκτεταμένος μανδύας αποσάθρωσης, μεγάλου πάχους (10 - 20m) αργιλικής σύστασης, ο οποίος προέρχεται από την αποσάθρωση και διάβρωση του υποβάθρου αλλά και την ενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων (Καβουνίδης et al., 2010).

Ειδικότερα περί της κατηγοριοποίησης της κατολίσθησης, αυτή ταξινομήθηκε ως μια οπισθοδρομικού τύπου προς τα ανάντη κατολίσθηση (Retrogressive) που εξελίσσεται διαδοχικά από τα κατώτερα τμήματα του πρανούς προς τα ανώτερα (Καβουνίδης et al., 2010).

Η χρονική αλληλουχία εξέλιξης του φαινομένου δεν είναι προφανής και εξαρτάται από παράγοντες όπως η γεωμετρία του πρανούς, το καθεστώς της πίεσης των πόρων και το πάχος της εδαφικής ζώνης εντός της οποίας εκδηλώνονται οι κατολισθητικές κινήσεις.

Το φαινόμενο ξεκινάει από τα κατώτερα τμήματα της πλαγιάς όπου εδαφικά ή βραχώδη τμήματα της χαλαρώνουν και αστοχούν κάτω από την επίδραση διαβρωτικών φαινομένων (πχ. επίδραση ποταμού Κατή στον πόδα του πρανούς) με αποτέλεσμα την διάδοση κατολισθητικών φαινομένων προς τα ανώτερα τμήματα της πλαγιάς, λόγω της απώλειας στήριξης των ανάντη τμημάτων της και της συνακόλουθης υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε ζώνες αδυναμίας τμημάτων αυτών.

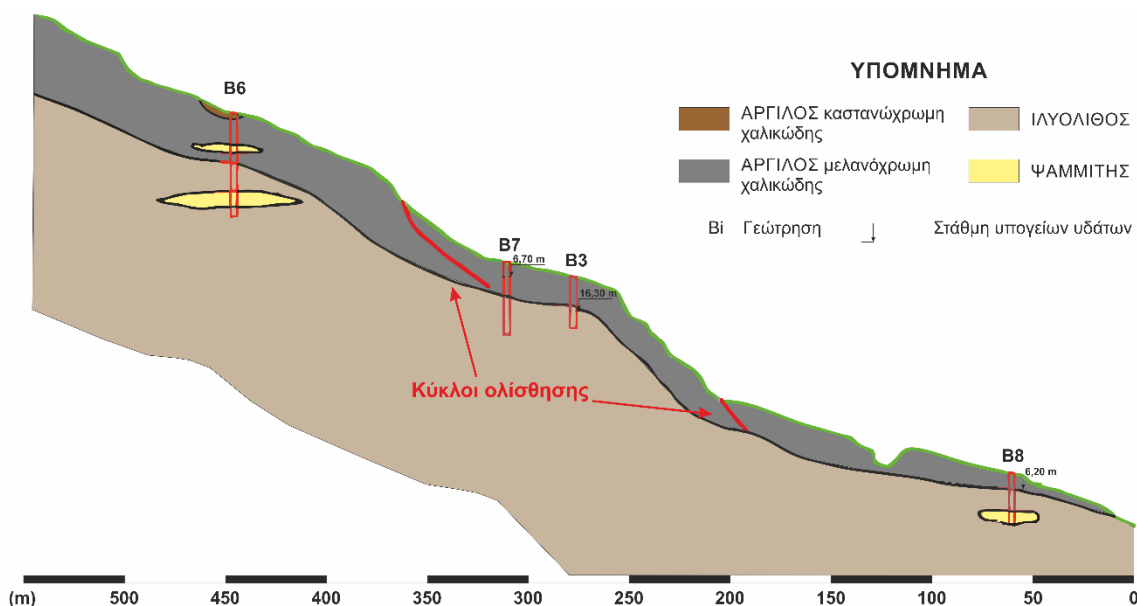
Τα υλικά που συμμετέχουν στις προαναφερθείσες κατολισθητικές κινήσεις αποτελούν συνήθως ένα μείγμα ψαμμιτικών ογκολίθων, λατυπών, μικρότερων ψαμμιτικών και ιλυολιθικών θραυσμάτων και αργιλοϊλύος. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση. Το επικρατέστερο πάχος είναι της τάξης των 5 m και τοπικά μέχρι και 8 m, ενώ αυτό μπορεί να φθάσει και τα 20 m με 25 m κυρίως όταν η κατολίσθηση συμπεριλαμβάνει και τη σαθρή επιφανειακή ζώνη του φλύσχη.

Τα υλικά αυτά τουλάχιστον κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι κορεσμένα με νερό και βρίσκονται σε οριακή έως ασταθή κατάσταση ισορροπίας. Έτσι μια πιθανή αφαίρεση μάζας στη βάση τους, από την δράση τοπικών ρεμάτων, ή μια πιθανή φόρτιση τους από υλικά που βρίσκονται σε υψηλότερα τμήματα, μπορεί εύκολα να τα ενεργοποιήσει.



Εικόνα 4.26 Τα εν λόγω υλικά κατολίσθησης, όπως αυτά εντοπίστηκαν στην περιοχή κατά την επίτοπου αυτοψία. **1)** Εντός ενεργής κατολίσθησης περιστροφικού χαρακτήρα. **2)** Εντός μεμονωμένης ανενεργής παλαιοκατολίσθησης.

Ο μηχανισμός και τα υλικά που συμμετέχουν στην εν λόγω κατολίσθηση συνοψίζονται στο παρακάτω μοντέλο κατολίσθησης που κατέληξαν οι ερευνητές Καβουνίδης et al. (2010), όπως αυτό προέκυψε βάσει των αποτελεσμάτων των γεωτρήσεων και της γεωλογικής μελέτης του 1996 και 1999.

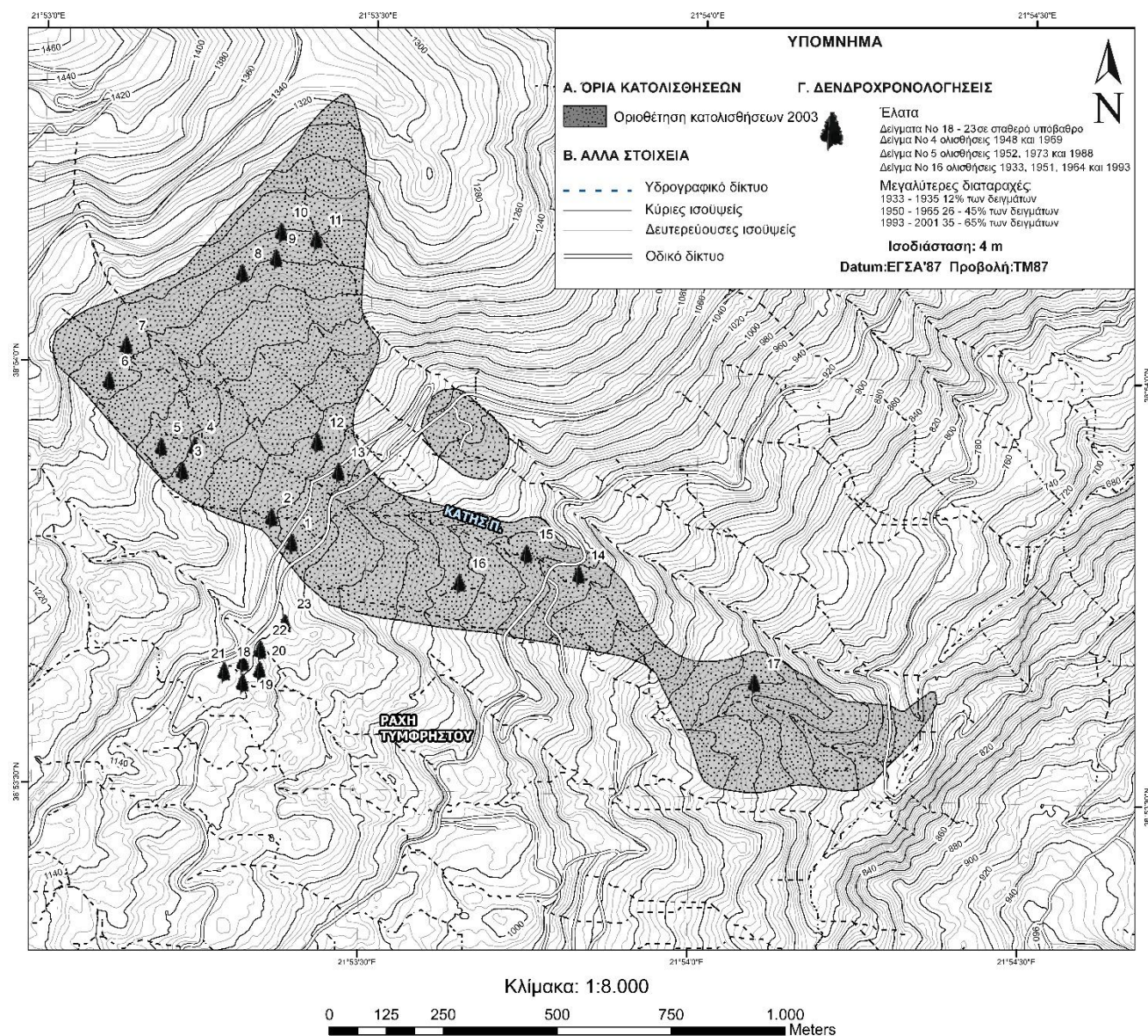


Εικόνα 4.27 Μοντέλο κατολίσθησης όπως προέκυψε από τις έρευνες στην περιοχή, τις περιόδους 1996 και 1999 (από Καβουνίδης et al., 2010).

4.6.4. Χρονολόγηση κατολισθητικών φαινομένων με δενδρογεωμορφολογικές και δενδροχρονικές τεχνικές στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού

Το 2003, μια άλλη ομάδα ερευνητών (Paradopoulos et al., 2007) οριοθέτησε μια ευρύτερη κατολίσθηση στην εκτεταμένη ασταθή περιοχή Ράχη Τυμφρηστού την οποία επίσης μελέτησε χρησιμοποιώντας δενδρογεωμορφολογικές παρατηρήσεις, χρονολογώντας μάλιστα τα κατολισθητικά γεγονότα με την χρήση τεχνικών δενδροχρονολόγησης.

Πιο συγκεκριμένα, οι ερευνητές μελέτησαν την κατεύθυνση, τον βαθμό κλίσης και την παραμόρφωση των κορμών των δέντρων που αναπτύχθηκαν εντός της οριοθετημένης ολισθαίνουσας μάζας, και συσχέτισαν τα αποτελέσματά τους με παρατηρήσεις και αναλύσεις δέντρων που αναπτύσσονταν εντός μιας γειτονικής σταθερής επιφάνειας. Επιπλέον, εξετάζοντας τα σημάδια μείωσης της ανάπτυξης του πλάτους των δακτυλίων του κορμού των δέντρων σε δείγματα που λήφθηκαν από το πεδίο, οι ίδιοι ερευνητές ήταν σε θέση να χρονολογήσουν τοπικά κατολισθητικά φαινόμενα και να καθορίσουν συγκεκριμένες χρονικές περιόδους όπου αυτά τα κατολισθητικά γεγονότα ταυτίζονται έντονα με περιόδους αυξημένης βροχόπτωσης και έντονης διακύμανσης του υπόγειου υδροφορέα.



Εικόνα 4.28 Τοπογραφικός χάρτης αποτύπωσης κατολισθήσεων (2003) και των δενδρογεωμορφολογικών δειγμάτων (1 – 23). Τα δείγματα 18 – 23 εντοπίζονται εντός σταθερής επιφάνειας (Paradopoulos et al., 2007 – με τροποποιήσεις του γράφοντος) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 6**).

Τα αποτελέσματα της μελέτης των παραμορφώσεων ανά κορμό των δέντρων εντός της κατολίσθησης έδειξαν ότι το 30,2% των δειγμάτων παρουσίαζαν περισσότερες από 6 κάμψεις, το 57,2% των δειγμάτων από 1 – 5 κάμψεις ενώ μόλις το 12,6% των δειγμάτων δεν παρουσίαζαν σημάδια κάμψεων. Επιπλέον, τα δέντρα από τη γειτονική σταθερή τοποθεσία και αυτά δεν παρουσίαζαν κάποιο σημάδι κάμψης. Ουσιαστικά, η τάση κάμψης που παρουσιάζει ένας κεκλιμένος κορμός δέντρου αποκαλύπτει την ικανότητα του να ισιώνει μέσω της αύξησης των κορυφών του (Papadopoulos et al., 2007). Στην περιοχή τα περισσότερα πλατύφυλλα είδη παρουσίαζαν σοβαρές παραμορφώσεις του κορμού τους και υψηλή τάση κάμψης. Τα έλατα εντός της κατολίσθησης είχαν ένα κορμό σχήματος S που είναι πολύ πιθανών να προέκυψε από μικρές μετακινήσεις και από τάσεις που εφαρμόστηκαν από γειτονικές κατολισθήσεις.

Περί της κατεύθυνσης και του βαθμού κλίσης των δέντρων που αναπτύσσονται στην ολισθαίνουσα πλαγιά, από την έρευνα έγινε φανερό ότι το 86% των δέντρων είχε κεκλιμένους κορμούς ενώ το υπόλοιπο 14% είχε ίσους κορμούς. Τα περισσότερα από τα κάθετα δέντρα ήταν άτομα ελάτης, ενώ στην παρακείμενη σταθερή τοποθεσία δεν παρατηρήθηκε κάποια κλίση κορμού στα δέντρα. Το μεγαλύτερο μέρος των δέντρων (72,2%) είχε κλίση με κατεύθυνση από Β (ΒΔ) σε Ν (ΝΑ), κατευθύνσεις παρόμοιες με τη γενική έκθεση της πλαγιάς.

Από την παραπάνω ανάλυση σχετικά με την κατεύθυνση και τον βαθμό κλίσης των δειγμάτων, καθώς και από τη συχνότητα κάμψης των κορμών των δέντρων που αναπτύσσονται σε εκδηλωθείσες κατολισθήσεις, και σε συνδυασμό με την εποχή των δέντρων, οι ερευνητές χαρακτήρισαν την ευρύτερη κατολίσθηση, ως μια ενεργή κατολίσθηση ηλικία μεγαλύτερης των 100 χρόνων που ξεκίνησε ως μια βαθιά κίνηση μάζας (Deep-seated landslide). Τα κατολισθητικά σημάδια πάνω στη βλάστηση ήταν πιο εμφανή σε πλατύφυλλα είδη βλάστησης σε σύγκριση με τα έλατα, ενώ η παρουσία ηλικιωμένων ατόμων ελάτης στο εσωτερικό της κατολίσθησης χαρακτήριζαν θέσεις σταθερών (In situ) τμημάτων (ψαμμιτικού υποβάθρου).

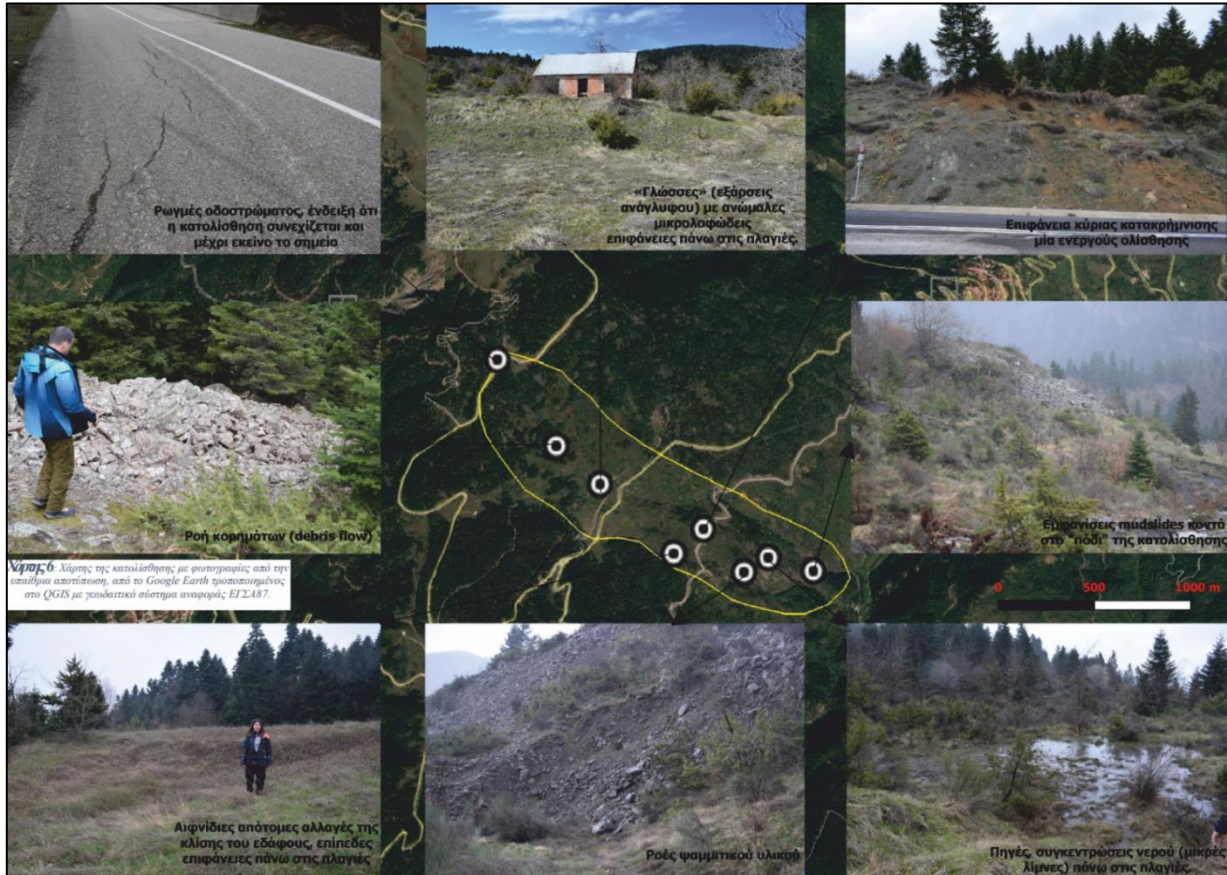
Τέλος, η επίδραση της κατολίσθησης στην αύξηση του πλάτους του δακτυλίου ανάπτυξης των δειγμάτων ελάτης ήταν εμφανής στις χρονικές περιόδους, 1933–1935, 1950–1956, 1981–1988 και 1993–2001, για τις οποίες εντοπίστηκαν ξαφνικές μειώσεις της ανάπτυξης (καταστολή) των δέντρων, και συνδέθηκαν με περιόδους εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων.

4.6.5. Αποτύπωση κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής Ράχη Τυμφρηστού με την χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV)

Η πιο πρόσφατη απόπειρα αποτύπωσης, έγινε το 2018 στα πλαίσια άλλης διπλωματικής εργασίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, όταν η περιοχή ερευνήθηκε ξανά, αυτή την φορά με τη χρήση μη επανδρωμένου αεροχήματος UAV, με στόχο την αποτύπωση των ορίων μιας ενιαίας σύνθετης κατολίσθησης, μεγαλύτερης σε έκταση σε σχέση με παλιότερες αποτυπώσεις και αποτελούμενης από πολλές μικρότερες ολισθήσεις (Δανδίκας, 2018). Στόχος εκείνης της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η σύγκριση των ευρημάτων κίνησης με τοπογραφικές αποτυπώσεις του παρελθόντος.

Κατά την έρευνα αυτή του 2018, κατασκευάστηκε ένας ψηφιακός χάρτης σε περιβάλλον Google Earth όπου απεικονίζονται τα όρια της κατολίσθησης και οι ενδείξεις των κατολισθητικών φαινομένων μέσα από φωτογραφίες που λήφθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις κατά την υπαίθρια χαρτογράφηση.

Εν συνεχεία, έγινε σύγκριση των νέων ορίων της κατολίσθησης με προηγούμενες οριοθετήσεις που είχαν γίνει στο παρελθόν, επισημαίνοντας το γεγονός πως η κατολίσθηση εξελίσσεται με το πέρασμα του χρόνου και πως η έκταση των υλικών κατολίσθησης αυξάνεται τόσο σε μήκος όσο και σε πλάτος.



Εικόνα 4.29 Χάρτης ορίων της κατολίσθησης και φωτογραφίες από την υπαίθρια αποτύπωση (από Δανδίκια, 2018).

4.6.6. Εκτίμηση γεωτεχνικών ιδιοτήτων της ευρύτερης βραχώμαζας στη περιοχή Ράχη Τυμφρηστού

Στη περιοχή Ράχη Τυμφρηστού, εξαιτίας του μεγάλου υψόμετρου, της κακής βατότητας και των πολλαπλών ελιγμών του υφιστάμενου οδικού δικτύου, καθώς και τις συχνές διακοπές της κυκλοφορίας λόγω δυσμενών καιρικών και εν συνόλω περιβαλλοντικών συνθηκών για μεγάλα διαστήματα της χειμερινής περιόδου (χιονοπτώσεις, κατολισθήσεις), σχεδιάστηκε ένα νέο οδικό δίκτυο που παρακάμπτει τις υψομετρικές θέσεις της περιοχής και τα προβλήματα που επικρατούν εκεί, με μια σήραγγα διπλής κατεύθυνσης 1400 m που διέρχεται μέσα από τον ορεινό όγκο της περιοχής Ράχη Τυμφρηστού.

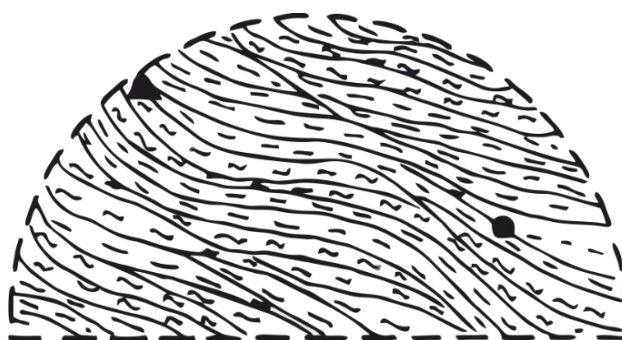
Η ολοκλήρωση της κατασκευής της σήραγγας ήταν αναγκαία και επείγουσα. Παρουσιάζονται δε ιδιαίτερα μεγάλα προβλήματα, λόγω του έντονου αναγλύφου της περιοχής, των δυσμενών γεωλογικών, κλιματολογικών (χιόνια, παγετός) και των εν γένει ευαίσθητων περιβαλλοντικών συνθηκών. Η σήραγγα ξεκίνησε να κατασκευάζεται το 1991 και ολοκληρώθηκε το έτος 2000, έχει διάμετρο 10 m περίπου και είναι κατασκευασμένη εντός του γεωλογικού σχηματισμού του φλύσχη της ζώνης Ωλονού – Πίνδου.



Εικόνα 4.30 Η σήραγγα Τυμφρηστού σε περιβάλλον Google Earth. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η υπό εξέταση κατολίσθηση, με πράσινο η πρώτη οριοθέτηση της κατολίσθησης το 1996 και με αστεράκια οι θέσεις του γεωερευνητικού προγράμματος 15 γεωτρήσεων που εκτελέστηκε για την μελέτη της. Τέλος, στην εικόνα φαίνονται 2 φωτογραφίες η μία από την είσοδο και η άλλη από την έξοδο της σήραγγας (Φωτογραφίες από τον συγγραφέα).

Από την μελέτη της περιοχής κατά το διάστημα των εργασιών κατασκευής της σήραγγας, εκτιμήθηκε ύστερα από γεωλογική έρευνα, ότι η σήραγγα είναι τοποθετημένη σε σχηματισμούς που αποτελούνται κυρίως από εναλλαγές φυλλοειδών αργιλικών σχιστολίθων χαμηλής αντοχής και συνεκτικών έως ισχυρών ιλυολίθων, κατά τόπους διαστρωμένων με φακούς ψαμμιτοπαγούς και μικρολατυτοπαγούς πολύ χαμηλής αντοχής.

Τεκτονικά όλος ο σχηματισμός εμφανιζόταν έντονα πτυχωμένος και καταπονημένος από πτυχωσιγενείς μικροεπιπέυσεις, αποκολλήσεις λεπίων και διαρρήξεις. Από πλευράς βαθμού εξαλλοίωσης όλες σχεδόν οι ασυνέχειες του αργιλικού σχιστολίθου εμφανίστηκαν εξαλλοιωμένες και είχαν μετατραπεί σε αργιλικό υλικό. Τα ανοίγματα των ασυνεχειών εκτιμήθηκαν της τάξης από 0 – 3 cm ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε και ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης (Κωστόπουλος et al., 1996).



Εικόνα 4.31 Τυπική διατομή σχηματισμού φλύσχη, αποτελούμενο από ιλυόλιθο με πυκνές παρεμβολές αργιλικού σχιστολίθου, μέσα στη σήραγγα Τυμφρηστού (από Kontogianni et al., 2016).

Στα πλαίσια της γεωτεχνικής έρευνας της σήραγγας εκτελέστηκε γεωερευνητικό πρόγραμμα γεωτρήσεων και κρίθηκε αναγκαία η συστηματική ανά μέτρο μήκους καταγραφή της στρωματογραφίας, των ασυνεχειών και του δείκτη ποιότητας του πετρώματος RQD. Οι τιμές του δείκτη RQD ήταν εξαιρετικά χαμηλές, κυμαινόμενες από 0 – 60%, και η ποιότητα της βραχόμαζας χαρακτηρίστηκε κατά Deere (1963) από πτωχή έως πολύ πτωχή.

Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος εκτιμήθηκε μέσω της εκτέλεσης δοκιμών σημειακής φόρτισης που εκτελέστηκαν επί τόπου στην περιοχή και από ορισμένες δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Βάσει των αποτελεσμάτων των παραπάνω δοκιμών και σε συνδυασμό με το βαθμό εξαλλοίωσης που του άρρηκτου βράχου, εκτιμήθηκαν 4 ομάδες αντοχής με χαρακτηριστικές τιμές μονοαξονικής θλίψης 9, 31, 72 και 169 MPa.

Παράλληλα, κατά την έρευνα της περιοχής της σήραγγας εκτελέστηκαν επί τόπου δοκιμές υδροπερατότητας, τα αποτελέσματα των οποίων έδειξαν ότι ο συντελεστής διαπερατότητας ήταν της τάξης του 10^{-4} έως 10^{-3} (cm/sec) ανεξαρτήτως βάθους, υποδεικνύοντας το κατακερματισμένο χαρακτήρα της βραχόμαζας.

Τέλος, σύμφωνα με τα παραπάνω η ποιότητα της βραχόμαζας στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού ταξινομήθηκε κατά την ταξινόμηση RMR του Bieniawski (1989) ως "Κακής" ποιότητας βραχόμαζα Κατηγορίας IV (24 – 31) και χαρακτηρίστηκε με ένα υπό γενική διερεύνηση πλαίσιο αντοχών με παραμέτρους:

$$c = 0,1 - 15 \text{ MPa} \text{ και } \varphi = 15 - 30^\circ$$

4.7. Συμπεράσματα ανάλυσης συνθηκών ευρύτερης περιοχής

Απ' όσα αναφέρθηκαν με λεπτομέρεια, στο παρόν κεφάλαιο για το συνολικό εύρος της περιοχής μελέτης προκύπτουν τα εξής σημαντικά συμπεράσματα:

1. Γεωμορφολογικά η ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι έντονα ορεινή με ισχυρές και τοπικά απότομες κλίσεις φυσικών πρανών.
2. Γεωλογικά η περιοχή δομείται από φλύσχη της Ζώνης της Πίνδου, ο οποίος λιθολογικά αποτελείται κυρίως από εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών. Τοπικά μπορεί να υπερτερούν οι ψαμμίτες ή η ιλυόλιθοι.
3. Τεκτονικά ο φλύσχης είναι πτυχωμένος. Εντονότερα είναι ο ιλυολιθικός και ασθενέστερα ο ψαμμιτικός φλύσχης.
4. Επιφανειακά ο φλύσχης εμφανίζεται έντονα αποσαθρωμένος και κατακερματισμένος μέχρι και βάθος 5 m. Επίσης τοπικά μπορεί να είναι καλυμμένος με πλευρικά κορήματα και αποσαθρώματα πάχους περίπου 2 – 4 m, τα οποία γενικά βρίσκονται σε ευαίσθητη κατάσταση ισορροπίας.
5. Υδρολιθολογικά ο φλύσχης στο σύνολο του είναι σχεδόν αδιαπέρατος, με εξαίρεση την επιφανειακή χαλαρωμένη και κερματισμένη ζώνη του, βάθους 10 – 20 m, που είναι ημιπερατή έως περατή και στην οποία αναπτύσσονται εποχικοί επικρεμάμενοι υδροφόροι

ορίζοντες. Υδροπερατές χαρακτηρίζονται και οι επιφανειακές αποθέσεις (κορήματα, αποσαθρώματα), καθώς και οι αλλουβιακές αποθέσεις της κοίτης.

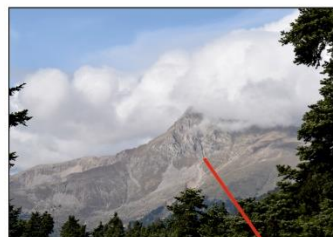
6. Η διάβρωση είναι ιδιαίτερα ισχυρή κατά μήκος της κοίτης των χειμάρρων της περιοχής. Η επιφανειακή διάβρωση είναι μικρή σε περιοχές με έντονη φυτοκάλυψη, ενώ αναμένεται ισχυρή στις γυμνές από βλάστηση περιοχές.
7. Λόγω του ισχυρού ανάγλυφου, των πολλών βροχοπτώσεων, της τάξεως των 1380 mm ανά έτος, του ισχυρού κερματισμού και αποσάθρωσης της επιφανειακής ζώνης του φλύσχη, της ύπαρξης χαλαρών πλευρικών κορημάτων και αποσαθρωμάτων, καθώς και της ισχυρής διάβρωσης, τα φυσικά πρανά της περιοχής γενικά δεν είναι ιδιαίτερα σταθερά.
8. Στο ΒΔ πρανές της περιοχής Ράχη Τυμφρηστού (ανάμεσα στη σήραγγα και στο χωριό Τυμφρηστός) εντοπίζεται μια εκτεταμένη ζώνη αστάθειας, αποτελούμενη από πολλές ενεργές ή μη κατολισθήσεις, από παλαιοκατολισθήσεις, από ζώνες ερπυσμού και πλευρικά κορήματα, όπου πολλά τμήματα της βρίσκονται είτε σε οριακή κατάσταση ισορροπίας είτε ενεργοποιούνται σταδιακά.
9. Παρόλα αυτά, πολλά τμήματα της δεν είναι αμέσως προφανή ως προς την πιθανή ενεργοποίησή τους, και η αστοχία του εδάφους δεν συμβαίνει σε τακτική βάση.
10. Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες που επιτελέστηκαν, για την κατασκευή της σήραγγας Τυμφρηστού, στην περιοχή, η ποιότητα του φλυσχικού υποβάθρου στην ευρύτερη περιοχή Ράχη Τυμφρηστού, μπορεί να ταξινομηθεί, κατά την ταξινόμηση RMR του Bieniawski (1989), ως μια "Κακής" ποιότητας βραχώμαζα Κατηγορίας IV (24 – 31) που χαρακτηρίζεται από ένα υπό γενική διερεύνηση πλαίσιο αντοχών με παραμέτρους:

$$c = 0,1 - 15 \text{ MPa και } \phi = 15 - 30^\circ.$$

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, βάσει της ανωτέρω, παραπάνω ανάλυσης και σε συνδυασμό με τις υπαίθριες και επιτόπου παρατηρήσεις των αυτοψιών στο πεδίο, κατασκευάστηκε ένα συνοπτικό εννοιολογικό προσομοίωμα (Conceptual model) της ευρύτερης περιοχής όπου παρουσιάζονται οι βασικές συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. (Το εν λόγω εννοιολογικό προσομοίωμα παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 22**).



Αλλουβιακά ριπίδια: Κώνιοι κλαστικών υλικών εντός κοιλάδος. Στην φωτογραφία φαίνεται το αλλουβιακό ριπίδιο του Καρπενησιού που βρίσκεται λίγα χιλιόμετρα Ανατολικά της ερευνηθείσας περιοχής.



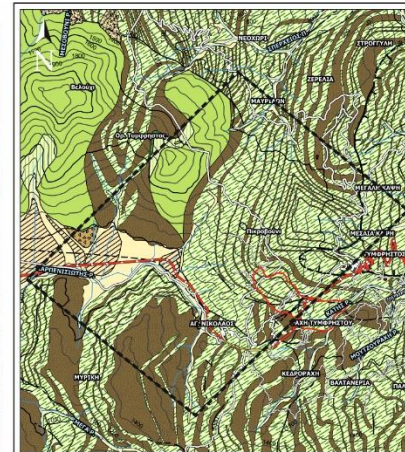
Ασβεστολίθιο (Κα): πελαγικό, πλακώδες του Άνω Κρητικού. Αποτελούν το υπόβαθρο της υπό εξέταση περιοχής.



Φωμμητικός φλόγος (Fr): ο σχηματισμός εμφανίζεται στην ευρύτερη περιοχή με διαφορετικούς χαρακτηριστικούς τύπους. Άλλοτε ως εναλλαγές μεσοστρωματιδίων φωμμητών και λεπτοστρωματιδίων ιλυολιθίων - αργιλικών σχοστιθίων, και άλλοτε ως μεσοστρωματιδείς - ποχιστρωματιδείς φωμμητές με λεπτές περιβόλους ιλυολιθίων. Σε σημαντικά τοπικά τμήματα ο φλόγος της περιοχής καλύπτεται από ηλιμερικά κομμάτια φωμμητικής ουσίας, τα οποία συνήθως είναι προσβεβλημένα και με μικρο ποσότητα αργιλικών. Μια άλλη χαρακτηριστική εμφάνιση που σχηματίζεται αυτού τον τύπο στην περιοχή της καταλισθήσης είναι αυτής, σε άμεση γειτνίαση με το δικό όρα της και κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα φλογικό σχηματισμό αποτελούμενο από εναλλαγές μεσοστρωματιδίων φωμμητών και έντονα αποσβεσμένων ιλυολιθίων, όπου οι φωμμητές εμφανίζονται με μια κρεμμυδαδιά σφαιρική μορφή ως αποτέλεσμα της έντονης θερμοκρασιακής μεταβολής που προκαλεί την αποψάλωση των πετρωμάτων (διαδοκία αποσβεσμού).



Ιλυολιθικός φλόγος (Fr): καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της ευρύτερης περιοχής και αποτελείται κυρίως από λεπτοστρωματιδείς ιλυολιθούς έως και σχοστιθικούς αργιλικούς στους οποίους παραβλάσκονται και λεπτές ενσφαιρωτές λεπτοστρωματιδείς φωμμητές. Ο σχηματισμός αυτός είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις διαταραχές της αποσβεσμού και της διαβρωσης και γι' αυτό είναι συχνά επιφανειακά κομμάτια από αργιλική αποσβεσμού και κρημμάτια. Όταν τα υλικά αυτά κοσσοθούν με νερό έρχονται προς το κατώτερο ή ακόμη και κατακοσσοθούν. Τα όρα που σχηματίζονται κάτω από τον επιφανειακό μόνον αποσβεσμού είναι γενικά ασταθή.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Α. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ ΟΣΟΚΙΝΟ

Lan Υλικά καταλισθήσης: άμμος, ασταχόκοκκοι, μελινοχρωμα, χηλιδιές (γεωμόρφωση και στίγματα ιλυολιθίου) τοπικά αμυδαίες.

Qa1f Αποσβεστικά κοιλώδη: άργιλοι, άμμοι, γάλλες μέσα σε κέρα κοιλώδη. Κώνιοι κλαστικών υλικών σε δευτερεύουσα κοιλώδη. (Σύγχρονες αποσβεσ. Κάτω Ολόκαινο)

ΠΛΕΙΣΤΟΚΙΝΟ

As Ασβεστολιθικά Λατυποπηλάκια: συσκαλιμένα με χαμηλές κλίσεις του οριζικού όγκου του Τυμφρηστού.

ΣΕΙΡΑ ΠΙΝΩΔΩ (ΚΑΤΩ ΤΡΙΤΟΓΕΝΕΣ - ΑΝΩ ΚΡΗΤΙΚΟ)

Fr Φλόγος: Αργιλοί και Ιλυολιθοί: εν μέρει σε συχνές εναλλαγές με λεπτά στρώματα κρημνιστά. Επίσης, με εντοπισμένες ερυθρών αργιλικών σχοστιθίων και στίγματα μελινοχρωμ (ή και με περιβόλους οσβεσμένων ΟΣ).
Fr Φλόγος: Γρανοβάκες, φωμμητές και λεπτομερή κροκοσταγή με περιβόλους σχοστιθίων.

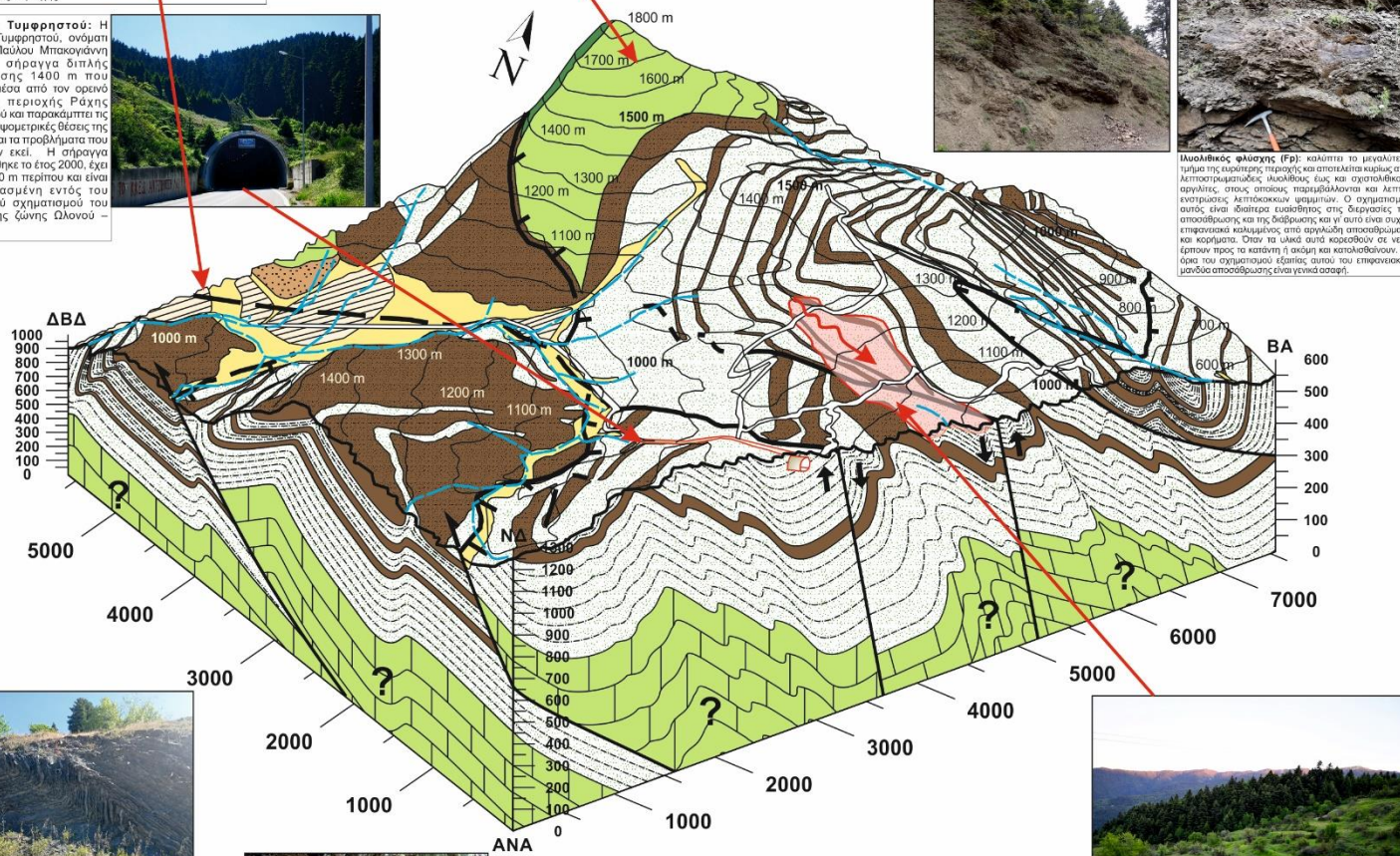
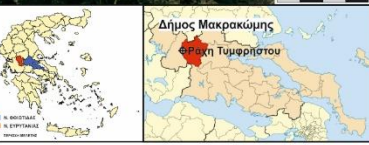
Ka Πελαγικό ασβεστολίθιο: πλακώδες συμπυκνός με εντοπισμένες κροκοσταγές, σε συχνές εναλλαγές με κλαστικούς μικρολυτοπηλάκιους έως μικροκροκοσταγές ασβεστολίθους.

ΚΑΤΩ ΚΡΗΤΙΚΟ - ΙΟΥΡΑΙΚΟ

Nh Ροδιολιθίτες: ποικιλοχρωμα, ερυθροί, πράσινοι ή φαιοί και ερυθροί σχοστιθίοι της σχετοκερατολιθικής διάταξης (β-Κα). Επίσης, παρενσφαιρωμένοι, πελαγικοί, στίγματα, θραυστοκομμάτια και ωχρόινα ασβεστολιθία ποικίλου πάχους (1-4). Πάχος μεγαλύτερο των 800 m. Το ανώτερο μέρος συνιστάται από εναλλαγές από ερυθρούς πυρηνικούς ασβεστολιθούς, φωμμητικούς ασβεστολιθούς, πράσινους μελινοχρωμ φωμμητές, μέρες και ερυθρούς αργιλικούς σχοστιθικούς (Πρώτος φλόγος της Πίνωδω). Πάχος 5-40 m.

Β. ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

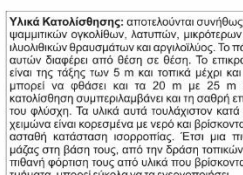
- Γεωλογικό όρα
- Ρήγμα ορατό
- Ρήγμα πιθανό
- Επιπτώση ορατή
- Επιπτώση πιθανή
- Υδρογραφικό δίκτυο
- Ισοβάεις
- Οδικό δίκτυο
- Σήραγγα Τυμφρηστού
- Ισοδιάσταση: 100 m



Τεκτονική: η ευρύτερη περιοχή μελέτης κατά τη διάρκεια της Αλτικής Ορογένεσης υπέστη μια έντονη πτωχονητική τεκτονική που προκάλεσε αλτατάλλες πιέσεις (οριζόντιες, οριζόντιες), οι οποίες στην συνέχεια αποκαλύφθηκαν, ερπίτευθηκαν και επωθήθηκαν με κυρίαρχη διεύθυνση κίνησης από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι άξονες των πτυχών έχουν διεύθυνση κυρίως Β-Ν έως ΒΒΔ - ΝΝΑ με συχνές, όμως σημαντικές αποκλίσεις από την κυρίαρχη αυτή διεύθυνση. Επίσης της συμμετρικής διαμόρφωσης (φωμμητές) και εκκρίτων (ιλυολιθίων, αργιλικών σχοστιθίων) πετρωμάτων με διαφορετική συμπεριφορά έναντι των πτωχονητικών δυνάμεων προκλήθηκαν τοπικά έντονες διαταραχές μικροπυκνωτές διαταραχές έως και μακροπυκνωτές. Μετά την πτωχονητική τεκτονική ακολουθήσει ερήνευσης τεκτονική η οποία έδωσε αργά μετώπιση με διεύθυνση ΒΒΑ - ΝΝΑ έως και Α - Δ. Τα ρήγματα αυτά, λόγω της κυριαρχίας του φλόγος, δεν είναι ασταθή και λόγω της διακοιλωμένης δεν ενεργοποιεί.



Υλικά Καταλισθήσης: αποτελούνται συνήθως από ένα μείγμα φωμμητικών ογκολιθίων, λατυπιών, μικρότερων φωμμητικών και ιλυολιθικών θραυσμάτων και αργιλικών. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση. Το επικρατέστερο πάχος είναι της τάξης των 5 m και τοπικά μέχρι και 8 m, ενώ αυτό μπορεί να φθάσει και τα 20 m με 25 m κυρίως όταν η καταλισθήση συμμετρίζεται και τη σαφή επιφανειακή ζώνη του φλόγος. Τα υλικά αυτά τουλάχιστον κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι κορεσμένα με νερό και βρίσκονται σε οριακή έως ασταθή κατάσταση ισορροπίας. Έτσι μια πιθανή αφαίρεση μάζας στη βάση τους, από την δράση τοπικών ρεμάτων, ή μια πιθανή φόρτιση τους από υλικά που βρίσκονται σε υψηλότερα τμήματα, μπορεί εύκολα να τα ενεργοποιήσει.



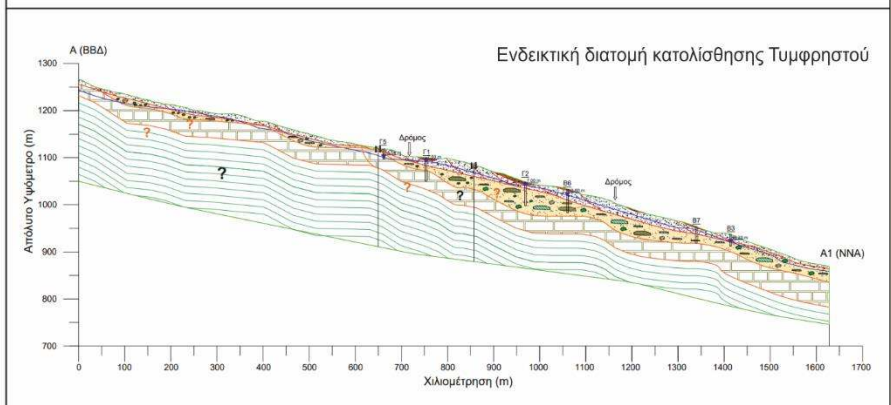
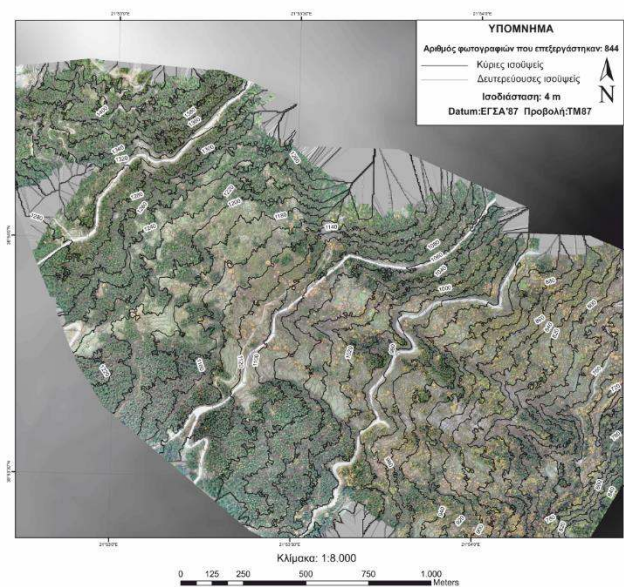
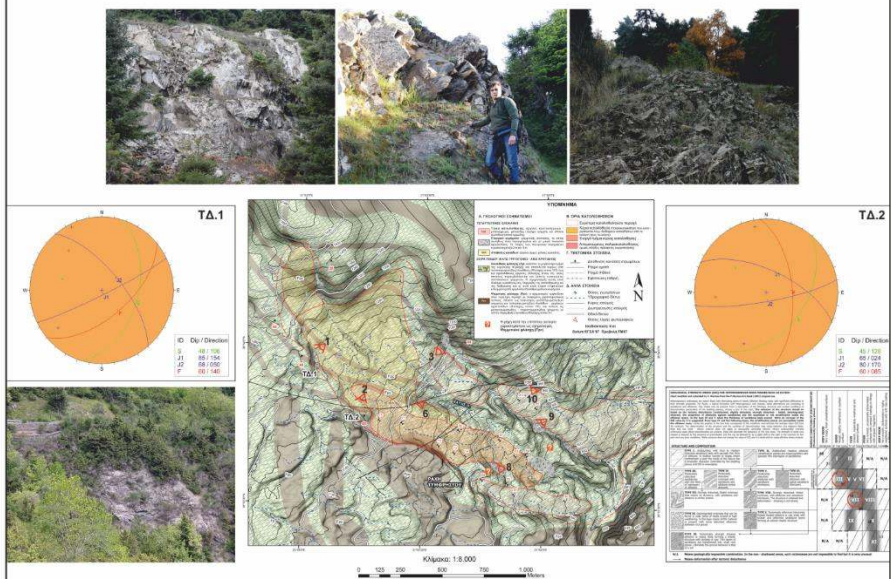
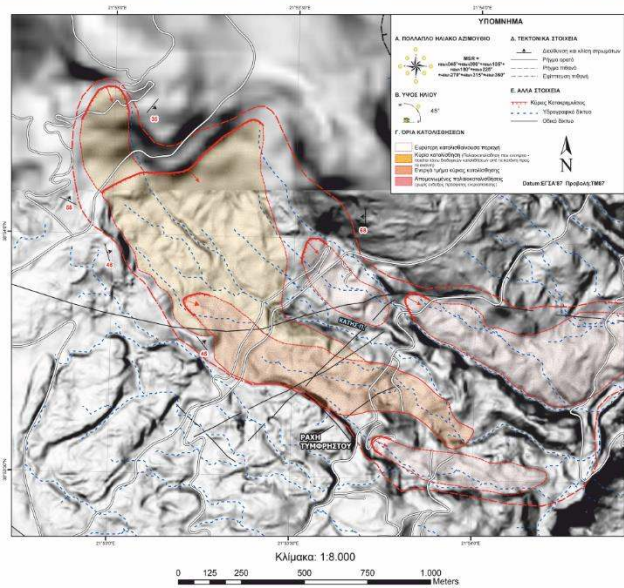
Καταλισθήση Τυμφρηστού: πρόκειται για μια καταλισθαιούσα περιοχή και όχι για μια μεμονωμένη ενιαία καταλισθήση. Ουσιαστικά, η περιοχή αποτελεί μια ευρεία ζώνη αποσβεσμού, όπου μεγάλα τμήματα των φωμμητικών κλάστων της βρίσκονται είτε σε οριακή κατάσταση ισορροπίας, είτε εμφανίζουν παλιές και νέες ενεργές ολισθήσεις με ταυτοχρόνια φαινόμενα ερπυσμού.

Εικόνα 4.32 Εννοιολογικό προσομοίωμα ευρύτερης περιοχής.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στέψη κύριας κατολίθησης: Πιθανώς το ανώτερο τμήμα της κύριας κατολίθησης καθώς δεν εντοπίστηκαν άλλες ενδείξεις κατολισθητικών φαινομένων πάνω από αυτό το σημείο.



5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

A. Σκοπός

Σκοπός όλων των εργασιών και αναλύσεων που επιτελέστηκαν για την τεχνικογεωλογική έρευνα της περιοχής μελέτης, αποτέλεσε:

- 1) Η δημιουργία νέου τοπογραφικού χάρτη της περιοχής, πάνω στον οποίο αποτυπώνονται η υφιστάμενη μορφολογία και οι κατολισθήσεις της περιοχής.
- 2) Η αναθεώρηση της διαθέσιμης γεωλογικής πληροφορίας της περιοχής.
- 3) Η έρευνα και ο εντοπισμός ελλείψεων στα δεδομένα για την επίτευξη των παραπάνω σκοπών.

B. Μεθοδολογία

5.1. Ερευνητικό πλαίσιο και στάδια μεθοδολογίας της έρευνας

Με την ανάθεση της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε άμεσα ο προγραμματισμός αξιολόγησης της ερευνηθείσας περιοχής, έτσι ώστε να καθοριστεί το γενικό πλαίσιο της έρευνας του φαινομένου, τόσο με εργασίες γραφείου, όσο και με επιτόπου αυτοψία στο πεδίο, προκειμένου να αναζητηθούν, συν τω χρόνω, "σκιές" και κενά στα συλλεχθέντα δεδομένα.

Η πρώτη επίσκεψη στο πεδίο επιτελέστηκε την περίοδο Νοεμβρίου 2019. Κατά την επίσκεψη αυτή εκτελέστηκε μια πρώτη αναγνωριστική χαρτογράφηση πεδίου, όπου επισημάνθηκαν και αξιολογήθηκαν διάφορες αστοχίες και σημάδια ύπαρξης κατολισθήσεων. Παράλληλα, εκτός από τις εργασίες της επιτόπιας έρευνας και έχοντας ως στόχο την απόκτηση δεδομένων υψηλής ανάλυσης που θα σκιαγραφήσουν την μορφολογία του εδάφους, εκτελέστηκε μια σειρά σαρώσεων της στενής περιοχής μελέτης με την χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους UAV, του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης αυτοψίας στο πεδίο, οι εργασίες που ακολούθησαν προσανατολίστηκαν κυρίως στην οπτική ανάλυση και επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων υψηλής ανάλυσης (HD) του Νοεμβρίου 2019. Λόγω ότι τα δεδομένα πρωτογενούς αναφοράς περιορίζονταν στο στενό χρονικό διάστημα ενός έτους, αναζητήθηκαν και συγκεντρώθηκαν πρόσθετα ψηφιακά δεδομένα από παλαιότερες σαρώσεις της περιοχής, τις περιόδους Μαρτίου του 2018 και Ιουλίου του 2019, ενώ παράλληλα εκτελέστηκε μια ακόμα πτήση του αεροσκάφους στη περιοχή τον Νοέμβριο του 2020. Επιπλέον, αναζητήθηκε από την Εθνική Υπηρεσία Κτηματολογίου Ελλάδος, το ψηφιακό μοντέλο της περιοχής όπως αυτή αποτυπώθηκε, με τεχνικές με λέιζερ ALS (Airborne Laser Scanning), το έτος 2007.

Στη συνέχεια και διαθέτοντας πλέον ένα σύνολο πέντε ψηφιακών μοντέλων ως δεδομένα, εξετάστηκαν ποιοτικά αλλά και με την βοήθεια εξειδικευμένων λογισμικών, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, οι διαχρονικές αλλαγές της μορφολογίας του εδάφους, συνθέτοντας παράλληλα μια νέα ψηφιακή βάση δεδομένων αποτελούμενη από αναλυτικούς θεματικούς χάρτες, μεγάλης κλίμακας, που επέτρεψαν στη συνέχεια της έρευνας την αναλυτικότερη και πιο στοχευμένη εργασία στο πεδίο.

Η τελική πολυήμερη έρευνα στο πεδίο εκτελέστηκε το Μάιο του 2021 και αποσκοπούσε στη συλλογή όλων των διαθέσιμων πολύτιμων δεδομένων σχετικά με τις γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές ιδιότητες του υπεδάφους αλλά και των χαρακτηριστικών εκείνων που σχετίζονται άμεσα και έμμεσα, με την αξιολόγηση της ευστάθειας του εδάφους στην περιοχή μελέτης.

Η συνεισφορά της πρότερης ανάλυσης και επεξεργασίας των ψηφιακών μοντέλων του εδάφους της περιοχής, υπήρξε καθοριστική στην επιτόπου αναγνώριση και αποτύπωση των κατολισθητικών φαινομένων, τα αποτελέσματα της οποίας επαληθεύτηκαν κατά έναν αποδεκτό βαθμό στο πεδίο, συμβάλλοντας στην χειραφέτηση της χρησιμότητας της μεθόδου έρευνας χρήση συστημάτων μη επανδρωμένων εναέριων αεροσκαφών UAV, ως χαμηλού κόστους εναλλακτική μέθοδο για την αποτελεσματική παρακολούθηση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.

Απώτερος σκοπός των παραπάνω εργασιών ήταν ο εντοπισμός, η κατηγοριοποίηση και η αποτύπωση όλων των πληροφοριών που σχετίζονται με κατολισθητικά φαινόμενα και τελικά η πύκνωση τους σε έναν τελικό τοπογραφικό χάρτη αποτύπωσης κατολισθήσεων.

Λόγω του μεγάλου αριθμού παραγόντων που επηρεάζουν την παρακάτω ανάλυση, και προκειμένου την οικονομία χώρου και έκτασης αλλά και κυρίως για την διατήρηση της νοηματικής συνοχής της μελέτης, τα εξειδικευμένα μεθοδολογικά βήματα για κάθε έναν από αυτούς παρουσιάζονται ομαδοποιημένα μαζί με τα αποτελέσματα και την ερμηνεία τους σε μια ομογενοποιημένη αφήγηση απρόσκοπτης ροής.

Γ. Προπαρασκευαστικές εργασίες

5.2. Προσέγγιση με την χρήση εναέριων συστημάτων UAV

5.2.1. Πρωτογενή ψηφιακά δεδομένα – Μεθοδολογία κατασκευής ψηφιακών μοντέλων εδάφους

Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν με την χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV), αποτελούν ουσιαστικά ένα σύνολο αλληλοκαλυπτόμενων φωτογραφιών, υψηλής ανάλυσης (HD), της ερευνηθείσας περιοχής. Οι φωτογραφίες αυτές εισήχθησαν στο ειδικό λογισμικό Pix4D mapper και μέσω της εφαρμογής φωτογραμμετρίας Structure from Motion (SFM), ενώθηκαν και συνέθεσαν γεωαναφερμένα ορθομοσαϊκά και ψηφιακά μοντέλα εδάφους υψηλής ανάλυσης HRDEM (High Resolution Digital Elevation Models), απεικονίζοντας την περιοχή σε αρχεία μορφής Raster (μορφή εικόνας) και Point Cloud (τρισδιάστατο νέφος σημείων) για κάθε εξεταζόμενο έτος αντίστοιχα.

Τα τελικά ψηφιακά μοντέλα, στις προαναφερθείσες μορφές αρχείων, μαζί με το σχέδιο πτήσης και τα στοιχεία της κάθε μιας σάρωσης που εκτελέστηκαν στο διάστημα 2018 – 2020. Αυτά καθώς και τα αντίστοιχα του ψηφιακού μοντέλου της περιοχής για το έτος 2007, παρουσιάζονται παρακάτω.

5.2.2. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του 2018

Η ψηφιακή σάρωση της περιοχής το Μάρτιο του 2018, εκτελέστηκε στα πλαίσια άλλης διπλωματικής εργασίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Δανδίκας, 2018) με την χρήση πλατφόρμας UAV, μοντέλου DJI Phantom 3 Professional, που αποτύπωσε ένα τμήμα, εντός της ευρύτερης κατολισθητικής περιοχής, με έκταση 0,436 km².

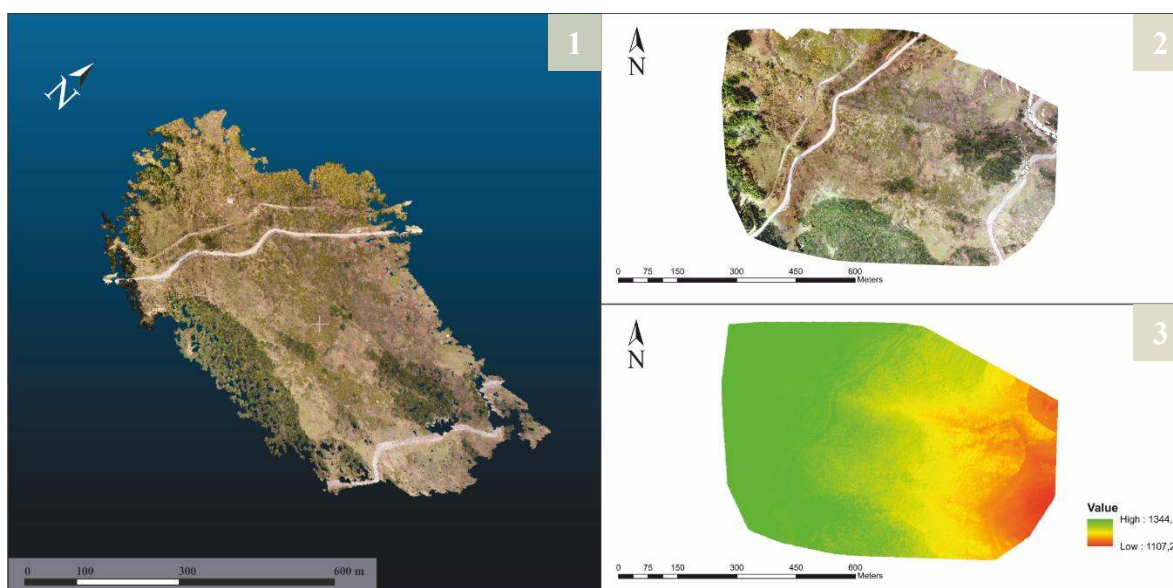
Από την πτήση αποκτήθηκαν 158 φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης, οι οποίες στη συνέχεια έλαβαν επεξεργασία σύμφωνα με την προαναφερθείσα μεθοδολογία προκειμένου την παραγωγή, του εν λόγω ψηφιακού μοντέλου εδάφους για το έτος 2018.



Εικόνα 5.1 Η πλατφόρμα UAV, τύπου DJI Phantom 3 Professional, που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση της περιοχής το έτος 2018.

Πίνακας 5-1 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Μαρτίου 2018.

ΟΝΟΜΑ ΣΑΡΩΣΗΣ	ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ ΜΑΡΤΙΟΣ 2018
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ	26-03-2018
ΕΚΤΑΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ	0.436 km ²
ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ	158
ΜΕΓΕΘΟΣ PIXEL	6.15 cm
RMS ERROR	x: 0.60, y: 0.50, z: 1.40 [cm]
ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	WGS 84 / UTM zone 34N [egm96]
ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	1 x 6.15 [cm/ pixel]



Εικόνα 5.2 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής το έτος 2018. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομοσαϊκός Χάρτης (DOM). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM).

5.2.3. Ψηφιακά μοντέλα εδάφους του 2019 – 2020

Οι ψηφιακές σαρώσεις της περιοχής, τις περιόδους 2019 και 2020, επιτελέστηκαν με την χρήση πιο σύγχρονης πλατφόρμας UAV, μοντέλου DJI Phantom 4 Pro V2.0.

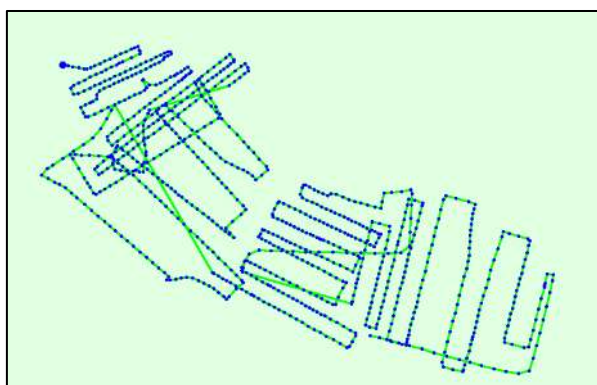


Εικόνα 5.3 Η πλατφόρμα UAV, τύπου DJI Phantom 4 Pro V2.0, που χρησιμοποιήθηκε για τις αποτυπώσεις της περιοχής τα έτη 2019 και 2020.

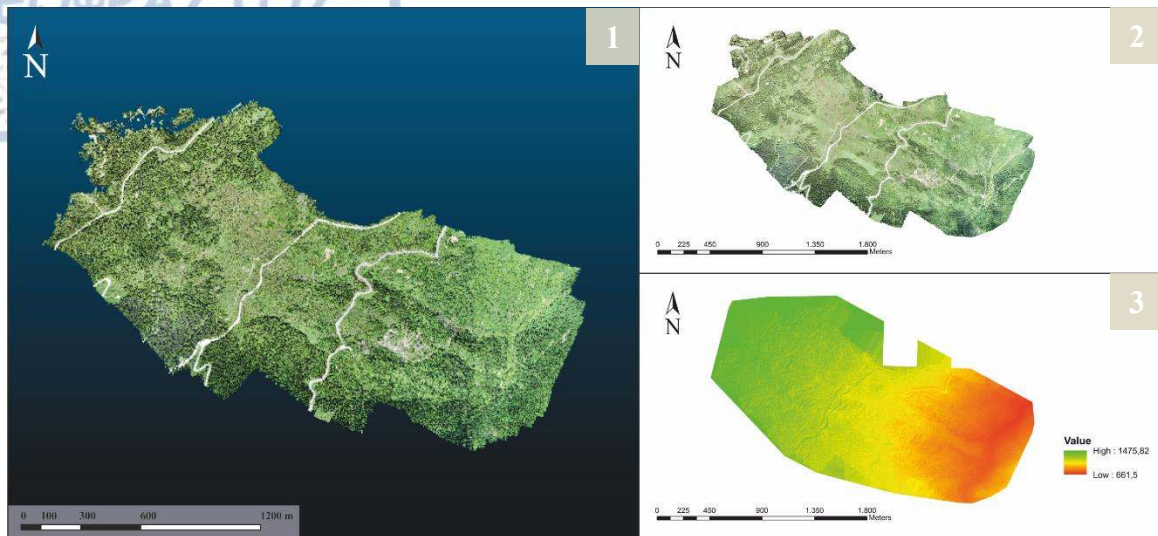
Την περίοδο Ιουλίου του 2019 στα πλαίσια επίσκεψης της ερευνηθείσας περιοχής, από τον υποψήφιο διδακτορικό φοιτητή, του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Ευστράτιο Καραντανέλλη, αποτυπώθηκε ένα μεγαλύτερο τμήμα της ασταθούς πλαγιάς, ήτοι 2,813 km² με ένα σύνολο 867 φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης (HD).

Πίνακας 5-2 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Ιουλίου 2019.

ΟΝΟΜΑ ΣΑΡΩΣΗΣ	ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ ΙΟΥΛΙΟΣ 2019
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ	09-07-2019
ΕΚΤΑΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ	2.813 km ²
ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ	867
ΜΕΓΕΘΟΣ PIXEL	5.88 cm
RMS ERROR	x: 0.60, y: 0.50, z: 2.25 [cm]
ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	WGS 84 / UTM zone 34N [egm96]
ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	1 x 5.88 [cm/ pixel]



Εικόνα 5.4 Σχέδιο πτήσης στη περιοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τις θέσεις των 867 φωτογραφιών. Η πράσινη γραμμή καθορίζει την πορεία που ακολουθήθηκε με αφετηρία την μεγάλη μπλε τελεία (από report της επεξεργασίας κατασκευής του ψηφιακού μοντέλου στο λογισμικό Pix4D mapper).

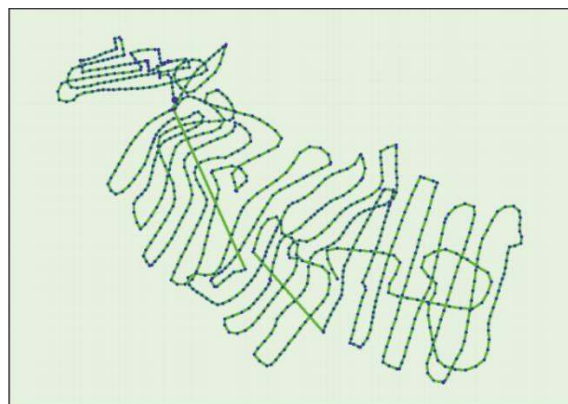


Εικόνα 5.5 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής τον Ιούλιο του 2019. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM).

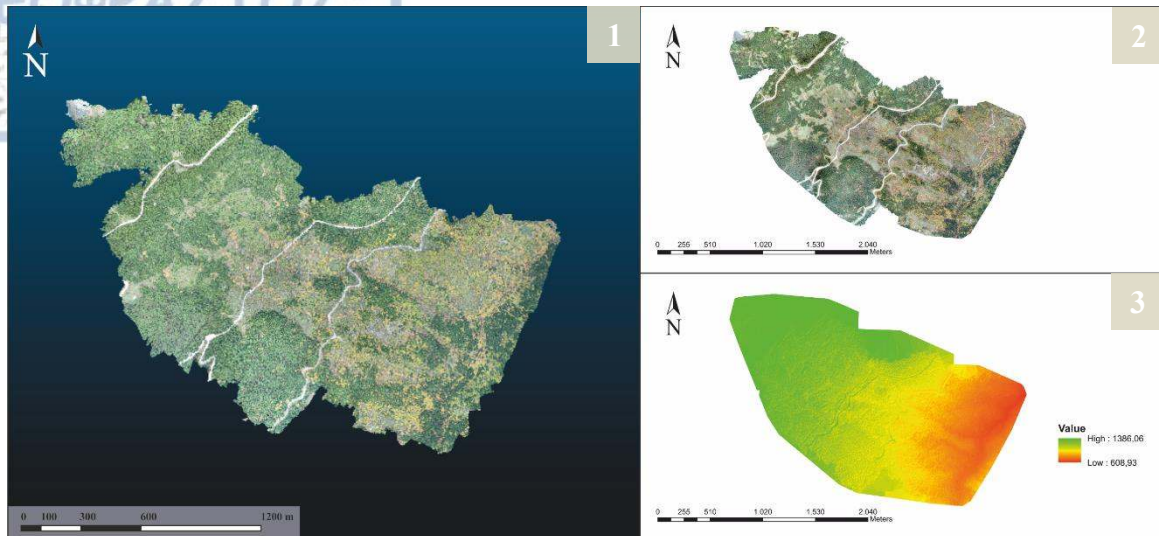
Λόγω της έντονης φυτοκάλυψης παρούσης στο σώμα του ψηφιακού μοντέλου της περιοχής, για την περίοδο Ιουλίου 2019, η ανάλυση και ο εντοπισμός των μορφολογικών χαρακτηριστικών που συνδέονται με κατολισθητικά γεγονότα ήταν ιδιαίτερα δυσχερής και για αυτό, την περίοδο Νοεμβρίου του 2019, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η εν λόγω περιοχή αποτυπώθηκε ξανά με ένα σύνολο 844 φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης, με χρήση της ίδιας πλατφόρμας UAV.

Πίνακας 5-3 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Νοεμβρίου 2019.

ΟΝΟΜΑ ΣΑΡΩΣΗΣ	ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2019
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ	30-11-2019
ΕΚΤΑΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ	3.441 km ²
ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ	844
ΜΕΓΕΘΟΣ PIXEL	6.25 cm
RMS ERROR	x: 0.90, y: 1.25, z: 1.28 [cm]
ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	WGS 84 / UTM zone 34N [egm96]
ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	1 x 6.25 [cm/ pixel]



Εικόνα 5.6 Σχέδιο πτήσης στη περιοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τις θέσεις των 844 φωτογραφιών. Η πράσινη γραμμή καθορίζει την πορεία που ακολουθήθηκε με αφετηρία την μεγάλη μπλε τελεία (από report της επεξεργασίας κατασκευής του ψηφιακού μοντέλου στο λογισμικό Pix4D mapper).

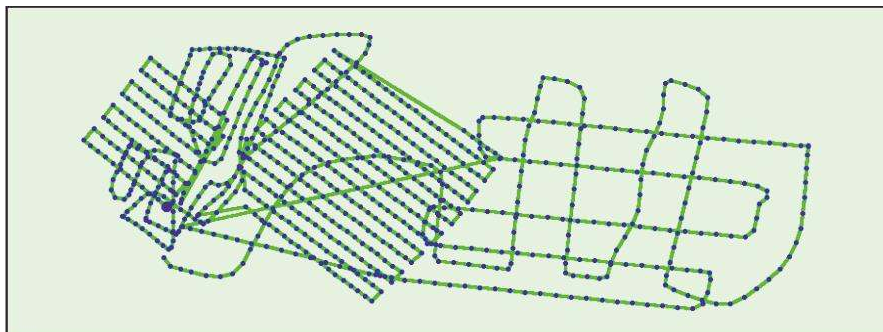


Εικόνα 5.7 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής τον Ιούλιο του 2019. **1)** Σε μορφή Point Cloud. **2)** Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM). **3)** Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM).

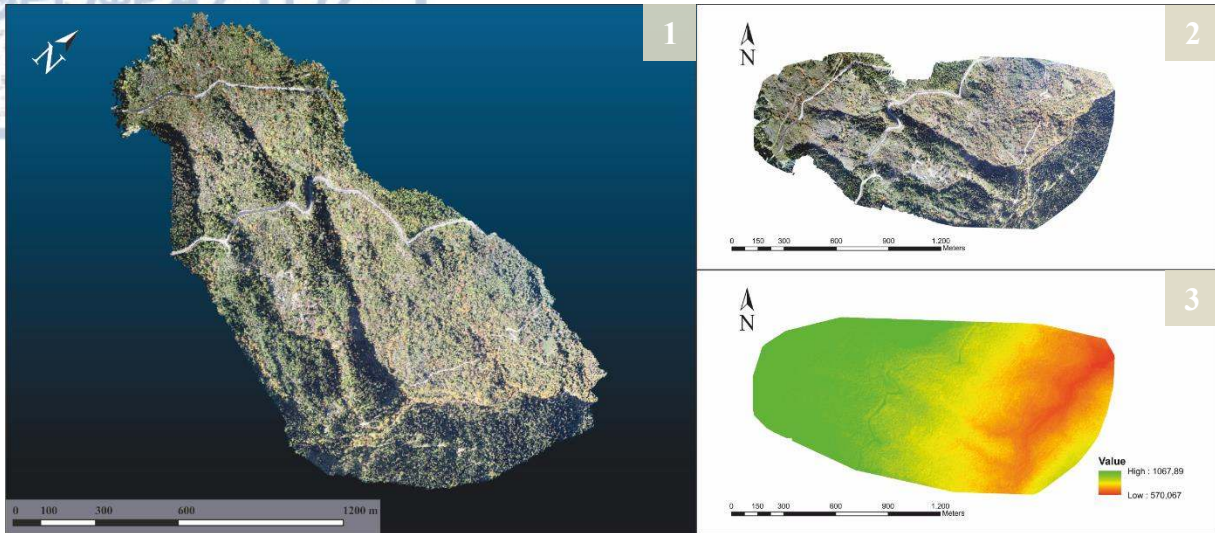
Τέλος, μετά από μια πρώτη επεξεργασία των τριών προαναφερθέντων ψηφιακών μοντέλων και αφού καθορίστηκε το γενικότερο πλαίσιο των κατολισθητικών διεργασιών της περιοχής, το Νοέμβριο του 2020 αποτυπώθηκε το κατ' εκτίμηση ενεργότερο τμήμα της ευρύτερης κατολισθητικής περιοχής, συνολικής έκτασης 1,612 km² με ένα σύνολο 835 φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης (HD).

Πίνακας 5-4 Στοιχεία σάρωσης της περιόδου Νοεμβρίου 2020.

ΟΝΟΜΑ ΣΑΡΩΣΗΣ	ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ	18-11-2020
ΕΚΤΑΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ	1.612 km ²
ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ	835
ΜΕΓΕΘΟΣ PIXEL	4.69 cm
RMS ERROR	x: 0.34, y: 0.77, z: 1.47 [cm]
ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	WGS 84 / UTM zone 34N [egm96]
ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	1 x 4.69 [cm/ pixel]



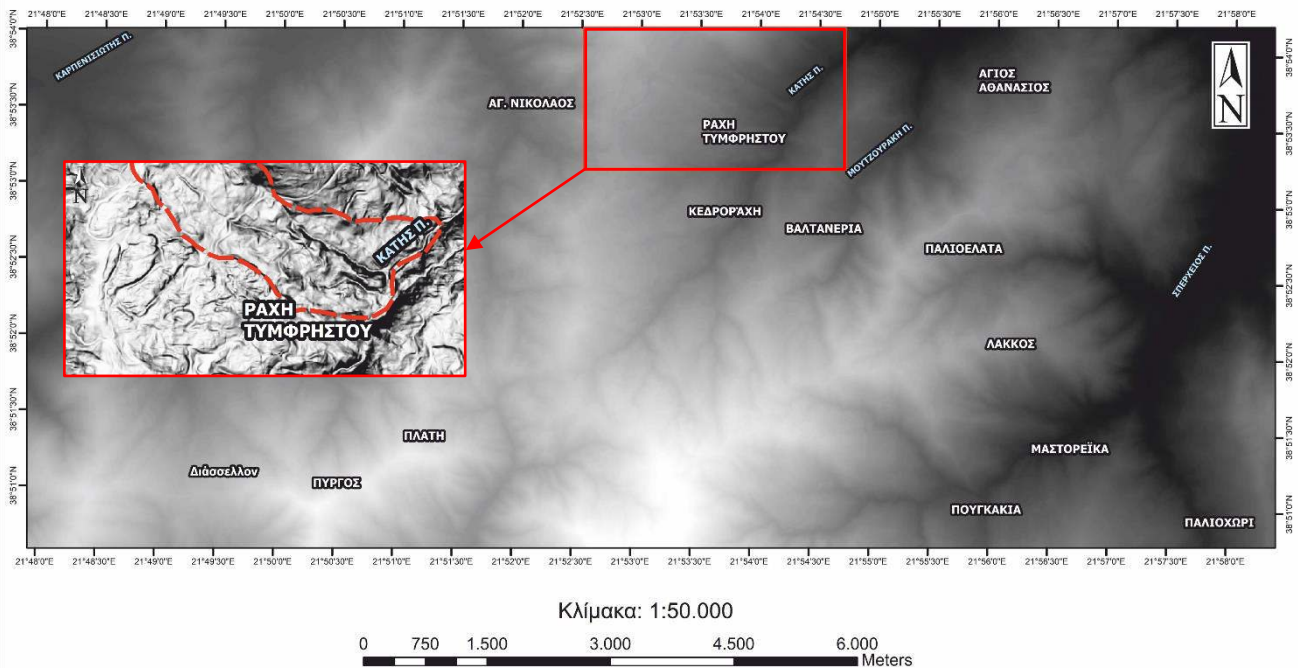
Εικόνα 5.8 Σχέδιο πτήσης στη περιοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τις θέσεις των 844 φωτογραφιών. Η πράσινη γραμμή καθορίζει την πορεία που ακολουθήθηκε με αφετηρία την μεγάλη μπλε τελεία (από report της επεξεργασίας κατασκευής του ψηφιακού μοντέλου στο λογισμικό Pix4D mapper).



Εικόνα 5.9 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους από σάρωση της περιοχής τον Νοέμβριο του 2020. 1) Σε μορφή Point Cloud. 2) Ψηφιακός Ορθομωσαϊκός Χάρτης (DOM). 3) Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM).

5.2.4. Ψηφιακό μοντέλου εδάφους του 2007

Έχοντας ως στόχο την επαλήθευση των ευρημάτων από την έρευνα της περιοχής, μέσω της χρήσης εναέριων συστημάτων UAV, αλλά και την εκτέλεση συγκριτικών χρονικών αναλύσεων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σχέση με την ενεργότητα και εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, αναζητήθηκε από την Εθνική Υπηρεσία Κτηματολογίου Ελλάδος, το ψηφιακό μοντέλο της περιοχής όπως αυτή αποτυπώθηκε με τεχνικές ALS (Airborne Laser Scanning) το έτος 2007. Το ψηφιακό αυτό μοντέλο καλύπτει μια μεγάλη έκταση της ευρύτερης περιοχής, τμήμα της οποίας αποτελεί και η ερευνηθείσα περιοχή Ράχη Τυμφρηστού. Έχει ανάλυση 5 x 5 [m/ pixel] και είναι γεωαναφερόμενο στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87.



Εικόνα 5.10 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ευρύτερης περιοχής για το έτος 2007, τμήμα του οποίου αποτελεί η περιοχή μελέτης. Με κόκκινο πλαίσιο απεικονίζεται η θέση και το πολλαπλό σκιασμένο ανάγλυφο MSR (Θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου) της ερευνηθείσας περιοχής (Μοντέλο από Εθνική Υπηρεσία Κτηματολογίου Ελλάδος).

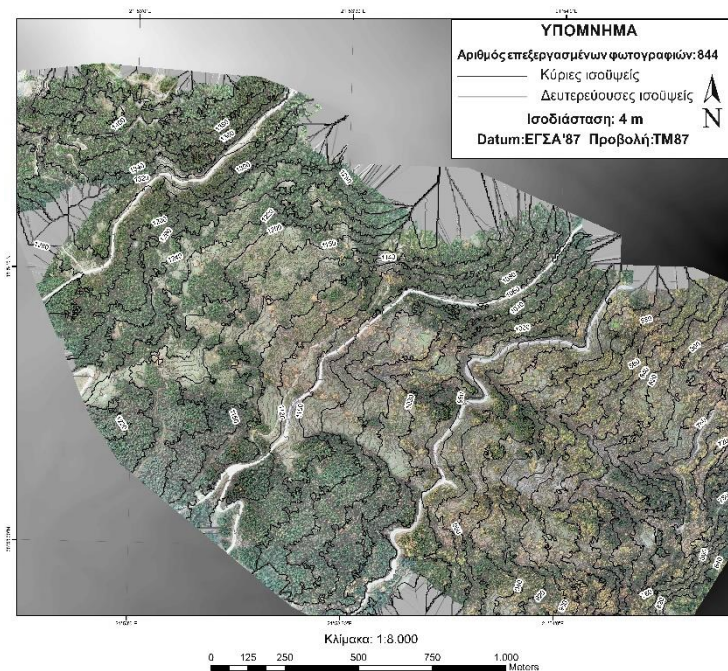
5.2.5. Πρώτη επεξεργασία δεδομένων

Μετά το στάδιο κατασκευής των ψηφιακών μοντέλων και διαθέτοντας πλέον ένα σύνολο πέντε μοντέλων ως δεδομένα ήταν απαραίτητη μια πρώτη επεξεργασία των μοντέλων, προκειμένου να μοιράζονται την ίδια βάση δεδομένων.

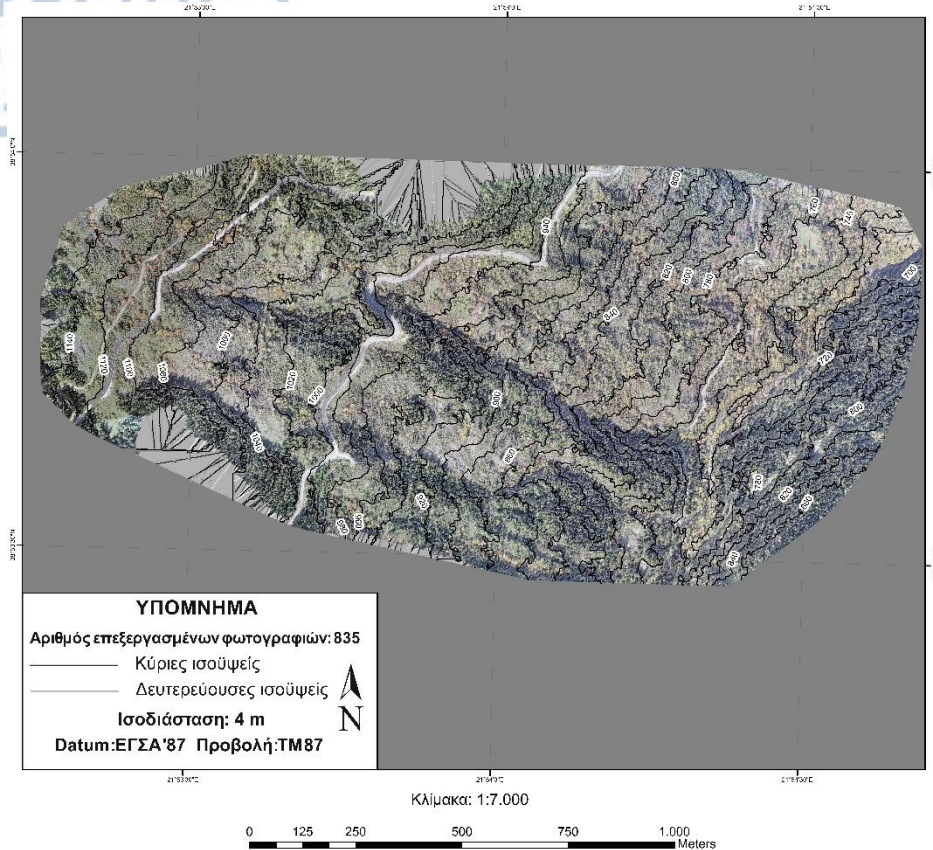
Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε αρχική επεξεργασία των δεδομένων, μέσω του λογισμικού ArcMap, εφαρμόζοντας την εντολή **"Project Raster"**, που αφορά την γεωαναφορά όλων των παραπάνω ψηφιακών μοντέλων σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων (Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87). Στη συνέχεια, επειδή τα δεδομένα των ψηφιακών μοντέλων που αποκτήθηκαν μέσω της χρήσης συστημάτων UAV (μοντέλα εδάφους 2018 – 2020) δεν μοιράζονται την ίδια ανάλυση, πραγματοποιήθηκε μετατροπή της χωρικής ανάλυσης των μοντέλων, μέσω του λογισμικού ArcMap, εφαρμόζοντας την εντολή **"Resample"**, σε μια επιλεγθείσα κοινή ανάλυση της τάξης 1 x 1 [m/ pixel]. Τέλος, για την εκτέλεση συγκριτικών αναλύσεων μεταξύ των πέντε ψηφιακών μοντέλων, και προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, κρίθηκε απαραίτητη η περικοπή του ψηφιακού μοντέλου του 2007 (Μοντέλο από Εθνική Υπηρεσία Κτηματολογίου Ελλάδος), μέσω του λογισμικού ArcMap, εφαρμόζοντας την εντολή **"Clip"**, έτσι ώστε η έκταση του να περιορίζεται μόνο στην περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ η χωρική ανάλυση όλων των μοντέλων μετατράπηκε πάλι σε μια κοινή ανάλυση της τάξης 5 x 5 [m/ pixel].

5.2.6. Ερμηνεία ψηφιακών μοντέλων εδάφους – κατασκευή χάρτων

Με την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω διεργασιών παραγωγής, διόρθωσης και εναρμόνισης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους της στενής περιοχής, ακολούθησε η μεμονωμένη ανάλυση και οπτική ερμηνεία του εκάστοτε ψηφιακού μοντέλου που παρείχε σημαντικές ενδείξεις σχετικά με τη φύση της τοπογραφίας, έχοντας πάντα ως στόχο την πλήρη αξιολόγηση της γενικής αστάθειας του εδάφους στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού. Τέλος, στα πλαίσια προετοιμασίας για τις εργασίες πεδίου, κατασκευάστηκαν από τα δεδομένα σαρώσεων της περιοχής, για τις περιόδους Νοεμβρίου του 2019 και 2020, οι παρακάτω ψηφιακοί ορθοφωτογραφικοί χάρτες:



Εικόνα 5.11 Ψηφιακός ορθοφωτογραφικός χάρτης περιοχής έρευνας, όπως αυτή αποτυπώθηκε την περίοδο Νοεμβρίου 2019. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 7**).



Εικόνα 5.12 Ψηφιακός ορθοφωτογραφικός χάρτης περιοχής έρευνας, όπως αυτή αποτυπώθηκε την περίοδο Νοεμβρίου 2020 (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 8**).

Δ. Παρουσίαση και ανάλυση ευρημάτων

5.3. Γεωμορφολογική ανάλυση επιφανείας

5.3.1. Μορφολογία εδάφους

Η διερεύνηση του γεωμορφολογικού καθεστώτος στη στενή περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε αφενός μέσω της ανάλυσης θεματικών χαρτών που δημιουργήθηκαν μετά από επεξεργασία των παραπάνω ψηφιακών μοντέλων και αφετέρου από επιτόπου παρατηρήσεις, κατά το στάδιο χαρτογράφησης, στο πεδίο.

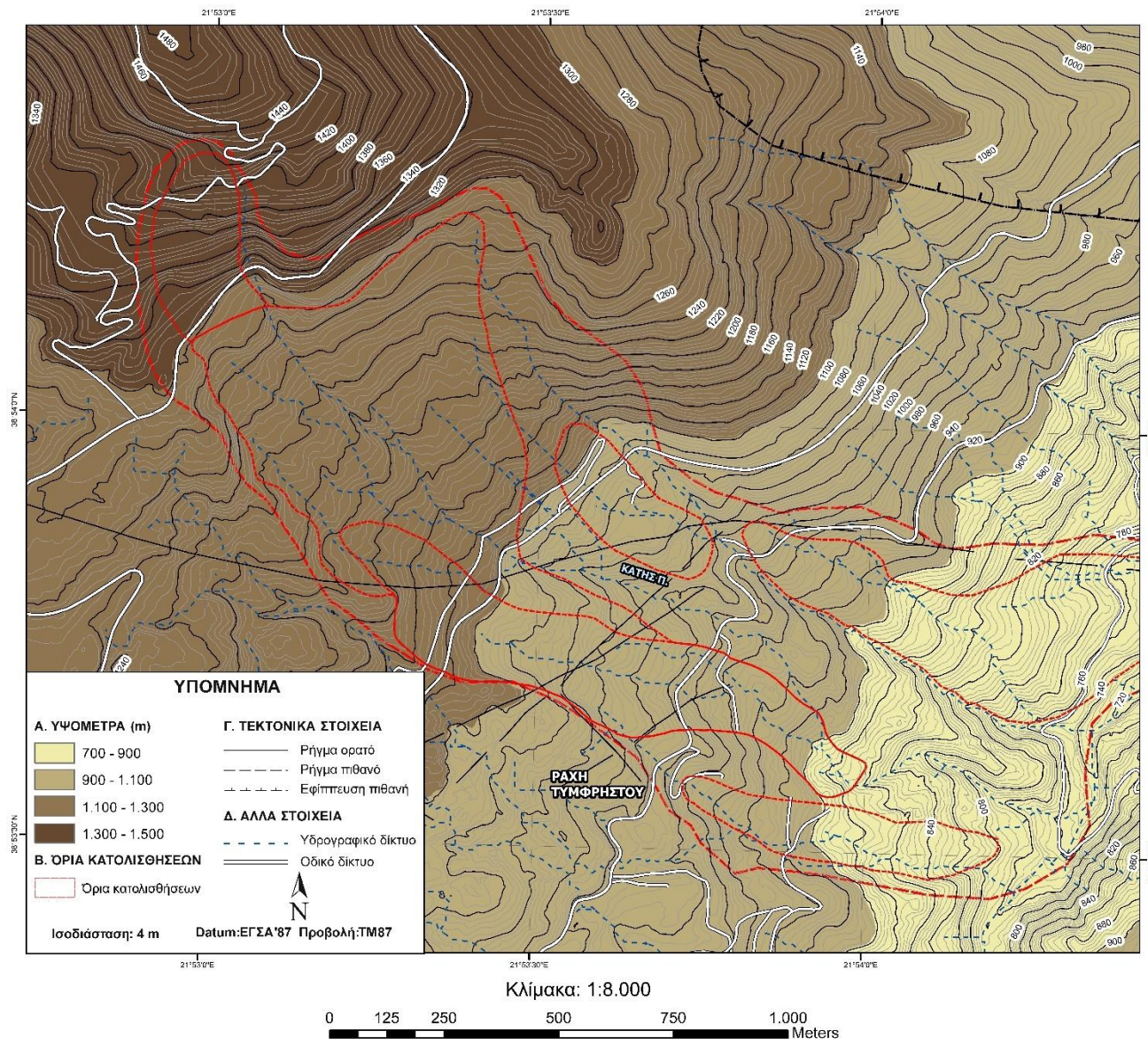
Ειδικότερα, η ευρύτερη κατολισθαίνουσα περιοχή εντοπίζεται στο ΒΔ φυσικό πρηνές του ορεινού όγκου Τυμφρηστού, και πιο συγκεκριμένα μεταξύ της Σήραγγας Τυμφρηστού και του χωριού Τυμφρηστός.

Μορφολογικά, η περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια σύνθετη πλαγιά, τοξοειδούς σχήματος με γενική διεύθυνση προσανατολισμού προς τα Α – ΝΑ, η οποία παρουσιάζει έντονο ορεινό ανάγλυφο, με έντονες μορφολογικές κλίσεις, μεγάλες υψομετρικές διαφορές και υψόμετρα της τάξης από 600 m έως 1400 m.

Την εν λόγω πλαγιά διασχίζουν πολλές εγκάρσιες ρεματιές του ποταμού Κατή, με ισχυρή κατά μήκος κλίση, οι οποίες σχεδόν πάντοτε είναι ευθύγραμμες, χαραδροειδείς, βάθους περίπου 10 – 20

μ, στην κοίτη των οποίων σχεδόν πάντα εμφανίζεται ο φλύσχος του υποβάθρου της εν λόγω περιοχής.

Οι ρεματιές αυτές εκτός από τα νερά της επιφανειακής απορροής, αποστραγγίζουν και τους επιφανειακούς επικρεμάμενους υδροφόρους ορίζοντες που σχηματίζονται στις χαλαρές επιφανειακές αποθέσεις (κορήματα, αποσαθρώματα), καθώς και στην επιφανειακή κερματισμένη ζώνη του φλύσχη.



Εικόνα 5.13 Τοπογραφικός χάρτης στενής περιοχής μελέτης, με ισοδιάσταση 4 m (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 9**).

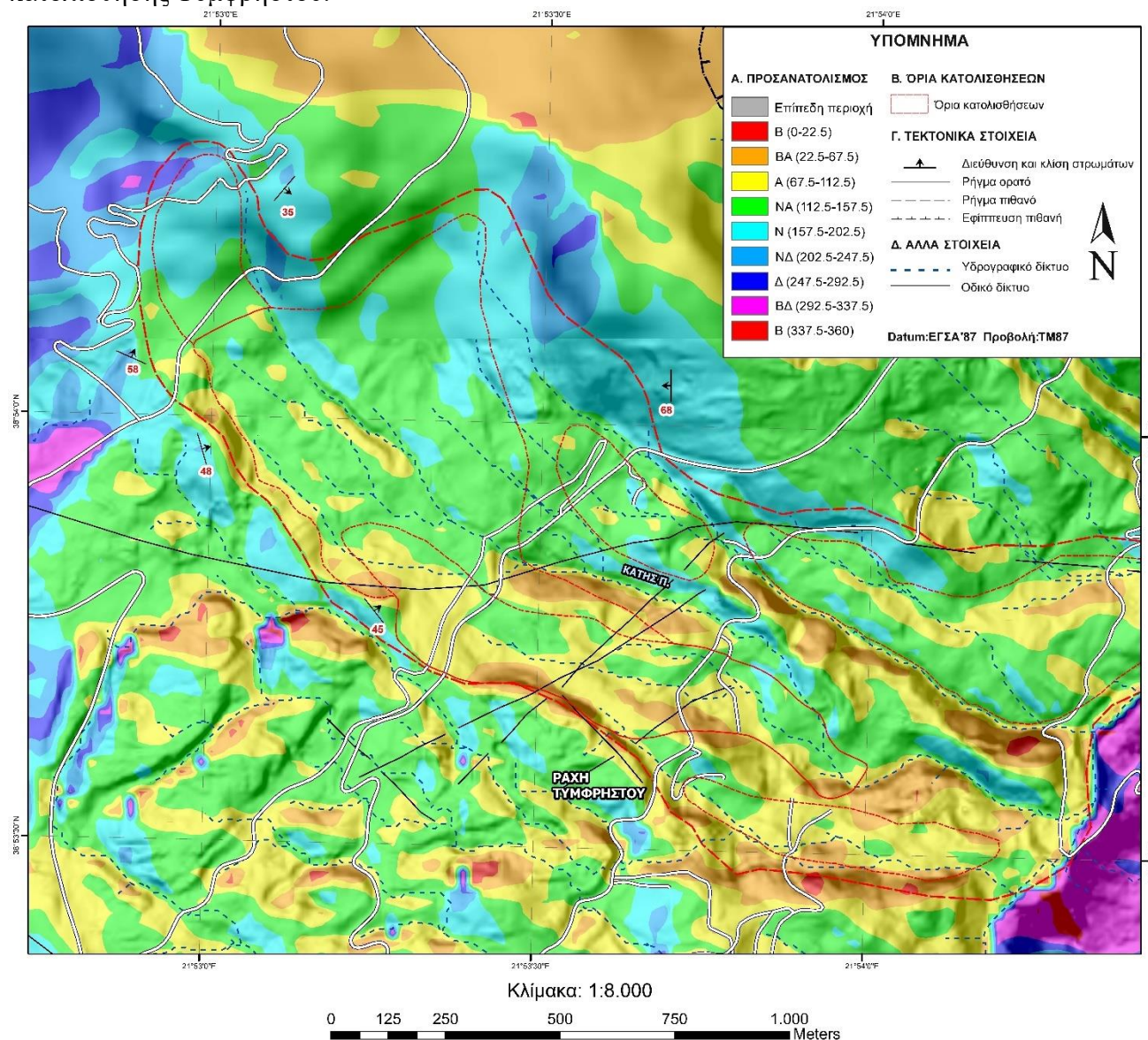
Στο κατώτερο τμήμα του φυσικού πρανούς, η μορφολογία του εδάφους εναλλάσσεται από τρεις εδαφικές κοιλάτες με άνοιγμα της τάξης των 100 – 200 m, και από δύο εδαφικές εξάρσεις με πλάτος της τάξης των 100 – 150 m.

Στους λόφους αυτούς, κατά την επιτόπου εργασία στο πεδίο, εντοπίστηκε στην επιφάνεια τους το σταθερό φλυσχικό υπόβαθρο της περιοχής.

5.3.2. Αποτύπωση σύνθετης κατολίθησης Τυμφρηστού

Μια πρώτη οριοθέτηση των κατολισθήσεων της περιοχής, προκύπτει εύκολα από την ανάλυση των παρακάτω θεματικών χαρτών που κατασκευάστηκαν για την περιοχή.

Αρχικά, παρατηρώντας τον χάρτη προσανατολισμού των κλιτύων (βλ. Εικόνα 5.14), μπορούν εύκολα να εντοπιστούν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα πλευρικά όρια της σύνθετης κατολίθησης Τυμφρηστού.



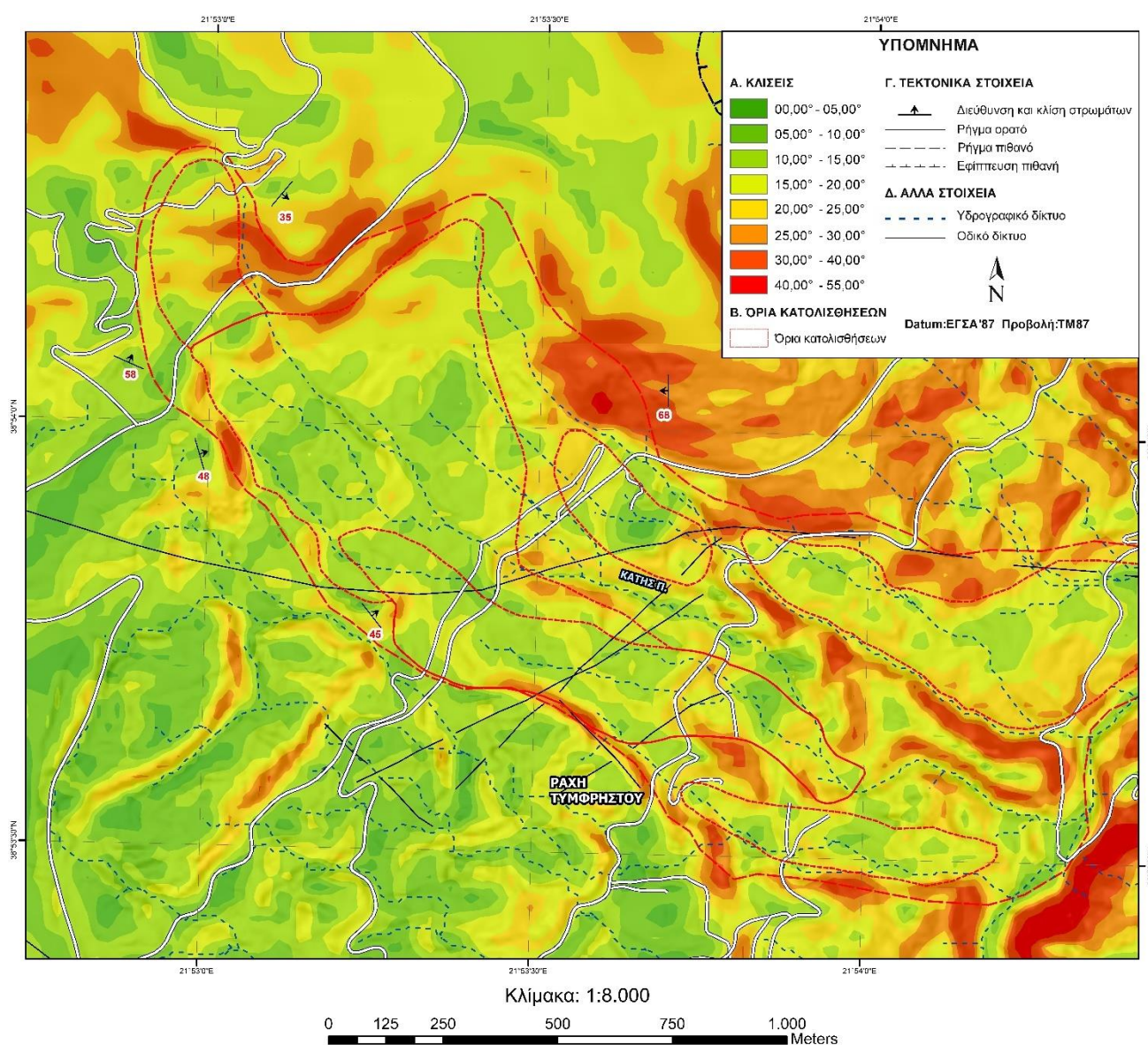
Εικόνα 5.14 Χάρτης προσανατολισμού των κλιτύων της στενής περιοχής μελέτης (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 10**).

Πιο συγκεκριμένα, η ευρύτερη περιοχή των κατολισθήσεων φαίνεται να οριοθετείται μεταξύ δύο αντικριστών κλιτύων, που αποτελούν ουσιαστικά τις πτέρυγες (flanks) της κατολίθησης. Η δυτική πτέρυγα παρουσιάζει ένα γενικό προσανατολισμό προς τα Α, ενώ αντίθετα η ανατολική έχει προσανατολισμό προς τα Δ. Οι κλίσεις του εδάφους, σύμφωνα με τον χάρτη κλίσεων (βλ. Εικόνα 5.15), στις πτέρυγες είναι της τάξης των 30° - 55°.

Ανάμεσα στις δύο αυτές πτέρυγες και στο κεντρικό τμήμα της φυσικής πλαγιάς, τοποθετείται το κύριο σάμα της κατολίσθησης. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει έναν γενικό προσανατολισμό προς τα Α – ΝΑ, και χαρακτηρίζεται από μια ευρεία ταπείνωση της μορφολογίας του αναγλύφου. Οι κλίσεις, εντός της περιοχής αυτής, κυμαίνονται από 05° έως περίπου 30°.

Το κατώτερο τμήμα του φυσικού πρανούς, σύμφωνα με την μελέτη του χάρτη πολλαπλού σκιασμένου αναγλύφου (βλ. Εικόνα 5.16), φαίνεται να αποτελεί τον πόδα της ευρύτερης κατολίσθησης. Στην περιοχή αυτή η μορφολογία του εδάφους εναλλάσσεται από τρεις επιμήκεις κοιλάδες και από δύο επιμήκεις λόφους. Εντός των κοιλάδων οι κλίσεις του εδάφους κυμαίνονται από 05° έως 25°, ενώ στις περιοχές των λόφων από 25° έως 40°.

Η στέψη της κατολίσθησης αυτής, εντοπίστηκε κατά την έρευνα που επιτελέστηκε στο πεδίο, στο ανώτερο τμήμα του φυσικού πρανούς, κοντά στον υδροκρίτη και σε ένα υψόμετρο περί τα 1440m.



Εικόνα 5.15 Χάρτης κλίσεων στενής περιοχής μελέτης (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 11**).

Συμπερασματικά, η ευρύτερη κατολισθητική περιοχή, ξεκινάει από υψόμετρο περίπου της τάξης των 1400 m, κοντά στον υδροκρίτη της περιοχής και καταλήγει στο κατώτερο τμήμα της κοιλάδας του ποταμού Κατή, σε υψόμετρο 660 m. Φαίνεται να καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της πλαγιάς και έχει ένα μέγεθος περίπου 1,75 km². Εντός της οριοθετημένης περιοχής, στην περιοχή του πόδα της κατολίσθησης, παρατηρούνται δύο ράχες οι οποίες φαίνεται να βρίσκονται στην θέση τους (In situ). Όσον αφορά τις ράχες αυτές, πιθανολογείται πως είτε δεν συμμετέχουν στις κατολισθητικές κινήσεις της περιοχής, είτε αποτελούν επιμέρους μη ενεργές πλευρικές πτέρυγες, η οποίες γλιστράνε στην βάση τους με έναν πολύ αργό μη κρίσιμο ρυθμό.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εν λόγω κατολίσθησης παρατίθενται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5-5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ευρύτερης κατολίσθησης.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	
ΜΗΚΟΣ	2.500 m
ΠΛΑΤΟΣ	850 m
ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (ΦΥΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΔΑ)	1.200 m
ΕΜΒΑΔΟΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	1,75 km ²

5.3.3. Αποτύπωση επιμέρους κατολισθήσεων

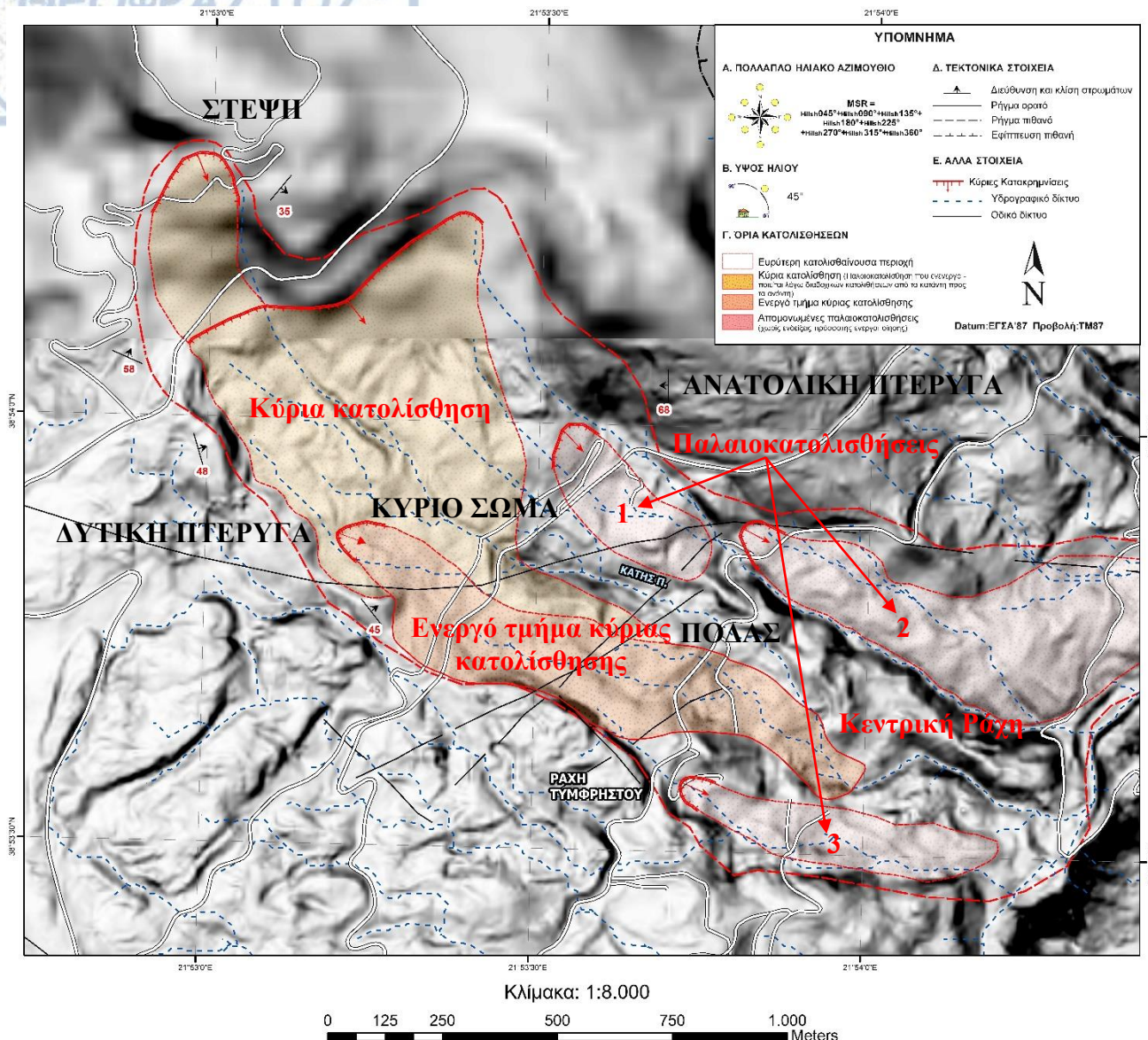
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η κατολίσθηση Τυμφρηστού μπορεί να ταξινομηθεί ως μια ενιαία σύνθετη κατολίσθηση, που αποτελείται από επιμέρους μικρότερες κατολισθήσεις. Ο διαχωρισμός της κατολίσθησης σε μικρότερες μονάδες, διευκόλυνε τη μελέτη της συμπεριφοράς κάθε επιμέρους τμήματος της ευρύτερης κατολίσθησης.

Βάσει της πρότερης μελέτης των θεματικών χαρτών, που κατασκευάστηκαν για την περιοχή, καθώς και των εργασιών, της επιτόπου αναγνώρισης και αποτύπωσης κατολισθητικών φαινομένων στο πεδίο, χαρτογραφήθηκαν τέσσερις επιμέρους τοπικές κατολισθήσεις, που συνθέτουν την ευρύτερη κατολίσθηση Τυμφρηστού και που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ενδείξεις κίνησης και διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας.

Πιο συγκεκριμένα, εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, οριοθετήθηκε μια μεγάλη κύρια κατολίσθηση συνολικής έκτασης $E = 0,63 \text{ km}^2$. Το υψηλότερο μέτωπο της κατολίσθησης εντοπίζεται κοντά στον υδροκρίτη και σε υψόμετρο της τάξης ~ 1420 m, ενώ το χαμηλότερο τμήμα της οριοθετείται εντός της κεντρικής κοιλάδας της περιοχής του πόδα της κατολίσθησης Τυμφρηστού, και σε υψόμετρο ~ 860 m. Το πλάτος της κατολίσθησης δεν είναι σταθερό και μεταβάλλεται από ~ 600 m στα υψηλότερα σημεία έως ~100 m προς τα χαμηλότερα.

Στη συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων από την επιτόπια χαρτογράφηση στο πεδίο, το κατώτερο τμήμα της εν λόγω κατολίσθησης απομονώθηκε από την αρχική οριοθέτηση, και ταξινομήθηκε ως μια ξεχωριστή κατολίσθηση, συνολικής έκτασης $E = 0,20 \text{ km}^2$. Το υψηλότερο μέτωπο της εντοπίστηκε σε ένα υψόμετρο περί τα 1180 m.

Τέλος, στον ευρύτερο κατολισθητικό χώρο της κατολίσθησης Τυμφρηστού, χαρτογραφήθηκαν τρεις μεμονωμένες παλαιοκατολισθήσεις. Η πρώτη εντοπίστηκε κοντά στο ανατολικό όριο της ευρύτερης κατολίσθησης, καλύπτοντας μια μικρή έκταση της τάξης $E = 0,06 \text{ km}^2$ ενώ οι άλλες δύο, στην περιοχή του πόδα, εντός των κοιλάδων που βρίσκονται εκατέρωθεν της κεντρικής ράχης.



Εικόνα 5.16 Χάρτης πολλαπλού σκιασμένου αναγλύφου της περιοχής μελέτης πάνω στον οποίο αποτυπώνονται χαρακτηριστικά τμήματα της ευρύτερης κατολίσθησης (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους του έτους 2007). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 12**).

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εν λόγω επιμέρους κατολισθήσεων παρατίθενται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5-6 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιμέρους κατολισθήσεων.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΩΝ

ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ	ΜΗΚΟΣ	~ 2.000 m
	ΠΛΑΤΟΣ	100 - 600 m
	ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (ΦΡΥΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΔΑΣ)	560 m
	ΕΜΒΑΔΟΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	0,63 km ²

ΕΝΕΡΓΟ ΤΜΗΜΑ ΚΥΡΙΑΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	ΜΗΚΟΣ	1.250 m
	ΠΛΑΤΟΣ	100 - 200 m
	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (ΦΡΥΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΔΑ)	320 m
	ΕΜΒΑΔΟΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	0,20 km ²
ΠΑΛΑΙΟΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ No 1 (Βλ. Εικόνα 5.16)	ΜΗΚΟΣ	420 m
	ΠΛΑΤΟΣ	170 m
	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (ΦΡΥΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΔΑ)	120 m
	ΕΜΒΑΔΟΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	0,05 km ²
ΠΑΛΑΙΟΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ No 2 (Βλ. Εικόνα 5.16)	ΜΗΚΟΣ	1.000 m
	ΠΛΑΤΟΣ	100 - 500 m
	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (ΦΡΥΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΔΑ)	300 m
	ΕΜΒΑΔΟΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	0,20 km ²
ΠΑΛΑΙΟΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ No 3 (Βλ. Εικόνα 5.16)	ΜΗΚΟΣ	700 m
	ΠΛΑΤΟΣ	120 m
	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (ΦΡΥΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΔΑ)	180 m
	ΕΜΒΑΔΟΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	0,07 km ²

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί, πως η τελική οριοθέτηση των κατολισθήσεων που αποτυπώθηκαν και εμφανίζονται στους παραπάνω θεματικούς χάρτες, καθώς και των επακόλουθων γεωμετρικών στοιχείων τους, επιτεύχθηκε, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, με την βοήθεια τεχνικών μηχανικής μάθησης δια της καινοτομικής εφαρμογής της μεθόδου PCA, σε συνδυασμό με την επί τόπου, ιδίους όμμασι, ποιοτική αξιολόγηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων της στο πεδίο. Η εν λόγω μέθοδος και τα αποτελέσματά της αναλύονται ενδελεχώς στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής διατριβής.

5.4. Γεωμορφολογική διερεύνηση επιφανείας στο πεδίο

5.4.1. Γενικό πλαίσιο έρευνας στο πεδίο

Κατά την εκπόνηση της τρέχουσας διατριβής εκτελέστηκε ευρύ φάσμα εργασιών στο πεδίο, από μεμονωμένες επισκέψεις στην περιοχή για την αναγνώριση του φαινομένου και την αποτύπωση της κατολισθήσεως με την χρήση συστημάτων UAV, μέχρι και την τελική πολυήμερη εργασία τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης που αποσκοπούσε στη συλλογή όλων των πολύτιμων δεδομένων σχετικά με τις γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές ιδιότητες αλλά και των χαρακτηριστικών εκείνων που σχετίζονται άμεσα και έμμεσα, με την αξιολόγηση της σταθερότητας της περιοχής. Οι εργασίες στο πεδίο προσανατολίστηκαν κυρίως στην αποτύπωση και έρευνα της έκτασης, του τύπου, των μηχανισμών και των συνθηκών των αστοχιών του εδάφους.

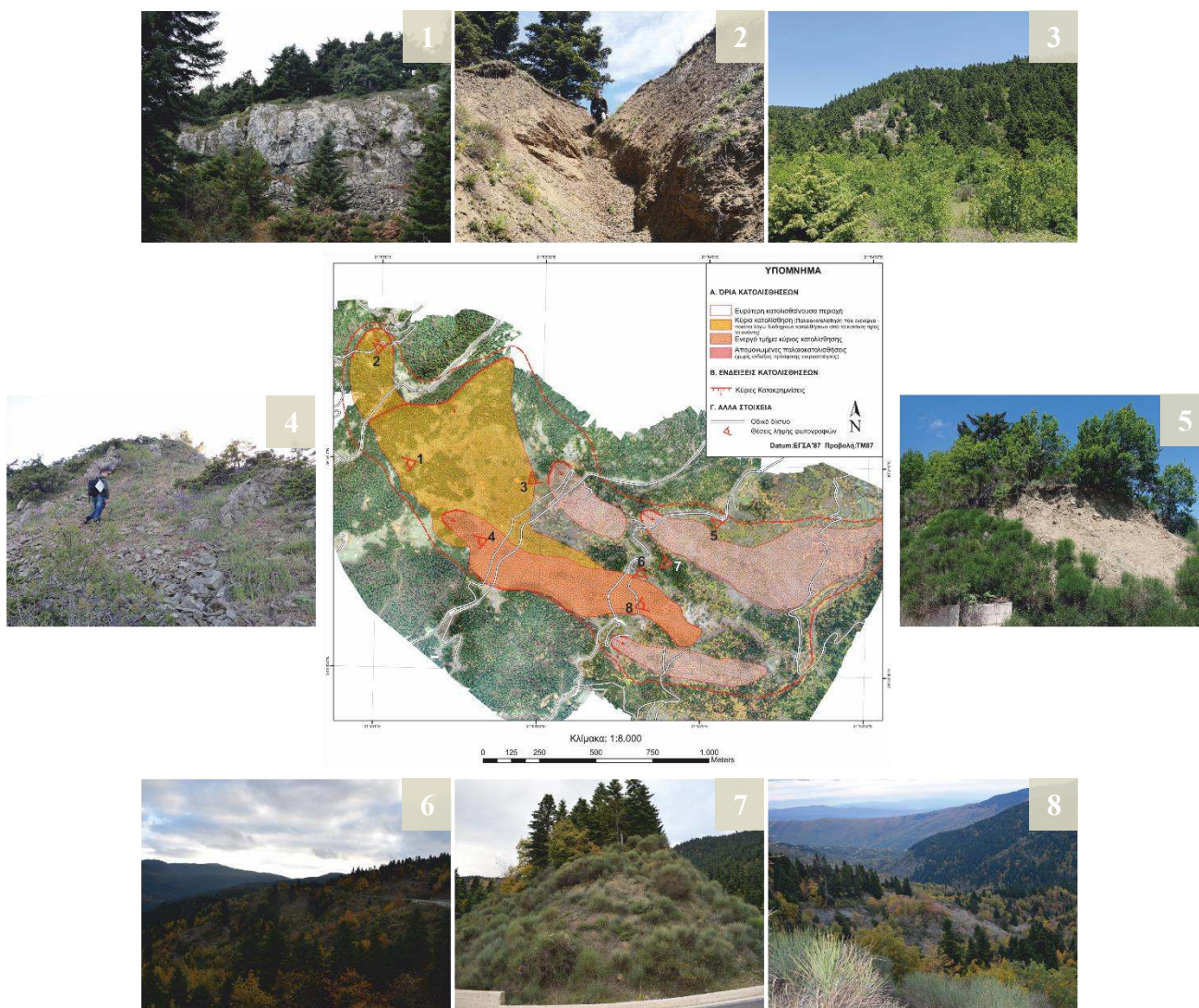
Πιο συγκεκριμένα, κατά την εργασία στο πεδίο αναλύθηκαν οι επιτόπου συνθήκες της μορφολογίας του εδάφους και αποτυπώθηκαν τα όρια και οι μορφολογικές εμφανίσεις που συνδέονται με κατολισθητικά φαινόμενα, ήτοι κύριες και δευτερεύουσες κατακρημνίσεις, παλαιές και νέες ολισθήσεις φυσικών πρानών, ρωγμές και μείζονες διαρρηξείς του υπεδάφους, εξάρσεις – θραύσεις του αναγλύφου, ενδείξεις ερπυσμού, εμφανίσεις βραχοκαταπτώσεων και ροών κορημάτων, καθώς και εκροές νερού και στάσιμα νερά επί του αναγλύφου.

Απώτερο σκοπό των παραπάνω εργασιών, αποτέλεσε η αποτύπωση όλων των εν γένει παρατηρήσεων και πληροφοριών που συλλέχτηκαν στο πεδίο, σχετικά με την κατολισθητική δραστηριότητα της περιοχής, σε έναν τοπογραφικό χάρτη αποτύπωσης κατολισθήσεων, υπό κλίμακα 1:8.000.

5.4.2. Αποτύπωση ορίων ευρύτερης κατολίσθησης

Το πρώτο στάδιο της έρευνας στο πεδίο προσανατολίστηκε κυρίως στον εντοπισμό των ορίων της ευρύτερης κατολίσθησης. Το ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης εντοπίστηκε κοντά στον υδροκρίτη και σε ένα υψόμετρο περί τα 1440m. Υψηλότερα αυτού του σημείου δεν εντοπίστηκαν άλλες ενδείξεις κατολισθητικών φαινομένων.

Όσον αφορά τις πτέρυγες της κατολίσθησης, και τις πιθανές επιμέρους μη ενεργές πλευρικές πτέρυγες (In situ ράχες στην περιοχή του πόδα της κατολίσθησης), κατά την έρευνα στο πεδίο, εντοπίστηκαν εμφανίσεις σταθερού υποβάθρου που επαληθεύουν και πιστοποιούν την οριοθέτηση της πρότερης ανάλυσης των ψηφιακών μοντέλων του εδάφους της περιοχής.

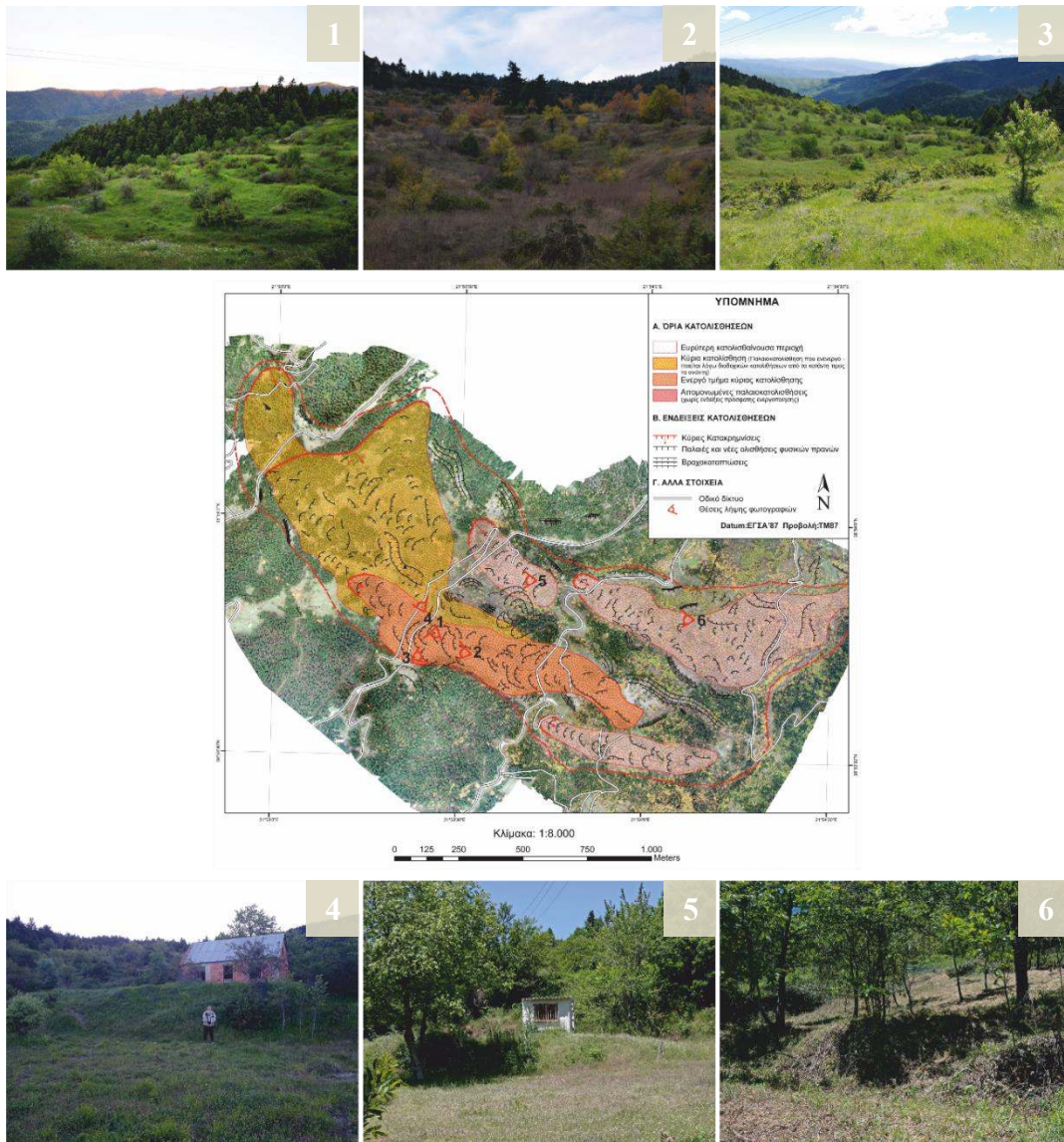


Εικόνα 5.17 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1) Τμήμα της δυτικής πτέρυγας της ευρύτερης κατολίσθησης. Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται το πιο σταθερό ψαμμιτικής σύστασης φλυσικό υπόβαθρο. 2) Στέψη ευρύτερης κατολίσθησης. 3) Τμήμα της ανατολικής πτέρυγας της ευρύτερης κατολίσθησης, και σε αυτή την περιοχή αυτή εμφανίζεται το πιο σταθερό ψαμμιτικής σύστασης φλυσικό υπόβαθρο. 4) Τμήμα από το δυτικό όριο ευρύτερης κατολίσθησης, στο τμήμα αυτό εμφανίζεται πάλι το πιο σταθερό υπόβαθρο. 5) Τμήμα της ανατολικής πτέρυγας της ευρύτερης κατολίσθησης. Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται το ιωολιθικό κομμάτι του φλυσικού υποβάθρου, παρόλο που ο σχηματισμός εμφανίζει έναν μεγάλο αποσθρωμένο μανδύα και μια ανοιχτή δομή λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης, φαίνεται να βρίσκεται στην θέση του και να ισορροπεί υπό μεγάλη κλίση. 6) Σταθερή ράχη ψαμμιτικής

σύστασης στην περιοχή του πόδα της κατολίθησης. 7) Ανώτερο τμήμα της κεντρικής ράχης στην περιοχή του πόδα. Στο τμήμα αυτό εμφανίζεται πάλι το ιλυολιθικό τμήμα του φλυσικού υποβάθρου και οι συνθήκες ισορροπίας είναι παραπλήσιες με αυτές τις περιπτώσεις 5. 8) Κεντρική σταθερή ράχη ψαμμιτικής σύστασης στην περιοχή του πόδα της ευρύτερης κατολίθησης. **Σημείωση:** Οι περιοχές των περιπτώσεων 6, 7 και 8, είναι πιθανό να μην συμμετέχουν στις κατολισθητικές κινήσεις της περιοχής, υπάρχει όμως και μια πιθανότητα να γλιστράνε στην βάση τους με έναν πολύ αργό ρυθμό, για αυτά τα τμήματα απαιτείται παραπάνω μελέτη και έρευνα.

5.4.3. Ενδείξεις περιστροφικών ολισθήσεων

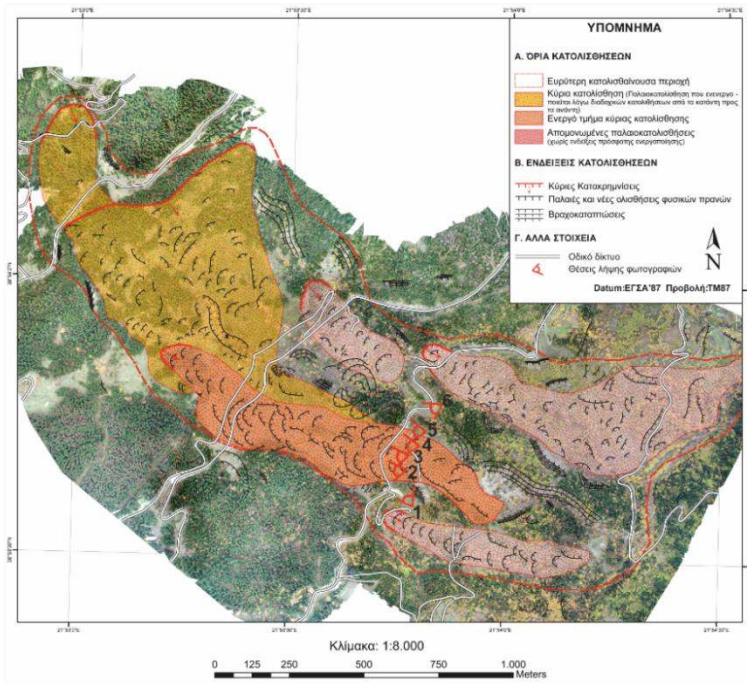
Εντός της προαναφερθείσας ευρύτερης κατολίθησης, εντοπίστηκαν πολλές περιοχές που χαρακτηρίζονται από αλληπάλληλες επιπεδώσεις, ταπεινώσεις, αναθλώσεις και ανορθώσεις της μορφολογίας του εδάφους. Αυτές οι χαρακτηριστικές εμφανίσεις του αναγλύφου συνδέονται κυρίως με κατολισθητικά φαινόμενα περιστροφικού χαρακτήρα και με περιοχές παλαιοκατολισθήσεων. Εντός της κεντρικής κατολίθησης τέτοιου είδους εμφανίσεις συνδέονται με την ζώνη συμπίεσης της κατολίθησης, όπου τα υλικά της συμπιέζονται από το υπερκείμενο φορτίο, δημιουργώντας αυτή την ακατάστατη εικόνα της τοπογραφίας.



Εικόνα 5.18 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1 – 4) Περιοχές εντός της κύριας κατολίθησης όπου εμφανίζονται ενδείξεις ύπαρξης περιστροφικών ολισθήσεων. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από μια ανώμαλη

τοπογραφία με πολλές μικρολοφώδεις επιφάνειες καθώς και από απότομες επιπεδώσεις, βυθίσματα και φουσκώματα του αναγλύφου. 5, 6) Περιοχές εντός παλαιοκατολισθήσεων. Οι παλαιοκατολισθήσεις της ευρύτερης περιοχής μπορούν να ταξινομηθούν ως παλαιές ρηγές ολισθήσεις χωρίς ενδείξεις πρόσφατης ενεργότητας.

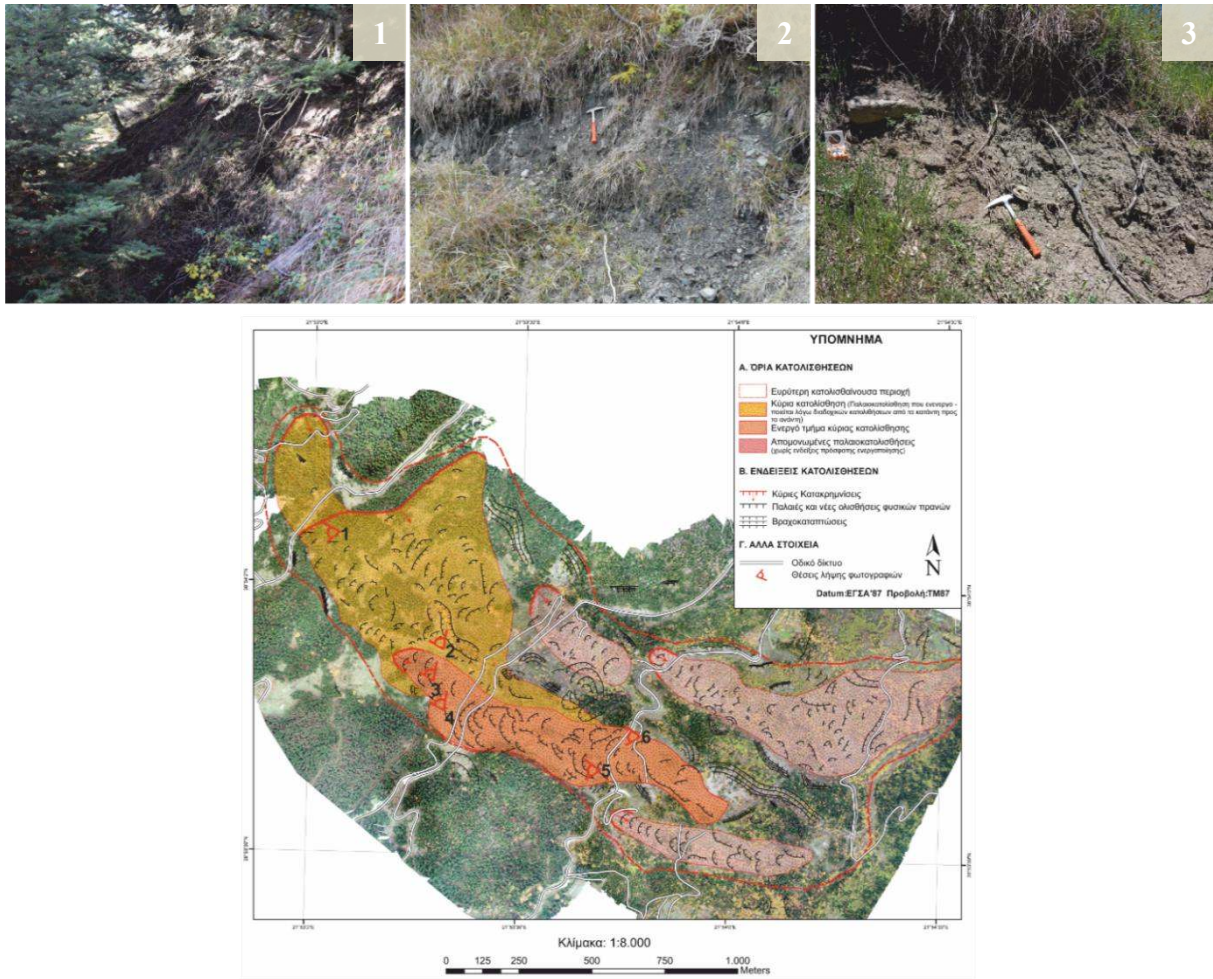
Πιο έντονες ενδείξεις κατολισθητικών κινήσεων, παρατηρήθηκαν στην περιοχή κοντά στον νέο οδικό δίκτυο Λαμίας – Καρπενησίου, και εντός του πιο ενεργού τμήματος της κύριας κατολίσθησης. Η περιοχή αυτή αποτελεί ουσιαστικά την ζώνη εφελκυσμού της κεντρικής κατολίσθησης και χαρακτηρίζεται από πολλές έντονες θραύσεις, μετατοπίσεις και καταπτώσεις του εδάφους. Επιπλέον, στον χώρο αυτό εντοπίστηκαν και αποτυπώθηκαν πολλές επιμέρους μικρότερης κλίμακας περιστροφικές ολισθήσεις.



Εικόνα 5.19 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1 – 6) Περιοχές εντός του ενεργού τμήματος της κύριας κατολίσθησης όπου παρατηρείται μια πιο ακατάστατη μορφολογία του εδάφους, με έντονες ενδείξεις ενεργότητας αποτελούμενης από πολλές μικρότερης κλίμακας περιστροφικές ολισθήσεις.

5.4.4. Αποτύπωση επιφανειών κατακρήμισεων

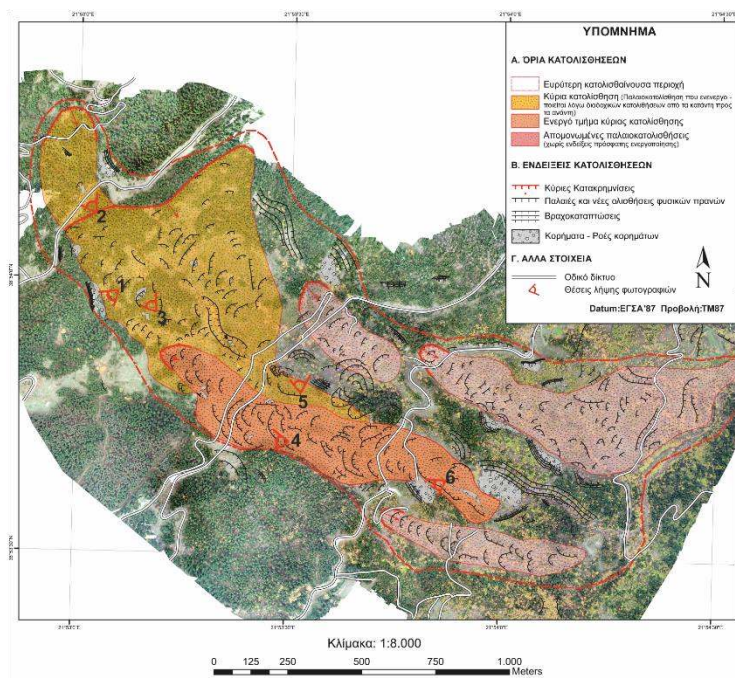
Κατά την χαρτογράφηση της κύριας κατολίσθησης, εντοπίστηκαν ενδείξεις απότομων αλλαγών και ταπεινώσης του αναγλύφου. Οι ενδείξεις αυτές αφορούν τις εμφανίσεις των κυριότερων επιφανειών κατακρήμισης της κατολίσθησης. Όταν οι επιφάνειες αυτές εμφανίζονται γυμνές από φυτοκάλυψη τότε χαρακτηρίζουν ένα πρόσφατο κατολισθητικό γεγονός, και επάνω τους διακρίνονται με ευκολία οι γραμμώσεις που δείχνουν την διεύθυνση της κίνησης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Τέτοιες επιφάνειες κατακρήμισης εντοπίστηκαν, τόσο κατά το στάδιο εργασιών στο ύπαιθρο, όσο και από την μεταγενέστερη μελέτη των ψηφιακών μοντέλων εδάφους της περιοχής, και αποτυπώθηκαν στον τελικό χάρτη αποτύπωσης των κατολισθήσεων με την μορφή φρυδιών.



Εικόνα 5.20 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1) Δευτερεύουσα επιφάνεια κατακρήμισης της κύριας κατολίσθησης. 2 - 6) Κύριες επιφάνειες κατακρήμισης μικρότερων κατολισθήσεων εντός του ευρύτερου χώρου της κύριας κατολίσθησης.

5.4.5. Αποτύπωση περιοχών βραχοκαταπτώσεων – ενδείξεις ροών κορημάτων

Όσον αφορά τα πιο σταθερά τμήμα της ευρύτερης περιοχής, δηλαδή τις περιοχές στα όρια της κατολίθωσης, αλλά και τις πιο σταθερές ράχες εντός των ορίων, όπου εμφανίζεται το πιο ψαμμιτικό τμήμα του φλυσικού υποβάθρου, παρατηρήθηκαν φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων. Η βραχόμαζα στις περιοχές αυτές παρουσιάζει έντονη τεκτονική καταπόνηση και μια ανοιχτή δομή που ελέγχεται από παρακατακόρυφα συστήματα ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες αυτές σταδιακά ανοίγουν και διευρύνονται με την επίδραση της ροής του νερού, κατά μήκος αυτών, και οδηγούν στην σταδιακή αποκόλληση και ανατροπή των επικρεμάμενων όγκων και στην αποκάλυψη νέων φρέσκων επιφανειών, επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία στην πάροδο του χρόνου.

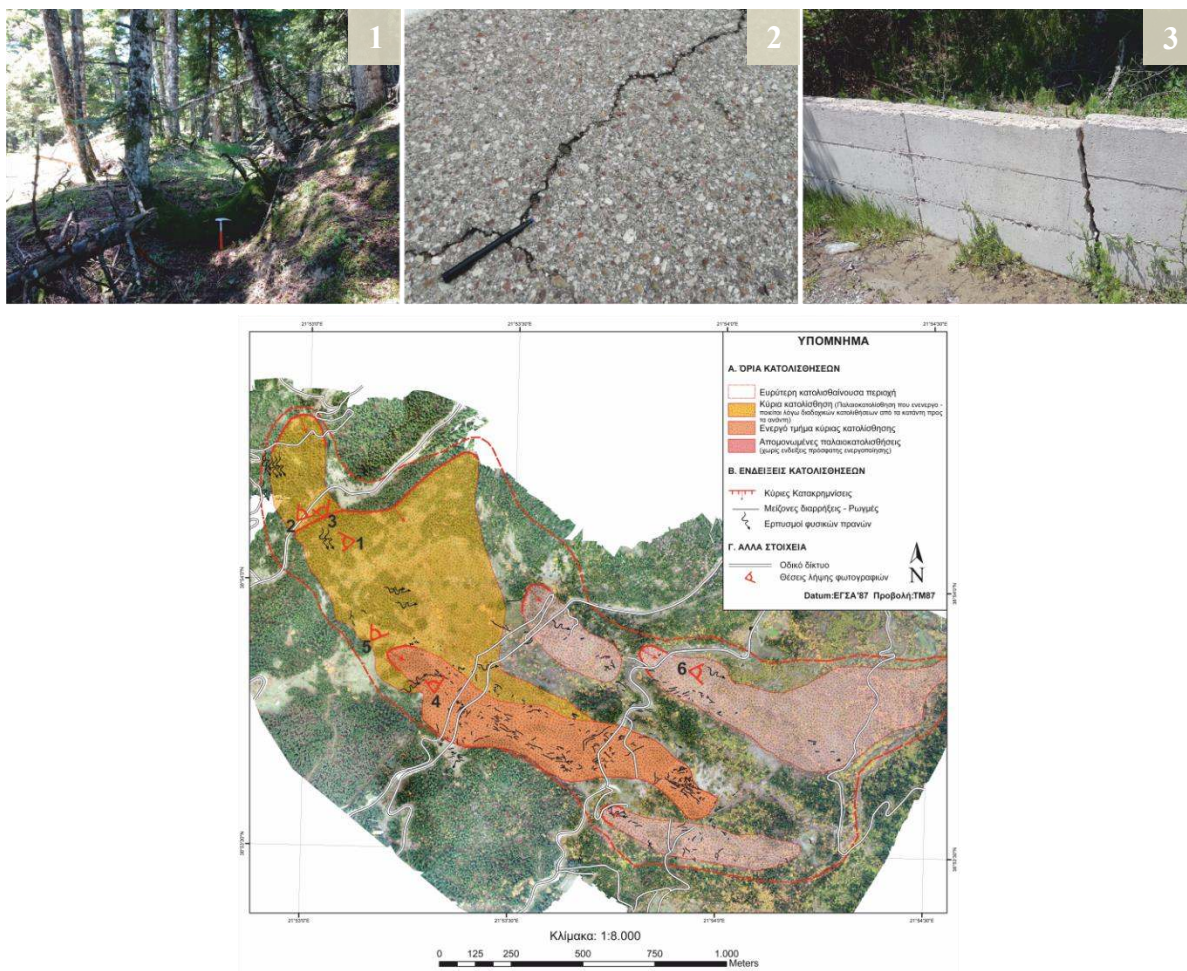


Εικόνα 5.21 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1, 2, 5, 6) Περιοχές βραχοκαταπτώσεων σε ψαμμιτικές εμφανίσεις του υποβάθρου. 3, 4) Περιοχές απόθεσης κορημάτων.

Παράλληλα, τα κορήματα που δημιουργούνται από την αποτόνωση αυτή της βραχώμαζας, ανάλογα με την κλίση του φυσικού εδάφους και το βαθμό κορεσμού με νερά βροχοπτώσεων - χιονοπτώσεων είναι επιρρεπή στην εκδήλωση εδαφικών ασταθειών, όπως ερπυσμοί και ροές, ακόμα και λασποροές.

5.4.6. Ενδείξεις εδαφικών ερπυσμών – αποτύπωση μείζονων ρωγμών και διαρρήξεων

Στο ανώτερο τμήμα της κεντρικής κατολίθησης καθώς και σε τοπικές περιοχές εντός των οριοθετημένων παλαιοκατολισθήσεων αποτυπώθηκαν μορφολογικές ενδείξεις εδαφικών ερπυσμών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν κορμοί δέντρων με κοίλη καμπυλότητα προς τα ανάντη, θραυσμένοι και μετατοπισμένοι τοίχοι αντιστήριξης, καθώς και μετατοπισμένοι φράχτες.



Εικόνα 5.22 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1, 6) Εμφανίσεις κορμών δέντρων με κοίλη καμπυλότητα προς τα ανάντη, χαρακτηριστικό σημάδι ερπυστικών κινήσεων (Sharpe, 1938). 3) Μετατοπισμένο τοίχο σκυροδέματος. 2) Εφελκυστικές ρωγμές επί του οδοστρώματος. Ο προσανατολισμός της ρωγμής είναι σχεδόν παράλληλος με την

διεύθυνση της κίνησης, συνεπώς είναι ένα δείγμα οριοθέτησης κοντά στην κεφαλή της κύριας κατολίσθησης. 4, 5) Εμφανίσεις ρωγμών και μείζονων διαρρήξεων στην επιφάνεια του εδάφους.

Σε τοπικά τμήματα εντός της κατολίσθησης εντοπίστηκαν περιοχές με κορήματα οι οποίες φαίνεται να τοποθετούνται σε ορισμένη σχετικά μεγάλη απόσταση από την πηγή τροφοδοσίας τους. Τα υλικά αυτά εκτιμάται πως προέρχονται από υψηλότερα τμήματα της κατολίσθησης, τα όποια στη συνέχεια ολίσθησαν με έναν αργό ρυθμό προς τα κατάντη.

Παράλληλα, στα πλαίσια περιχαράκωσης των ορίων της κατολίσθησης, χαρτογραφήθηκαν εμφανίσεις ρωγμών και μείζονων διαρρήξεων της επιφανείας του εδάφους. Η αναγνώριση τέτοιων εμφανίσεων στο πεδίο και η κατανόηση της σημασίας τους, συντελούν στο καθορισμό του τύπου της κατολισθητικής κίνησης.

Στον χάρτη της **Εικόνας 5.22** οι εμφανίσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στο κατώτερο ενεργό τμήμα της κύριας κατολίσθησης, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δεν εντοπίστηκαν ρωγμές και σε άλλα τμήματα της κατολίσθησης.

Η δυνατότητα αναγνώρισης τέτοιων μικρών ρωγμών και διαρρήξεων ήταν εφικτή κυρίως κατά το στάδιο εργασιών στο πεδίο, ενώ κατά την διαδικασία αναγνώρισης τέτοιων δομών στα στάδια της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους ήταν αρκετά περιορισμένη καθώς η φυτοκάλυψη της περιοχής εμπόδιζε σε ένα βαθμό την αποτύπωση αυτών των εμφανίσεων.

5.4.7. Υδρογεωλογικό καθεστώς – αποτύπωση περιοχών διήθησης και πηγών

Στα πλαίσια διερεύνησης του στενού υδρογεωλογικού καθεστώτος, καθώς και της επίδρασης του νερού στην ενεργοποίηση των κατολισθητικών φαινομένων, αποτυπώθηκαν περιοχές συγκέντρωσης και εκροής νερού. Πιο συγκεκριμένα αποτυπώθηκαν ταπεινώσεις του αναγλύφου γεμάτες με νερό, περιοχές διήθησης (στάσιμα νερά) και πηγές.

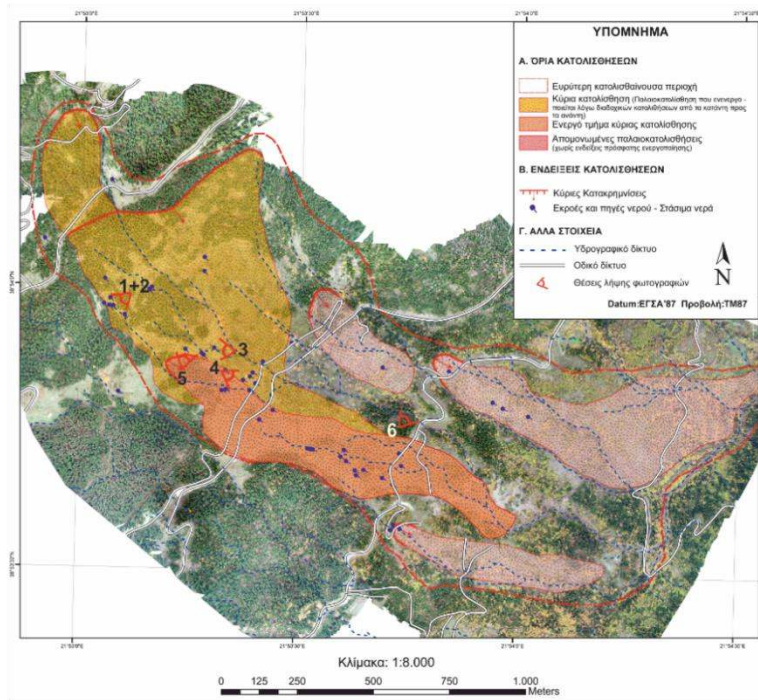
Τα σημεία που αποφορτίζεται το νερό φανερώνουν ένα ακατάστατο καθεστώς περατότητας. Μια φυσιολογική ροή του νερού θα έπρεπε να περνάει μέσα από τα υλικά της κατολίσθησης και να καταλήγει υπόγεια από τα ανάντη προς τα κατάντη (Fookes et al., 2007).

Στην περίπτωση της υπό μελέτη κατολίσθησης τα υλικά κατολίσθησης είναι αργιλικά οπότε η διαδικασία αυτή γίνεται με έναν πολύ αργό ρυθμό. Το νερό εισέρχεται εντός της πιο χαλαρής δομής των υλικών κατολίσθησης δημιουργώντας υπόγειους ορίζοντες που ακολουθούν την γενική κλίση του εδάφους και αποστραγγίζονται με αργό ρυθμό στην κοίτη των ρεμάτων της περιοχής.

Όταν η κίνηση αυτή διακόπτεται από αδιαπέρατα στρώματα τότε δημιουργούνται σημεία εξόδου του νερού (πηγές) στην επιφάνεια του εδάφους οι οποίες με την σειρά τους φορτίζουν και τροφοδοτούν με νερό τα κατώτερα τμήματα της κατολίσθησης.

Παράλληλα η κυκλοφορία του νερού συνεχίζεται και σε μεγαλύτερα βάθη εντός του υποβάθρου, κατά μήκος διαρρήξεων και σημαντικών διακλάσεων του φλύσχη.

Η παρουσία υπογείου ορίζοντα εντός των υλικών της κατολίσθησης επιβαρύνει σημαντικά την ευστάθεια τους και συνεισφέρει στην εκδήλωση αστοχιών.

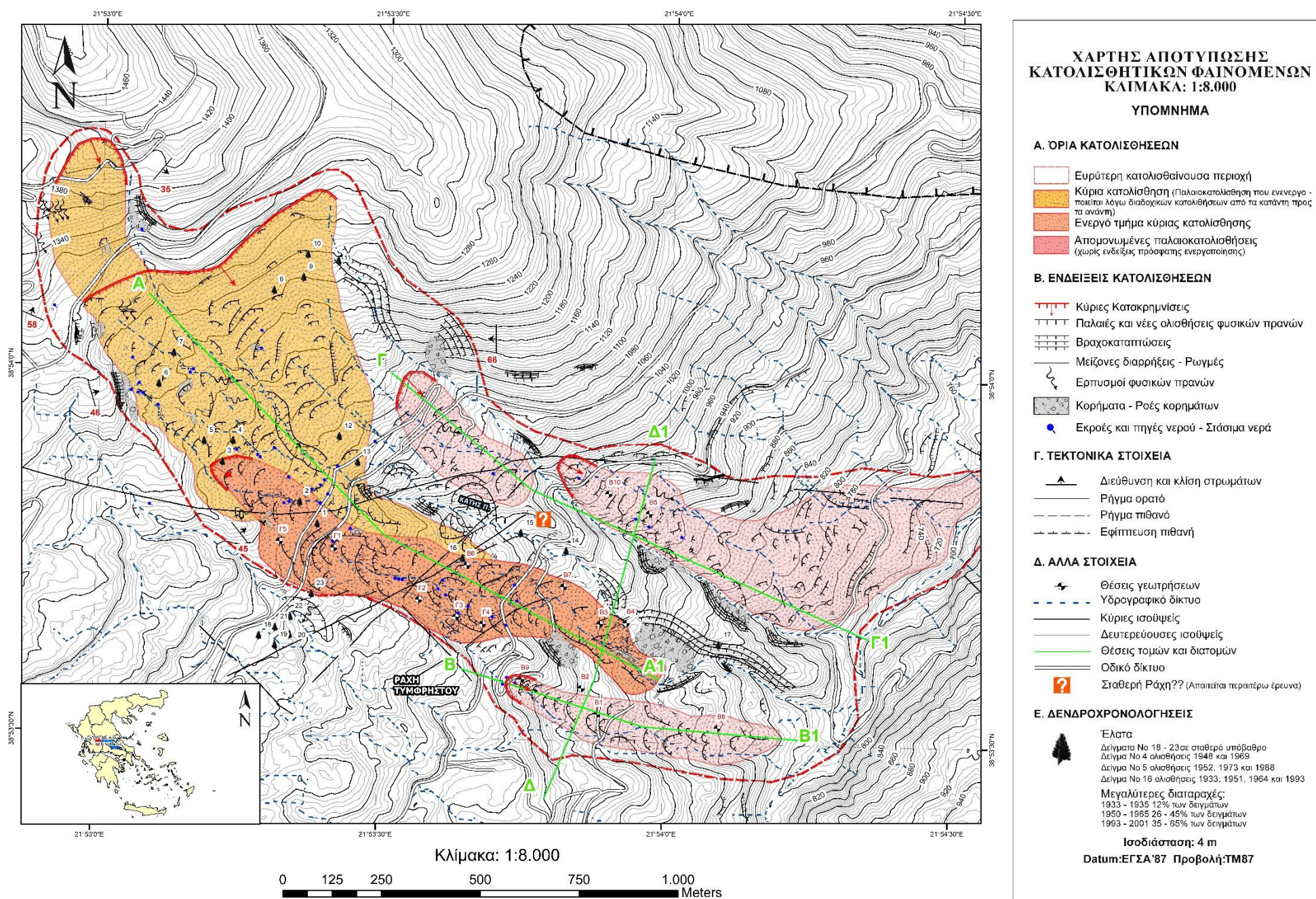


Εικόνα 5.23 Φωτογραφικό υλικό από την έρευνα στο πεδίο. 1, 2) Ταπεινώσεις του αναγλύφου γεμάτες με νερό (λήψη φωτογραφίας Νο 1. Νοέμβριος 2019, λήψη φωτογραφίας Νο 2. Μάιος 2021. 3, 4, 5) Περιοχές εμφάνισης πηγών και στάσιμων νερών. 6) Εγκάρσιο ρέμα του ποταμού Κατή.

Ε. Σύνθεση τοπογραφικού χάρτη

5.4.8. Χάρτης αποτύπωσης κατολισθητικών φαινομένων

Βάσει της ανωτέρας ανάλυσης από τις υπαίθριες παρατηρήσεις και σε συνδυασμό με την γεωμορφολογική ανάλυση που επιτελέστηκε από την οπτική ερμηνεία των ψηφιακών μοντέλων της περιοχής, κατασκευάστηκε ο τοπογραφικός χάρτης αποτύπωσης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, σε κλίμακα 1:8.000, όπου αποτυπώνονται σε αυτών τα όρια και το σύνολο των πληροφοριών που συλλέχτηκαν και σχετίζονται με τα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής.



Εικόνα 5.24 Τοπογραφικός χάρτης αποτύπωσης κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής (Κλίμακα 1:8.000) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 14**).

ΣΤα. Αναθεώρηση της γεωλογικής πληροφορίας της περιοχής

5.5. Τεχνικογεωλογική διερεύνηση επιφανείας

Στα πλαίσια των εργασιών πεδίου για την καταγραφή και αποτύπωση των μορφολογικών ενδείξεων κατολισθήσεων, εκτελέστηκε παράλληλα τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση και αναθεώρηση της πρότερης ανάλυσης του γεωλογικού καθεστώτος της περιοχής.

Στην περιοχή μελέτης επικρατούν αφενός η ενότητα του φλύσχη, ηλικίας Άνω Κρητιδικού – Κάτω Τριτογενούς, η οποία αποτελεί και το υπόβαθρο της περιοχής, και αφετέρου οι χαλαρές επιφανειακές αποθέσεις του Τεταρτογενούς.

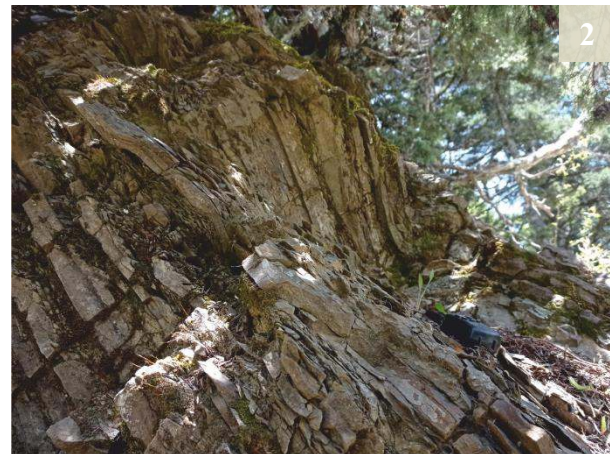
Ο φλύσχος κατά τη χαρτογράφηση στο πεδίο διαχωρίστηκε σε διάφορους επιμέρους τύπους ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής των ψαμμιτών και των ιλυολίθων και την τεκτονική καταπόνηση που παρουσίαζε, δίνοντας περισσότερο έμφαση στη μηχανική συμπεριφορά των επιμέρους αυτών σχηματισμών και λιγότερο στη στρωματογραφική τους θέση μέσα στην ενότητα του φλύσχη.

5.5.1. Τεκτονική περιοχής μελέτης

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η ευρύτερη περιοχή μελέτης ανήκει στην ζώνη της Πίνδου, και υπέστη έντονη πτυχωσιγενή τεκτονική κατά τη διάρκεια της Αλπικής Ορογένεσης. Αυτή η τεκτονική προκάλεσε αλληπάλληλες πτυχές (σύγκλινα, αντίκλινα) οι οποίες στην συνέχεια αποκολλήθηκαν, επιπτεύθηκαν και επωθήθηκαν με κυρίαρχη διεύθυνση κίνησης από τα ανατολικά προς τα δυτικά (Βλ. Κεφάλαιο 4 «4.2.3. Τεκτονική»).

Στην περιοχή μελέτης οι άξονες των πτυχών έχουν διεύθυνση ως επί το πλείστον Β – Ν, με συχνές όμως σημαντικές αποκλίσεις από αυτή την κυρίαρχη διεύθυνση. Οι επιφάνειες της στρώσης του φλύσχη, από παρατηρήσεις και εκτιμήσεις στο ύπαιθρο, φαίνεται να έχουν παράταξη ΒΔ – ΝΑ και να κλίνουν με μια γωνία κλίσης από 30° - 50° άλλοτε προς τα ΒΑ και άλλοτε προς τα ΝΔ.

Λόγω της συμμετοχής τόσο των άκαμπτων (ψαμμίτες) όσο και των εύκαμπτων (ιλυόλιθοι, αργιλοί σχιστόλιθοι) μελών του φλύσχη, που παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά έναντι των πτυχωσιγενών δυνάμεων προκλήθηκαν τοπικά έντονες δυσαρμονικές μικροπτυχώσεις, διατμήσεις έως και μυλωνιτώσεις.



Εικόνα 5.25 1) Χαρακτηριστικές πτυχές τύπου Knick. 2) Δυσαρμονικές μικροπτυχώσεις.

Μετά την πτυχωσιγενή τεκτονική της περιοχής ακολούθησε ρηξιγενής τεκτονική η οποία έδωσε ρήγματα μετάπτωσης με διεύθυνση ΒΒΔ - ΝΝΑ έως και Α - Δ. Τα ρήγματα αυτά, λόγω της ευκαμψίας του φλύσχη σαν σύνολο, δεν είναι σαφή και λόγω της έντονης δασοκάλυψης δεν εντοπίστηκαν κατά την αυτοψία στο πεδίο. Παρόλα αυτά είναι αναμφίβολο ότι τοπικά προκάλεσαν τον ισχυρό κερματισμό του φλύσχη.

Συνακόλουθα, ο φλύσξης της περιοχής εκτός από τις συχνές λιθολογικές ιζηματογενείς εναλλαγές, εμφανίζει και συχνές μεταβολές στην τεκτονική του καταπόνηση τόσο από θέση σε θέση όσο και στο βαθμό έντασης. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με την επιφανειακή χαλάρωση, λόγω της επιφανειακής μηχανικής και χημικής αποσάθρωσης, οδήγησαν σε ισχυρή αποδιοργάνωση και διαταραχή του φλύσχη.

5.5.2. Τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση - Αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής

Έχοντας ως βάση το τμήμα του γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησίου, όπου εντοπίζεται η περιοχή μελέτης, και μετά από την εκτέλεση τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης στο πεδίο, κατασκευάστηκε ο αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης, πάνω στον οποίο αποτυπώνονται πρόσθετες πληροφορίες, σχετικά με την γεωλογική δομή και τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων του σχηματισμού του φλύσχη, που ουσιαστικά αντανακλούν και προδιαγράφουν τις κατολισθητικές συνθήκες της περιοχής.

Τα αποτελέσματα της εν λόγω χαρτογράφησης και ο αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται παρακάτω.

ΣΤβ. Σύνθεση και ανάλυση αναθεωρημένης γεωλογικής πληροφορίας

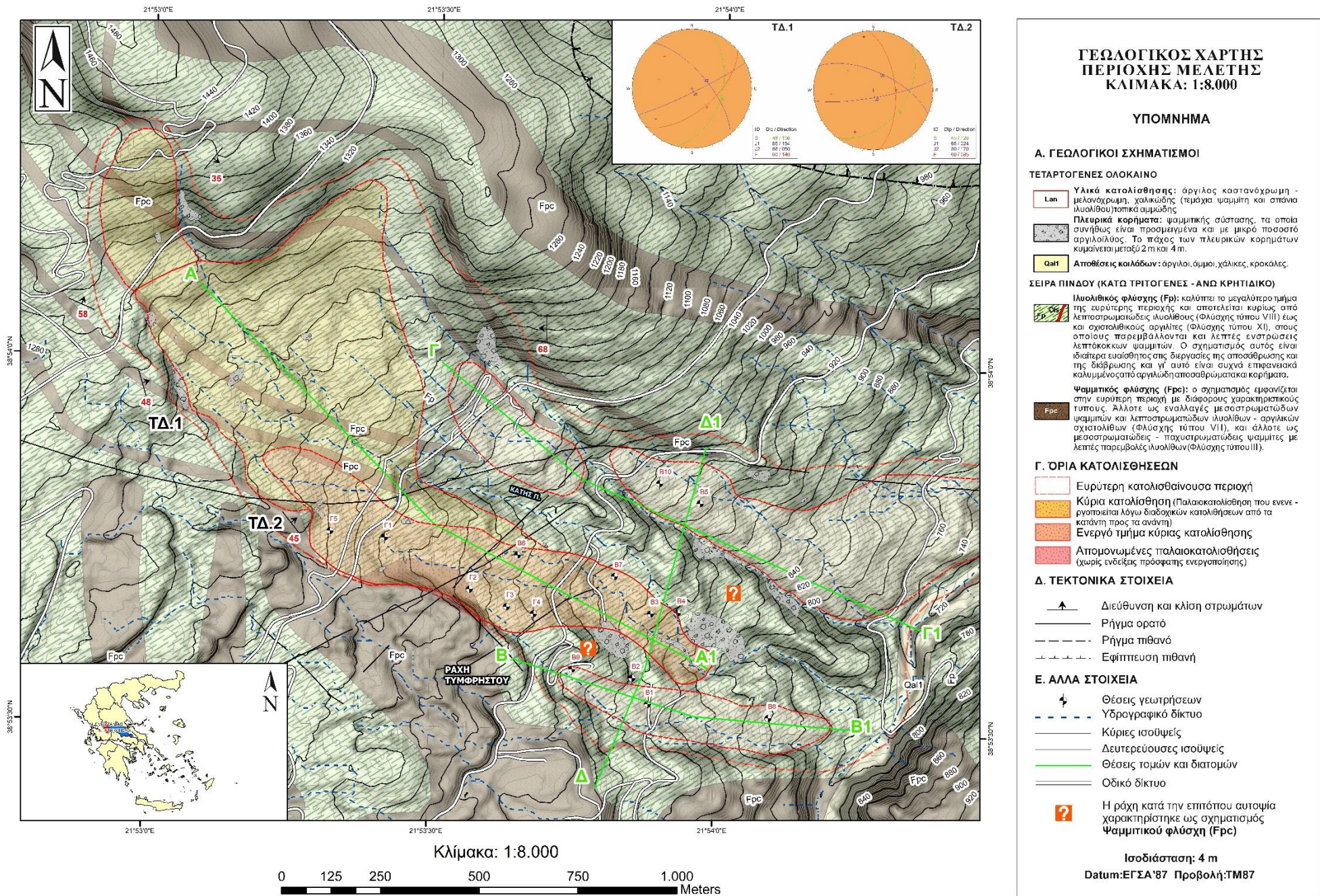
5.5.3. Χαρακτηριστικοί επιμέρους τύποι φλύσχη

Κατά την έρευνα χαρτογραφήθηκαν οι εξής χαρακτηριστικοί τύποι Φλύσχη: Τύπου III, VII, VIII και XI, οι εμφανίσεις των οποίων αναλύονται παρακάτω:

1) Φλύσξης τύπου III

Μέτρια διαταραγμένος τεμαχώδης φλύσξης αποτελούμενος από μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με λίγες ενστρώσεις ιλυολίθων, αναφερόμενος κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχόμαζες όπως ο φλύσξης (V. Marinos, 2017) ως **Φλύσξης τύπου III**. Ο χαρακτηριστικός αυτός τύπος, εντοπίστηκε σε εμφανίσεις του υποβάθρου, κατά μήκος του δυτικού ορίου της ευρύτερης κατολίσθησης, και τοπικά στην ανατολική πτέρυγα, και στις πιο σταθερές ράχες, της ευρύτερης κατολίσθησης.

Η ενότητα αυτή εμφανίζει χαρακτηριστικούς οριζόντες αποτελούμενους κυρίως από σκληρούς μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες στους οποίου παρεμβάλλονται και λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων. Η συμμετοχή των ψαμμιτών κυμαίνεται μεταξύ 90% και 100% και για αυτό τον λόγο ο σχηματισμός αποτελεί κατ' ουσία βράχο σε ποσοστό 100%. Όσον αφορά την δομή του, ο σχηματισμός εμφανίζεται τεμαχώδης, μέτρια διαταραγμένος, οριζόμενος από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Οι επιφάνειες των ασυνεχειών εμφανίζονται τραχείες και ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες. Σύμφωνα με την ταξινόμηση GSI για ετερογενείς βραχόμαζες όπως ο φλύσξης (V. Marinos, 2017) ο σχηματισμός εμφανίζει δείκτη γεωλογικής αντοχής **GSI = 50 – 55**.



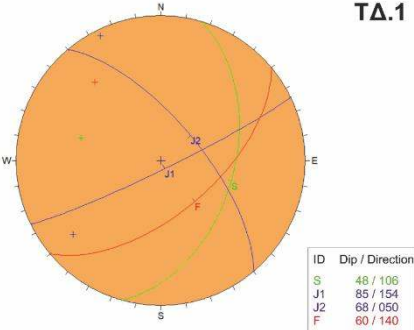
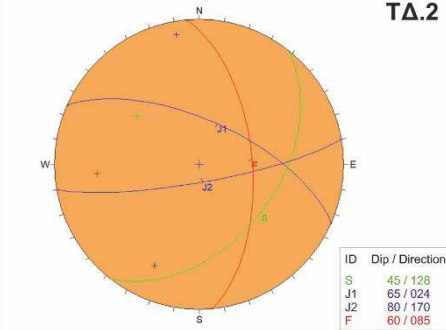
Εικόνα 5.26 Αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, φύλλο Καρπενησιού, για την περιοχή μελέτης (Κλίμακα 1:8.000) (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 15**).

Κατά την χαρτογράφηση του σχηματισμού αυτού, σε διάφορες θέσεις, παρατηρήθηκαν φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν, όπου ήταν δυνατόν, τεκτονικές μετρήσεις των ασυνεχειών, έχοντας ως στόχο την κατασκευή τεκτονικών διαγραμμάτων.

Τα στοιχεία των μετρήσεων καθώς και επιμέρους πληροφορίες σχετικά με τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού, παρατίθενται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5-7 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου III.

ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΥΠΟΥ III

<p>ΓΕΝΙΚΟΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ</p> <p>ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ (ISRM)</p> <p>ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI</p> <p>ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ</p> <p>Οι θέσεις των διαγραμμάτων αποτυπώνονται στον αναθεωρημένο γεωλογικό χάρτη της περιοχής (βλ. Εικόνα 5.26)</p>	<p>Στην δυτική πτέρυγα: 48°/106°</p>	<p>Στην ανατολική πτέρυγα: 68°/270°</p>
	<p>I – II</p>	<p>Υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένη βραχώμαζα</p>
	<p>50 – 55</p>	
	<p>ΤΔ.1</p> 	<p>ΤΔ.2</p> 

2) Φλύσχης τύπου VII

Έντονα διαταραγμένος έως πτυχωμένος φλύσχης αποτελούμενος από εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και λεπτοστρωματώδων ιλυολίθων, αναφερόμενος κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχης (V. Marinis, 2017) ως **Φλύσχης τύπου VII**.

Ο επιμέρους αυτός τύπος φλύσχη, εντοπίστηκε τοπικά σε εμφανίσεις του υποβάθρου, σε όλη την έκταση της ευρύτερης περιοχής. Χαρακτηριστικές είναι οι εμφανίσεις του στις δύο ράχες στο κατώτερο τμήματα της ευρύτερης κατολίθησης, αλλά και εντός του ρέματος στην περιοχή κάτω από το παλαιό οδικό δίκτυο Λαμίας – Καρπενησίου.

Την ενότητα αυτή αποτελούν εναλλαγές σκληρών μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και λεπτοστρωματώδων ιλυολίθων. Η συμμετοχή των ψαμμιτών και ιλυολίθων κυμαίνεται από 60% - 40% αντίστοιχα. Λόγω της συμμετοχής των σκληρών ψαμμιτών ο σχηματισμός αυτός αποτελεί βράχο σε ποσοστό 70%.

Όσον αφορά την δομή του, ο σχηματισμός εμφανίζεται έντονα διαταραγμένος, πτυχωμένος με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Οι επιφάνειες των ασυνεχειών εμφανίζονται λείες και μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες. Σύμφωνα με την ταξινόμηση GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχης (V. Marinis, 2017) ο σχηματισμός εμφανίζει έναν δείκτη γεωλογικής αντοχής **GSI = 40 – 45**. Ο τύπος αυτός είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις διαδικασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης και γι' αυτό επιφανειακά είναι καλυμμένος με αργιλώδη αποσαθρώματα και κορήματα.

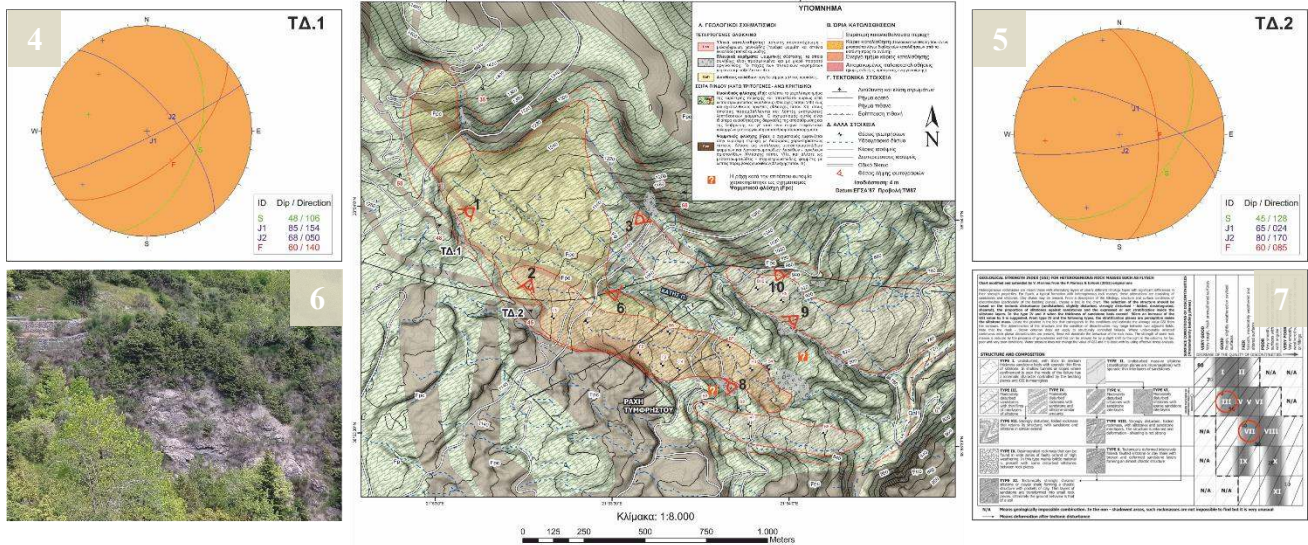
Τα όρια του φλύσχικου αυτού τύπου είναι ασαφή λόγω αυτής της μεταβατικής ιζηματογένεσης του φλύσχη από τον έναν τύπο στον άλλο και λόγω της προαναφερθείσας κάλυψης του σχηματισμού από αποσαθρώματα και πλευρικά κορήματα.

Κατά την χαρτογράφηση του σχηματισμού αυτού, στις προαναφερθείσες θέσεις, παρατηρήθηκαν πάλι φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, όμως σε αυτές τις θέσεις η δυνατότητα λήψης τεκτονικών διαγραμμάτων, λόγω της απόκρημνης τοπογραφίας δεν ήταν εφικτή. Τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του εν λόγω σχηματισμού παρατίθενται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5-8 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου VII.

ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΥΠΟΥ VII

ΓΕΝΙΚΟΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ (ISRM) ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI	Ο σχηματισμός είναι πτυχωμένος και φαίνεται να κλίνει άλλοτε προς τα ΒΑ και άλλοτε προς τα ΝΔ	
	IV - V	Ισχυρά έως έντονα αποσαθρωμένη βραχώμαξα 40 – 45



Εικόνα 5.27 Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. 1 - 3) Χαρακτηριστικές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου III στο δυτικό (1,2) και ανατολικό (3) όριο, (9) και τοπικά στην σταθερή ράχη εντός της ευρύτερης κατολίθωσης.

4,5) Τεκτονικά διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για εμφανίσεις κατά μήκος της δυτικής πτέρυγας. **6, 8, 10** Χαρακτηριστικές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου VII σε διάφορες θέσεις εντός της ευρύτερης κατολισθητικής περιοχής. **7)** Ταξινόμηση επιμέρους πιο ψαμμιτικών μελών του φλύσχη κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη (V. Marinis, 2017). **Σημείωση:** οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη.

3) Φλύσχη τύπου VIII

Έντονα διαταραγμένος έως πτυχωμένος φλύσχη αποτελούμενος από λεπτοστρωματώδεις έως και σχιστολιθικούς ιλυολίθους και αργιλίτες στους οποίους παρεμβάλλονται λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών, αναφερόμενος κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη (V. Marinis, 2017) ως **Φλύσχη τύπου VIII**. Η συμμετοχή των ιλυολίθων – αργιλιτών ανέρχεται σε ποσοστό 70% - 100% και των ψαμμιτών σε ποσοστό 0% - 30%.

Εμφανίσεις του χαρακτηριστικού αυτού τύπου εντοπίστηκαν στα όρια της ανατολικής πτέρυγας της ευρύτερης κατολίσθησης και τοπικά στο ανώτερο τμήμα της κεντρικής ράχης του πόδα επί του νέου οδικού δικτύου Λαμίας - Καρπενησιού.

Κατά την επιτόπου αυτοψία στο πεδίο δεν εντοπίστηκε κάποια έντονα χαρακτηριστική εμφάνιση της δομής αυτού του τύπου φλύσχη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως ο σχηματισμός παρουσιάζει έναν μεγάλο αποσαθρωμένο μανδύα, λόγω της παρουσίας μεγαλύτερου ποσοστού σε ιλυολίθους, που εμφανίζονται πιο επιδεκτικοί στο φαινόμενο της αποσάθρωσης (φαινόμενο επιφανειακής σχάσης των ιλυολίθων) και μια ανοιχτή δομή, λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης του.

Η αρχική βραχώδης δομή του σχηματισμού αυτού, φαίνεται να έχει καταστραφεί, με εξαίρεση τις πιο ανθεκτικές ενστρώσεις ψαμμιτών. Παρόλα αυτά για τις εμφανίσεις που εντοπίστηκαν φαίνεται πως αυτές βρίσκονται στην θέση τους και σε κατάσταση ισορροπίας υπό μεγάλη κλίση. Για τον λόγο αυτό χαρακτηρίστηκαν από τον συγκεκριμένο επιμέρους τύπου φλύσχη. Έτσι λοιπόν για τα πιο υγιή βαθύτερα τμήματα αυτού του τύπου, δόθηκε μια τιμή δείκτη γεωλογικής αντοχής **GSI = 30 – 35**.

Τα όρια του φλυσχικού αυτού τύπου είναι ασαφή λόγω αυτής της μεταβατικής ιζηματογένεσης του φλύσχη από τον έναν τύπο στον άλλο και λόγω της προαναφερθείσας έντονης τεκτονικής καταπόνησης και αποσάθρωσης.

Τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του εν λόγω σχηματισμού παρατίθενται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5-9 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου VII.

ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΥΠΟΥ VIII

ΓΕΝΙΚΟΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ	Ο σχηματισμός είναι πτυχωμένος όμως στο ύπαιθρο δεν εντοπίστηκε κάποια χαρακτηριστική εμφάνιση της δομής του
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ (ISRM)	V - VI Τα επιφανειακά τμήματα της βραχώμαζας έχουν μετατραπεί σε έδαφος και η αρχική βραχώδης δομή, όπως και ο δομικός του σκελετός του υλικού έχει καταστραφεί. Υπάρχει σημαντική μεταβολή στον όγκο αλλά ουσιαστικές μετακινήσεις του εδαφικού υλικού που προέκυψε δεν έχουν ακόμα σημειωθεί.
ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI	30 – 35

4) Φλύσξης τύπου XI

Όλο το υπόλοιπο μέρος της χαρτογραφηθείσας περιοχής, εντός των ορίων της κατολίσθησης, δομείται εντός ενός ισχυρά τεκτονισμένου αποδιοργανωμένου φλύσχη, αποτελούμενο από ισχυρά διατημημένους ιλυολίθους έως φυλλώδεις αργιλικούς σχιστόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται κερματισμένα έντονα παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια, αναφερόμενος κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσξης (V. Marinos, 2017) ως **Φλύσξης τύπου XI**.

Ο επιμέρους αυτός τύπος, γεωλογικά προέρχεται από το ιλυολιθικό κυρίως υπόβαθρο της περιοχής, το οποίο υπέστη επίδραση έντονης τεκτονικής δράσης, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ημιβραχώδους σχηματισμού χαοτικής δομής με πλήθος πυκνών και τυχαίων ολισθηρών επιφανειών ασυνχειών. Η δομή του λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης αλλά και πιθανώς λόγω μετακινήσεων βαρύτητας δεν εύκολα είναι εμφανής.

Η συμπεριφορά του υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά ενός χαλαρού εδαφικού υλικού.

Σύμφωνα με την ταξινόμηση GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσξης (V. Marinos, 2017) ο σχηματισμός εμφανίζει δείκτη γεωλογικής αντοχής **GSI = 10 – 15**.

Ο τύπος αυτός εμφανίζεται ιδιαίτερα ευαίσθητος στις διαδικασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης και γι' αυτό επιφανειακά είναι καλυμμένος με αργιλώδη αποσαθρώματα και κορήματα, ψαμμιτικής προέλευσης.

Τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του εν λόγω σχηματισμού παρατίθενται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5-10 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά φλύσχη τύπου XI.

ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΥΠΟΥ XI

ΓΕΝΙΚΟΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ	Ο σχηματισμός είναι πτυχωμένος και εμφανίζει χαοτική δομή. Στο ύπαιθρο συναντήθηκαν μεμονωμένα βραχώδη τεμάχια αργιλικού σχιστολίθου όπου μετρήθηκε η στρώση τους με τιμές: 35°/050° (Η τιμή αυτή δεν είναι αντιπροσωπευτική για το σύνολο του σχηματισμού).
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ (ISRM)	VI Η βραχώμαζα στην επιφάνεια εμφανίζεται εντελώς αποδιοργανωμένη και έχει μετατραπεί σε έδαφος. Η αρχική βραχώδης δομή, όπως και ο δομικός σκελετός του υλικού έχει καταστραφεί.
ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI	10 – 15



Εικόνα 5.28 Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. 1 - 3) Χαρακτηριστικές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου IX. 4) Έντονα διατμημένος αργίλικός σχιστόλιθος ο οποίος τεμαχίζεται σε φυλλάκια. 6 - 8) Πιθανές εμφανίσεις Φλύσχη τύπου VIII στα όρια της ανατολικής πτέρυγας και τοπικά στο ανώτερο τμήμα της κεντρικής ράχης επί του νέου οδικού δικτύου Λαμίας - Καρπενησίου. 5) Ταξινόμηση επιμέρους πιο ιλυολιθικών μελών του φλύσχη κατά το σύστημα ταξινόμησης GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη (V. Marinis, 2017). **Σημείωση: οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη.**

5.5.4. Επιφανειακές αποθέσεις Τεταρτογενούς

Οι αποθέσεις του Τεταρτογενούς στην περιοχή μελέτης αποτελούνται γενικά από προϊόντα αποσάθρωσης, διάβρωσης και μεταφοράς και από αποθέσεις που δημιουργήθηκαν κατά την πρόσφατη γεωλογική περίοδο του Τεταρτογενούς.

Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή εντοπίστηκαν οι παρακάτω σχηματισμοί:

1) Αλλουβιακές αποθέσεις κοιλάδων

Στην περιοχή της κοίτης του ρέματος Κατή παρατηρούνται αδρομερείς αποθέσεις αποτελούμενες από κροκάλες, χαλίκια και άμμο. Συχνά παρατηρούνται και μεγαλύτεροι ογκόλιθοι, ελαφρώς στρογγυλεμένοι. Το πάχος αυτών των αποθέσεων είναι της τάξης από 2 m έως τοπικά 10 m.

2) Κορήματα ψαμμιτικής σύστασης

Σε σημαντικά τοπικά τμήματα πάνω στον φλύσχη της περιοχής εντοπίζονται κορήματα ψαμμιτικής σύστασης, τα οποία συνήθως είναι προσμειγμένα και με ένα μικρό ποσοστό αργιλοίλους. Το πάχος των κορημάτων κυμαίνεται μεταξύ 2 – 4m.

Τα εν λόγω κορήματα, ανάλογα με την κλίση του φυσικού εδάφους και το βαθμό κορεσμού τους, από νερά βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων, είναι επιρρεπή στην εκδήλωση εδαφικών ασταθειών, όπως ερπυσμοί, ροές ακόμη και λασποροές.

3) Αποσαθρώματα

Σχεδόν σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, όπου το υπόβαθρο είναι κυρίως ιλυολιθικό, παρατηρούνται τοπικές συγκεντρώσεις αποσαθρωμάτων, πάχους από 2 έως 5 m. Αποτελούνται κυρίως από μίγμα αργιλοίλους και μικρών ψαμμιτικών και ιλυολιθικών θραυσμάτων.

Λόγω μεγάλης συμμετοχής της αργίλου και της μεγάλης κλίσης των φυσικών πρανών, όταν τα εν λόγω αποσαθρώματα κορεσθούν με νερό, έρπουν και ολισθαίνουν προς τα κατόντη.

Ο διαχωρισμός αυτών των υλικών από τα παλαιότερα υλικά κατολίσθησης ήταν αρκετά δύσκολος στο πεδίο, και για αυτό το λόγω τα τελευταία ονομάστηκαν πιθανά υλικά κατολίσθησης.

4) Πιθανά υλικά κατολισθήσεων

Στις περιοχές εντός των πιο απομονωμένων οριοθετημένων παλαιοκατολισθήσεων, εντοπίστηκαν πιθανά υλικά κατολίσθησης, αποτελούμενα από ένα μίγμα αργιλοίλους και γωνιοδών ψαμμιτικών θραυσμάτων. Το πάχος των υλικών αυτών εκτιμάται της τάξης των 4 – 8m.

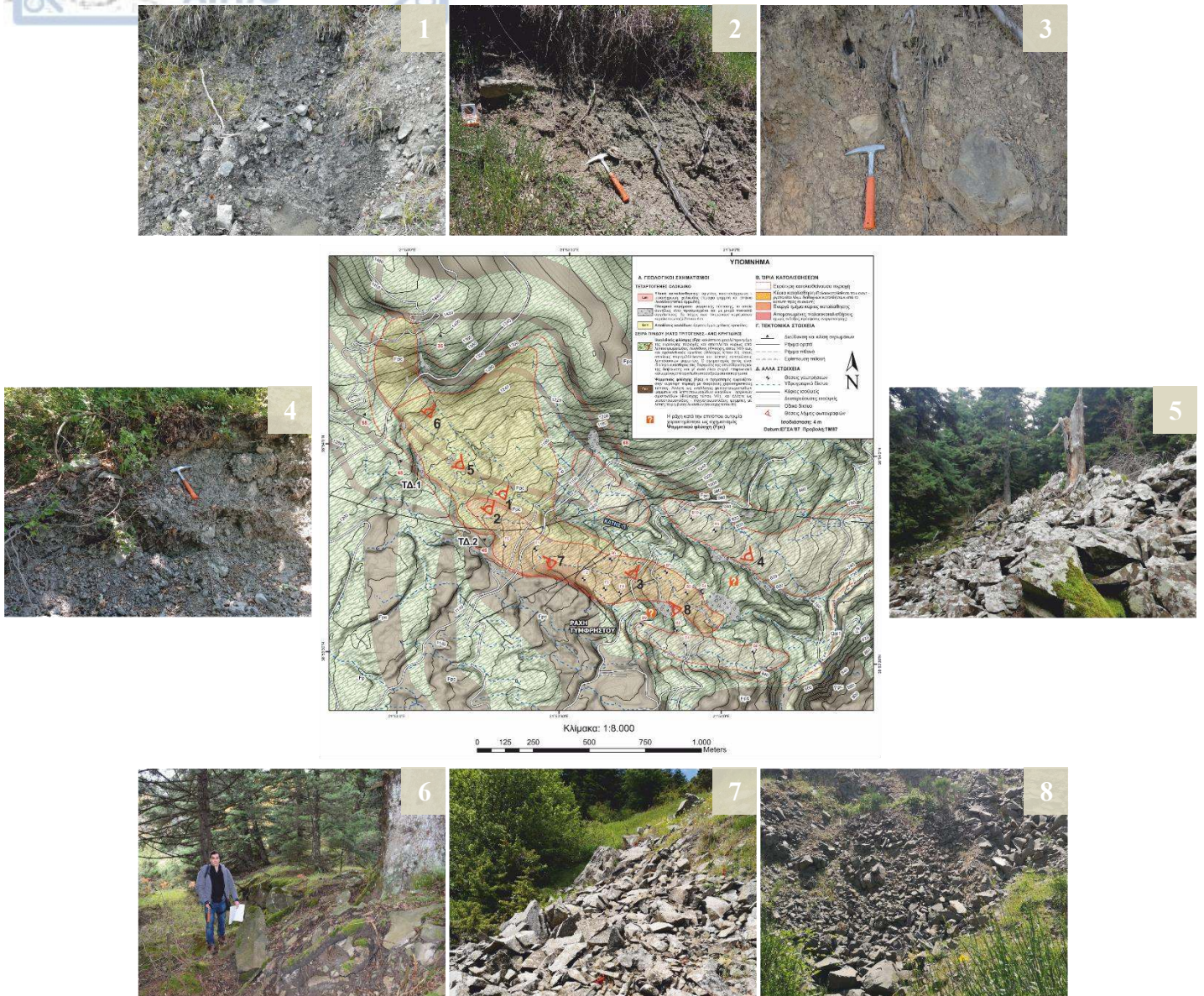
Από παρατηρήσεις που έγιναν στο πεδίο αναφορικά με την μορφολογία του εδάφους εντός αυτών των οριοθετημένων περιοχών, εκτιμήθηκε πως τα υλικά τους συνδέονται με παλαιές ολισθήσεις, χωρίς όμως ενδείξεις πρόσφατης ενεργότητας.

5) Υλικά κατολισθήσεων

Σε όλη την έκταση της οριοθετημένης κεντρικής κατολίσθησης εντοπίστηκαν υλικά αποτελούμενα συνήθως από ένα μίγμα ψαμμιτικών ογκολίθων, λατύπων, μικρότερων ψαμμιτικών και ιλυολιθικών θραυσμάτων και αργιλοίλους. Τα υλικά αυτά προήλθαν από κατολισθητικά φαινόμενα, χωρίς όμως να αποκλείεται και η συμμετοχή της επιφανειακής κερματισμένης και αποσαθρωμένης ζώνης του φλύσχη (Φλύσχη τύπου XI). Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση.

Από παρατηρήσεις της μορφολογίας του εδάφους κατά την επιτόπου αυτοψία αλλά και από την γεωτεχνική ανάλυση του υπεδάφους που ακολουθεί, προκύπτει ένα βέβαιο πάχος των υλικών αυτών

της τάξης μεταξύ 5 - 8 m, ενώ αυτό μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 10 - 15 m και τοπικά έως 20 m όταν η κατολίθωση περιλαμβάνει και τη σαθρή επιφανειακή ζώνη του φλύσχη.



Εικόνα 5.29 Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. 1 - 3) Υλικά κατολίθωσης αποτελούμενα από ένα μίγμα ψαμμιτικών ογκολίθων, λατύπων, μικρότερων ψαμμιτικών και ιλυολιθικών θραυσμάτων και αργιλοίλους, εντός της κύριας κατολίθωσης 4) Πιθανά υλικά κατολίθωσης αποτελούμενα από ένα μίγμα αργιλοίλους και γωνιωδών ψαμμιτικών θραυσμάτων εντός παλαιοκατολίθωσης. 5 - 8) Περιοχές εναπόθεσης ψαμμιτικών κορημάτων. **Σημείωση: οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη.**

5.6. Γεωλογική – Γεωτεχνική ανάλυση υπεδάφους

Μετά το πέρας των εργασιών της τεχνικογεωλογικής ανάλυσης της επιφανείας της περιοχής στο πεδίο, ακολούθησε μια σειρά εργασιών που αφορούσαν την γεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση του υπεδάφους.

Απώτερος σκοπός αυτών των εργασιών αποτέλεσε η συσχέτιση των επιφανειακών δεδομένων που λήφθηκαν στο πεδίο, με δεδομένα του υπεδάφους που αναζητήθηκαν από γεωερευνητικά προγράμματα γεωτρήσεων σε παλαιότερες μελέτες.

Ουσιαστικά, τα επιφανειακά δεδομένα προσδιορίζουν τη χωρική κατανομή των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν άμεσα και έμμεσα την κατολίσθηση, ενώ τα δεδομένα του υπεδάφους αποδίδουν τη σύνθεση του γεωυλικού και την κατανομή του αντίστοιχα στο βάθος. Έτσι λοιπόν, ο βέλτιστος συσχετισμός των παραπάνω δεδομένων έχει ιδιαίτερη σημασία, τόσο στην ερμηνεία του φαινομένου, όσο και στην κατασκευή του γεωλογικού - γεωτεχνικού προσομοιώματος της περιοχής.

5.6.1. Δεδομένα γεωτρήσεων

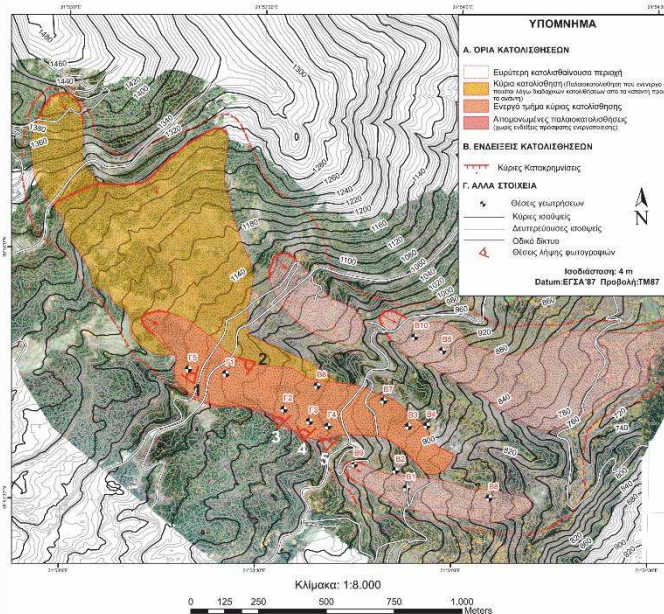
Τα δεδομένα του υπεδάφους που συγκεντρώθηκαν αναφέρονται σε δεδομένα γεωτρήσεων και σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που διεξήχθησαν στο πλαίσιο γεωτεχνικής έρευνας της περιοχής τις περιόδους 1996 και 1999.

Κατά τις έρευνες αυτές εκτελέστηκε σύνολο 15 δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται αναλυτικά στο **Παράρτημα Νο 1** [Αναλυτικά μητρώα γεωτρήσεων].

Οι θέσεις και οι συντεταγμένες των εν λόγω γεωτρήσεων, προσδιορίστηκαν είτε από την επιτόπου αναγνώριση τους και καταγραφή τους, μέσω χρήσης της εφαρμογής OsmAnd GPS Tracker, στο πεδίο, είτε από την απευθείας καταγραφή τους από αποτυπώσεις τους σε γεωαναφερμένους χάρτες του παρελθόντος.

Πίνακας 5-11 Στοιχεία και συντεταγμένες γεωτρήσεων.

ΓΕΩΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	X (ΕΓΣΑ '87)	Y (ΕΓΣΑ '87)	Z Απόλυτο υψόμετρο (m)	ΕΝΑΡΞΗ (m)	ΠΕΡΑΣ (m)
1996	Γ1	21,892007	38,898568	1098	0	36
	Γ2	21,894513	38,897429	1051	0	50
	Γ3	21,895607	38,89705	1032	0	50
	Γ4	21,896396	38,896902	1017	0	25,11
	Γ5	21,890413	38,898691	1138	0	20,4
1999	B1	21,899789	38,894903	920	0	25
	B2	21,899315	38,895483	930	0	30
	B3	21,899815	38,896959	932	0	25
	B4	21,900597	38,896994	913	0	30
	B5	21,901189	38,899495	930	0	25
	B6	21,895898	38,898233	1027	0	50
	B7	21,898737	38,897791	949	0	35,5
	B8	21,903311	38,89464	840	0	25,3
	B9	21,897556	38,895661	975	0	25
	B10	21,899996	38,899931	956	0	25



Εικόνα 5.30 Φωτογραφικό υλικό από την χαρτογράφηση στο πεδίο. Οι γεωτρήσεις που αποτυπώθηκαν στο πεδίο. 1) Γεώτρηση Γ5. 2) Γεώτρηση Γ1. 3) Γεώτρηση Γ2. 4) Γεώτρηση Γ3. 5) Γεώτρηση Γ4. **Σημείωση:** οι θέσεις και προσανατολισμός των φωτογραφιών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα πάνω στον χάρτη.

5.6.2. Ενδεικτικές τομές

Στη συνέχεια, και μετά από λεπτομερή μελέτη και ανάλυση των μητρώων των γεωτρήσεων (Παράρτημα Νο 1), κατασκευάστηκαν τέσσερις ενδεικτικές τομές, τρεις με παράλληλο – προσανατολισμό (Α – Α1, Β – Β1, Γ – Γ1) στην διεύθυνση της κίνησης και μια με κάθετο (Δ – Δ1), προκειμένου να μελετηθεί λεπτομερώς, η εξέλιξη και το μοντέλο της κατολίσθησης.

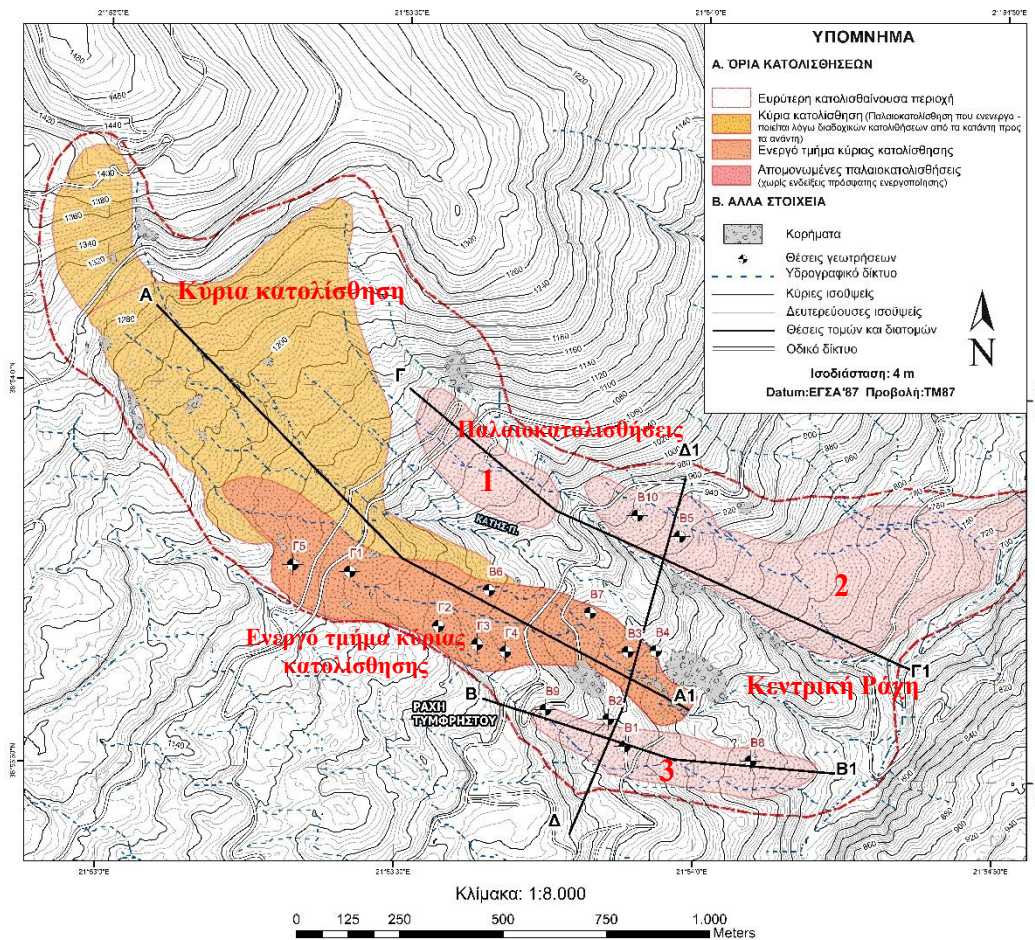
Στις ενδεικτικές αυτές τομές, εκτός από την στρωματογραφία του υπεδάφους, αποτυπώνονται οι εκτιμώμενοι πιθανοί κύκλοι ολίσθησης της κατολίσθησης, καθώς και ο υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος σχεδιάστηκε βάσει των δεδομένων των γεωτρήσεων από μετρήσεις της στάθμης του υπογείου ορίζοντα μετά την ολοκλήρωση της εκάστοτε γεώτρησης.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη διαπερατότητα των υλικών της κατολίσθησης σε σύγκριση με αυτή του υποβάθρου, προσδιορίστηκε το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα πέρα από το πεδίο των παρεχόμενων δεδομένων και εκφράζεται ως πιθανός υδροφόρος ορίζοντας.

Πίνακας 5-12 Στάθμες υδροφόρου ορίζοντα από μετρήσεις του μετά την ολοκλήρωση των γεωτρήσεων.

	ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ (m)
1996	Γ1	7,5
	Γ2	7
	Γ3	19
	Γ4	7,5
	Γ5	18
1999	B1	-
	B2	14,4
	B3	16,3
	B4	-
	B5	12,3
	B6	12,6
	B7	6,7
	B8	6,2
	B9	5,7
	B10	-

Οι θέσεις και η ανάλυσή των εν λόγω ενδεικτικών τομών, παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω:



Εικόνα 5.31 Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μελέτης πάνω στον οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις των ενδεικτικών τομών.

1) Ενδεικτική διατομή A – A1

Η διατομή A – A1 (Βλ. Εικόνα 5.32) σχεδιάστηκε κατά μήκος του άξονα της κύριας κατολίσθησης (Βλ. Εικόνα 5.31). Πρόκειται για ένα τμήμα μήκους περίπου 1650 m που έχει προσανατολισμό παράλληλο με την γενική διεύθυνση της κίνησης της κατολίσθησης, ήτοι BBD – NNA.

Επί της διατομής αποτυπώθηκαν συνολικά έξι σχηματισμοί, τρία εδαφικά στρώματα αναφερόμενα στον επιφανειακό μανδύα, ήτοι, κορήματα, αποσαθρώματα και υλικά κατολίσθησης, και τρεις επιμέρους σχηματισμοί του φλυσχικού υποβάθρου.

Πιο αναλυτικά, οι σχηματισμοί που διακρίθηκαν είναι οι κάτωθι:

Επιφανειακός εδαφικός μανδύας: ως επιφανειακός εδαφικός μανδύας ορίστηκε η ζώνη του υπεδάφους που εμφανίζει ιδιότητες χαλαρού εδάφους. Ο μανδύας αυτός αποτελείται από κορήματα ψαμμιτικής σύστασης και από υλικά κατολισθήσεων και αποσαθρώματα, του φλυσχικού υποβάθρου, αργιλικής κυρίως σύστασης, με τα εξής παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. **Κορήματα:** ψαμμιτικής κυρίως σύστασης προσμειγμένα με μικρό ποσοστό αργιλοϊλύος. Το πάχος τους κυμαίνεται μεταξύ 2 m και 4 m.
2. **Αποσαθρώματα - Υλικά κατολίσθησης:** τα υλικά αυτά συναντήθηκαν στα πρώτα μέτρα των γεωτρήσεων σε όλη την έκταση της διατομής. Προέρχονται από τον πιο έντονα διαταραγμένο και αποδιοργανωμένο ορίζοντα του φλυσχικού υποβάθρου. Πρόκειται ουσιαστικά για υλικά περίπου ίδιας σύστασης (αργιλικής), με τα αποσαθρώματα όμως να χαρακτηρίζονται από μια πιο χαλαρή δομή έναντι της πυκνότερης δομής των υλικών κατολίσθησης.
 - a. **Αποσαθρώματα:** τα υλικά αυτά συναντήθηκαν στα πρώτα μέτρα των γεωτρήσεων και αποτελούνται κυρίως από μια καστανόχρωμη ΑΡΓΙΛΟ με χαλικώδη γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής κυρίως σύστασης. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση, ενώ η δομή τους είναι σχετικά χαλαρή. Τα υλικά αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσάθρωση των βαθύτερων υλικών κατολίσθησης.
 - b. **Υλικά κατολίσθησης:** τα υλικά αυτά αποτελούν την κύρια μάζα των κατολισθημένων υλικών. Προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο ορίζοντα του φλυσχικού υποβάθρου (Φλύσσης τύπου XI) και καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μια μελανόχρωμη χαλικώδη ΑΡΓΙΛΟ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής αλλά και ιλυολιθικής σύστασης. Η δομή και σε αυτά τα υλικά είναι χαλαρή, πυκνότερη όμως από τα επιφανειακότερα.

Σχηματισμοί υποβάθρου: το φλυσχικό υποβάθρο της περιοχής μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις επιμέρους σχηματισμούς, που από τον ανώτερο στον κατώτερο παρατίθενται παρακάτω:

1. **Αποδιοργανωμένος φλύσσης:** πρόκειται για έναν γεωτεχνικά ασθενή σχηματισμό με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά που καλύπτει τον ευρύτερο χώρο της περιοχής, προερχόμενος από την έντονη τεκτονική καταπόνηση του φλυσχικού υποβάθρου (τύπου VII και VIII).

Στις επιφανειακές εμφανίσεις του εκτιμήθηκε ως ένας ημιβραχώδης αποδιοργανωμένος σχηματισμός χαοτικής δομής, αποτελούμενος από ισχυρά διατμημένους ιλυολίθους έως φυλλώδεις αργιλικούς σχιστόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται κερματισμένα έντονα παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια (Φλύσχος τύπου XI).

Εντός των γεωτρήσεων, ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται ως μια έντονα τεκτονισμένη σκληρή και συνεκτική αργιλική μάζα, μαζί με τεμάχια βραχώδους αργιλικού σχιστολίθου και ψαμμιτών, που αποτελούν ουσιαστικά τα υπολείμματα της αρχικής δομής του. Η παρουσία και η συχνότητα αυτών των τεμαχίων είναι ανομοιόμορφη και τυχαία. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό, και εκτιμάται μικρότερο στα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης.

Ο σχηματισμός αυτός φαίνεται να βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας και να είναι υπεύθυνος για την δημιουργία των υλικών της κατολίσθησης.

- 2. Ψαμμιτικό υπόβαθρο:** πρόκειται για έναν σχηματισμό αποτελούμενο από λεπτόκοκκους έως μεσόκοκκους ψαμμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλυολίθων, που εμφανίζει έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού.

Το ψαμμιτικό αυτό υπόβαθρο συναντήθηκε σε λίγες γεωτρήσεις με την μορφή μιας ανεξάρτητης φάσης. Στο μεγαλύτερο σύνολο των γεωτρήσεων οι ψαμμίτες εμφανίζονταν με την μορφή τεμαχίων εντός της χαοτικής δομής του αποδιοργανωμένου φλύσχη. Εξαίρεση αποτελούν οι εμφανίσεις ψαμμιτών στις γεωτρήσεις Γ5, Γ1 και Β4 (Βλ. Εικόνα 5.32 και 5.35) όπου εντοπίστηκαν με μεγαλύτερο πάχος σαν μια επιμέρους ανεξάρτητη φάση του υποβάθρου.

Παράλληλα, ο διαχωρισμός αυτός του υποβάθρου, σε μια πιο ανεξάρτητη ψαμμιτική και ιλυολιθική φάση, επαληθεύτηκε κατά την διαδικασία της επιτόπου αυτοψίας στο πεδίο, όπου η πρώτη εντοπίστηκε σε τοπικές εμφανίσεις του υποβάθρου, σε όλη την έκταση της ευρύτερης περιοχής.

Επιφανειακά ο σχηματισμός εντοπίστηκε πτυχωμένος, και αποτελούμενος από εναλλαγές μεσοστρωματώδων ψαμμιτών και λεπτοστρωματώδων ιλυολίθων (Φλύσχος τύπου VII) ενώ τοπικά στην περιοχή της δυτικής πτέρυγας της κατολίσθησης εμφανιζόταν μέτρια διαταραγμένος τεμαχώδης αποτελούμενος από μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με λίγες ενστρώσεις ιλυολίθων, (Φλύσχος τύπου III).

- 3. Ιλυολιθικό υπόβαθρο:** αποτελεί την υγιέστερη μορφή ιλυολίθων που συναντήθηκε εντός των γεωτρήσεων και πρόκειται για έναν έντονα τεκτονισμένο και ελαφρά αποσαθρωμένο σχηματισμό αποτελούμενο από βραχώδεις ιλυολίθους έντονα κερματισμένους έως κατακερματισμένους, με παρεμβολές ψαμμιτικών ενστρώσεων.

Η ανεξάρτητη φάση του σχηματισμού αυτού προσδιορίστηκε κυρίως από προσωπικές εκτιμήσεις σε τοπικές εμφανίσεις του σχηματισμού στην επιφάνεια, καθώς και από παρατηρήσεις στις πιο σταθερές ψαμμιτικές ράχες της περιοχής, για τις οποίες φαίνεται πιθανόν να γλιστράνε στην βάση τους, με έναν πολύ αργό ρυθμό, πάνω σε ένα πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο.

Επιφανειακά ο σχηματισμός χαρακτηρίστηκε ως έντονα διαταραγμένος, πτυχωμένος ιλυολιθικός φλύσχος αποτελούμενος από λεπτοστρωματώδεις έως και σχιστολιθικούς ιλυολίθους και αργιλίτες στους οποίους παρεμβάλλονται λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών (Φλύσχος τύπου VIII). Βέβαια όπως προαναφέρθηκε, λόγω της έντονης επιδεκτικότητας του σχηματισμού σε συνθήκες της

αποσάθρωσης, στο πεδίο, δεν εντοπίστηκε μια χαρακτηριστική εμφάνιση της δομής που να επαληθεύει ότι πρόκειται για αυτόν τον τύπου φλύσχη, παρόλα αυτά στις εμφανίσεις που εντοπίστηκε φαίνεται να βρίσκεται στην θέση του και να ισορροπεί υπό μεγάλη κλίση και για αυτό τον λόγο χαρακτηρίστηκε και συνδέθηκε με αυτή την ανεξάρτητη επιμέρους ιλυολιθική φάση.

Επιπλέον, επί της τομής αποτυπώθηκαν οι πιθανοί κύκλοι ολίσθησης της κατολίσθησης, τόσο οι επιφανειακοί και πιο βέβαιοι κύκλοι, εντός των υλικών της κατολίσθησης, όσο και οι βαθύτεροι, λιγότερο προφανείς κύκλοι, στην διεπιφάνεια μεταξύ των υλικών κατολίσθησης και του αποδιοργανωμένου φλύσχη.

Παράλληλα, εκτιμήθηκε και αποτυπώθηκε, μια βαθύτερη επιφάνεια ολίσθησης της κύριας κατολίσθησης, δηλαδή αυτή της πιθανής ερπυστικής ολίσθησης ανάμεσα στον πιο αποδιοργανωμένο φλύσχη και στο ψαμμιτικό υπόβαθρο.

Τέλος, για το κατώτερο τμήμα της ευρύτερης κατολισθητικής περιοχής, αποτυπώθηκε η δυσμενέστερη αλλά όχι απίθανη, βαθύτερη επιφάνεια ολίσθησης, δηλαδή της επιφάνειας μιας πιθανής ερπυστικής ολίσθησης της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο ιλυολιθικό υπόβαθρο, η οποία πιθανώς συντελείται με έναν μηχανισμό προοδευτικής βαθιάς ολίσθησης.

2) Ενδεικτική διατομή B – B1 και Γ – Γ1

Οι διατομές B – B1 και Γ – Γ1 (Βλ. Εικόνα 5.33, 5.34) σχεδιάστηκαν κατά μήκος των πιο απομονωμένων παλαιοκατολισθήσεων (Βλ. Εικόνα 5.31) και οι οποίες οροθετήθηκαν στην πρότερη γεωμορφολογική ανάλυση. Πρόκειται για δύο τμήματα μήκους περίπου 1450 m και 900 m αντίστοιχα, με προσανατολισμό παράλληλο ή υποπαράλληλο με την γενική διεύθυνση της κίνησης της κατολίσθησης, ήτοι BBΔ – NNA και ΒΔ -NA αντίστοιχα.

Επί των διατομών αυτών αποτυπώθηκαν και πάλι όλοι οι σχηματισμοί που αναλύθηκαν παραπάνω. Η διαφορά στις κατολισθητικές συνθήκες αυτών των περιοχών, έγκειται κυρίως στο πάχος των κατολισθημένων υλικών, που εντοπίζονται σε όλη την έκταση αυτών των περιοχών και παρουσιάζουν μικρότερο πάχος σε σχέση με αυτά της κύριας κατολίσθησης. Τα υλικά αυτά πιθανόν συνδέονται με παλαιότερες ολισθήσεις, χωρίς όμως ενδείξεις πρόσφατης ενεργότητας.

3) Ενδεικτική τομή Δ – Δ1

Η τομή Δ – Δ1 (Βλ. Εικόνα 5.35) σχεδιάστηκε κάθετα προς τους κύριους άξονες της ευρύτερης συνολικής κατολίσθησης (Βλ. Εικόνα 5.31). Πρόκειται για ένα τμήμα μήκους περίπου 900 m που έχει προσανατολισμό κάθετο προς την γενική διεύθυνση της κίνησης της κατολίσθησης, ήτοι ΔΝΔ – ΑΒΑ.

Επί της τομής αυτής αποτυπώνονται όλοι οι σχηματισμοί που αναλύθηκαν παραπάνω, ένα τμήμα από την κεντρική κατολίσθηση στο κέντρο της τομής, δύο απομονωμένες πιο επιφανειακές παλαιοκατολισθήσεις εκατέρωθεν της κεντρικής καθώς και ο πιθανός κύκλος ολίσθησης της συνολικής κατολίσθησης.

Οι εν λόγω ενδεικτικές τομές, καθώς και το τρισδιάστατο προσομοίωμα της ευρύτερης κατολίσθησης, που κατασκευάστηκε βάσει της ανωτέρας ανάλυσης, παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω:

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ - ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ Α - Α1

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:6500

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΜΑΝΔΥΑΣ

ΚΟΡΗΜΑΤΑ



Κορήματα ψαμμικής κυρίως σύστασης προσμειγμένα με μικρό ποσοστό αργιλοίλου. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 2 m και 4 m.

ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΑΤΑ



Καστανόχρωμη ΑΡΓΙΛΟΣ με χαλικώδη γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμικής κυρίως σύστασης. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση, ενώ η δομή τους είναι σχετικά χαλαρή. Τα υλικά αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσάθρωση των βαθύτερων υλικών κατολίθωσης.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ



Μελανόχρωμη χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμικής αλλά και ιλυολιθικής σύστασης. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο οριζόντα του φλυσικού υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI) και καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής.

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ



Έντονα τεκτονισμένη σκληρή και συνεκτική αργιλική μάζα, μαζί με τεμάχια βραχώδους αργιλικού σχιστολίθου και ψαμμιτών, που αποτελούν ουσιαστικά τα υπολείμματα της αρχικής δομής του φλυσικού υποβάθρου (τύπων VII και VIII). Η παρουσία και η συχνότητα αυτών των τεμαχίων είναι ανομοιομορφη και τυχαία. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό, και εκτιμάται μικρότερο στα ανώτερα τμήματα της κατολίθωσης. Πρόκειται για έναν ημιβραχώδη, γεωτεχνικά ασθενή σχηματισμό, όπου στην πιο υγιή μορφή του χαρακτηρίζεται ως Φλύσχης τύπου XI.

ΨΑΜΜΙΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ



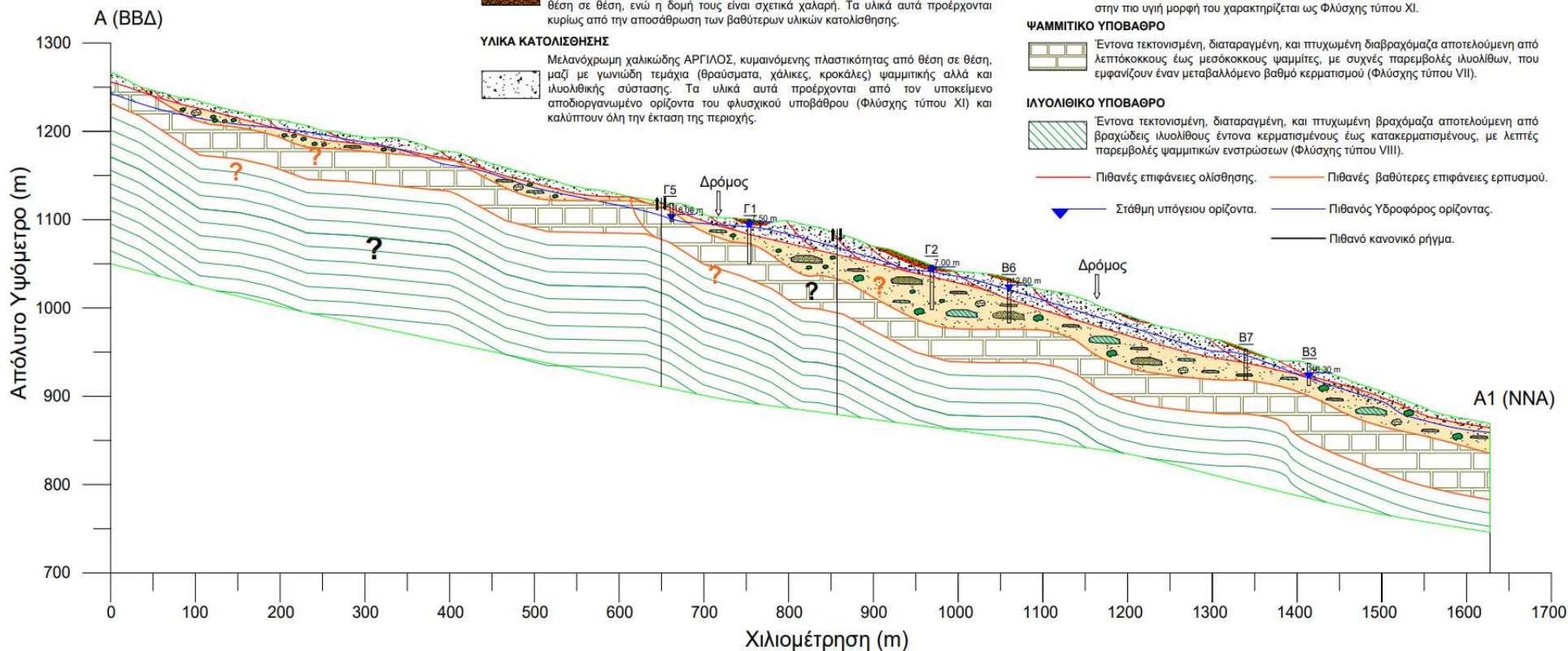
Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη διαβραχόμαζα αποτελούμενη από λεπτόκοκκους έως μεσόκοκκους ψαμμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλυολιθών, που εμφανίζουν έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού (Φλύσχης τύπου VII).

ΙΛΥΟΛΙΘΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ



Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη βραχώμαζα αποτελούμενη από βραχώδεις ιλυολιθούς έντονα κερματισμένους έως κατακερματισμένους, με λεπτές παρεμβολές ψαμμικών ενστρώσεων (Φλύσχης τύπου VIII).

- Πιθανές επιφάνειες ολίθωσης.
- Πιθανές βαθύτερες επιφάνειες ερπυσμού.
- Στάθμη υπόγειου οριζόντα.
- Πιθανός Υδροφόρος οριζόντας.
- Πιθανό κανονικό ρήγμα.



Εικόνα 5.32 Ενδεικτική διατομή Α – Α1 κατά μήκος του άξονα της κύριας κατολίθωσης.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ - ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ Β - Β1

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:6500

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ



Αλλουβιακές αδρομερείς αποθέσεις κοιλάδων αποτελούμενες από κροκάλες, χαλίκια και άμμο. Συχνά παρατηρούνται και μεγαλύτεροι ογκόλιθοι, ελαφρώς στρωγγυλεμένοι. Το πάχος αυτών των αποθέσεων είναι της τάξης από 2 m έως τοπικά 10 m.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΜΑΝΔΥΑΣ

ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΑΤΑ



Καστανόχρωμη ΑΡΓΙΛΟΣ με χαλικώδη γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής κυρίως σύστασης. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση, ενώ η δομή τους είναι σχετικά χαλαρή. Τα υλικά αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσάθρωση των βαθύτερων υλικών κατολιθήσεων.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΘΗΣΗΣ



Μελανόχρωμη χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής αλλά και ιλυολιθικής σύστασης. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο ορίζοντα του φλυσικού υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI) και καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής.

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ



Έντονα τεκτονισμένη σκληρή και συνεκτική αργιλική μάζα, μαζί με τεμάχια βραχώδους αργιλικού σχιστολίθου και ψαμμιτών, που αποτελούν ουσιαστικά τα υπολείμματα της αρχικής δομής του φλυσικού υποβάθρου (τύπων VII και VIII). Η παρουσία και η συχνότητα αυτών των τεμαχίων είναι ανομοιόμορφη και τυχαία. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό, και εκπίπτει μικρότερο στα ανώτερα τμήματα της κατολιθήσεως. Πρόκειται για έναν ημιβραχώδη, γεωτεχνικά ασθενή σχηματισμό, όπου στην πιο υγιή μορφή του χαρακτηρίζεται ως Φλύσχης τύπου XI.

ΨΑΜΜΙΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ



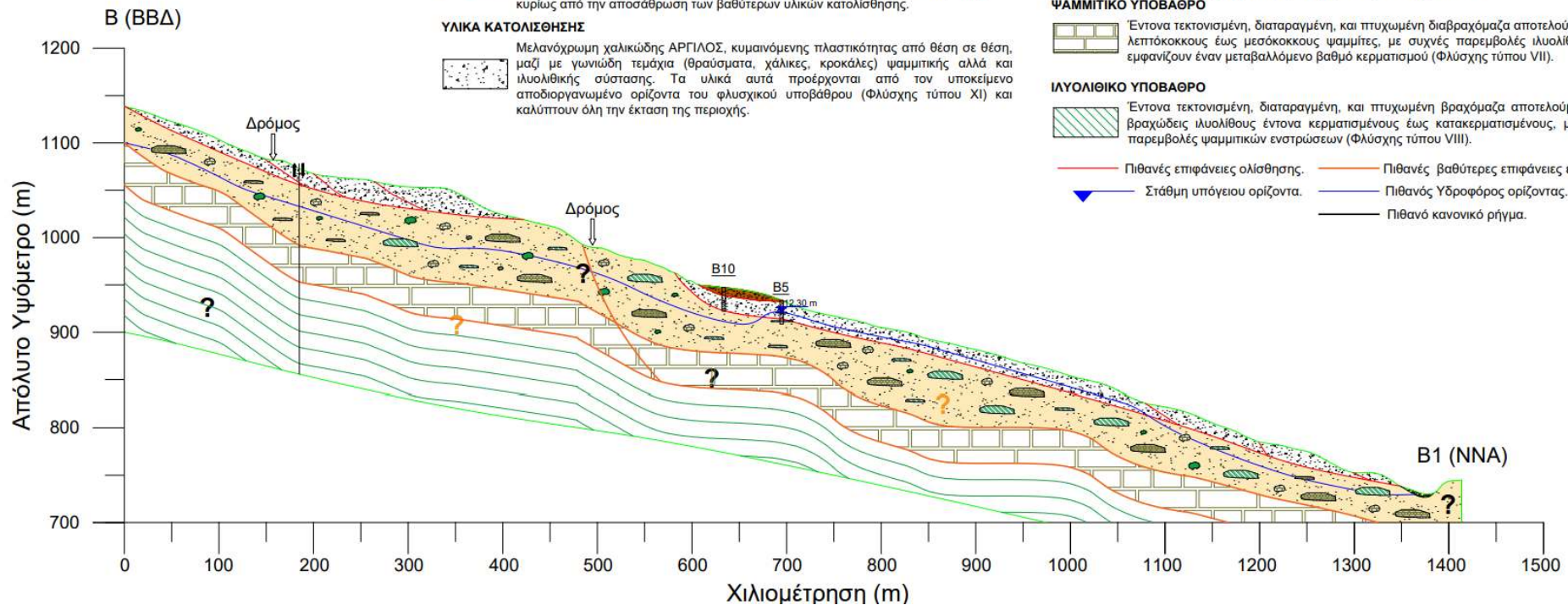
Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη διαβραχόμαζα αποτελούμενη από λεπτόκοκκους έως μεσόκοκκους ψαμμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλυολιθων, που εμφανίζουν έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού (Φλύσχης τύπου VII).

ΙΛΥΟΛΙΘΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ



Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη βραχόμαζα αποτελούμενη από βραχώδεις ιλυολιθούς έντονα κερματισμένους έως κατακερματισμένους, με λεπτές παρεμβολές ψαμμιτικών ενστρώσεων (Φλύσχης τύπου VIII).

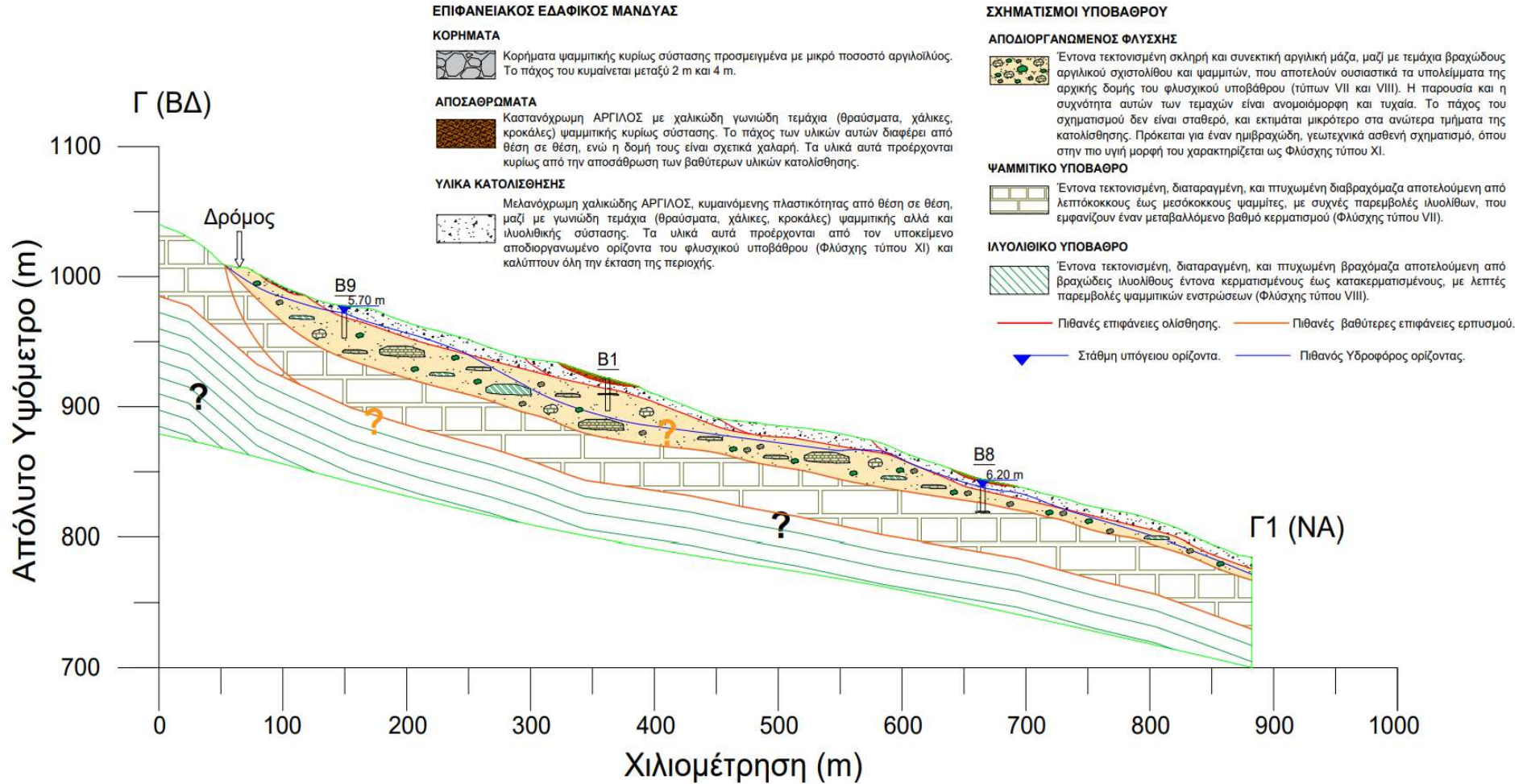
- Πιθανές επιφάνειες ολίσθησης.
- Πιθανές βαθύτερες επιφάνειες ερπυσμού.
- ▼ Στάθμη υπόγειου ορίζοντα.
- Πιθανός Υδροφόρος ορίζοντας.
- Πιθανό κανονικό ρήγμα.



Εικόνα 5.33 Ενδεικτική διατομή Β – Β1 κατά μήκος της περιοχής των παλαιοκατολιθήσεων 1 και 2.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ - ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ Γ - Γ1
ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:4500

ΥΠΟΜΝΗΜΑ



Εικόνα 5.34 Ενδεικτική διατομή Γ – Γ1 κατά μήκος της παλαιοκατολίσθησης 3.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ - ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ Δ - Δ1

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:4500

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΜΑΝΔΥΑΣ

ΚΟΡΗΜΑΤΑ



Κορήματα ψαμμίτικης κυρίως σύστασης προσμειγμένα με μικρό ποσοστό αργιλοίλου. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 2 m και 4 m.

ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΑΤΑ



Καστανόχρωμη ΑΡΓΙΛΟΣ με χαλικιώδη γυνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμίτικης κυρίως σύστασης. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση, ενώ η δομή τους είναι σχετικά χαλαρή. Τα υλικά αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσάθρωση των βαθύτερων υλικών κατολίθωσης.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ



Μελανόχρωμη χαλικιώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γυνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμίτικης αλλά και ιλυολιθικής σύστασης. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιωργανωμένο ορίζοντα του φλυσχικού υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI) και καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής.

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ



Έντονα τεκτονισμένη σκληρή και συνεκτική αργιλική μάζα, μαζί με τεμάχια βραχώδους αργιλικού σχιστολίθου και ψαμμίτων, που αποτελούν ουσιαστικά τα υπολείμματα της αρχικής δομής του φλυσχικού υποβάθρου (τύπων VII και VIII). Η παρουσία και η συχνότητα αυτών των τεμαχίων είναι ανομοιομορφή και τυχαία. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό, και εκτιμάται μικρότερο στα ανώτερα τμήματα της κατολίθωσης. Πρόκειται για έναν ημιβραχώδη, γεωτεχνικά ασθενή σχηματισμό, όπου στην πιο υγιή μορφή του χαρακτηρίζεται ως Φλύσχης τύπου XI.

ΨΑΜΜΙΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ



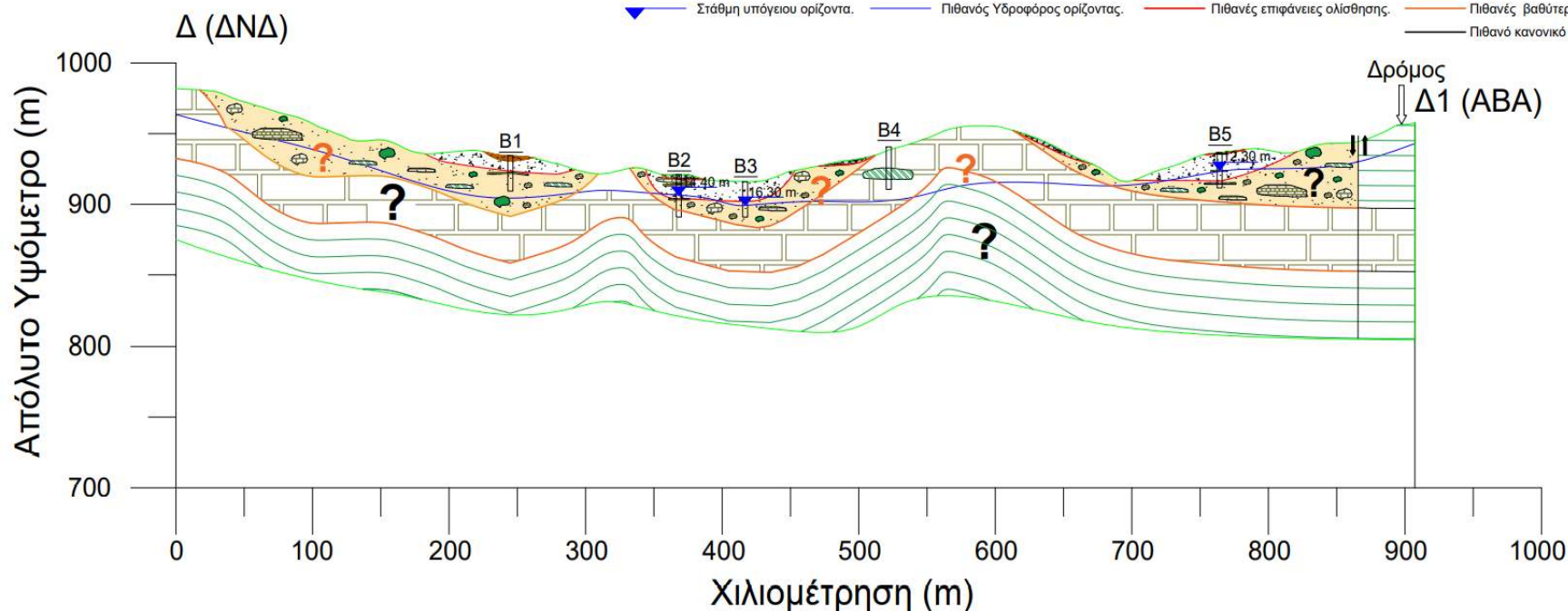
Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη διαβραχόμαζα αποτελούμενη από λεπτόκοκκους έως μεσόκοκκους ψαμμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλυολίθων, που εμφανίζουν έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού (Φλύσχης τύπου VII).

ΙΛΥΟΛΙΘΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

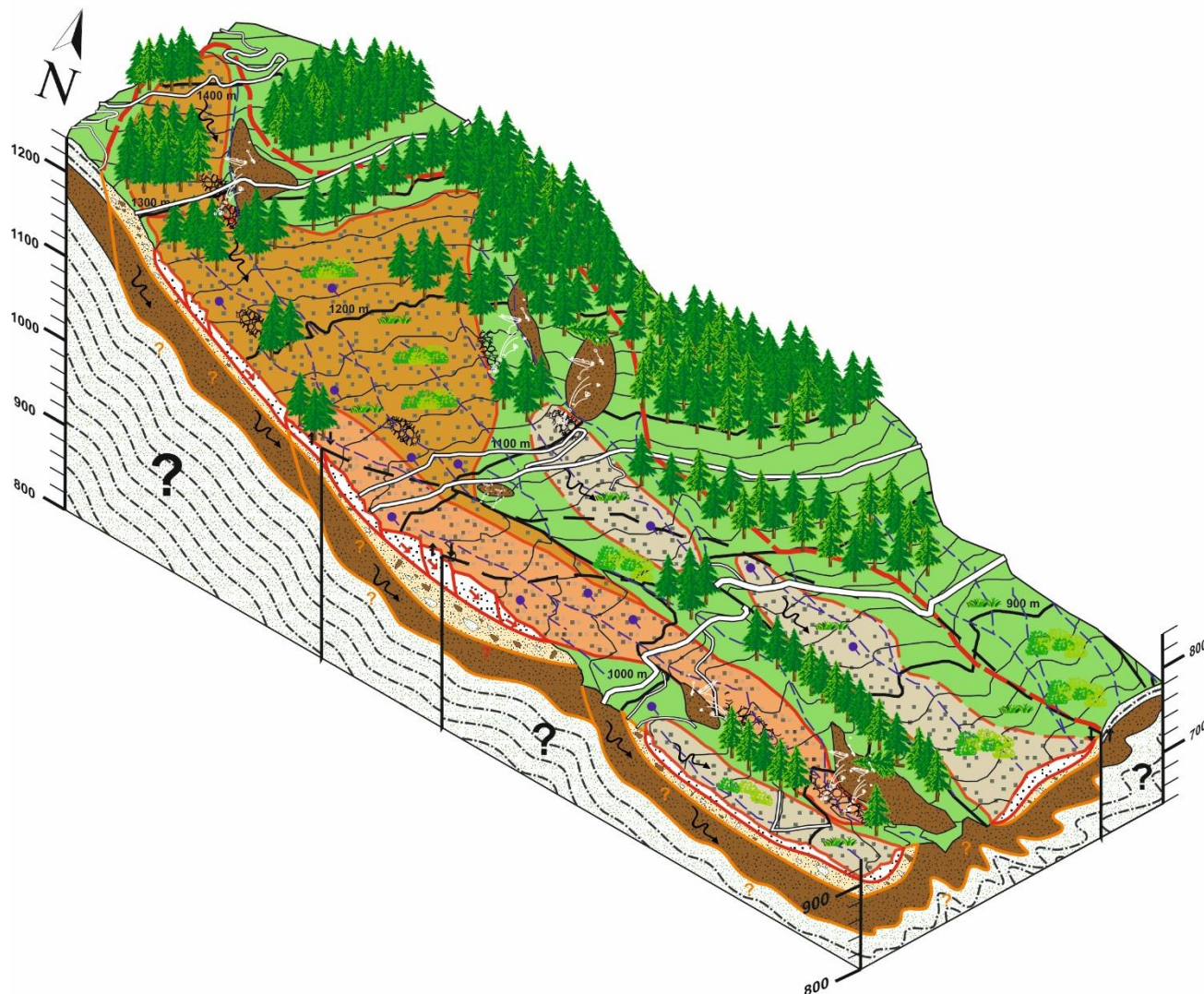


Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη βραχώμαζα αποτελούμενη από βραχώδεις ιλυολίθους έντονα κερματισμένους έως κατακερματισμένους, με λεπτές παρεμβολές ψαμμίτικων ενστρώσεων (Φλύσχης τύπου VIII).

▼ Στάθμη υπόγειου ορίζοντα. — Πιθανός Υδροφόρος ορίζοντας. — Πιθανές επιφάνειες ολίσθησης. — Πιθανές βαθύτερες επιφάνειες ερπυσμού. — Πιθανό κανονικό ρήγμα.



Εικόνα 5.35 Ενδεικτική τομή Δ - Δ1 κάθετα προς τους κύριους άξονες της ευρύτερης συνολικής κατολίθωσης.



Εικόνα 5.36 Ενδεικτικό τρισδιάστατο προσομοίωμα ευρύτερης κατολίθησης Τυμφρηστού.



5.6.3. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων

Μετά το πέρας της γεωλογικής ανάλυσης της στρωματογραφίας υπεδάφους, και της κατασκευής του τρισδιάστατου προσομοιώματος της ευρύτερης κατολίσθησης, οι ακόλουθες εργασίες προσανατολίστηκαν στην διερεύνηση των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων των σχηματισμών που εμπλέκονται στις κατολισθήσεις.

Οι τιμές των παραμέτρων του εδαφικού μανδύα καθώς και του πιο αποδιοργανωμένου ημιβραχώδους φλυσχικού υποβάθρου, προέκυψαν μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών, που διεξήχθησαν στο πλαίσιο γεωτεχνικής έρευνας της περιοχής, τις περιόδους 1996 και 1999. Συγκεκριμένα, οι τιμές των διαφόρων φυσικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων αντοχής αυτών των στρωμάτων, προκύπτουν γενικά ως οι μέσοι όροι των τιμών των αντίστοιχων εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών. Τα αποτελέσματα των επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών αναγράφονται ξεχωριστά για κάθε γεώτρηση στα αναλυτικά μητρώα των γεωτρήσεων (Βλ. Παράρτημα Νο 1).

Τέλος, όσον αφορά τις τιμές των παραμέτρων αντοχής του πιο σταθερού υποβάθρου, ήτοι ιλυολιθικό και ψαμμιτικό υπόβαθρο, αυτές προσδιορίστηκαν αλγεβρικά, μέσω της επίλυσης του κριτηρίου αστοχίας για βραχώμαζες με ισότροπη ή ευλόγως ισότροπη συμπεριφορά, των **Hoek & Brown (2002)**.

5.6.4. Γεωτεχνικό προσομοίωμα

Βάσει των προαναφερθέντων εργασιών, καταστρώθηκε ένα ενδεικτικό γεωτεχνικό προσομοίωμα του υπεδάφους, πάνω στο οποίο αποτυπώνονται το σύνολο των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων των σχηματισμών που εμπλέκονται στην κατολίσθηση.

Το προσομοίωμα αυτό παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.38** και χρησιμοποιείται, στη συνέχεια της παρούσας διατριβής, για την διεξαγωγή εδαφοτεχνικών ελέγχων ευστάθειας των επιμέρους κατολισθήσεων.

Υπόμνημα συμβόλων γεωτεχνικού προσομοιώματος:

Υ.Υ.Ο = Υπόγειος υδάτινος ορίζοντας	ϕ' = Ενεργός γωνία τριβής,	a = Σταθερά βραχώμαζας (κατά Hoek & Brown, 2002)
W = Φυσική υγρασία	ϕ'_{res} = Ενεργός παραμένουσα γωνία τριβής	s = Σταθερά βραχώμαζας (κατά Hoek & Brown, 2002)
W_L = Όριο υδαρότητας	$I_{s(50)}$ = Ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης	c = Συνοχή βραχώμαζας (κατά Hoek & Brown, 2002)
PI = Δείκτης πλαστικότητας	$\sigma_{ci(50)}$ = Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κατά $I_{s(50)}$	ϕ = Γωνία τριβής βραχώμαζας (κατά Hoek & Brown, 2002)
e = Λόγος κενών	N_{spt} = Αριθμός κρούσης δοκιμών SPT (για 30 cm διείδυση)	E_m = Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας (κατά Hoek & Brown, 2002)
γ_d = Ξηρό φαινόμενο βάρος	RQD = Δείκτης ποιότητας του πετρώματος (κατά Deere, 1963)	Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (2002):
γ_s = Ειδικό βάρος στερεών	GSI = Δείκτης γεωλογικής αντοχής (κατά V. Marinos, 2007)	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$ $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$
γ = Υγρό φαινόμενο βάρος	σ_{ci} = Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$
q_u = Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη	m_i = Σταθερά υλικού	$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$
C_u = Αστράγγιστη διαμητική αντοχή	D = Βαθμός διαταραχής της βραχώμαζας από εκσκαφή	
c' = Ενεργός συνοχή	m_b = Απομειωμένη σταθερά υλικού (κατά Hoek & Brown, 2002)	

Εικόνα 5.37 Υπόμνημα συμβόλων γεωτεχνικού προσομοιώματος

Βάθη (m)
0,00

Επιφάνεια εδάφους

Αποσαθρώματα:

Καστανόχρωμη ΑΡΓΙΛΟΣ, με χαλικιώδη γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμίτικης κυρίως σύστασης. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση, ενώ η δομή τους είναι σχετικά χαλαρή. Τα υλικά αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσάθρωση των βαθύτερων υλικών κατολίθησης.
κατά U.S.C.S [CL]

Εργαστηριακά ή από επιτόπου δοκιμές:

W = 17%	e ≅ 0,4	γ ≅ 22 kN/ m ³	*c' ≅ 20 kN/ m ²
W _L ≅ 33,3%	γ _d = 18 kN/ m ³	q _u = 128 kN/ m ²	φ' ≅ 15°
PI ≅ 16%	γ _s = 2,64	C _u = 64 kN/ m ²	N _{spt} ≥ 10 (≅ 10 - 12)

4,00 - 5,00
(τοπικά 6,00 m)

Υλικά κατολίθησης:

Μελανόχρωμη χαλικιώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμίτικης αλλά και ιλιολιθικής σύστασης. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο ορίζοντα του φλυσιχικού υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI) και καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής.
κατά U.S.C.S [CL]

Εργαστηριακά ή από επιτόπου δοκιμές:

W ≅ 16,2%	e ≅ 0,4	γ ≅ 22,5 kN/ m ³	*c' ≅ 37 kN/ m ²
W _L ≅ 32%	γ _d ≅ 19,5 kN/ m ³	q _u = 76 kN/ m ²	φ' ≅ 18°
PI ≅ 14%	γ _s = 2,67	C _u = 38 kN/ m ²	N _{spt} ≥ 25 (≅ 25 - >50)

Υ.Υ.Ο 5,7 - 18 m
(Μ.Ο ≅ 12 m)



10,00 - 25,00
(τοπικά 30,00 m)

Αποδιοργανωμένος φλύσχης:

Έντονα τεκτονισμένη σκληρή και συνεκτική αργιλική μάζα, μαζί με τεμάχια βραχυώδους αργιλικού σχιστολίθου και ψαμμινών, που αποτελούν ουσιαστικά τα υπολείμματα της αρχικής δομής του φλυσιχικού υποβάθρου (τύπων VII και VIII). Η παρουσία και η συχνότητα αυτών των τεμαχίων είναι ανομοιόμορφη και τυχαία. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό, και εκτιμάται μικρότερο στα ανώτερα τμήματα της κατολίθησης. Πρόκειται για έναν ημιβραχυώδη, γεωτεχνικά ασθενή σχηματισμό, όπου στην πιο υγιή μορφή του χαρακτηρίζεται ως Φλύσχης τύπου XI.

Εργαστηριακά ή από επιτόπου δοκιμές:

W ≅ 13,5%	e ≅ 0,37	γ ≅ 22,5 kN/ m ³	c' ≅ 20 - 180 kN/ m ²
W _L ≅ 28,2%	γ _d ≅ 19,7 kN/ m ³	q _u = 206 kN/ m ²	φ' ≅ 23° φ' _{res} ≅ 11°-15°
PI ≅ 14%	γ _s = 2,66	C _u = 103 kN/ m ²	N _{spt} ≥ 50 (APN)

Μέσω εμπειρικών τύπων (Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (2002):

GSI = 10 - 15	D = 0	s = 1,01E-4	c ≅ 28 kN/ m ²
σ _{ci} = 206 kN/ m ²	m _b = 0,192		φ ≅ 14°
m _i ≅ 4	a = 0,561		Em ≅ 56 MN/ m ²

35,00 - 50,00
(τοπικά 60,00 m)

Ψαμμικό υπόβαθρο:

Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη διαβραχόμαζα αποτελούμενη από λεπτόκοκκους έως μεσόκοκκους ψαμμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλιολιθών, που εμφανίζουν έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού (Φλύσχης τύπου VII).

Εργαστηριακά ή από επιτόπου δοκιμές:

γ ≅ 25 kN/ m ³	I _{s(50)} ≅ 3217 kN/ m ²	σ _{ci(50)} = 72,6 MN/ m ²	RQD = 7 - 100% (≅ 45%)
---------------------------	--	---	------------------------

Μέσω εμπειρικών τύπων (Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (2002):

GSI = 40 - 45	D = 0	s = 12,72E-4	c ≅ 3,02 MN/ m ²
σ _{ci} = 72,6 MN/ m ²	m _b = 1,173		φ ≅ 27,5°
**m _i ≅ 10	a = 0,515		Em ≅ 4792 MN/ m ²

60,00 - 90,00
(τοπικά 100,00 m)

Ιλιολιθικό υπόβαθρο:

Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη βραχόμαζα αποτελούμενη από βραχυώδεις ιλιολιθούς έντονα κερματισμένους έως κατακερματισμένους, με λεπτές παρεμβολές ψαμμίτικων ενστρώσεων (Φλύσχης τύπου VIII).

Μέσω εμπειρικών τύπων (Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (2002):

GSI = 30 - 35	D = 0	s = 7,3E-4	c ≅ 1,5 MN/ m ²
**σ _{ci} ≅ 40 MN/ m ²	m _b = 0,981	γ ≅ 24 kN/ m ³	φ ≅ 26°
**m _i ≅ 10	a = 0,515		Em ≅ 3556 MN/ m ²

?

Παρατηρήσεις:

- * Επί των επιφανειών ολίσθησης οι παράμετροι αντοχής μειώνονται. Για πιθανές μικρές μετακινήσεις η τιμή της συνοχής μηδενίζεται c' = 0, ενώ για μεγάλες μετακινήσεις η γωνία της διατμητικής αντοχής μειώνεται προς την παρεμνοουσα φ' ≅ φ' _{res}.
- ** Η τιμές σ_{ci} και m_i που σημειώνονται παραπάνω εκτιμήθηκαν βιβλιογραφικά σύμφωνα με τους Marinos & Tsiambaos, 2017 και V. Marinos, 2017.

Εικόνα 5.38 Ενδεικτικό γεωτεχνικό προσομοίωμα του υεδάφους.

5.7. Συμπεράσματα τεχνικογεωλογικής διερεύνησης περιοχής μελέτης

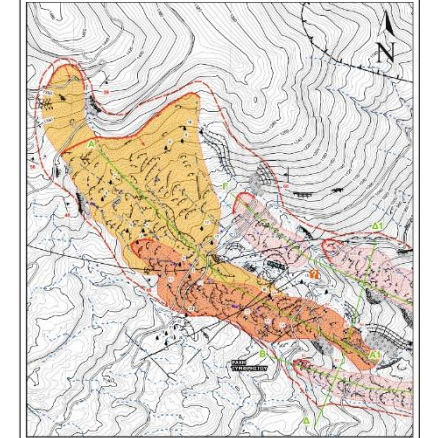
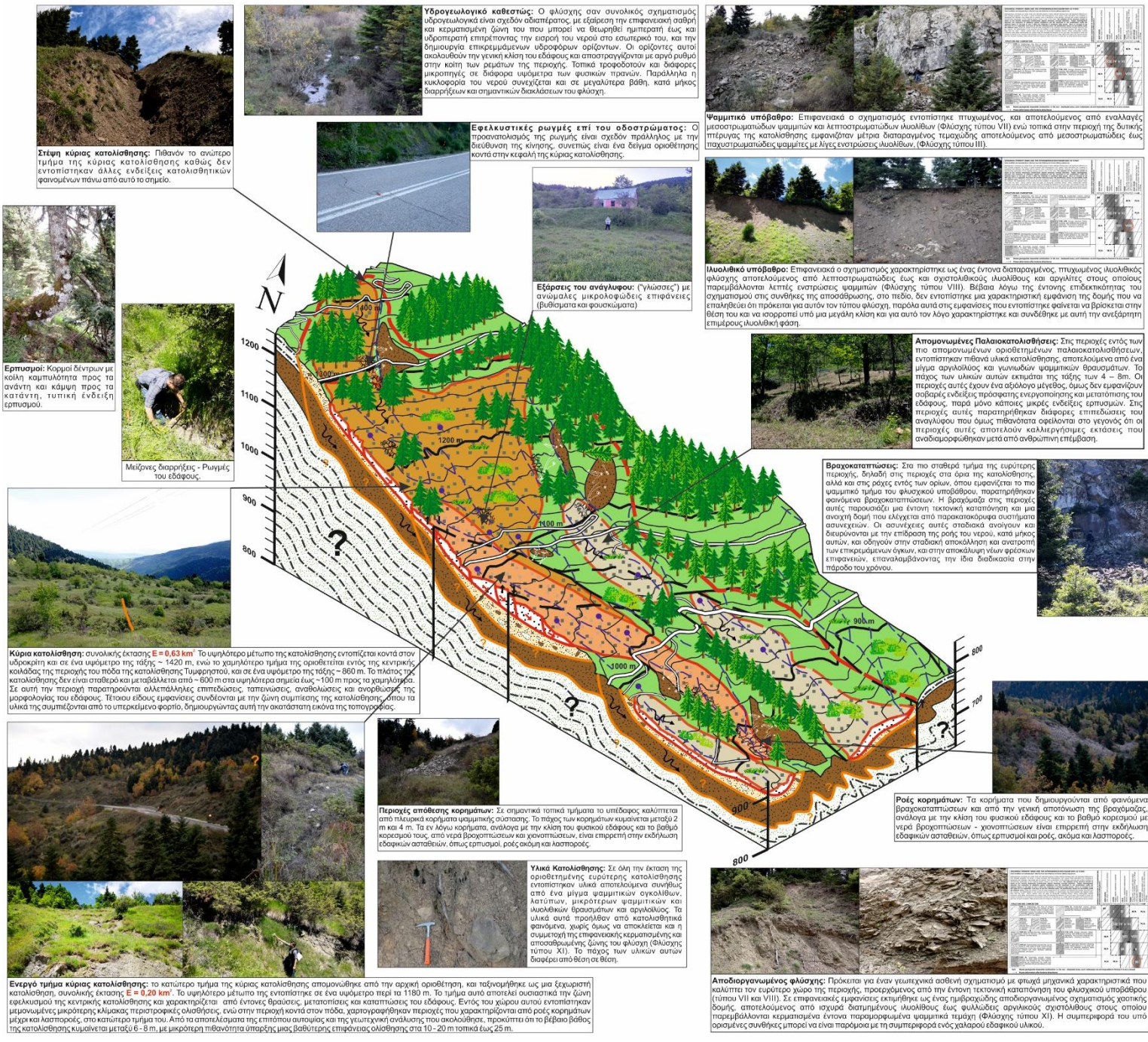
Απ' όσα αναφέρθηκαν με λεπτομέρεια, στο παρόν κεφάλαιο για την στενή περιοχή μελέτης προκύπτουν τα εξής σημαντικά συμπεράσματα:

1. Στο ΒΔ πρηνές της περιοχής Ράχη Τυμφρηστού (ανάμεσα στη σήραγγα και στο χωριό Τυμφρηστός) οριοθετήθηκε μια εκτεταμένη σύνθετη κατολίσθηση, που αποτελείται από επιμέρους πολλές ενεργές ή μη κατολισθήσεις, και συνιστά κατ' ουσία τον ευρύτερο κατολισθητικό χώρο της υπό μελέτη περιοχής.
2. Η εν λόγω σύνθετη κατολίσθηση σε μεγάλα τμήματα της γενικά βρίσκεται σε ευαίσθητη κατάσταση ισορροπίας και τοπικά μάλιστα είναι ασταθής. Αυτό οφείλεται στις ιδιαίτερα απότομες εγκάρσιες κλίσεις της, στην ευαισθησία των γεωλογικών σχηματισμών και κυρίως της επιφανειακής ζώνης τους, στους παράγοντες της αποσάθρωσης και διάβρωσης, και τέλος στο ιδιαίτερα πλούσιο σε βροχοπτώσεις κλίμα της περιοχής (Βλ. Κεφάλαιο 4 «4.4 Υδρογεωλογικό καθεστώς ευρύτερης περιοχής»), που έχει σαν αποτέλεσμα το διαποτισμό μέχρι τον βαθμό κορεσμού της επιφανειακής ζώνης του φλύσχη και των χαλαρών σχηματισμών που επικάθονται σε αυτόν, ήτοι κορήματα αποσαθρώματα και υλικά κατολισθήσεων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω εντοπίζεται η εκδήλωση επιμέρους παλαιών και νέων ενεργών κατολισθήσεων, καθώς και εκτεταμένων εδαφικών ερπυσμών.
3. Εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, οριοθετήθηκε μια επιμέρους εκτεταμένη, κύρια κατολίσθηση, πλάτους 600 m, που ξεκινάει ανάντη του παλαιού οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου σε ένα υψόμετρο 1420 m, και συνεχίζει με ένα πλάτος περίπου 100 m, ακολουθώντας τις πλευρές των δύο επιμήκων λόφων, καταλήγοντας στο στενότερο τμήμα μεταξύ των λόφων αυτών.
4. Εντός αυτής της επιμέρους κύριας κατολίσθησης, εντοπίστηκαν πολλές περιοχές που χαρακτηρίζονται από αλλεπάλληλες επιπεδώσεις, ταπεινώσεις, αναθλώσεις και ανορθώσεις της μορφολογίας του εδάφους. Αυτές οι χαρακτηριστικές εμφανίσεις του αναγλύφου συνδέονται κυρίως με κατολισθητικά φαινόμενα περιστροφικού χαρακτήρα.
5. Πιο έντονες ενδείξεις κατολισθητικών κινήσεων, παρατηρήθηκαν στην περιοχή κοντά στον νέο οδικό δίκτυο Λαμίας – Καρπενησίου, και εντός του πιο ενεργού τμήματος της επιμέρους κύριας κατολίσθησης. Το τμήμα αυτό απομονώθηκε από την αρχική οριοθέτηση, και ταξινομήθηκε ως μια ξεχωριστή κατολίσθηση. Το υψηλότερο μέτωπο αυτού του ξεχωριστού πιο ενεργού τμήματος της επιμέρους κύριας κατολίσθησης εντοπίστηκε σε ένα υψόμετρο περί τα 1180 m, και αποτελεί ουσιαστικά την ζώνη εφελκυσμού της επιμέρους κύριας κατολίσθησης, χαρακτηριζόμενη από έντονες θραύσεις, μετατοπίσεις και καταπτώσεις του εδάφους.
6. Εντός του χώρου αυτού εντοπίστηκαν μεμονωμένες μικρότερης κλίμακας περιστροφικές ολισθήσεις, ενώ στην περιοχή κοντά στον πόδα, χαρτογραφήθηκαν περιοχές που χαρακτηρίζονται από ροές κορημάτων μέχρι και λασποροές, στο κατώτερο τμήμα του.
7. Σε περιοχές εκατέρωθεν της επιμέρους κύριας κατολίσθησης εντοπίστηκαν υλικά κατολίσθησης, αποτελούμενα από ένα μίγμα αργιλοϊλύος και γωνιωδών ψαμμιτικών

θραυσμάτων, που πιθανόν να συνδέονται με παλαιότερες κατολισθήσεις. Οι περιοχές αυτές έχουν αξιόλογο μέγεθος, όμως δεν εμφανίζουν σοβαρές ενδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης και μετατόπισης του εδάφους, παρά μόνο κάποιες μικρές ενδείξεις ερπυσμών.

8. Εντός των παραπάνω παλαιοκατολισθήσεων παρατηρήθηκαν διάφορες επιπεδώσεις του αναγλύφου που όμως πιθανότατα οφείλονται στο γεγονός ότι οι περιοχές αυτές αποτελούν καλλιεργήσιμες εκτάσεις που αναδιαμορφώθηκαν μετά από ανθρώπινη επέμβαση.
9. Σε όλη την έκταση της ευρύτερης κατολίσθησης παρατηρήθηκαν ενδείξεις ερπυσμού. Οι ερπυσμοί αυτοί αφορούν κυρίως τα επιφανειακά κορήματα, αποσαθρώματα και υλικά κατολίσθησης, καθώς και τα επιφανειακά υλικά του έντονα αποδιοργανωμένου φλύσχη του υποβάθρου, τα οποία όταν διαποτιστούν και κορεσθούν έρχονται με αργό ρυθμό προς τα κατάντη.
10. Επιπλέον, βάσει της γεωλογικής και γεωτεχνικής ανάλυσης της περιοχής, εκτιμήθηκε ένας πιθανός ερπυσμός στην διεπιφάνεια μεταξύ του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη (Φλύσχη τύπου XI) και του ψαμμιτικού υποβάθρου (Φλύσχη τύπου VII), καθώς και για το κατώτερο τμήμα της ευρύτερης κατολισθητικής περιοχής, ο δυσμενέστερος αλλά όχι απίθανος, ερπυσμός της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο (Φλύσχη τύπου VIII).
11. Όσον αφορά την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση της περιοχής, η διαφορετική σύσταση και η έντονη τεκτονική καταπόνηση του φλυσχικού υποβάθρου συνθέτουν μια ασθενή βραχύμαζα, η οποία ακόμα και στα βαθύτερα τμήματα της δεν εξασφαλίζει ιδιαίτερα καλές συνθήκες ισορροπίας, και φαίνεται να είναι υπεύθυνη για την εν συνόλω δημιουργία των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, βάσει της ανωτέρας ανάλυσης κατασκευάστηκε ένα συνοπτικό εννοιολογικό προσομοίωμα της υπό μελέτη κατολίσθησης, όπου παρουσιάζονται οι ιδιαίτερες τεχνικογεωλογικές και κατολισθητικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν. (Το εν λόγω εννοιολογικό προσομοίωμα παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 23**).



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

A. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΜΑΝΔΥΑΣ (ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ ΟΣΑΚΙΝΟ)

- Κορμιά:** ψαμμιτικά κίτρινα οσάσιμα προερχόμενα με μικρό ποσοστό αργιλλώδους. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 2 m και 4 m.
- Υλικά καταλιθώσεως:** Κατανοκρήμια έως μεσαλόκρημια χαλαρής ΑΡΤΙΛΟΣ, κωμονομένης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γυνοθή τεμάχια (θραύσματα, χαλκίς, κροκάλες) ψαμμιτικής αλλά και ιλυοθινικής οσάσεως. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο οριζόνα του ψαμμιτικού οδοθώρου (Φλώσχης τύπου XI) και καλύπτουν όλη την έκταση εντός της καταλιθώσεως. Στα υλικά αυτά συμπεριλαμβάνονται και τα πιο χαλαρά αποσπασμάτια.

ΦΛΩΣΧΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΕΙΡΑΣ ΠΙΝΔΟΥ (ΚΡΗΤΙΤΟΓΕΝΕΣ - ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ)

- Αποδιοργανωμένος φλώσχης:** Έντονα τεκτονισμένη οκλήρη και συνεκτική αργιλλική μάζα, μαζί με τεμάχια βραχώδους αργιλλικού σχιστολίθου και ψαμμιτών, που αποτελούν ουσιαστικά τα υπολείμματα της αρχικής δομής του ψαμμιτικού οδοθώρου (τύπου VII και VIII). Η παρουσία και η συσχέτιση αυτών των τεμαχίων είναι ανισομορφή και τυχαία. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό, και εκτιμάται μικρότερο στα ανώτερα τμήματα της καταλιθώσεως. Πρόκειται για έναν ημιβραχώδη, γεωτεκτονικά ασθενή σχηματισμό, όπου στην πιο υψηλή μορφή του χαρακτηρίζεται ως Φλώσχης τύπου XI.
- Ιλυοθινικό οδοθώρο:** Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη βραχώδης αποτελούμενη από βραχώδεις ιλυοθινούς έντονα κερματισμένους έως κατακεραματισμένους με λεπτές παρεμβολές ψαμμιτικών εντορώσεων (Φλώσχης τύπου VIII).
- Ψαμμιτικό οδοθώρο:** Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη διαβραχώδης αποτελούμενη από λεπτόκοκκους έως μεσοκοκκούς ψαμμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλυοθινών, που εμφανίζονται έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού (Φλώσχης τύπου VII).

B. ΟΡΙΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΕΩΣΗΣ

- Ευρύτερη καταλιθώσιμια περιοχή
- Κύρια καταλιθώση
- Ενεργό τμήμα κύριας καταλιθώσεως
- Απομονωμένες παλαιοκαταλιθώσεις

Γ. ΆΛΛΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- Ερπυσμοί φυσικών πρηνών
- Εκροές και πηγές νερού - Στάσιμα νερά
- Υδρογραφικό δίκτυο
- Κύριες ισόμειες
- Ρήγμα πιθανό
- Δευτερεύουσες ισόμειες
- Οδικό δίκτυο

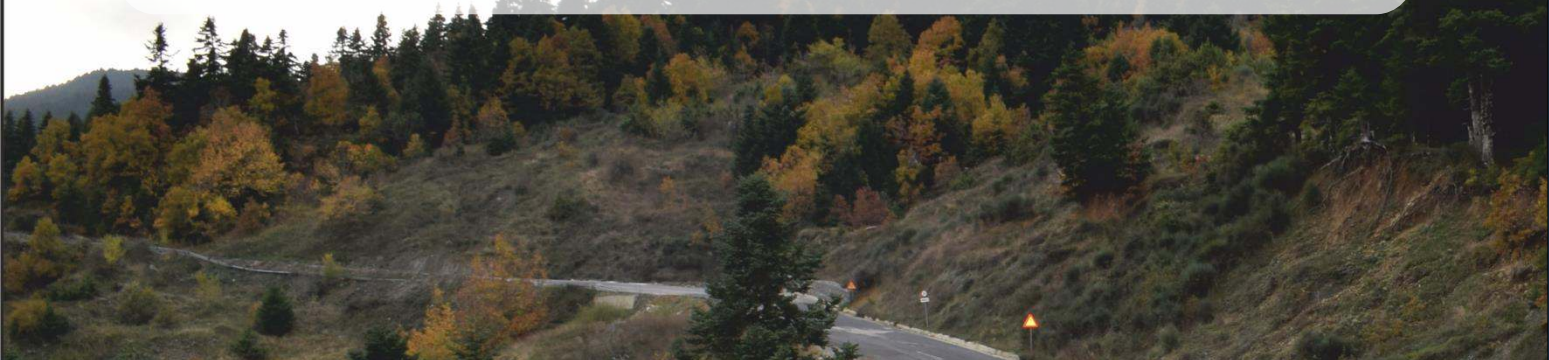
Ισοδιάσταση: 4 m

Δήμος Μακραιοκμής
ΕΡΕΥΝΑ ΤΥΜΦΟΡΗΣΤΟΥ

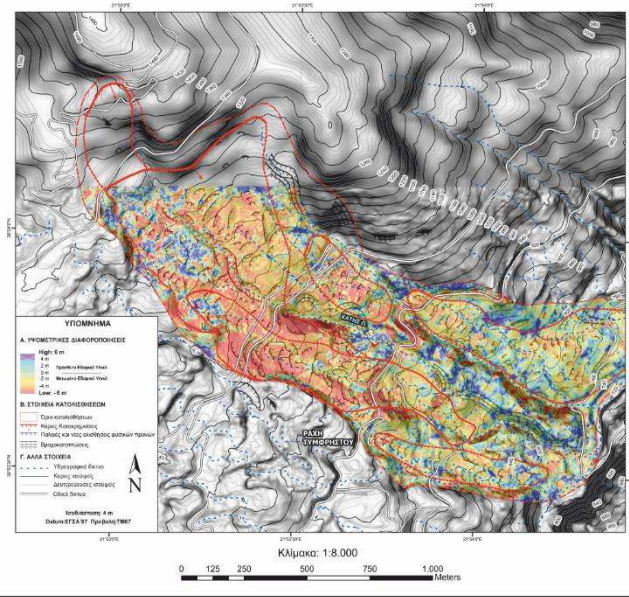
Εικόνα 5.39 Γεωλογικό προσομοίωμα υπό μελέτη καταλιθώσεως

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ



Έντονες ενδείξεις κατολισθητικών κινήσεων και "φρέσκιες" επιφάνειες κατακρημνίσεων, στην περιοχή επί του νέο οδικό δίκτυο Λαμίας – Καρπενησίου, εντός του πιο ενεργού τμήματος της κύριας κατολίσθησης.

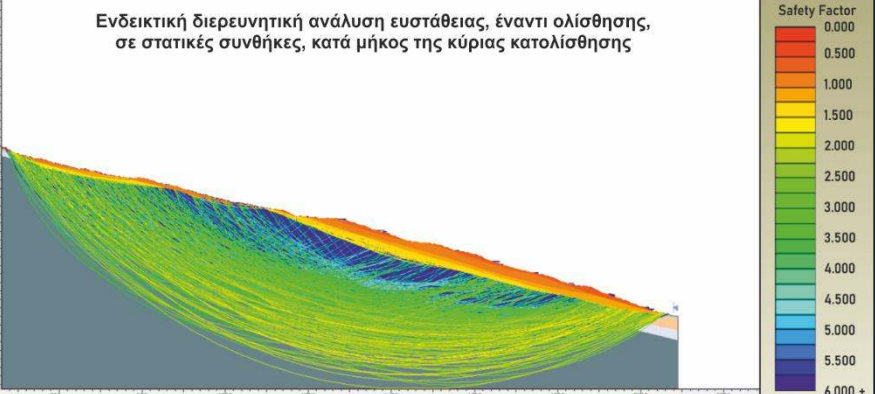
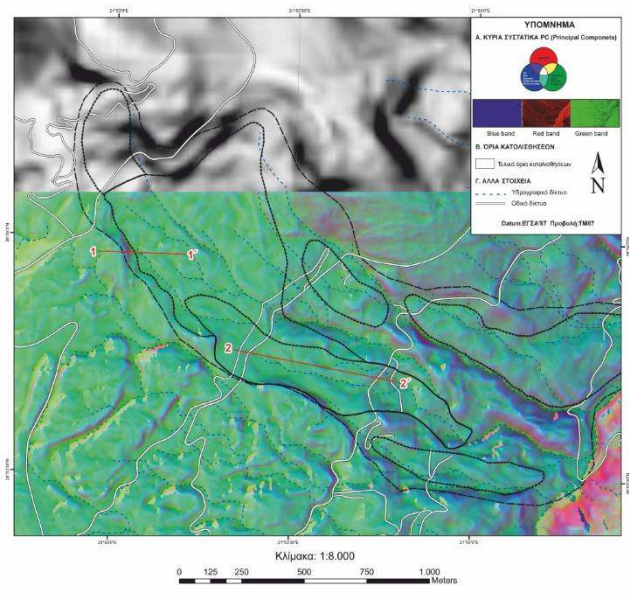
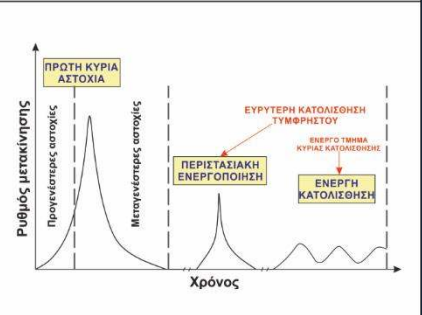
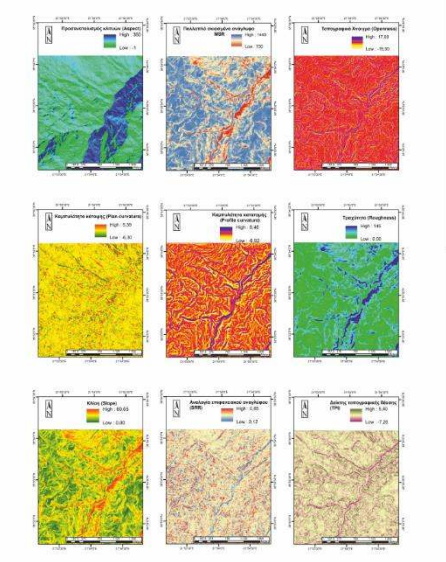
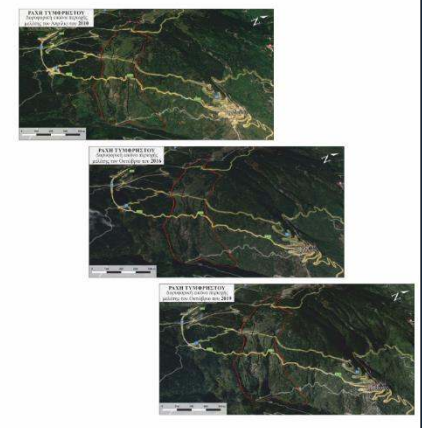


Minus = DEM(2019) - DEM(2007)

Raster Matrix

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 0 & 2 \\ 4 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 3 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ -2 & -1 & 1 & 1 \\ 4 & 0 & -2 & 2 \\ 1 & -2 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

DEM(2019) - DEM(2007) = D.o.D



6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

6.1. Γενικό πλαίσιο

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει τις εργασίες παραγωγής, ανάλυσης και επεξεργασίας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους της περιοχής, με ιδιαίτερη λεπτομέρεια, καθώς και ένα ευρύ φάσμα εργασιών στο πεδίο, που αφορούν στον προσδιορισμό του γεωδυναμικού καθεστώτος της περιοχής, καθώς και την ιδίους όμμασι αξιολόγηση όλων εκείνων των συνθηκών που συντελούν στην εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων της, ακολουθεί η τελική έρευνα και ανάλυση των κατολισθητικών φαινομένων που διαδραματίζονται στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού.

Η τελική αυτή ανάλυση προκύπτει από ένα σύνολο επιμέρους αναλύσεων της περιοχής, και αφορά στον προσδιορισμό της έκτασης, του τύπου, των μηχανισμών και της συχνότητας εμφάνισης των αστοχιών του εδάφους στην περιοχή μελέτης, καθώς και στην απογραφή όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών σε αναλυτικά μητρώα κατολισθήσεων, αποτελούμενα από παρατηρήσεις και επισημάνσεις αναφορικά με την αναδιαμόρφωση του αναγλύφου της περιοχής, έτσι ώστε σε χρόνο μέλλοντα να υπάρξει η δυνατότητα πρόβλεψης δυνητικών κινδύνων, τόσο από νέες εμφανίσεις κίνησης, όσο και από μια επικείμενη ενεργοποίηση ολόκληρης της κατολίσθησης, με σκοπό να κατασκευαστούν στοχευμένα έργα υποδομής για την αποτροπή των ενδεχόμενων καταστροφών.

Το οργανόγραμμα των εργασιών και των επιμέρους αναλύσεων που επιτελέστηκαν για την επίτευξη της τελικής αυτής έρευνας, μαζί με τις ενδιάμεσες ενέργειες που συνδέουν τα βήματα μεταξύ τους, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6.1**.

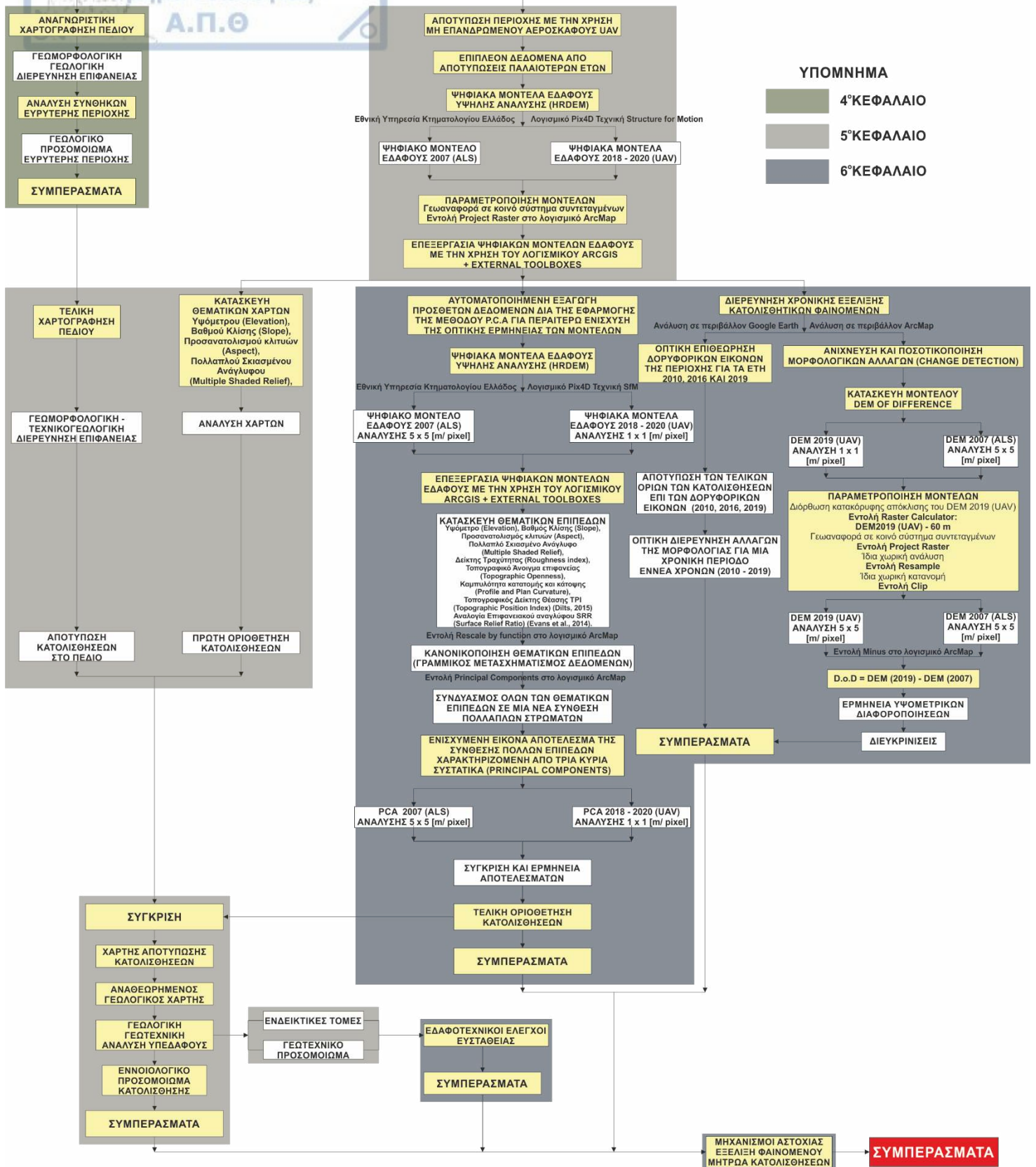
6.2. Εφαρμογή της μεθόδου PCA για πρόσθετη ενίσχυση της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων υψηλής ανάλυσης (HRDEM)

Στα πλαίσια των εργασιών οπτικής ερμηνείας των υψηλής ανάλυσης ψηφιακών μοντέλων εδάφους, HRDEMs, για την τελική αποτύπωση των κατολισθήσεων της περιοχής συντελείται απόπειρα ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας του μοντέλου, η οποία πραγματοποιήθηκε διά της καινοτόμου εφαρμογής μεθόδων Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), μέσω της μεθόδου PCA (Principal Component Analysis), και της παραμετροποίησης της γεωαναλυτικής πληροφορίας, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, για την αυτοματοποιημένη εξαγωγή πρόσθετης επαυξημένης γεωμορφολογικής πληροφορίας.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας επιτρέπει την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας των πλαγιών και την λεπτομερέστερη αναγνώριση των μορφολογικών "υπογραφών" κατολισθήσεων.

Η μεθοδολογία περί της αυτοματοποιημένης εξαγωγής πρόσθετων δεδομένων από τα ήδη υπάρχοντα, καθώς και η περιγραφή και των νέων επαυξημένων δεδομένων που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου PCA, παρατίθενται αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ



Εικόνα 6.1 Συνοπτικό οργανόγραμμα εργασιών που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής μελέτης.

6.2.1. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, με κάποιες τροποποιήσεις, για την εξαγωγή πρόσθετων επαυξημένων πληροφοριών σχετικά με την μορφολογία του εδάφους, από τα διαθέσιμα ψηφιακά μοντέλα εδάφους, κατασκευάστηκε εις αναλογία της αντίστοιχης μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε στην ερευνητική εργασία της Kamila Pawluszek, το 2018, για την διερεύνηση δύο κατολισθήσεων φλυσχικών σχηματισμών στα Πολωνικά Καρπάθια Όρη, μέσω οπτικής ερμηνείας μορφολογικών χαρακτηριστικών αποτυπωμένων σε ψηφιακό μοντέλο εδάφους HRDEM (Βλ. Κεφάλαιο 3 «3.7. Μελέτη περίπτωσης»).

Ειδικότερα, έχοντας ως στόχο την ενίσχυση της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων της περιοχής, δηλαδή του μοντέλου του 2007 (ALS) και των μοντέλων 2018 – 2020 (UAV), κατασκευάστηκαν για το καθένα, δέκα θεματικά επίπεδα δεδομένων (Layers) που αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές ρύθμισης των κατολισθήσεων. Τα επίπεδα αυτά, αντανακλούν τους παράγοντες που ευθύνονται για τα εναύσματα κατολισθητικών κινήσεων, και μπορούν να οριστούν, να κατηγοριοποιηθούν και να εξαχθούν εύκολα από ένα δεδομένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, εφαρμόζοντας διάφορες μαθηματικές πράξεις, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, διαμέσου του εξειδικευμένου λογισμικού ArcMap.

Κάθε ένα από τα θεματικά επίπεδα που κατασκευάστηκαν παρείχε διαφορετικές ενδείξεις σχετικά με τη φύση της τοπογραφίας και για αυτό τον λόγο η παρατήρηση κάθε επιπέδου μεμονωμένα ήταν περίπλοκη και χρονοβόρα, ενώ η σύνδεση τους με τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων δεν ήταν άμεσα προφανής.

Από τα παραπάνω προέκυψε η ανάγκη για τον μετασχηματισμό των μεμονωμένων θεματικών επιπέδων σε μια σύνθεση πολλαπλών στρωμάτων που θα παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία και θα επιτρέπει τον εντοπισμό διαφορετικών μορφολογικών ενδείξεων κατολισθήσεων.

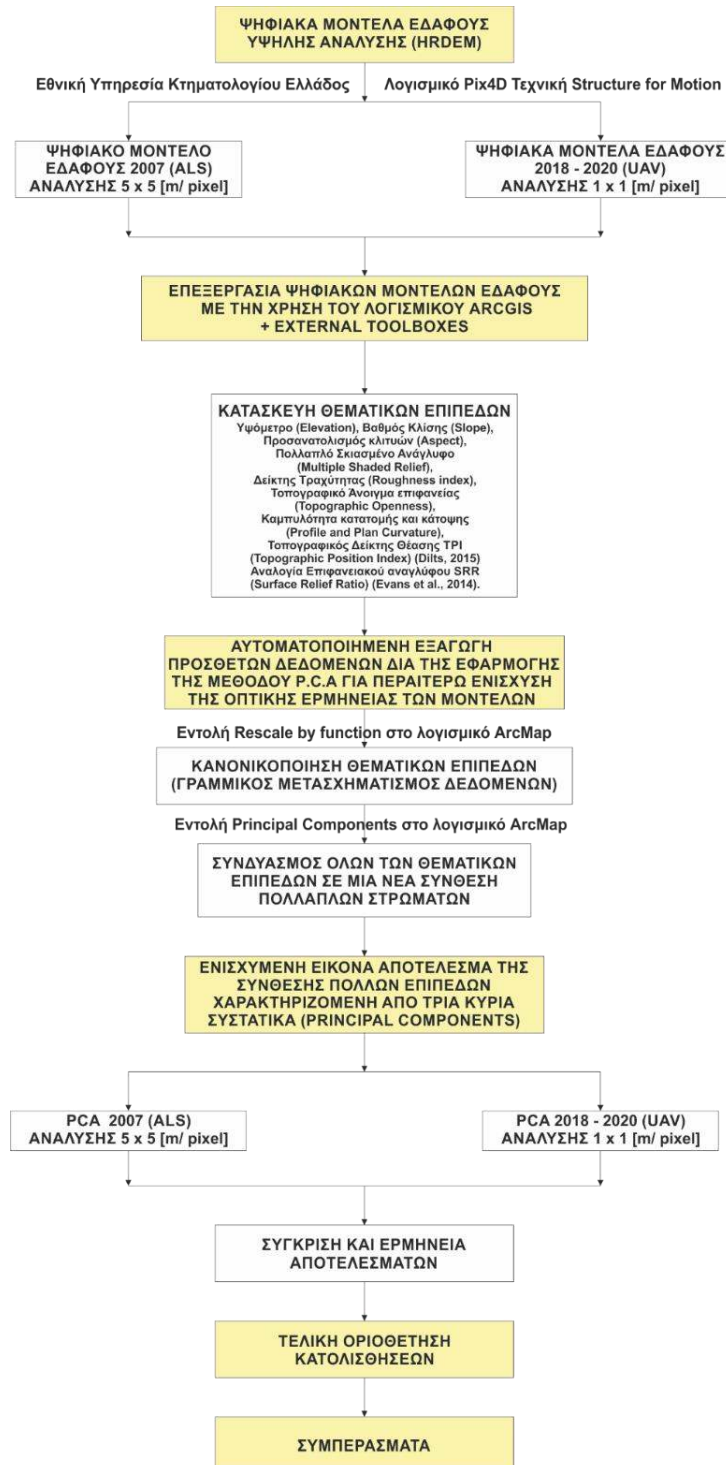
Ο μετασχηματισμός αυτός επιτεύχθηκε δια της εφαρμογής της μεθόδου «Ανάλυσης Κύριων Συστατικών» ή «Principal Components Analysis» ή PCA για συντομία, η οποία εκτελέστηκε χρήση της εντολής "**Principal Components**" του λογισμικού ArcMap. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου PCA όπως περιγράφεται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας (Βλ. Κεφάλαιο 3 «3.7.1. Principal Component Analysis (PCA)»), ένα σύνολο αλληλένδετων μεταβλητών μετασχηματίζεται με ορθογωνικό γραμμικό τρόπο σε ένα νέο σύνολο συσχετισμένων ή μη συσχετιζόμενων μεταβλητών, που ονομάζονται Κύρια Συστατικά (Principal Components).

Αυτή η μέθοδος ανάλυσης επιτρέπει ουσιαστικά την απομείωση των αρχικών αλληλένδετων μεταβλητών και τον εν συνεχεία μετασχηματισμό τους σε ένα νέο σύνολο δεδομένων με την μορφή εικόνας (Raster), ως αποτέλεσμα μιας πολύστρωματικής σύνθεσης, αποτελούμενης από τον συνδυασμό πολλών μεμονωμένων θεματικών επιπέδων.

Για την επίτευξη του μετασχηματισμού αυτού είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των θεματικών επιπέδων, καθώς αυτά έχουν διαφορετικά εύρη δεδομένων. Έτσι λοιπόν, πριν από την εφαρμογή της μεθόδου PCA προηγείται ανεξάρτητα ο γραμμικός μετασχηματισμός κάθε θεματικού επιπέδου, που επιτυγχάνεται με την εντολή "**Resample**" μέσω του λογισμικού ArcMap. Το νέο εύρος δεδομένων που προκύπτει για κάθε θεματικό επίπεδο του αντίστοιχου μοντέλου αναφοράς, παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Κατόπιν εφαρμογής της μεθόδου PCA από κάθε μια νέα ενισχυμένη εικόνα που προκύπτει για το εκάστοτε εξεταζόμενο ψηφιακό μοντέλο, παρέχονται σημαντικές πληροφορίες τόσο για την αναγνώριση και οριοθέτηση κατολισθητικών φαινομένων, όσο και για την χαρτογράφηση της ευρύτερης μορφολογίας του εδάφους.

Η ροή εργασιών, τα αποτελέσματα και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, της εν λόγω εφαρμογής παρατίθενται αναλυτικά στη συνέχεια.



Εικόνα 6.2 Ροή εργασιών ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων υψηλής ανάλυσης (HRDEM).

1. Θεματικά επίπεδα δεδομένων

Για την επίτευξη της ενίσχυσης της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων, κατασκευάζονται δέκα θεματικά επίπεδα δεδομένων (Layers) για κάθε ένα ψηφιακό μοντέλο αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μοντέλο κατασκευάστηκαν οκτώ διαφορετικά θεματικά επίπεδα δεδομένων, διαμέσου του λογισμικού ArcMap, ευρέως εφαρμοσμένα σε μελέτες κατολισθήσεων, ήτοι: 1. Υψόμετρο (Elevation), 2. Βαθμός Κλίσης (Slope), 3. Προσανατολισμός κλιτύων (Aspect), 4. Πολλαπλό Σκιασμένο Ανάγλυφο (Multiple Shaded Relief), 5. Δείκτης Τραχύτητας (Roughness index), 6. Τοπογραφικό Άνοιγμα επιφανείας (Topographic Openness), 7. Καμπυλότητα κατατομής και 8. κάτοψης (Profile and Plan Curvature).

Καθώς και δύο θεματικά επίπεδα, που δεν ήταν διαθέσιμα στο εξειδικευμένο λογισμικό ArcMap, τα οποία κατασκευάζονται με την χρήση εξωτερικών εργαλείων του λογισμικού, ήτοι: 9. Τοπογραφικός Δείκτης Θέσης TPI (Topographic Position Index) (Dilts, 2015) και 10. Αναλογία Επιφανειακού αναγλύφου SRR (Surface Relief Ratio) (Evans et al., 2014).

Ο ορισμός και η αναλυτική περιγραφή του εκάστοτε θεματικού επιπέδου που χρησιμοποιείται παρατίθεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 (Βλ. Κεφάλαιο 3 «3.6.Ταυτοποίηση κατολισθήσεων μέσω της οπτικής ερμηνείας ψηφιακών μοντέλων») και συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6-1 Συνοπτική περιγραφή των θεματικών επιπέδων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ HRDEM	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ELEVATION)	Όλα τα παρακάτω θεματικά επίπεδα δεδομένων είναι συνάρτηση του υψομέτρου.
ΚΛΙΣΗ (SLOPE)	Περιγράφει τις αλλαγές υψομέτρου ανά συγκεκριμένη μονάδα. Έχει εύρος 0° - 90°, όπου οι 0° αντιπροσωπεύουν μια οριζόντια περιοχή ενώ οι 90° μια κάθετη περιοχή.
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΛΙΤΥΩΝ (ASPECT)	Απεικονίζει την οριζόντια κατεύθυνση μιας επιφάνειας, ταξινομείται σε οκτώ κλάσεις που αντιστοιχούν σε οκτώ γεωγραφικές κατευθύνσεις και μια πρόσθετη κλάση για επίπεδο έδαφος και παίρνει τιμές από 0° - 360°.
ΣΚΙΑΣΜΕΝΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ (HILLSHADE)	Δείχνει την τιμή φωτισμού για κάθε κελί του μοντέλου DEM. Προσδιορίζοντας την κατάλληλη τιμή της κατεύθυνσης του ηλιακού φωτός και του υψηλού αζιμούθιου, φαίνονται οι φωτιζόμενες και σκιασμένες περιοχές. Ενισχύει την «ορατότητα» της επιφάνειας. Στην παρούσα διατριβή, ο φωτισμός της επιφάνειας πραγματοποιήθηκε από οκτώ κατευθύνσεις (πολλαπλάσιο των 45°) και συνδυάστηκε σε ένα στρώμα αθροίζοντας και τα οκτώ στρώματα δημιουργώντας ένα Πολλαπλό σκιασμένο ανάγλυφο MSR (Multiple Shaded Relief) .
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ (ROUGHNESS INDEX)	Ο δείκτης τραχύτητας είναι το μέτρο της τοπογραφικής ετερογένειας του εδάφους, και χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες κατολισθήσεων, έχοντας ως στόχο την εκτίμηση της ηλικίας των κατολισθήσεων και τη δημιουργία χαρτών απογραφής (McKean & Roering 2004).
ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ (OPENNESS)	Με τον όρο τοπογραφικό άνοιγμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ ενός αρχικού DEM και του DEMki, όπου DEMki ορίζεται ένα ομαλοποιημένο αρχικό DEM στο οποίο κάθε κελί του πλέγματος του αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή υψομέτρου ενός κινούμενου παραθύρου με γνωστές διαστάσεις (Pawluszek, 2018). Ο δείκτης αυτός, προσφέρει μια σαφή διάκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών του αναγλύφου και της γύρω τοπογραφίας, αναδεικνύοντας τόσο το υψηλότερο όσο και το χαμηλότερο τμήμα των χαρακτηριστικών αυτών.
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΟΨΗΣ (PLAN CURVATURE)	Η καμπυλότητα κάτοψης είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης και περιγράφει την ταχύτητα αλλαγής της κλίσης κατά μήκος της κάτοψης μιας επιφάνειας. Οι θετικές της τιμές απεικονίζουν επιφάνειες που είναι πλευρικά κυρτές ενώ οι αρνητικές επιφάνειες που είναι πλευρικά κοίλες.

ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ HRDEM

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ (PROFILE CURVATURE)	Η καμπυλότητα κατατομής είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης και περιγράφει την ταχύτητα αλλαγής της κλίσης κατά μήκος του προφίλ μιας επιφάνειας. Οι αρνητικές τιμές της περιγράφουν επιφάνειες που είναι κυρτές προς τα πάνω ενώ οι θετικές τιμές της, επιφάνειες που είναι κοίλες προς τα πάνω.
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΕΑΣΗΣ (TOPOGRAPHIC POSITION INDEX TPI)	Ο δείκτης τοπογραφικής θέσης TPI χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των τοπογραφικών θέσεων αλλαγής της κλίσης και ορίζεται ως η διαφορά σε ένα DEM μεταξύ του υψόμετρου ενός κελιού και του μέσου υψόμετρου των γειτονικών κελιών (Pawluszek, 2018).
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (SURFACE RELIEF RATIO SRR)	Ο δείκτης SRR περιγράφει και αυτός την τραχύτητα του εδάφους, με την διαφορά ότι υπολογίζεται για μια συνεχή επιφάνεια Raster και εντός ενός καθορισμένου παραθύρου (Pike & Wilson 1971). Παίρνει τιμές από 0 - 1 και ορίζεται ως εξής: $SRR = (z(\text{mean}) - z(\text{min})) / ((z(\text{max}) - z(\text{min})))$ Όπου: z = υψόμετρο.

Τα αποτελέσματα του γραμμικού μετασχηματισμού των παραπάνω θεματικών επιπέδων, με τα νέα εύρη τιμών των δεδομένων, καθώς και ο πίνακας συσχέτισης τους, για κάθε ένα μοντέλο αναφοράς παρατίθεται αναλυτικά παρακάτω:

➤ Μοντέλο 2007 (ALS):

Πίνακας 6-2 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (ALS) του 2007.

ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ HRDEM	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΕΑΣΗΣ (TOPOGRAPHIC POSITION INDEX TPI)	0.00	1.00	0.53	0.08
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (SURFACE RELIEF RATIO SRR)	0.00	1.00	0.52	0.09
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ (ROUGHNESS INDEX)	0.00	1.00	0.07	0.06
ΚΛΙΣΗ (SLOPE)	0.00	1.00	0.35	0.16
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ (PROFILE CURVATURE)	0.00	1.00	0.45	0.07
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΟΨΗΣ (PLAN CURVATURE)	0.00	1.00	0.53	0.08
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ELEVATION)	0.00	1.00	0.60	0.20
ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ (OPENNESS)	0.00	1.00	0.56	0.07
ΠΟΛΛΑΠΛΟ ΣΚΙΑΣΜΕΝΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ MSR (MULTIPLE SHADED RELIEF)	0.00	1.00	0.81	0.16
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΛΙΤΥΩΝ (ASPECT)	0.00	1.00	0.49	0.31

Πίνακας 6-3 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (ALS) του 2007.

	TPI	SRR	ROUGHNESS	SLOPE	PROFILE CURVATURE	PLAN CURVATURE	ELEVATION	OPENNESS	MSR	ASPECT
TPI	1.00									
SRR	0.38	1.00								
ROUGHNESS	-0.04	-0.01	1.00							
SLOPE	-0.03	0.00	0.90	1.00						
PROFILE CURVATURE	-0.63	-0.67	0.01	0.01	1.00					
PLAN CURVATURE	0.61	0.14	0.00	-0.01	-0.45	1.00				
ELEVATION	0.10	0.05	-0.17	-0.17	-0.08	0.02	1.00			
OPENNESS	0.79	0.51	-0.01	-0.01	-0.81	0.77	0.08	1.00		
MSR	0.04	0.01	-0.95	-0.97	-0.01	0.01	0.17	0.01	1.00	
ASPECT	0.00	0.00	0.18	0.18	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.17	1.00

➤ Μοντέλο Μαρτίου 2018 (UAV):

Πίνακας 6-4 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Μαρτίου 2018.

ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ HRDEM	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΕΑΣΗΣ (TOPOGRAPHIC POSITION INDEX TPI)	0.00	1.00	0.51	0.02
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (SURFACE RELIEF RATIO SRR)	0.00	1.00	0.47	0.13
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ (ROUGHNESS INDEX)	0.00	1.00	0.01	0.03
ΚΛΙΣΗ (SLOPE)	0.00	1.00	0.33	0.23
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ (PROFILE CURVATURE)	0.00	1.00	0.57	0.01
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΟΨΗΣ (PLAN CURVATURE)	0.00	1.00	0.56	0.02
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ELEVATION)	0.00	1.00	0.52	0.22
ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ (OPENNESS)	0.00	1.00	0.52	0.04
ΠΟΛΛΑΠΛΟ ΣΚΙΑΣΜΕΝΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ MSR (MULTIPLE SHADED RELIEF)	0.00	1.00	0.75	0.25
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΛΙΤΥΩΝ (ASPECT)	0.00	1.00	0.39	0.24

Πίνακας 6-5 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Μαρτίου 2018.

	TPI	SRR	ROUGHNESS	SLOPE	PROFILE CURVATURE	PLAN CURVATURE	ELEVATION	OPENNESS	MSR	ASPECT
TPI	1.00									
SRR	0.41	1.00								
ROUGHNESS	0.03	0.01	1.00							
SLOPE	0.09	0.02	0.46	1.00						
PROFILE CURVATURE	-0.82	-0.46	0.00	0.02	1.00					
PLAN CURVATURE	0.63	0.02	0.05	0.16	-0.23	1.00				
ELEVATION	0.04	0.02	-0.04	-0.08	-0.03	0.02	1.00			
OPENNESS	0.42	0.34	-0.01	0.04	-0.28	0.24	0.03	1.00		
MSR	-0.09	-0.02	-0.49	-0.98	-0.00	-0.17	0.07	-0.04	1.00	
ASPECT	0.04	0.01	0.02	0.05	-0.02	0.05	-0.03	0.01	-0.07	1.00

➤ Μοντέλο Ιουλίου 2019 (UAV):

Πίνακας 6-6 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Ιουλίου 2019.

ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ HRDEM	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΕΑΣΗΣ (TOPOGRAPHIC POSITION INDEX TPI)	0.00	1.00	0.33	0.08
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (SURFACE RELIEF RATIO SRR)	0.00	1.00	0.46	0.15
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ (ROUGHNESS INDEX)	0.00	1.00	0.01	0.01
ΚΛΙΣΗ (SLOPE)	0.00	1.00	0.42	0.27
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ (PROFILE CURVATURE)	0.00	1.00	0.59	0.00
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΟΨΗΣ (PLAN CURVATURE)	0.00	1.00	0.39	0.01
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ELEVATION)	0.00	1.00	0.44	0.21

ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ (OPENNESS)	0.00	1.00	0.33	0.01
ΠΟΛΛΑΠΛΟ ΣΚΙΑΣΜΕΝΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ MSR (MULTIPLE SHADED RELIEF)	0.00	1.00	0.64	0.28
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΛΙΤΥΩΝ (ASPECT)	0.00	1.00	0.45	0.27

Πίνακας 6-7 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Ιουλίου 2019.

	TPI	SRR	ROUGHNESS	SLOPE	PROFILE CURVATURE	PLAN CURVATURE	ELEVATION	OPENNESS	MSR	ASPECT
TPI	1.00									
SRR	0.38	1.00								
ROUGHNESS	0.02	0.01	1.00							
SLOPE	0.08	0.11	0.07	1.00						
PROFILE CURVATURE	-0.70	-0.37	0.00	0.03	1.00					
PLAN CURVATURE	0.40	-0.08	0.04	0.17	0.07	1.00				
ELEVATION	0.02	0.01	0.07	-0.07	-0.03	0.02	1.00			
OPENNESS	1.00	0.38	0.02	0.08	-0.70	0.40	0.03	1.00		
MSR	-0.08	-0.11	-0.07	-0.99	-0.02	-0.16	0.05	-0.09	1.00	
ASPECT	0.01	0.04	0.02	0.02	-0.01	0.03	-0.01	0.01	-0.07	1.00

➤ **Μοντέλο Νοεμβρίου 2019 (UAV):**

Πίνακας 6-8 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Νοεμβρίου 2019.

ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ HRDEM	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΕΑΣΗΣ (TOPOGRAPHIC POSITION INDEX TPI)	0.00	1.00	0.72	0.01
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (SURFACE RELIEF RATIO SRR)	0.00	1.00	0.46	0.15
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ (ROUGHNESS INDEX)	0.00	1.00	0.00	0.01
ΚΛΙΣΗ (SLOPE)	0.00	1.00	0.42	0.26
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ (PROFILE CURVATURE)	0.00	1.00	0.25	0.00
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΟΨΗΣ (PLAN CURVATURE)	0.00	1.00	0.70	0.01
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ELEVATION)	0.00	1.00	0.50	0.24
ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ (OPENNESS)	0.00	1.00	0.72	0.01
ΠΟΛΛΑΠΛΟ ΣΚΙΑΣΜΕΝΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ MSR (MULTIPLE SHADED RELIEF)	0.00	1.00	0.64	0.28
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΛΙΤΥΩΝ (ASPECT)	0.00	1.00	0.44	0.27

Πίνακας 6-9 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Νοεμβρίου 2019.

	TPI	SRR	ROUGHNESS	SLOPE	PROFILE CURVATURE	PLAN CURVATURE	ELEVATION	OPENNESS	MSR	ASPECT
TPI	1.00									
SRR	0.41	1.00								

ROUGHNESS	0.01	0.02	1.00							
SLOPE	0.08	0.12	0.12	1.00						
PROFILE CURVATURE	-0.69	-0.39	0.00	0.04	1.00					
PLAN CURVATURE	0.46	-0.05	0.01	0.19	0.03	1.00				
ELEVATION	0.02	0.04	0.03	-0.03	-0.03	-0.02	1.00			
OPENNESS	1.00	0.41	0.01	0.08	-0.70	0.46	0.02	1.00		
MSR	-0.03	-0.11	-0.11	-0.99	-0.03	-0.18	0.00	-0.09	1.00	
ASPECT	0.01	0.05	0.05	0.09	0.01	0.04	0.02	0.01	-0.08	1.00

➤ Μοντέλο Νοεμβρίου 2020 (UAV):

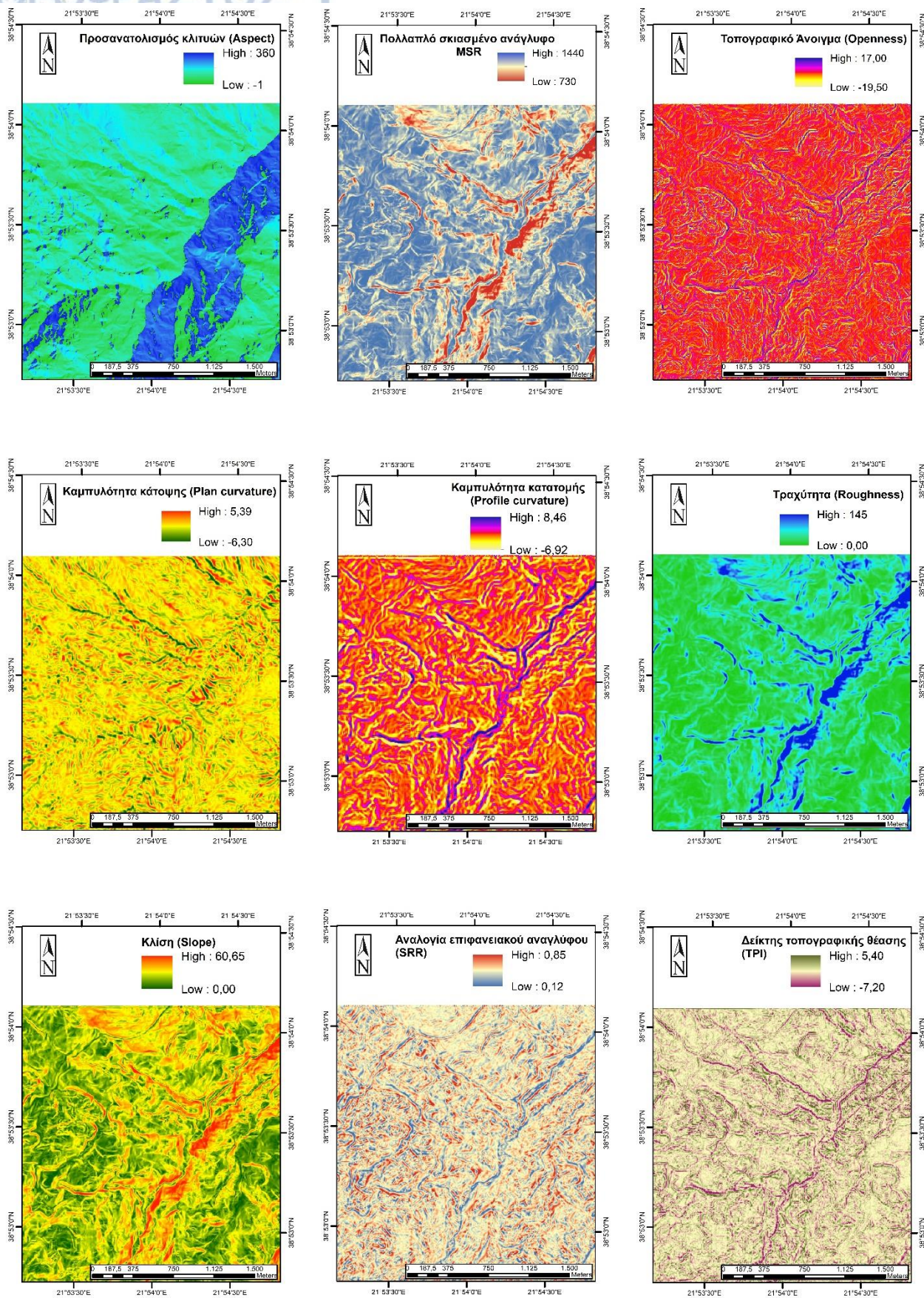
Πίνακας 6-10 Εύρη τιμών για κάθε ένα θεματικό επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου (UAV) του Νοεμβρίου 2020.

ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ HRDEM	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΕΑΣΗΣ (TOPOGRAPHIC POSITION INDEX TPI)	0.00	1.00	0.43	0.04
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (SURFACE RELIEF RATIO SRR)	0.00	1.00	0.46	0.14
ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ (ROUGHNESS INDEX)	0.00	1.00	0.02	0.03
ΚΛΙΣΗ (SLOPE)	0.00	1.00	0.43	0.26
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ (PROFILE CURVATURE)	0.00	1.00	0.37	0.07
ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΟΨΗΣ (PLAN CURVATURE)	0.00	1.00	0.38	0.01
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ELEVATION)	0.00	1.00	0.49	0.26
ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ (OPENNESS)	0.00	1.00	0.43	0.04
ΠΟΛΛΑΠΛΟ ΣΚΙΑΣΜΕΝΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ MSR (MULTIPLE SHADED RELIEF)	0.00	1.00	0.65	0.27
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΛΙΤΥΩΝ (ASPECT)	0.00	1.00	0.44	0.27

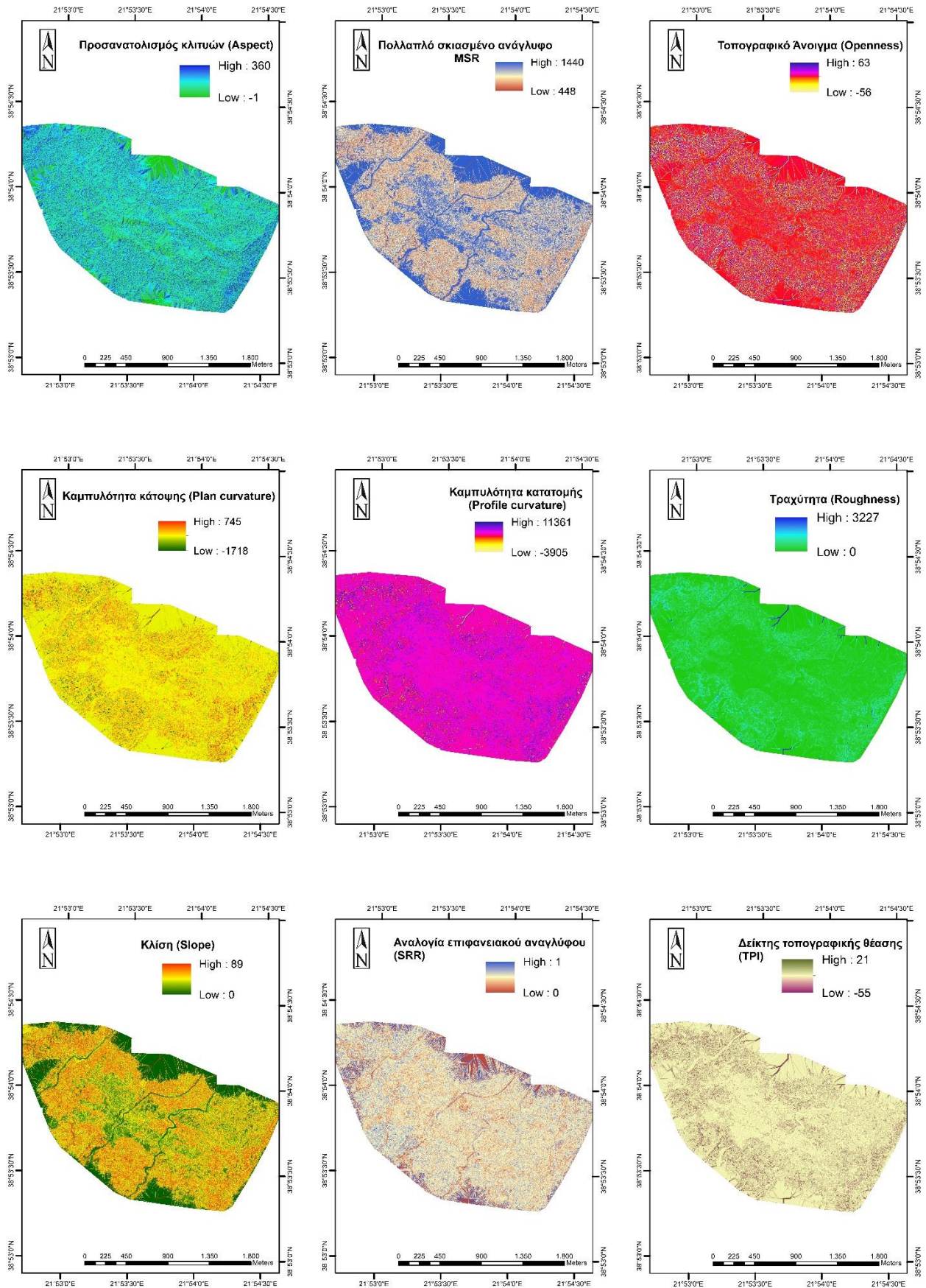
Πίνακας 6-11 Δείκτες συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών θεματικών επιπέδων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Νοεμβρίου 2020.

	TPI	SRR	ROUGHNESS	SLOPE	PROFILE CURVATURE	PLAN CURVATURE	ELEVATION	OPENNESS	MSR	ASPECT
TPI	1.00									
SRR	0.28	1.00								
ROUGHNESS	0.03	0.01	1.00							
SLOPE	0.07	0.08	0.40	1.00						
PROFILE CURVATURE	-0.56	-0.40	0.03	0.00	1.00					
PLAN CURVATURE	0.44	-0.01	0.12	0.16	-0.21	1.00				
ELEVATION	0.02	-0.02	-0.15	-0.22	-0.02	-0.01	1.00			
OPENNESS	1.00	0.28	0.03	0.08	-0.56	0.44	0.02	1.00		
MSR	-0.08	-0.07	-0.40	-0.99	-0.01	-0.16	0.20	-0.08	1.00	
ASPECT	0.01	0.02	0.05	0.07	0.00	0.03	-0.10	0.01	-0.07	1.00

Τα εν λόγω θεματικά επίπεδα δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο (ALS) του 2007, καθώς και του πιο αντιπροσωπευτικού, από τα ψηφιακά μοντέλα UAV, μοντέλου του Νοεμβρίου 2019, λόγω μεγαλύτερης χωρικής κατανομής αλλά και ύπαρξης λιγότερου θορύβου στα δεδομένα από την φυτοκάλυψη της περιοχής, παρατίθενται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 6.3 Θεματικά επίπεδα δεδομένων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (ALS) του 2007. (Παρατίθενται ευκρινέστερα στο Παράρτημα Νο 16).



Εικόνα 6.4 Θεματικά επίπεδα δεδομένων που κατασκευάστηκαν για το ψηφιακό μοντέλο (UAV) του Νοεμβρίου 2019. (Παρατίθενται ευκρινέστερα στο Παράρτημα Νο 17).

2. Σύνθεση κύριων συστατικών PCs (Principal Components)

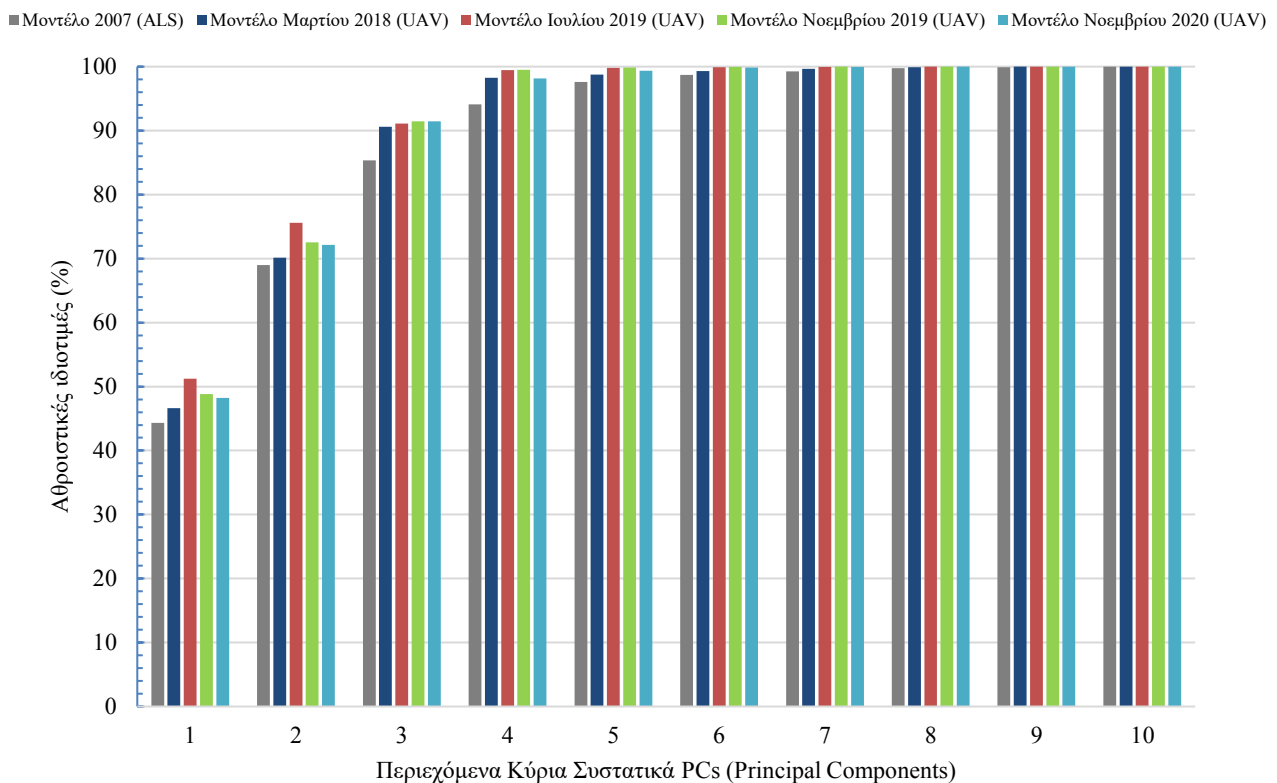
Παρατηρώντας τους δείκτες συσχέτισης, για κάθε ένα από τα θεματικά επίπεδα που χρησιμοποιούνται για το εκάστοτε μοντέλο, προκύπτει πως ορισμένα από αυτά παρέχουν περιττές πληροφορίες σχετικά με τη μορφολογία της επιφάνειας.

Κατά την εφαρμογή της PCA ο αριθμός των θεματικών επιπέδων που λαμβάνονται υπόψη μπορεί να μειωθεί. Ένα εμπειρικό κριτήριο για τη μείωση αυτή απαιτεί τα αποτελούμενα Κύρια Συστατικά PCs (Principal Components) να παρέχουν τουλάχιστον το 80% της συνολικής διακύμανσης πληροφοριών των δεδομένων θεματικών επιπέδων (Solanas Pérez et al., 2011).

Με άλλα λόγια, προτού διεξαχθεί η παραγωγή της νέας ενισχυμένης εικόνας δια της PCA, θα πρέπει να εκτιμηθεί το ποσοστό πληροφορίας που θα εμπεριέχεται σε αυτή ανάλογα με τον αριθμό των Principal Components που θα την συνθέσουν. Κάθε Principal Component (PC) θα αποτελείται από ένα σύνολο συσχετισμένων ή μη συσχετισμένων μεταβλητών (όπως ήδη ορίστηκαν από τα θεματικά επίπεδα στην παρούσα περίπτωση), οι οποίες για κάθε PC θα επιλέγονται με αυτοματοποιημένο τρόπο μηχανικής μάθησης.

Στην **Εικόνα 6.5** παρουσιάζεται το ποσοστό αθροιστικής διακύμανσης ιδιοτιμών των περιεχόμενων PCs για κάθε δοκιμαστική εκτέλεση της μεθόδου για αύξοντα αριθμό PCs από 1 έως 10, προκειμένου να εκτιμηθεί ακριβώς η βέλτιστη σχέση λογιζόμενων PCs με την ευκρινέστερη δυνατή σύνθεση απομειωμένης πληροφορίας σύμφωνα με τον εμπειρικό κανόνα της διακύμανσης του 80%.

Αθροιστική διακύμανση ιδιοτιμών περιεχόμενων Κύριων Συστατικών PCs (Principal Components)



Εικόνα 6.5 Αθροιστική διακύμανση ιδιοτιμών περιεχόμενων Κύριων Συστατικών PCs (Principal Components)

Τα αποτελέσματα για όλα τα μοντέλα αναφοράς HRDEM, δείχνουν πως οι επιλύσεις με τρία Κύρια Συστατικά (PCs) που προέρχονται από την αυτοματοποιημένη σύνθεση των δεδομένων των θεματικών επιπέδων των μοντέλων αναφοράς HRDEM, εμπεριέχουν κατά μέσο όρο το 90% της συνολικής διακύμανσης της διαθέσιμης πληροφορίας, ικανοποιώντας το εμπειρικό κριτήριο για την απομείωση των περιττών πληροφοριών ($\geq 80\%$ της συνολικής διακύμανσης), καθιστώντας έτσι την επιλογή σύνθεσης εικόνας με τρία Κύρια Συστατικά (PCs) βέλτιστη έναντι της επιλογής δύο PCs που δεν πληρεί το κριτήριο του 80% και έναντι τεσσάρων και παραπάνω PCs που το υπερκαλύπτουν, σε βαθμό που δεν απομειώνεται ουσιαστικά η ποσότητα περιττής πληροφορίας.

Συνεπώς, κάθε μια PCA ανάλυση που εκτελείται για το εκάστοτε μοντέλο, χρησιμοποιείται σε δεύτερο στάδιο ως εργαλείο για την μετατροπή της συνολικής διακύμανσης πληροφορίας 10 αρχικών θεματικών επιπέδων σε τρεις ζώνες που στην συγκεκριμένη περίπτωση βάσει των επιλύσεων και της βέλτιστης επιλογής που συντελέστηκαν στην παραπάνω παράγραφο, θα αντιστοιχούν σε τρία Κύρια Συστατικά (PCs).

Η εφαρμογή της PCA επιτρέπει την σύνθεση του αριθμού Κύριων Συστατικών (PCs) που επιλέχτηκαν, τριών εν προκειμένω, σε ένα νέο σύνολο μορφής εικόνας (Raster), χαρακτηριζόμενης από την σύνθεση των **τριών βασικών χρωμάτων: Κόκκινο – Πράσινο – Μπλε (R – G – B)**.

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι μορφολογικές πληροφορίες με τον υψηλότερο συντελεστή βαρύτητας στο μίγμα δεδομένων του κάθε Κύριου Συστατικού (PC) οι οποίες θα αντιστοιχίζονται και θα χαρακτηρίζουν το PC για κάθε ένα από τα τρία Κύρια Συστατικά (PCs) της εκάστοτε ανάλυσης.

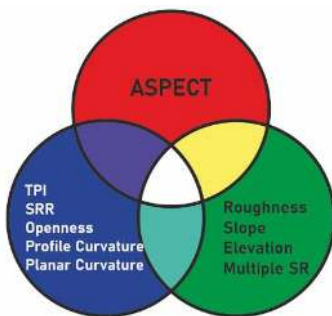
Προκειμένου να τελεστεί αυτός ο προσδιορισμός υπολογίζεται για κάθε ανάλυση ο βαθμός συσχέτισης των αρχικών θεματικών επιπέδων των ψηφιακών μοντέλων, με τα περιεχόμενα των τριών Κύριων Συστατικών (PCs), λαμβάνοντας υπόψιν, κατά Pawluszek (2018) τις τιμές που παρουσιάζουν θετική ή αρνητική συσχέτιση μεγαλύτερη του 0,5.

Οι πίνακες συσχέτισης των αρχικών θεματικών επιπέδων, των ψηφιακών μοντέλων, με την σύνθεση των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών (PCs) που απαρτίζουν την κάθε PCA ανάλυση για κάθε μοντέλο, παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω:

➤ Μοντέλο 2007 (ALS):

Πίνακας 6-12 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.

	ΠΡΩΤΟ PC (ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΔΕΥΤΕΡΟ PC (ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΤΡΙΤΟ PC (ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ)
TPI	-0.01	0.09	0.80
SRR	0.00	0.05	0.69
ROUGHNESS	0.38	-0.79	-0.01
SLOPE	0.38	-0.83	-0.01
PROFILE CURVATURE	0.01	-0.06	-0.85
PLAN CURVATURE	-0.01	0.04	0.70
ELEVATION	-0.07	0.56	-0.08
OPENNESS	-0.03	0.07	0.92
MSR	-0.39	0.83	0.01
ASPECT	0.97	0.20	0.00

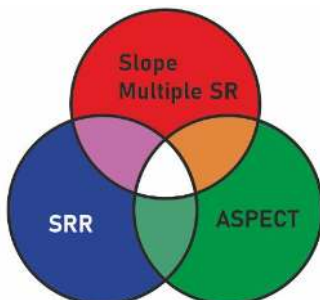


Εικόνα 6.6 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου ALS για το έτος 2007.

➤ Μοντέλο Μαρτίου 2018 (UAV):

Πίνακας 6-13 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.

	ΠΡΩΤΟ PC (ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΔΕΥΤΕΡΟ PC (ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΤΡΙΤΟ PC (ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ)
TPI	-0.09	0.02	0.43
SRR	-0.02	0.01	0.97
ROUGHNESS	-0.48	-0.04	-0.04
SLOPE	-0.98	-0.08	-0.01
PROFILE CURVATURE	-0.00	-0.01	-0.47
PLAN CURVATURE	-0.16	0.02	0.02
ELEVATION	0.14	-0.17	-0.02
OPENNESS	-0.04	0.00	0.37
MSR	0.99	0.07	0.01
ASPECT	-0.12	0.97	0.00

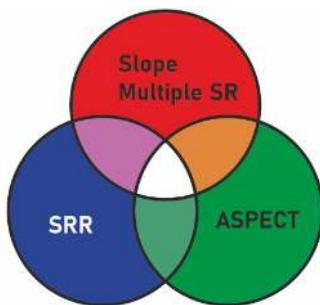


Εικόνα 6.7 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για το έτος 2018.

➤ Μοντέλο Ιουλίου 2019 (UAV):

Πίνακας 6-14 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.

	ΠΡΩΤΟ PC (ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΔΕΥΤΕΡΟ PC (ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΤΡΙΤΟ PC (ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ)
TPI	-0.09	0.00	0.38
SRR	-0.13	0.02	0.96
ROUGHNESS	-0.07	-0.01	-0.00
SLOPE	-0.99	-0.07	-0.01
PROFILE CURVATURE	-0.03	0.00	-0.38
PLAN CURVATURE	-0.17	0.01	-0.11
ELEVATION	0.08	-0.02	-0.02
OPENNESS	-0.10	0.00	0.38
MSR	0.99	0.07	0.02
ASPECT	-0.15	0.98	-0.01

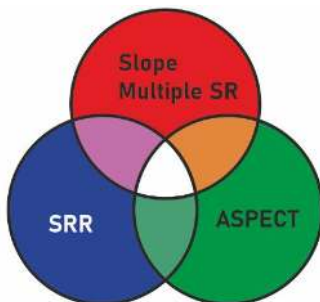


Εικόνα 6.8 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για την περίοδο Ιουλίου 2019.

➤ **Μοντέλο Νοεμβρίου 2019 (UAV):**

Πίνακας 6-15 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.

	ΠΡΩΤΟ PC (ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΔΕΥΤΕΡΟ PC (ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΤΡΙΤΟ PC (ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ)
TPI	-0.10	0.01	0.40
SRR	-0.14	0.05	0.96
ROUGHNESS	-0.12	-0.03	-0.00
SLOPE	-0.99	-0.08	-0.02
PROFILE CURVATURE	-0.02	-0.01	-0.40
PLAN CURVATURE	-0.18	0.01	-0.08
ELEVATION	0.02	0.15	-0.03
OPENNESS	-0.10	0.01	0.40
MSR	0.99	0.09	0.03
ASPECT	-0.17	0.98	-0.02

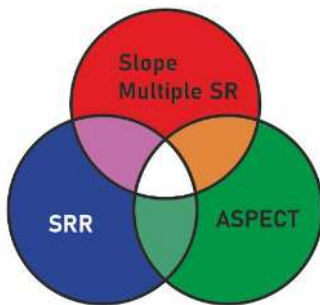


Εικόνα 6.9 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για την περίοδο Νοεμβρίου 2019.

➤ **Μοντέλο Νοεμβρίου 2020 (UAV):**

Πίνακας 6-16 Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των αρχικών θεματικών επιπέδων και των περιεχομένων των τριών Κύριων Συστατικών PCs.

	ΠΡΩΤΟ PC (ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΔΕΥΤΕΡΟ PC (ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	ΤΡΙΤΟ PC (ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ)
TPI	-0.07	-0.02	0.34
SRR	-0.10	0.01	0.96
ROUGHNESS	-0.41	-0.01	-0.03
SLOPE	-0.98	-0.14	-0.01
PROFILE CURVATURE	0.00	0.01	-0.44
PLAN CURVATURE	-0.16	-0.02	0.01
ELEVATION	0.39	-0.38	0.00
OPENNESS	-0.07	-0.02	0.34
MSR	0.98	0.15	0.01
ASPECT	-0.15	0.91	-0.01



Εικόνα 6.10 Κατανομή Κύριων Συστατικών (PCs) μετά των περιεχόμενων τοπογραφικών πληροφοριών στην χρωματική παλέτα (R – G – B) σύνθεσης του μοντέλου UAV για την περίοδο Νοεμβρίου 2020.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της σύνθεσης των Κύριων Συστατικών PCs για τα ψηφιακά μοντέλα των περιόδων 2018 – 2020 που αποκτήθηκαν με την χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV), γίνεται εύκολα αντιληπτό πως όλες οι αναλύσεις στα εν λόγω παραχθέντα μοντέλα έχουν όμοια αποτελέσματα.

Γι' αυτό τον λόγο προκειμένου να ερμηνευτούν άρτια τα αποτελέσματα της εφαρμογής PCA για τα παραπάνω μοντέλα επιλέχθηκε το πιο αντιπροσωπευτικό από τα τέσσερα, με κριτήρια την μεγαλύτερη χωρική κατανομή αλλά και την ύπαρξη του λιγότερου δυνατού θορύβου στα δεδομένα από την φυτοκάλυψη της περιοχή, εν προκειμένω το μοντέλο (UAV) του Νοεμβρίου 2019, ανάλυσης 1 x 1 [m/ pixel].

Οι τελικές ενισχυμένες εικόνες, για το εν λόγω μοντέλο, Νοεμβρίου 2019, και οι αντίστοιχες που αφορούν στο ψηφιακό μοντέλο, ανάλυσης 5 x 5 [m/ pixel], της περιοχής όπως αυτή αποτυπώθηκε με τεχνικές ALS το έτος 2007, ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθόδου PCA, και η ερμηνεία τους παρατίθενται αναλυτικά στη συνέχεια.

3. Αποτελέσματα εφαρμογής PCA (Principal Components Analysis)

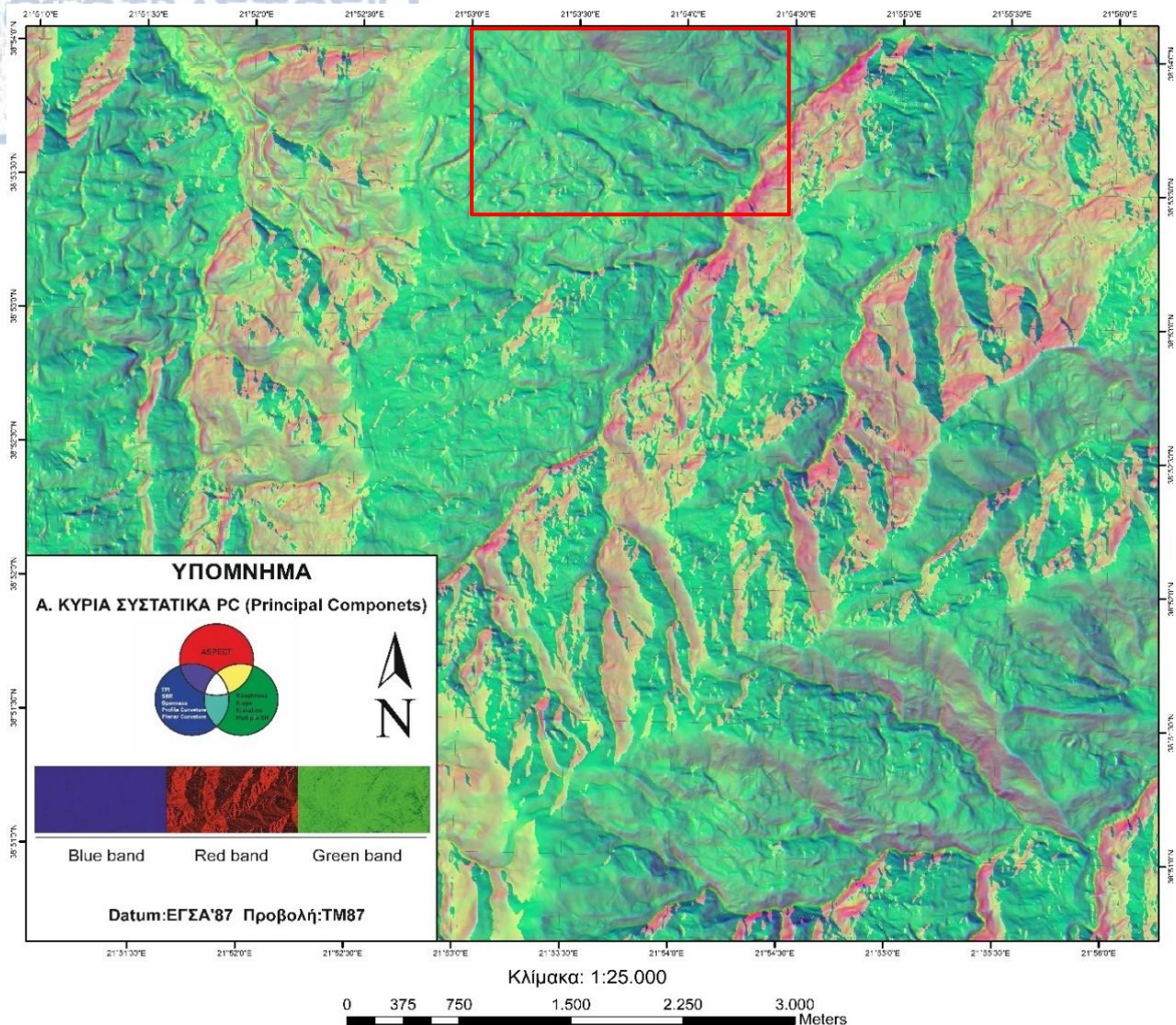
Η μέθοδος PCA εκτελέστηκε με την εντολή "Principal Components" μέσω του λογισμικού ArcMap, και οι τελικές ενισχυμένες εικόνες, της τοπογραφίας που προέκυψαν, για τα προαναφερθέντα μοντέλα, και η ερμηνεία τους παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω:

➤ Εφαρμογή της PCA στο μοντέλο ALS του έτους 2007:

Βάσει της οπτικής θεώρησης της παραγόμενης νέας ενισχυμένης εικόνας από την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο ALS του έτους 2007, η οποία περιέχει περίπου το 90% της συνολικής διακύμανσης των πληροφοριών από τα αρχικά θεματικά επίπεδα δεδομένων του μοντέλου, εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν διάφορες μορφολογικές ενδείξεις και χαρακτηριστικά όρια κατολισθήσεων.

Σε πρώτο στάδιο, προσδιορίζονται τα όρια και οι μορφολογικές ενδείξεις των κατολισθητικών φαινομένων που αποτυπώνονται στην περιοχή, εκτελώντας ανάλυση της χρωματικής σύνθεσης της εικόνας.

Πιο συγκεκριμένα, περιοχές όπου η τοπογραφία είναι γωνιαδώς κοίλη προς τα επάνω, καθώς συνδέεται με "αιχμηρές εξάρσεις" του αναγλύφου, υποδεικνύονται από τα πιο σκούρα μπλε έως μωβ χρώματα της εικόνας.



Εικόνα 6.11 Ενισχυμένη εικόνα, ανάλυσης 5 x 5 [m/ pixel], της μορφολογίας της ευρύτερης περιοχής μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης (ALS) του έτους 2007. Με κόκκινο πλαίσιο απεικονίζεται η θέση της ερευνηθείσας περιοχής. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 18**).

Χρωματικές εμφανίσεις αυτού του είδους παρατηρούνται κυρίως στις δύο αντικριστές κλιτύες που οριοθετούν τον ευρύτερο κατολισθητικό χώρο της περιοχής μελέτης, οι οποίες έχουν ήδη με την υπό κεφάλαιο 5 της παρούσας γεωμορφολογικής ανάλυσης, αναγνωριστεί και χαρακτηριστεί ως πτέρυγες (flanks) της σύνθετης κατολίσθησης Τυμφρηστού (Βλ. Κεφάλαιο 5 «5.3.2. Αποτύπωση σύνθετης κατολίσθησης Τυμφρηστού»). Η ταύτιση των χρωματικών αυτών ενδείξεων με τις αναγνωριστικές πτέρυγες της εν λόγω κατολίσθησης τεκμηριώνει και επαυξάνει αυτόν τον χαρακτηρισμό τους.

Βαθύ μπλε έως μωβ χρωματικές ενδείξεις εντοπίζονται επίσης και στην περιοχή των σταθερών ράχων της σύνθετης κατολίσθησης, για τις οποίες εκτιμάται ότι το αποτέλεσμα αυτό αντιπροσωπεύει πιθανές μη ενεργές πλευρικές πτέρυγες επιμέρους κατολισθήσεων.

Αντίθετα, με πράσινα έως κίτρινα χρώματα, υποδεικνύονται περιοχές με κοίλη και προς τα πάνω τοπογραφία. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται με πιο ανώμαλες τοπογραφίες, αποτελούμενες

κυρίως από αναθολώσεις και ανορθώσεις της μορφολογίας του εδάφους. Εντός της ερευνηθείσας περιοχής, οι χρωματικές αυτές ενδείξεις αφορούν πιθανώς υλικά κατολισθήσεων.

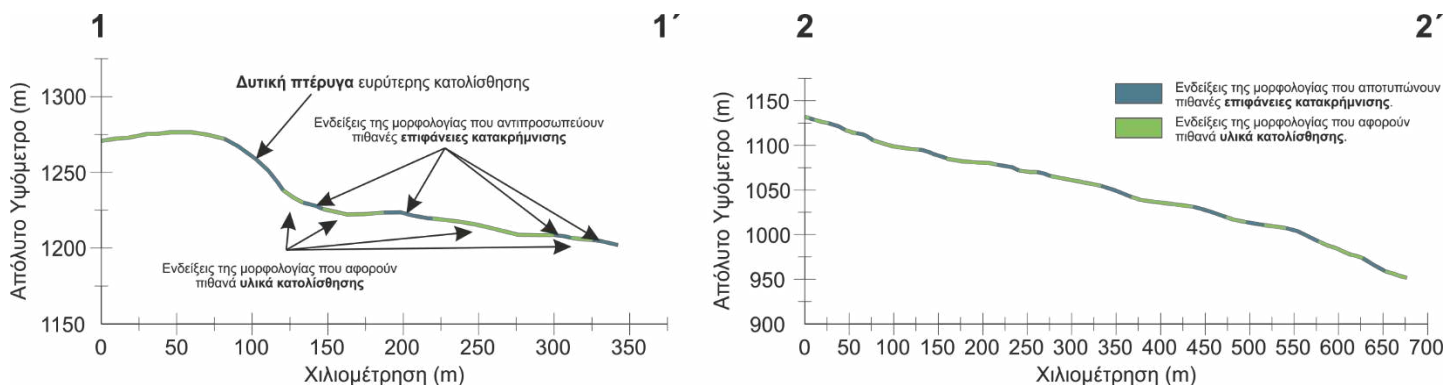
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κατά την παρατήρηση της εικόνας, παρουσιάζουν οι τοπικές εμφανίσεις μπλε έως γαλάζιων περιοχών εντός της σύνθετης κατολίσθησης που κυρίως χαρακτηρίζεται από πρασινοκίτρινο χρώμα. Αυτές οι τοπικές εμφανίσεις (γαλάζιου και μπλε), αποτυπώνουν και πάλι περιοχές έξαρσης του αναγλύφου, με την διαφορά ότι σε αυτές τις περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από επιφάνειες κατακρημνίσεων. Ως προς την σημαντική της εικόνας, όσο εντονότερη η απόχρωση των επιφανειών κατακρημνίσεως, τόσο ευκολότερη η αναγνώριση τους και η δυνατότητα σύνδεσης τους με πρόσφατα κατολισθητικά γεγονότα.

Οι χαρακτηριστικές αυτές ενδείξεις του αναγλύφου συνδέονται κυρίως με κατολισθητικά φαινόμενα περιστροφικού χαρακτήρα, και η αναγνώριση και αποτύπωση τους επαληθεύτηκε κατά έναν αποδεκτό βαθμό στο πεδίο.

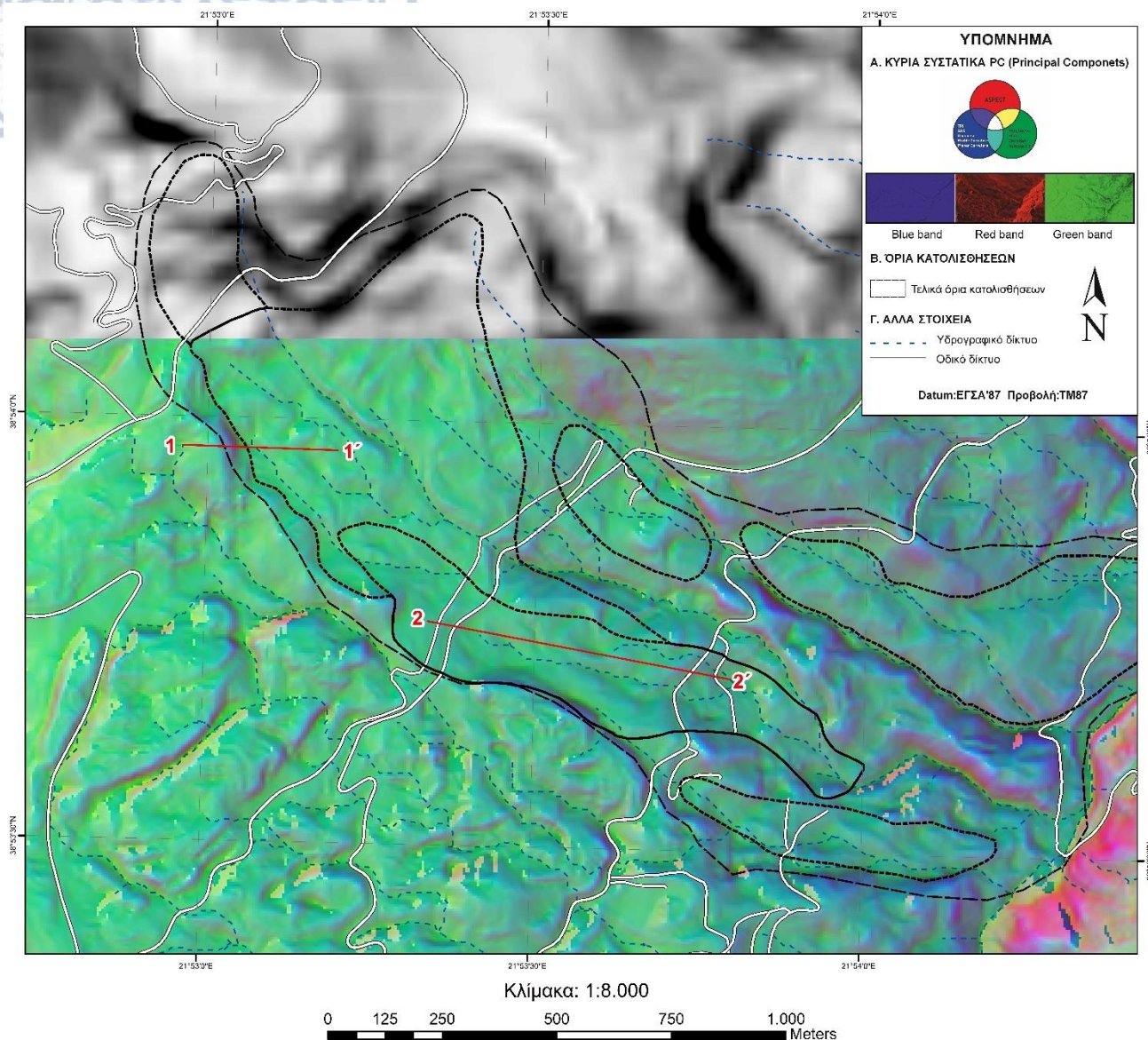
Με σημείο αναφοράς την παραπάνω χρωματική ανάλυση και με γνώμονα τις θεωρητικές ταξινομήσεις των επιμέρους τμημάτων των κατολισθήσεων (Varnes, 1978; Highland & Bobrowsky, 2008), αποτυπώθηκαν τα όρια της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης και τα όρια των πιθανών επιμέρους κατολισθήσεων που την συνθέτουν.

Σημειώνεται ότι σχετικά με το ανώτερο τμήμα της σύνθετης κατολίσθησης, το οποίο εντοπίζεται εκτός των ορίων της νέας ενισχυμένης εικόνας, έλαβε χώρα η μέχρι ενός βαθμού εκτίμηση του χρώματός της μετέπειτα ανάλυσης PCA στο ψηφιακό μοντέλο UAV του Νοεμβρίου 2019, και κυρίως με συνεκτίμηση προσωπικών παρατηρήσεων και εκτιμήσεων στο πεδίο.

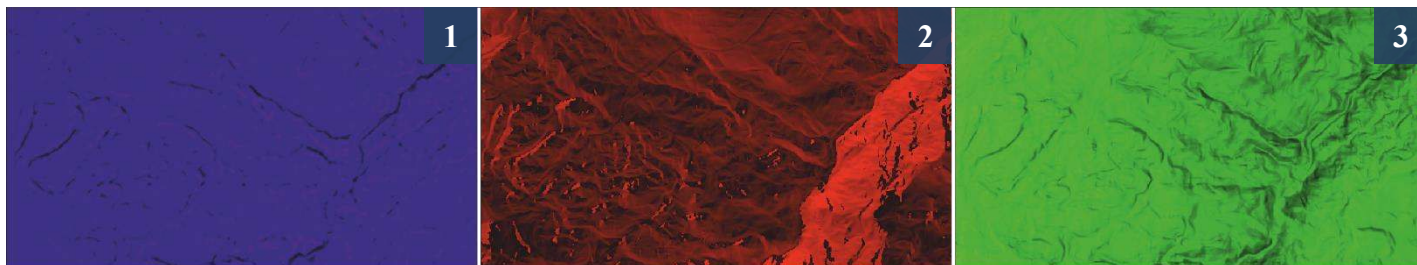
Σε δεύτερο στάδιο, παρατίθενται παρακάτω ως διευκρινιστικά τεκμήρια το τμήμα της ενισχυμένης εικόνας που αφορά την υπό μελέτη περιοχή, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν, καθώς και δύο επεξηγηματικές, ενδεικτικές χρωματικές τομές πάνω στις οποίες συσχετίζονται οι μορφολογικές ενδείξεις που αντιπροσωπεύουν την κατολίσθηση, με την χρωματική σύνθεση της εικόνας.



Εικόνα 6.12 Ενδεικτικές χρωματικές τομές πάνω στις οποίες αποτυπώνονται οι τοπογραφικές αναπαραστάσεις της επιφανείας. Οι θέσεις των εν λόγω τομών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα στην **Εικόνα 6.13**.



Εικόνα 6.13 Τμήμα ενισχυμένης εικόνας, ανάλυσης 5 x 5 [m/ pixel], της μορφολογίας της ευρύτερης περιοχής μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης (ALS) του έτους 2007, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν, καθώς και οι θέσεις των δύο παραπάνω ενδεικτικών χρωματικών τομών. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 19**).

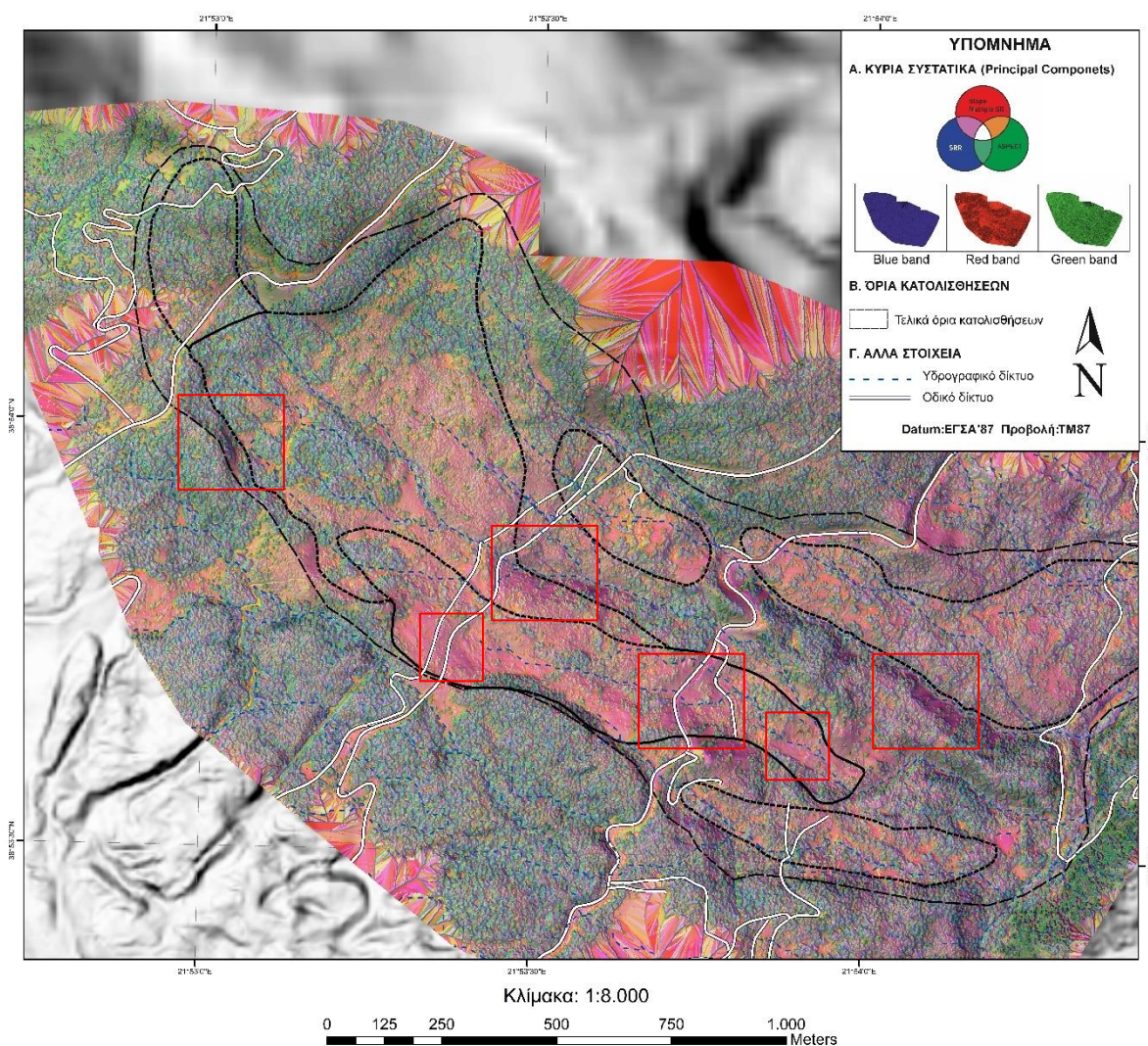


Εικόνα 6.14 Τοπογραφική αναπαράσταση επιφανείας τριών κύριων συστατικών PCs. **1) Μπλέ κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το τρίτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (TPI, SRR, PROFILE και PLAN CURVATURE, OPENNESS). **2) Κόκκινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το πρώτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας, το οποίο δεν φαίνεται να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία και περιγράφει στο ~97% τον προσανατολισμό των κλιτών της περιοχής (ASPECT). **3) Πράσινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το δεύτερο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας, στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (ROUGHNESS, SLOPE, ELEVATION, MSR).

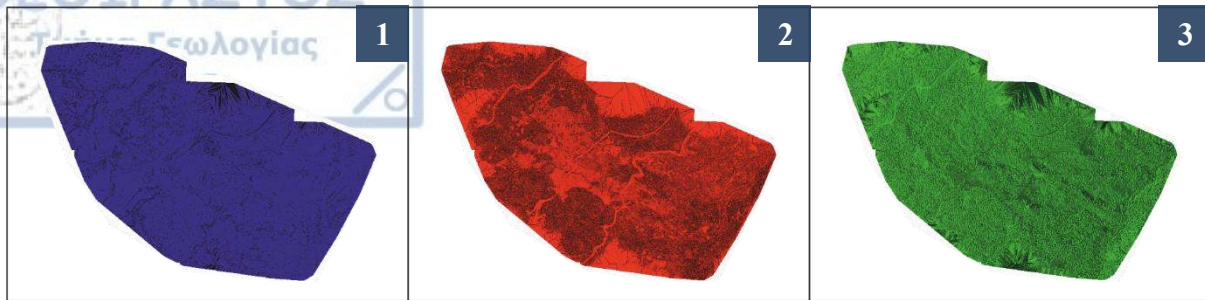
➤ Εφαρμογή της PCA στο μοντέλο UAV της περιόδου Νοεμβρίου 2019:

Βάσει της οπτικής παρατήρησης της παρακάτω ενισχυμένης εικόνας (**Εικόνα 6.15**) για το μοντέλο (UAV) Νοεμβρίου 2019, η οποία περιέχει περίπου το 90% της συνολικής διακύμανσης των πληροφοριών από τα αρχικά θεματικά επίπεδα δεδομένων του μοντέλου, δεν εντοπίστηκαν σαφείς μορφολογικές ενδείξεις για την διαπίστωση ύπαρξης κατολισθήσεων, παρά μόνο κάποιες τοπικές ενδείξεις επιφανειών κατακρημνίσεων.

Πιο συγκεκριμένα, από την ανάλυση της χρωματικής σύνθεσης της εικόνας, όπου παρουσιάζονται πράσινα χρώματα υποδεικνύονται περιοχές πυκνής βλάστησης, λόγω της έντονης ανάπτυξης της και του μεγάλου ύψους των δέντρων που την αποτελούν. Οι συνθήκες για τις περιοχές αυτές θα μπορούσαν να επιφέρουν την εκτίμηση τους ως σταθερές.



Εικόνα 6.15 Ενισχυμένη εικόνα, ανάλυσης 1 x 1 [m/ pixel] της μορφολογίας της περιοχής μελέτης μετά την εφαρμογή της μεθόδου PCA στο ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης (UAV) της περιόδου Νοεμβρίου 2019, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολισθαίνουσας περιοχής και των επιμέρους τμηματικών κατολισθήσεων που την αποτελούν. (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 20**).



Εικόνα 6.16 Τοπογραφική αναπαράσταση επιφανείας τριών κύριων συστατικών PCs. **1) Μπλέ κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το τρίτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (SRR). **2) Κόκκινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το πρώτο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας, στο οποίο αποτυπώνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία της επιφάνειας (SLOPE, MSR). **3) Πράσινο κανάλι εικόνας:** Αποτελεί το δεύτερο κύριο συστατικό PC της τελικής ενισχυμένης εικόνας, το οποίο δεν φαίνεται να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία και περιγράφει στο ~91% τον προσανατολισμό των κλιτύων της περιοχής (ASPECT).

Παρά το γεγονός πως αυτού του είδους οι εκτιμήσεις δύναται να ισχύουν για περιοχές εντός των ορίων ευρύτερων σύνθετων κατολισθήσεων, στην συγκεκριμένη περίπτωση της εδώ περιοχής μελέτης, αυτή η εκτίμηση καταρρίπτεται με διττό τρόπο. Αφ' ενός διότι κατά το στάδιο των εργασιών στο πεδίο (για τις ανάγκες της παρούσης), παρατηρήθηκαν φαινόμενα απόκλισης των κορμών των δέντρων από την κατακόρυφο φαινόμενο που αποτελεί προδήλως, χαρακτηριστική ένδειξη ερπυσμού του εδάφους κατά Sharpe (1938) και αφετέρου από την αναφορά στην ερευνητική μελέτη των Papadopoulos et al. (2007).

Κατά την μελέτη αυτή χρονολογήθηκαν κατολισθητικά γεγονότα εντός των εν λόγω περιοχών με έντονη βλάστηση τοποθετημένες εντός των ορίων της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης, με χρήση μεθόδων δενδρογεωμορφολογικών παρατηρήσεων και τεχνικών δενδροχρονολόγησης, που κατέληξαν στο συμπέρασμα της ύπαρξης ενδείξεων φαινομένων ολίσθησης που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή. (Βλ. Κεφάλαιο 4 «4.6.4. Χρονολόγηση κατολισθητικών φαινομένων με δενδρογεωμορφολογικές και δενδροχρονικές τεχνικές στην περιοχή Ράχη Τυμφρηστού»).

Αντίθετα, με πορτοκαλί χρώματα, υποδεικνύονται στην εικόνα περιοχές όπου η βλάστηση είτε απουσιάζει είτε εμφανίζεται αρκετά αραιή σε σχέση με την πυκνότητά της στο σύνολο της περιοχής. Εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, οι χρωματικές αυτές ενδείξεις αφορούν πιθανώς υλικά κατολισθήσεων.

Στον ίδιο χώρο, παρατηρώντας την εικόνα, εντοπίζονται τοπικά περιοχές χαρακτηριζόμενες από σκούρα μπλε έως μωβ χρώματα. Με αυτά τα χρώματα αποτυπώνονται περιοχές όπου η τοπογραφία είναι γωνιωδώς κοίλη προς τα επάνω και συνδέεται με "αιχμηρές" εξάρσεις του αναγλύφου.

Οι χρωματικές αυτές ενδείξεις δεν είναι αμέσως προφανείς και συναντώνται κυρίως στην περιοχή της δυτικής πτέρυγας, στην περιοχή του κεντρικού ρέματος κάτω από το νέο οδικό δίκτυο Λαμίας – Καρπενησίου, στην κεντρική ράχη στην περιοχή του πόδα της κατολίσθησης καθώς και σε τοπικές εμφανίσεις σε όλη την έκταση της κατολίσθησης που πιθανώς συνδέονται με επιφάνειες κατακρημνίσεων (οι περιοχές αυτές αποτυπώνονται με κόκκινο πλαίσιο στην Εικόνα 6.15).

6.2.3. Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη και εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας επέτρεψε την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας των πλαγιών, και την λεπτομερή αναγνώριση μορφολογικών ενδείξεων κατολισθήσεων, που σε συνδυασμό με τις επιτόπου παρατηρήσεις και επισημάνσεις στο πεδίο, πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου, οδήγησε στην τελική οριοθέτηση των κατολισθήσεων της περιοχής, και την αποτύπωση τους σε όλους τους θεματικούς χάρτες και τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν για αυτήν (Βλ. Κεφάλαιο 5 της παρούσας).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου PCA στα δύο διαφορετικά ψηφιακά μοντέλα, που αποκτήθηκαν με διαφορετικές μεθόδους αποτύπωσης, ήτοι ψηφιακό μοντέλο 2007 αποτύπωσης της περιοχής με τεχνικές ALS και ψηφιακό μοντέλο Νοεμβρίου 2019 αποτύπωσης της περιοχής μέσω της χρήσης μη επανδρωμένου αεροσκάφους UAV, φαίνεται πως η μέθοδος PCA εφαρμόζεται καλύτερα για το μικρότερης ανάλυσης, 5 x 5 [m/ pixel], ψηφιακό μοντέλο του 2007 (ALS), έναντι του πολύ πιο υψηλής ανάλυσης, 1 x 1 [m/ pixel], ψηφιακού μοντέλου του Νοεμβρίου 2019 (UAV).

Πιο συγκεκριμένα, βάσει των αποτελεσμάτων της μεθόδου PCA για το ψηφιακό μοντέλο του 2007 (ALS), επιτεύχθηκε η αποτύπωση των ορίων της ευρύτερης κατολίσθησης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την απαρτίζουν, καθώς και ο προσδιορισμός επιφανειών κατακρημνίσεων αλλά και τοπικών, μικρότερων κατολισθήσεων.

Αντίθετα τα αποτελέσματα για το ψηφιακό μοντέλο του 2019 (UAV) φαίνεται να επηρεάζονται από την βλάστηση της περιοχής και ο εντοπισμός σαφών μορφολογικών χαρακτηριστικών δεν ήταν εύκολος. Η ανάλυση 1 x 1 [m/ pixel] του εν λόγω ψηφιακού μοντέλου, παρότι είναι μεγαλύτερη, φαίνεται να παρουσιάζει περιορισμένο βαθμό απόδοσης, σε σχέση με την αναγνώριση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής.

Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην φύση και στην εξέλιξη της κατολίσθησης. Όπως έγινε σαφές από προηγούμενα κεφάλαια η ερευνηθείσα κατολίσθηση δεν συμπεριφέρεται σαν μια μεμονωμένη ραγδαία κατολίσθηση, αλλά σαν μια σύνθετη κατολίσθηση, αποτελούμενη από πολλές ενεργές ή μη κατολισθήσεις και ερπυσμούς, όπου πολλά τμήματα της βρίσκονται είτε σε οριακή κατάσταση ισορροπίας, είτε ενεργοποιούνται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου.

Τα σημάδια αυτών των κινήσεων πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, κατά την διερεύνηση τους σε μεγάλη κλίμακα, όπως αυτή με χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων UAV, δεν είναι άμεσα προφανή και ο εντοπισμός τους προϋποθέτει εμπειρική γνώση των ιδιοτήτων των γεωλογικών υλικών που συμμετέχουν σε αυτές τις κινήσεις.

Παρά τα μειονεκτήματα, η συνεισφορά της τρέχουσας τεχνολογίας των συστημάτων UAV για το παρόν ερευνητικό εγχείρημα υπήρξε καθοριστική, καθώς παρείχε ορθοφωτογραφίες και υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα εδάφους HRDEM, για διαφορετικές χρονικά σαρώσεις της περιοχής, σε χαμηλό κόστος (χρόνου, χρήματος και ανθρώπινου δυναμικού), ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο τις υποθέσεις για την ερμηνεία και εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.

Εν κατακλείδι, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, έχοντας ως στόχο την ενίσχυση της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών μοντέλων υψηλής ανάλυσης (HRDEM), διά της εφαρμογής της μεθόδου PCA, στο ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποδείχτηκε εκ του

αποτελέσματος παραπάνω από ικανοποιητική, τόσο ως προς την αυτοματοποιημένη εξαγωγή επαυξημένων πληροφοριών σχετικά με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων, όσο και ως προς την αξιολόγηση του βαθμού απόδοσης τέτοιων μεθόδων Μηχανικής Μάθησης σε εφαρμογές Τεχνικής Γεωλογίας.

6.3. Διερεύνηση χρονικής εξέλιξης κατολισθητικών φαινομένων

Στα πλαίσια διερεύνησης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής μελέτης, εκτελέστηκε παράλληλα αριθμός ορισμένων συγκριτικών αναλύσεων για την ίδια περιοχή, με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σχέση με την ενεργότητα και εξέλιξη των φαινομένων.

Οι αναλύσεις συνοψίζονται αφενός, στην ποιοτική οπτική ερμηνεία δορυφορικών εικόνων της περιοχής αναφερόμενες σε ένα χρονικό διάστημα εννέα ετών (2010 – 2019), και αφετέρου στην αυτοματοποιημένη εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, διά της εφαρμογής υπολογιστικών πράξεων για την παραγωγή ενός Ψηφιακού μοντέλου διαφοράς (DEM of Difference), σε σχέση με τις διαχρονικές αλλαγές της μορφολογίας και τις μετατοπίσεις του εδάφους.

6.3.1. Μεθοδολογία

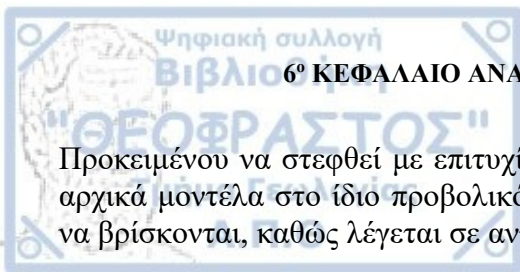
Πρώτη διεργασία για την διερεύνηση της εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων στον χρόνο, αποτέλεσε η οπτική διερεύνηση ποιοτικών αλλαγών της μορφολογίας του υπεδάφους, δια μελέτης δείγματος τριών δορυφορικών εικόνων της περιοχής, ληφθήσες τυχαία εκ χρονικού διαστήματος αναφοράς εννέα ετών, αρχίζοντας από το έτος 2010 έως και το έτος 2019.

Πιο συγκεκριμένα, αφού αποτυπώθηκαν τα τελικά όρια των κατολισθήσεων σε περιβάλλον Google Earth Pro, ακολούθησε διεξοδική οπτική εξέταση των δύο επιλεγμένων ιστορικών εικόνων της περιοχής, για τα έτη 2010 και 2016, και η σύγκριση τους με την σημερινή εικόνα της περιοχής (τελευταία αποτύπωση για το έτος 2019).

Η δεύτερη διεργασία που έλαβε χώρο έχει στόχο τον εντοπισμό των μετακινήσεων κατά μήκος της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης αλλά και την ποσοτικοποίησή τους, κατόπιν εκτέλεσης της μεθόδου ανίχνευσης των μορφολογικών αλλαγών (Change Detection). Η μέθοδος πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης των πέντε διαθέσιμων ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEMs) ήτοι τεσσάρων ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2018 – 2020 (UAV) και του μοντέλου 2007 (ALS).

Η ικανότητα της μεθοδικής ανίχνευσης των μορφολογικών αλλαγών σε ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEMs) άνοιξε νέους, πρόσθετους δρόμους για τον εντοπισμό, την πρόβλεψη και τον ποσοτικό προσδιορισμό των κατολισθήσεων (James et al., 2012). Κάθε ένα DEM ορίζεται ως η ψηφιακή εικόνα αναπαράστασης μιας συνεχούς επιφάνειας γης (Miller & Laflamme, 1958). Οι εικόνες DEM αποτελούνται από εικονοστοιχεία (pixel) τα οποία αντιπροσωπεύουν την τιμή υψομέτρου της αναφερόμενης έκτασης, ανάλογη με τον χώρο στον οποίο αντιστοιχούν στην εικόνα.

Η ποσοτικοποίηση των υψομετρικών διαφοροποιήσεων μεταξύ δύο εξεταζόμενων μοντέλων, και η αποτύπωση τους σε ένα νέο ψηφιακό μοντέλο επονομαζόμενο DEM of Difference (DoD) αποτελούμενο από pixel με τιμές οι οποίες αντιστοιχούν στη διαφορά των τιμών των εισαχθέντων μοντέλων, επιτυγχάνεται εύκολα και αυτοματοποιημένα, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος εφαρμόζει υπολογιστικές πράξεις ανάμεσα στα μοντέλα.



Προκειμένου να στεφθεί με επιτυχία αυτό το εγχείρημα προϋποτίθεται να αναφέρονται και τα δύο αρχικά μοντέλα στο ίδιο προβολικό σύστημα και να μοιράζονται τις ίδιες συντεταγμένες, συνεπώς να βρίσκονται, καθώς λέγεται σε αντιστοιχία.

Η ψηφιακή αναπαράσταση της μορφολογικής αλλαγής του εδάφους, που ορίζεται ως μοντέλο DoD, θα προκύψει εν τέλη κατά την σύγκριση των δυο ψηφιακών μοντέλων DEM, με τον υπολογισμό της διαφοράς κάθε ζεύγους αντίστοιχων pixel ξεχωριστά. Η διαδικασία αυτή εκφράζεται μαθηματικά με τον τύπο του Williams (2012) ως ακολούθως:

$$\delta E = Z_2 - Z_1$$

Όπου:

δE : η διαφορά υψομετρικών αλλαγών ανάμεσα στα εξεταζόμενα DEMs αναφοράς, που εκφράζεται σε ένα νέο DEM.

Z_1 : το προγενέστερο χρονικά DEM αναφοράς από τα δεδομένα δύο.

Z_2 : το μεταγενέστερο χρονικά DEM αναφοράς από τα δεδομένα δύο.

Καθώς οι εικονιζόμενες υψομετρικές αλλαγές της επιφανείας του εδάφους αντικατοπτρίζουν τις χωρικές και χρονικές διαδικασίες των κατολισθήσεων (James et al., 2012), η κατασκευή χαρτών απεικόνισης του DoD αποτελεί ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο στη χαρτογράφηση κατολισθήσεων.

Βέβαια, ενώ σε ευρύτερο πλαίσιο, η γενική τεχνική παραγωγής ενός DoD είναι σχετικά απλή, για την διάκριση της πραγματικής γεωμορφολογικής αλλαγής στα αποτελέσματα του παραχθέντος DoD, προϋποτίθεται να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς των μεταβολών οι αβεβαιότητες και το ποσοστό σφάλματος των μετρήσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο όταν τα DEMs έχουν κατασκευαστεί από συγγωνεύσεις δεδομένων τα οποία αποκτήθηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές έρευνας και ανάλυσης, προκειμένου να διασφαλιστεί η εγκυρότητα του μοντέλου (Wheaton et al., 2010).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής διατριβής, κατασκευάζεται ένα DoD για δωδεκαετές χρονικό διάστημα αναφοράς, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, και με τη βοήθεια του εξειδικευμένου λογισμικού ArcMap, εφαρμόζοντας υπολογιστικές πράξεις μεταξύ των υψομετρικών δεδομένων των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM) του 2007 (ALS) και του 2019 (UAV), που ποσοτικοποιεί της εν λόγω μορφολογικές αλλαγές μεταξύ των μοντέλων.

Παρότι το μοντέλο του Νοεμβρίου του 2020 αφορά μεταγενέστερη χρονικά αποτύπωση της περιοχής, για την ανάλυση επιλέχθηκε το μοντέλο του Νοεμβρίου 2019, λόγω της μεγαλύτερης χωρικής κατανομής του αλλά και της ύπαρξης μικρότερου θορύβου στα δεδομένα από την φυτοκάλυψη της περιοχής. Βέβαια για την απόφαση της επιλογής αυτής εκτελέστηκε προκαταρκτική σύγκριση των ψηφιακών μοντέλων Νοεμβρίου 2019 και 2020, και πάλι με την μέθοδο Change Detection, τα αποτελέσματα της οποίας έδειξαν μηδαμινές διαφορές, ανάμεσα στα δύο μοντέλα.

Προκειμένου να μειωθούν τα ποσοστά αβεβαιότητας και σφάλματος των επεξεργαζόμενων δεδομένων εκτελείται μια σειρά εργασιών, μέσω εφαρμογής συγκεκριμένων εντολών στο λογισμικό ArcMap, προκειμένου τα εξεταζόμενα μοντέλα να μοιράζονται την ίδια βάση δεδομένων.

Κατά την αρχική σύγκριση των υψομετρικών δεδομένων των δύο μοντέλων παρατηρείται μια σταθερή απόκλιση της τάξης των 60 m στα δεδομένα του μοντέλου του 2019, σε σχέση με αυτά του μοντέλου του 2007, σε όλη την απεικονιζόμενη έκταση του. Αυτή η απόκλιση οφείλεται στην λανθασμένη κατακόρυφη γεωαναφορά των δεδομένων κατά την αποτύπωση της περιοχής μέσω του μη επανδρωμένου αεροχήματος UAV. Η απόκλιση αυτή διορθώνεται με εφαρμογή της εντολής "**Raster Calculator**", του λογισμικού ArcMap, η οποία αφαιρεί, από κάθε τιμή pixel του DEM (2019 UAV), την σταθερή αυτή τιμή των 60 m.

Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας την εντολή "**Project Raster**", τα δύο εξεταζόμενα μοντέλα γεωαναφέρονται σε κοινό σύστημα συντεταγμένων (Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87) μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την πιθανότητα σφάλματος από μια πιθανή λανθασμένη μετατροπή.

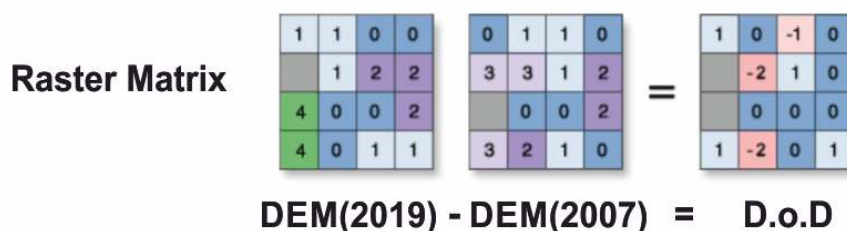
Έπειτα, προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να περικοπεί το ψηφιακό μοντέλο του 2007 (ALS), ώστε η έκταση του να περιορισθεί μόνο στην περιοχή του μοντέλου του Νοεμβρίου 2019. Η περικοπή αυτή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της εντολής "**Clip**" του λογισμικού ArcMap.

Τέλος, επειδή τα δύο εξεταζόμενα μοντέλα δεν μοιράζονται την ίδια ανάλυση, γεγονός που τα καθιστά μη συγκρίσιμα, πραγματοποιείται μετατροπή της χωρικής ανάλυσης των μοντέλων, σε κοινή ανάλυση της τάξης 5 x 5 [m/ pixel] με εφαρμογή της εντολής "**Resample**" του λογισμικού ArcMap.

Με την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω εργασιών για την απομείωση του βαθμού σφάλματος στα αποτελέσματα των μεταβολών που θα προκύψουν, κατασκευάζεται διά της εντολής "**Minus**" (ή ενναλλακτικά μέσω της εντολής "**Raster Calculator**", αφαιρώντας τα δύο εξεταζόμενα μοντέλα) του λογισμικού ArcMap, το μοντέλο DEM of Difference της περιοχής.

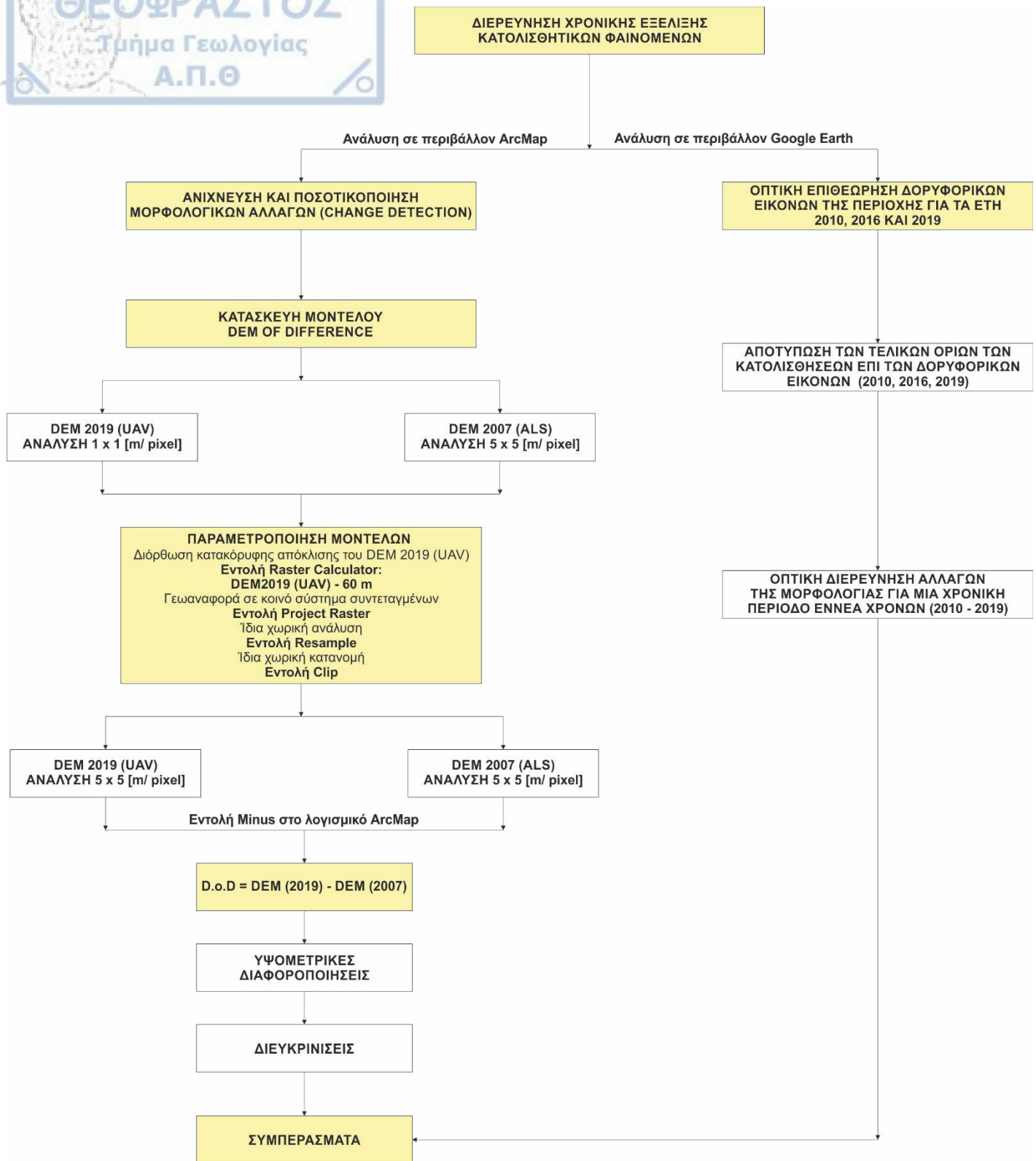
Με την εφαρμογή της εντολής αφαιρούνται οι τιμές pixel του μοντέλου αναφοράς του 2007 (ALS) από το μεταγενέστερο μοντέλο της περιοχής του Νοεμβρίου του 2019 (UAV), συνιστώντας με αυτό τον τρόπο ένα νέο μοντέλο, που απεικονίζει τις μορφολογικές μεταβολές του εδάφους, για χρονικό διάστημα ανάλυσης, δώδεκα έτη, δηλαδή από το 2007 έως το 2019.

Minus = DEM(2019) - DEM(2007)



Εικόνα 6.17 Ενδεικτική αναπαράσταση της διαδικασίας κατασκευής του μοντέλου DoD, διά της εφαρμογής της εντολής Minus, σε περιβάλλον ArcMap, μέσω της αφαίρεσης των τιμών pixel του DEM του 2007 (ALS) από τις τιμές pixel του DEM του 2019 (UAV), κατά την διαδικασία σύγκρισης του κάθε pixel ξεχωριστά (Οι πίνακες της εικόνας από την επίσημη ιστοσελίδα των κατασκευαστών του προγράμματος ArcMap, στην διεύθυνση: <https://desktop.arcgis.com/>).

Το διάγραμμα ροής εργασιών, τα αποτελέσματα και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της εν λόγω εφαρμογής παρατίθενται αναλυτικά στη συνέχεια.



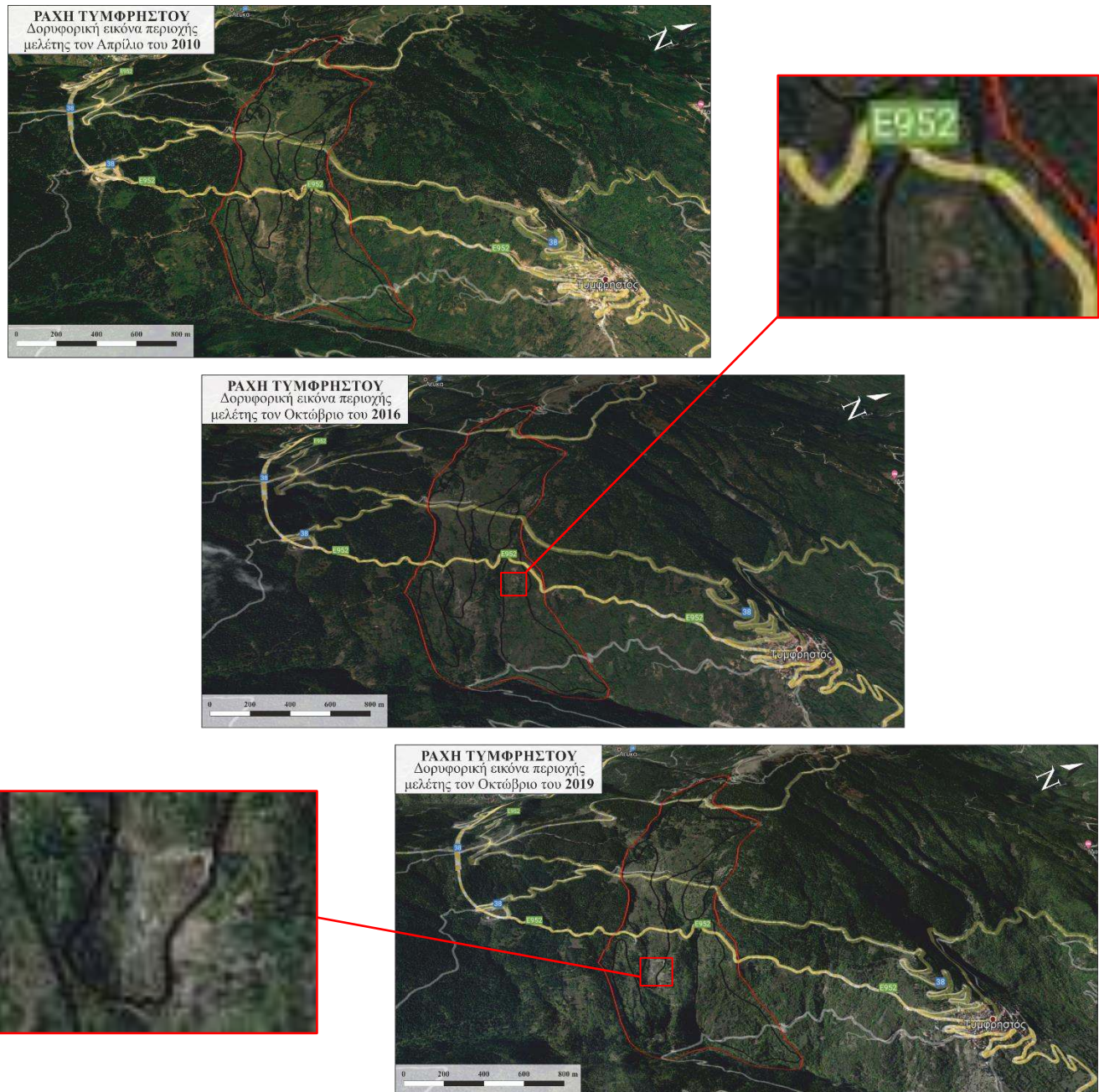
Εικόνα 6.18 Ροή εργασιών για την διερεύνηση της εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής μελέτης.

"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

6.3.2. Αποτελέσματα

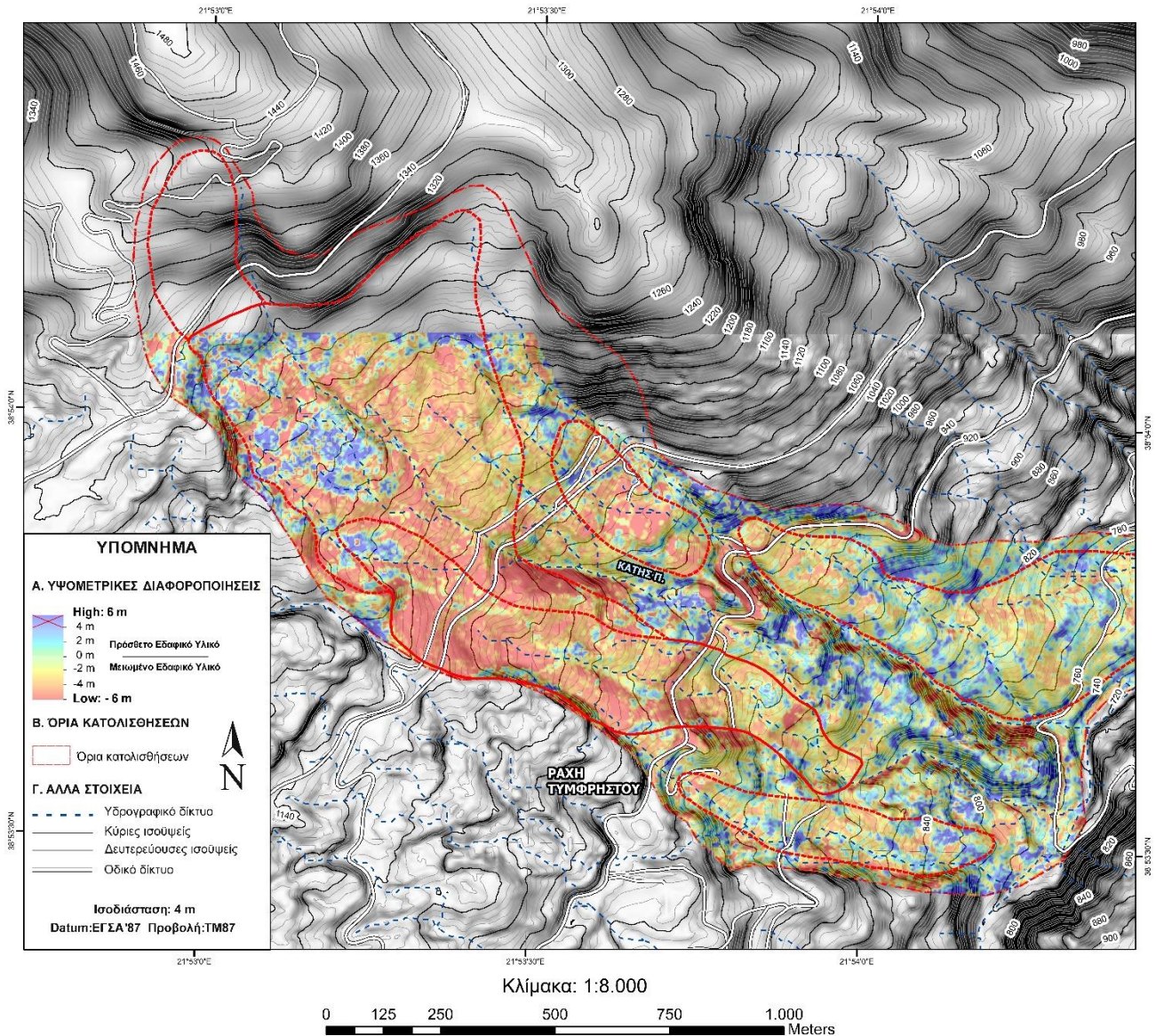
Τμήμα Γεωλογίας

Τα αποτελέσματα της οπτικής διερεύνησης και σύγκρισης της μορφολογίας του εδάφους, από δορυφορικές εικόνες της περιοχής, για αποτυπώσεις της, τα έτη 2010, 2016 και 2019 δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθώς με εξαίρεση δύο μικρών, τοπικών εμφανίσεων μεταβολής του αναγλύφου (Βλ. εντός κόκκινου πλαισίου στην **Εικόνα 6.19**), στην περιοχή του πόδα της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης, μια για το έτος 2016 και μια για το έτος 2019, δεν εντοπίστηκαν άλλες χαρακτηριστικές αλλαγές της τοπογραφίας που να συνδέονται με κατολισθήσεις. Γι' αυτό το λόγο η προσέγγιση της χρονικής εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, για αυτή την περίοδο (2010 – 2019), υπό αυτή την κλίμακα, δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή.



Εικόνα 6.19 Δορυφορικές εικόνες της υπό μελέτη περιοχής για τα έτη 2010, 2016 και 2019 πάνω στις οποίες αναζητήθηκαν μεταβολές της μορφολογίας του εδάφους με στόχο την διερεύνηση της χρονικής εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, για χρονική ανάλυση εννέα ετών (2010 – 2019). Με κόκκινο αποτυπώνονται τα όρια της ευρύτερης κατολίσθησης και οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν αλλαγές του αναγλύφου, ενώ με μαύρο τα όρια των επιμέρους κατολισθήσεων που την αποτελούν.

Αντίθετα τα αποτελέσματα της ποσοτικής ανίχνευσης των μορφολογικών αλλαγών της περιοχής, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, για διάστημα δώδεκα χρόνων, μέσω της σύγκρισης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους του 2019 (UAV) και 2007 (ALS), σε επίπεδο ριxel, και της ακόλουθης κατασκευής του DoD της περιοχής, είναι σαφώς ακριβέστερα και φαίνεται να ανταποκρίνονται σύμφωνα και με τις εκτιμήσεις στο πεδίο περισσότερο στην πραγματική εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων, αποτυπώνοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια τις θέσεις και την ένταση των υψομετρικών μεταβολών της επιφανείας του εδάφους της περιοχής.



Εικόνα 6.20 Χάρτης DEM of DIFFERENCE (DoD) της περιοχής μελέτης, που απεικονίζει τις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2007 (ALS) και 2019 (UAV), για χρονική ανάλυση δώδεκα χρόνων. Επί του χάρτη με κόκκινο αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολίσησης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την αποτελούν (Παρατίθεται ευκρινέστερα στο **Παράρτημα Νο 21**).

Αναλύοντας την χρωματική σύνθεση του παραπάνω χάρτη, με κόκκινο έως ανοιχτό πράσινο χρώμα αποτυπώνονται περιοχές που παρουσιάζουν μείωση στα υψόμετρα τους, για την εν λόγω χρονική ανάλυση της περιοχής.

Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από μια μείωση της επιφανείας του εδάφους, της τάξης από 0 έως -6 m, και συνδέονται με την ενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων και βραχοκαταπτώσεων στα πιο σταθερά τμήματα της περιοχής, υποδεικνύοντας κατά ένα βαθμό, ανάλογα με την χρωματική τους διαίρεση (πχ. κόκκινο, πορτοκαλί κίτρινο, κ.α.), την ένταση και ενεργότητα αυτών των φαινομένων.

Αντίθετα περιοχές που παρουσιάζουν αύξηση στα υψόμετρα τους, για την εν λόγω χρονική ανάλυση της περιοχής, αποτυπώνονται με μπλε έως ανοιχτό πράσινο χρώμα. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από αύξηση του εδαφικού υλικού, της τάξης από 0 έως 6 m, και πιθανώς αποτελούν περιοχές συσσώρευσης κατολισθητικών υλικών και κορημάτων. Παρόλα αυτά, το εκτιμώμενο πρόσθετο εδαφικό υλικό, της τάξης 4 – 6 m της ανάλυσης, δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς εντοπίζεται σε περιοχές που φαίνεται να επηρεάζονται από την βλάστηση του DEM του 2019 (UAV).

Σε γενικές γραμμές το πρόσθετο εδαφικό υλικό που προέκυψε από την δράση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, κατά το διάστημα 2007 – 2019, και συσσωρεύεται στην περιοχή, φαίνεται να έχει απομακρυνθεί ως ένα βαθμό από την δράση των τοπικών ρεμάτων και για αυτό τον λόγο, βάσει και των επιτόπου παρατηρήσεων κατά την έρευνα στο πεδίο, το πραγματικό πρόσθετο εδαφικό υλικό εκτιμάται μικρότερο των 4 m.

6.3.3. Συμπεράσματα

Η παραπάνω εφαρμογή της μεθόδου Change Detection, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, διά εκτέλεσης υπολογιστικών πράξεων, μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού ArcMap ανάμεσα στα δεδομένα των DEM 2007 (ALS) και DEM 2019 (UAV), είχε ως στόχο την κατασκευή μοντέλου DoD της περιοχής Ράχης Τυμφρηστού, η μελέτη του οποίου κατέδειξε την χρονική εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής. Εκ του αποτελέσματος της επετράπη η ποσοτική αξιολόγηση των μεταβολών της μορφολογίας του εδάφους, και η επαλήθευση σε συνδυασμό με τις επιτόπου παρατηρήσεις και επιστημονικές στο πεδίο των προγενέστερων προσεγγιστικών εκτιμήσεων της χρονικής εξέλιξης και ενεργότητας των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.

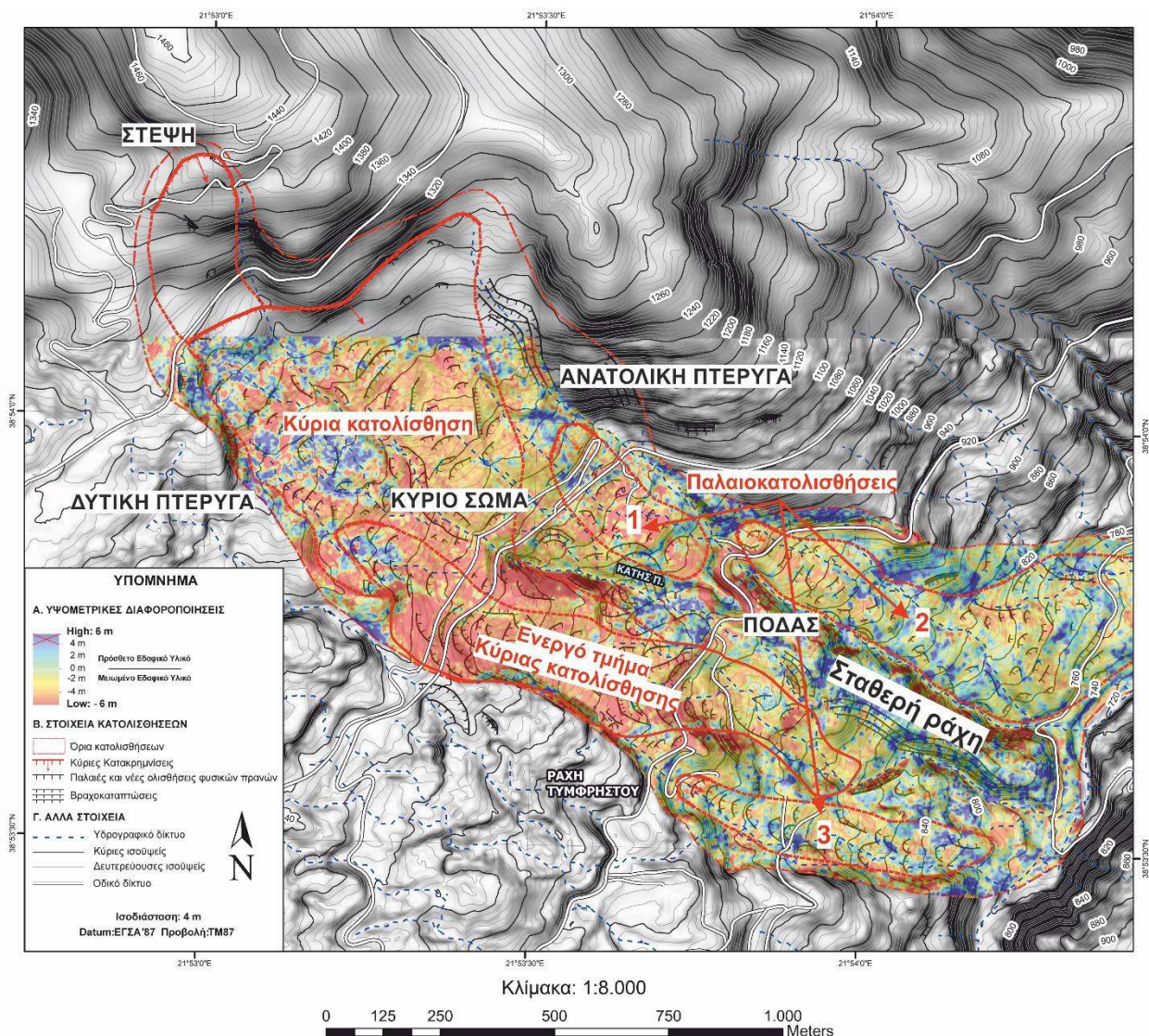
Πιο συγκεκριμένα, από την ανάλυση του χάρτη DoD, επαληθεύονται οι ενδείξεις ενεργότητας του κατώτερου τμήματος της κύριας κατολίσθησης, το οποίο ορθώς απομονώθηκε και οριοθετήθηκε ως μια ξεχωριστή κατολίσθηση.

Παράλληλα, παρατηρώντας τον χάρτη DoD (Βλ.Εικόνα 6.21), εντοπίζονται εντός των παλαιοκατολισθήσεων ενδείξεις ενεργότητας και μεταβολής της τοπογραφίας, που έρχονται σε αντίθεση με την πρότερη ανάλυση των περιοχών αυτών, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως πιθανές παλαιές ολισθήσεις, χωρίς όμως ενδείξεις πρόσφατης ενεργότητας. Οι ενδείξεις αυτές πιθανώς δεν ταυτίζονται με κατολισθητικά φαινόμενα αλλά οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι οι περιοχές αυτές αποτελούν καλλιεργήσιμες εκτάσεις που αναδιαμορφώθηκαν, με την πάροδο του χρόνου, και μετά από ανθρώπινη επέμβαση.

Όσον αφορά τα πιο σταθερά τμήματα του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, δηλαδή τις περιοχές στα όρια της σύνθετης κατολίσθησης, αλλά και τις σταθερότερες ράχες εντός των ορίων της, όπου εμφανίζεται το ψαμμιτικό τμήμα του φλυσχικού υποβάθρου, διά της μεθόδου Change Detection, επαληθεύτηκαν τα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων που παρατηρήθηκαν κατά την επιτόπου αυτοψία στο πεδίο.

Τέλος, εξετάζοντας στο σύνολο της, την ευρύτερη διερευνούμενη κατολίσθηση, επί του χάρτη DoD, παρατηρείται πως το δυτικό τμήμα της εμφανίζεται ενεργότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματά της. Παράλληλα εντοπίζονται εύκολα οι ζώνες απομείωσης και συσσώρευσης υλικών επιφανείας εδάφους, επαληθεύοντας σε αποδεκτό βαθμό τον διαχωρισμό της ευρύτερης κατολίσθησης στα επιμέρους χαρακτηριστικά τμήματα, της πρότερης γεωμορφολογικής ανάλυσης (Βλ. Κεφάλαιο 5 «5.3. Γεωμορφολογική ανάλυση επιφανείας»).

Αντιδιασταλτικά, τα αποτελέσματα της οπτικής διερεύνησης και σύγκρισης της μορφολογίας του εδάφους, από δορυφορικές εικόνες της περιοχής, δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθώς δεν εντοπίστηκαν ιδιαίτερα εμφανείς ενδείξεις ενεργότητας για τον χαρακτηρισμό της εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση αυτή είναι μια γρήγορη και πολύτιμη τεχνική για τον εντοπισμό νέων κατολισθήσεων, και για τον λόγο αυτό δεν παραλείπεται από το ερευνητικό - μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσας διατριβής.



Εικόνα 6.21 Χάρτης DEM of DIFFERENCE (DoD) της περιοχής μελέτης, που απεικονίζει τις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2007 (ALS) και 2019 (UAV), για χρονική ανάλυση δώδεκα χρόνων, όπου επαληθεύονται εκτιμήσεις πρότερων αναλύσεων σχετικά με την εξέλιξη των κατολισθήσεων. Επί του χάρτη με κόκκινο αποτυπώνονται τα τελικά όρια της σύνθετης κατολίσθησης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την συνθέτουν (1,2,3 μεμονωμένες παλαιοκατολισθήσεις), καθώς και τα χαρακτηριστικά επιμέρους τμήματά της.

6.4. Μηχανισμοί αστοχίας κατολισθήσεων περιοχής Ράχης Τυμφρηστού

Με βάση τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω αναλύσεων που εκτελέστηκαν για την διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής Ράχης Τυμφρηστού, καθώς και την επαλήθευση των αρχικών εκτιμήσεων και παρατηρήσεων που επιτελέστηκαν στο πεδίο, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η σημερινή γεωμετρία της ευρύτερης πλαγιάς, προέκυψε από αστοχίες του εδάφους, που συνέβησαν στο παρελθόν και συνεχίζουν να συμβαίνουν μέχρι και σήμερα. Ο ευρύτερος χώρος, της εν λόγω πλαγιάς, βρίσκεται υπό την συνεχή επίδραση δυναμικών παραγόντων αποσταθεροποίησης, όπως αναφορικά είναι οι διαδικασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης που δρουν στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με την έντονη τεκτονική καταπόνηση του φλυσχικού υποβάθρου της περιοχής, ο οποίος εντοπίζεται πτυχωμένος, έντονα κατακερματισμένος, και χαρακτηρίζεται επιφανειακά ως έντονα αποδιοργανωμένος με πολύ ανοιχτή δομή και με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, οδηγεί στην ενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων που μεταβάλλουν συνεχώς με το χρόνο την γεωμετρία της πλαγιάς.

6.4.1. Μηχανισμός αστοχίας ευρύτερης κατολίσθησης

Ο συνολικός χώρος της ευρύτερης κατολίσθησης, ταξινομείται σε προηγούμενα κεφάλαια ως μια σύνθετη κατολίσθηση, αποτελούμενη από πολλές ενεργές ή μη κατολισθήσεις, από ζώνες ερπυσμού και ροές κορημάτων, όπου τα περισσότερα τμήματά της βρίσκονται είτε σε οριακή κατάσταση ισορροπίας είτε ενεργοποιούνται σταδιακά.

Ο κύριος μηχανισμός αστοχίας, του συνόλου της ευρύτερης κατολίσθησης, βάσει της γεωμετρίας της πλαγιάς, των ενδείξεων της αρχικής κλίσης της, αλλά και από την εναπόθεση των υλικών κατολίσθησης στα κατώτερα τμήματά της, εκτιμάται ο μηχανισμός της προοδευτικής περιστροφικής ολίσθησης (Progressive Rotational Slide).

Πιο αναλυτικά, εκδηλώσεις περιστροφικής ολίσθησης εντοπίζονται εντός του φλυσχικού σχηματισμού του υποβάθρου της περιοχής. Η διαφορετική σύσταση και η έντονη τεκτονική καταπόνηση του φλυσχικού υποβάθρου συνθέτουν μια ασθενή βραχόμαζα, η οποία ακόμα και στα βαθύτερα τμήματά της δεν εξασφαλίζει ιδιαίτερα καλές συνθήκες ισορροπίας, ενώ επιφανειακά εμφανίζεται με ένα ιδιαίτερα απρόβλεπτο παχύ μανδύα πλήρως αποδιοργανωμένου και αποσαθρωμένου φλύσχη (Φλύσχη τύπου XI) που φαίνεται να είναι υπεύθυνος για την δημιουργία των κατολισθητικών υλικών της περιοχής.

Λόγω της πολύ έντονα ανοιχτής δομής (ζώνες διάτμησης, ρωγμές κ.α.) του σχηματισμού αυτού στην επιφάνεια, είναι δυνατή η διείσδυση επιφανειακών υδάτων μέσα στη μάζα του. Η έντονη εισροή επιφανειακών υδάτων εντός του σχηματισμού, και εξαιτίας του ιδιαίτερου υδρολιθολογικού καθεστώτος του, που χαρακτηρίζεται ως πρακτικά αδιαπέρατος σχηματισμός, προκαλεί την αύξηση των πιέσεων πόρων του, που μειώνουν περαιτέρω τις ήδη πτωχές μηχανικές του ιδιότητες, και προκαλούν την εκδήλωση περιστροφικών αστοχιών.

Ο παραπάνω μηχανισμός αστοχίας, που περιγράφεται για την ευρύτερη κατολίσθηση της περιοχής, εκτιμάται πως δεν γίνεται μονομιάς, αλλά συμβαίνει με έναν προοδευτικό ρυθμό ενεργοποίησης ξεκινώντας από την εκδήλωση επιφανειακών περιστροφικών ολισθήσεων του εδάφους, όπου όταν ένα επιφανειακό τμήμα της αστοχήσει, προκαλεί την χαλάρωση της υποκείμενης βραχόμαζας, επιτρέπει την εισροή νερού σε αυτή την πιο ανοιχτή δομή της βραχόμαζας, αυξάνοντας τις πιέσεις πόρων της και προκαλώντας την εκδήλωση περιστροφικών ολισθήσεων στα βαθύτερα αυτά τμήματά της.

Επαναλαμβανόμενη, με την πάροδο του χρόνου, η παραπάνω διαδικασία οδήγησε σε διάδοση του μηχανισμού περιστροφικής ολίσθησης και στα βαθύτερα τμήματα της πλαγιάς, φτάνοντας πιθανώς μέχρι και την δυσμενέστερη αλλά όχι απίθανη βαθύτερη επιφάνεια ολίσθησης, δηλαδή της ερπυστικής ολίσθησης της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου (Φλύσχης τύπου VII) πάνω στο πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο (Φλύσχης τύπου VIII), η οποία προωθείται από τα ανάντη προς τα κατόντη, χαρακτηρίζοντας πλέον το ευρύτερο κατολισθητικό φαινόμενο ως μια κατολίσθηση βαθιάς ολίσθησης (Deep-seated landslide).

6.4.2. Εξέλιξη φαινομένου

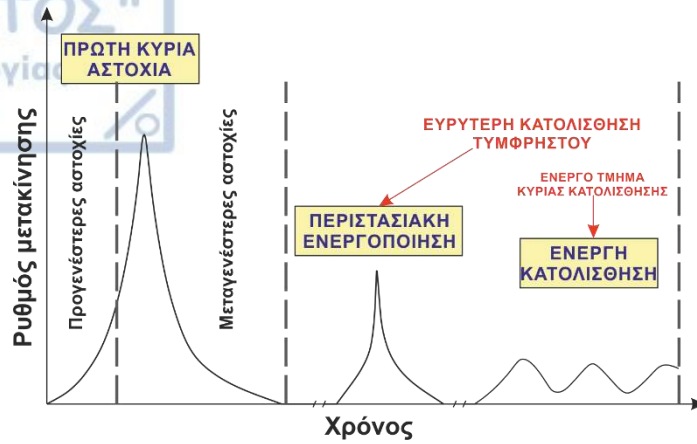
Όσον αφορά την εξέλιξη του φαινομένου της εν λόγω κατολίσθησης, πιθανώς αυτό ξεκίνησε, κάποια στιγμή στο παρελθόν από μια επιφανειακή ολίσθηση, στο τμήμα της δεύτερης κύριας επιφάνειας κατακρήμνισης της κύριας κατολίσθησης, ανάντη του παλαιού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου και σε υψόμετρο της τάξης 1280 m, όπου μικρές ποσότητες των προϊόντων της κατολίσθησης, ολίσθησαν ή ακόμη και κύλισαν με την μορφή ροής κατά μήκος της πλαγιάς. Το φαινόμενο αυτό, επαναλήφθηκε στην πάροδο του χρόνου, και διαδόθηκε με προοδευτικό βαθμό τόσο επιφανειακά όσο και βαθύτερα σε όλη την έκταση της περιοχής.

Επιπλέον, εξαιτίας της απώλειας στήριξης του εδάφους και της συνακόλουθης υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε ζώνες αδυναμίας των άνωθεν τμημάτων της πλαγιάς, από την εκδήλωση διαδοχικών ολισθήσεων, το φαινόμενο μεταφέρθηκε και προς τα ανάντη, με μηχανισμό οπισθοδρομικού τύπου (Retrogressive) που διαδόθηκε διαδοχικά από τα κατώτερα προς τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης.

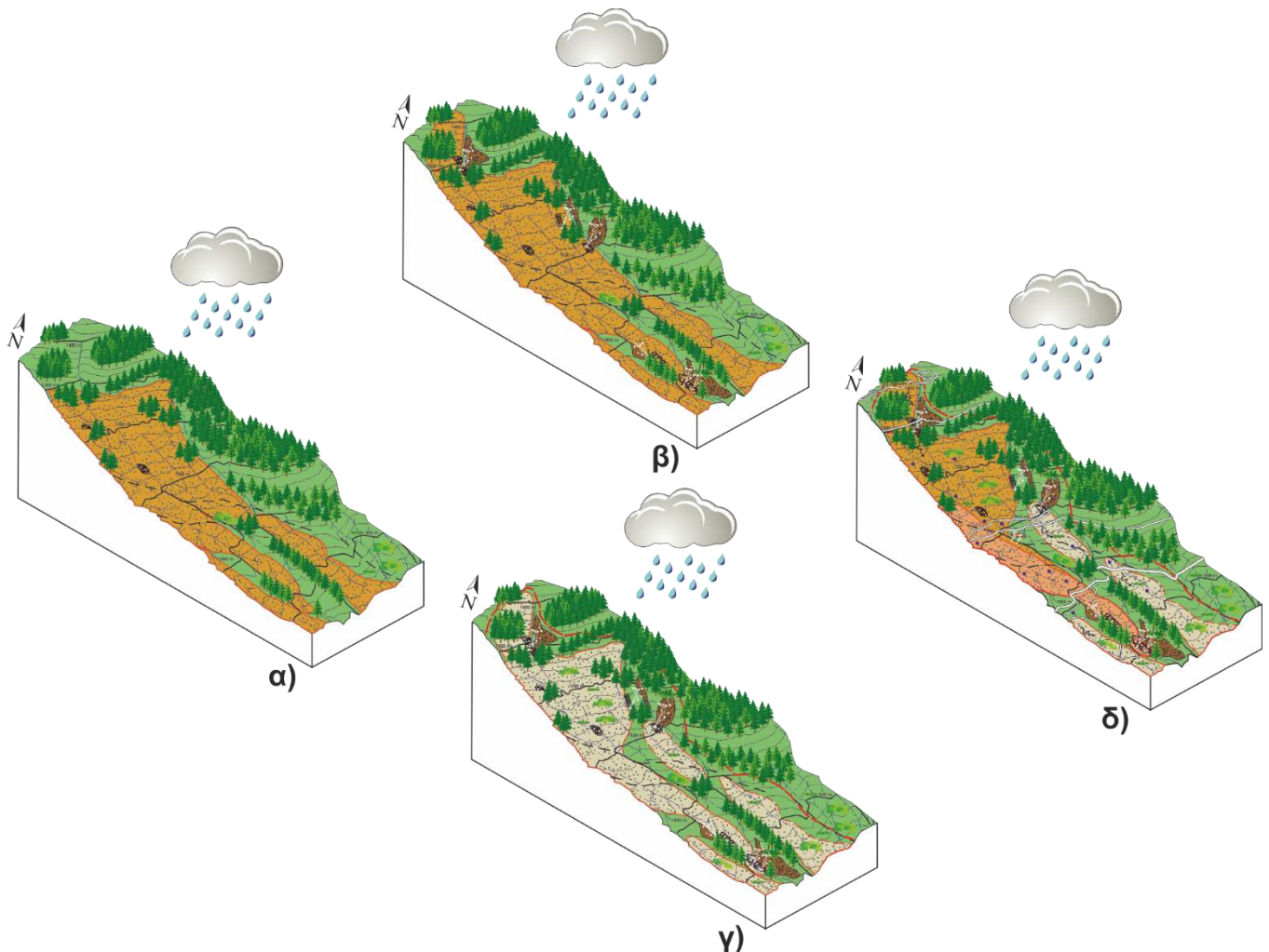
Σήμερα, τα υλικά της κατολίσθησης, σε κάποια τμήματά της, φαίνεται να έχουν ισορροπήσει μέχρι ενός βαθμού, ή τουλάχιστον εντοπίζονται σε οριακή κατάσταση ισορροπίας. Παρόλα αυτά, πολλά τμήματα της, κυρίως εντός της επιμέρους κύριας κατολίσθησης, είτε έρπουν με έναν πολύ αργό ρυθμό (στο ανατολικό τμήμα) είτε ολισθαίνουν έως και ρέουν με γρηγορότερο ρυθμό (στο δυτικό τμήμα) προς τα κατόντη. Σε κατά τόπους τμήματα της κατολίσθησης, η ενεργοποίηση των υλικών της δεν είναι άμεσα προφανής, καθώς η αστοχία του εδάφους δεν συμβαίνει σε τακτική βάση. Χαρακτηριστικά, τα υλικά στο ανατολικό κυρίως τμήμα της ευρύτερης κατολίσθησης φαίνεται να έχουν διαβρωθεί και απομακρυνθεί ως ένα βαθμό, από την δράση των τοπικών ρεμάτων της περιοχής, και εμφανίζονται στην επιφάνεια του εδάφους, ως μεμονωμένα τμήματα της παλαιάς κατολίσθησης, χωρίς όμως ενδείξεις πρόσφατης ενεργότητας.

Συμπερασματικά, την ευρύτερη σύνθετη κατολίσθηση Τυμφρηστού αποτελεί μια εκτεταμένη παλαιοκατολίσθηση, η οποία σύμφωνα με το διάγραμμα των Leroueil, et al., (1996), βρίσκεται στο στάδιο περιστασιακής ενεργοποίησης της, που ενεργοποιείται τόσο από μια πιθανή εκδήλωση αργής βαθιάς ολίσθησης της βάσης της, σε όλη την έκταση της, όσο και από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης, προοδευτικού τύπου στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου, στα κατώτερα τμήματα της.

Παράλληλα, μικρότερες τοπικές αστοχίες εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, όπως επιφανειακές ολισθήσεις, ροές εδαφών και κορημάτων, και προϊόντα από βραχοκαταπτώσεις, συμβάλλουν στην περαιτέρω ενεργοποίηση του φαινομένου, αναδιαμορφώνοντας την γεωμετρία της πλαγιάς και φορτίζοντας με πρόσθετο υλικό την κατολίσθηση. Τέλος, οι απότομες μεταβολές στη στάθμη του υπογείου ορίζοντα, κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, μπορεί να προκαλέσουν την εκδήλωση μετακινήσεων, εντός των επιφανειακών υλικών κατολίσθησης αλλά και βαθύτερα επί του αποδιοργανωμένου φλύσχη, λόγω καθίζησης, εξαιτίας της πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού.



Εικόνα 6.22 Διάγραμμα σταδίων κατολίσθησεων, ανάλογο με τον ρυθμό της κίνησης και τον χρόνο εξέλιξης του φαινομένου (Leroueil, et al., 1996 – με τροποποιήσεις του γράφοντος).



Εικόνα 6.23 Ενδεικτικό προσομοίωμα της πιθανής εξέλιξης της ευρύτερης κατολίσθησης Τυμφρηστού. **α)** Πρώτη εκδήλωση επιφανειακής περιστροφικής ολίσθησης. **β)** Σταδιακή διάδοση του φαινομένου τόσο επιφανειακά όσο και βαθύτερα σε όλη την έκταση της περιοχής, καθώς και στα ανώτερα τμήματα της πλαγιάς, από την εκδήλωση διαδοχικών επιφανειακών και βαθύτερων ολισθήσεων, τόσο προοδευτικού όσο και οπισθοδρομικού χαρακτήρα. **γ)** Σταδιακή ανάκτηση της ισορροπίας του συστήματος της κατολίσθησης. Οι εκδηλώσεις των αστοχιών περιορίζονται τοπικά σε περιορισμένης έντασης μικρότερες τοπικές ολισθήσεις, ροές εδαφών και κορημάτων, καθώς και σε βραχοκαταπτώσεις στα πιο σταθερά τμήματα της. **δ)** Σημερινή κατάσταση της κατολίσθησης. Ενεργοποίηση της επιμέρους κύριας κατολίσθησης, εξαιτίας πιθανών αργών βαθιών ολισθήσεων στην βάση της, όσο και από διαδοχικές επιφανειακές ολισθήσεις προοδευτικού στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου στα κατώτερα τμήματα της.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΕ ΣΤΑΔΙΑ:

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΜΑΝΔΥΑΣ

ΚΟΡΗΜΑΤΑ

Κορήματα ψαμμίτικης κυρίως σύστασης προσαρτημένα με μικρό ποσοστό αργιλολύου. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 2 m και 4 m.

ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΑΤΑ

Καστανόχρωμη ΑΡΓΙΛΟΣ με χαλικιώδη γενιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμίτικης κυρίως σύστασης. Το πάχος των υλικών αυτών διαφέρει από θέση σε θέση, ενώ η δομή τους είναι σχετικά χαλαρή. Τα υλικά αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσάθρωση των βαθύτερων υλικών κατολίσθησης.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Μελανόχρωμη χαλικιώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμανώμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γενιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμίτικης αλλά και ιλυολιθικής σύστασης. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο ορίζοντα του ψευδοκλίμακας υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI) και καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής.

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΟΣ ΦΥΛΣΧΗΣ

Εντονα τεκτονισμένη ακλήρη και συνεκτική αργιλική μάζα, μαζί με τεμάχια βραχώδους αργιλικού σχιστολίθου και ψαμμιτών, που αποτελούν ουσιαστικά τα υπολείμματα της αρχικής δομής του ψευδοκλίμακας υποβάθρου (τύπων VII και VIII). Η παρουσία και η συχνότητα αυτών των τεμαχίων είναι ανομοιομορφή και τυχαία. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό, και εκτιμάται μικρότερο στα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης. Πρόκειται για έναν ημιβραχώδη, γεωτεχνικά ασθενή σχηματισμό, όπου στην πιο υγιή μορφή του χαρακτηρίζεται ως Φλύσχης τύπου XI.

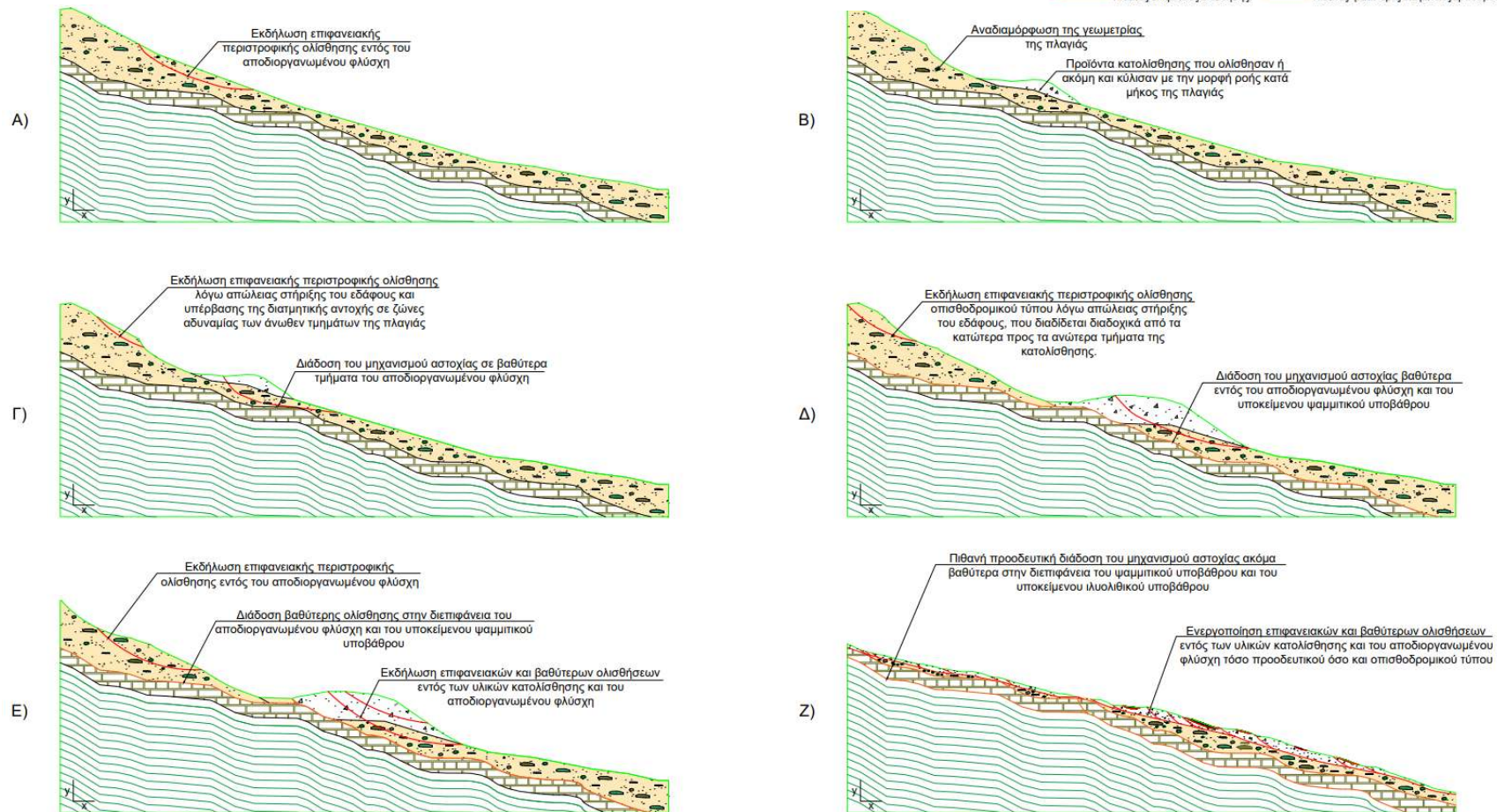
ΨΑΜΜΙΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Εντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη διαβραχώμαζα αποτελούμενη από λεπτόκοκκους έως μεσόκοκκους ψαμμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλυολιθών, που εμφανίζουν έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού (Φλύσχης τύπου VII).

ΙΛΥΟΛΙΘΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Εντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη βραχώμαζα αποτελούμενη από βραχώδεις ιλυολιθούς έντονα κερματισμένους έως κατακερματισμένους, με λεπτές παρεμβολές ψαμμικών ενστρώσεων (Φλύσχης τύπου VIII).

— Πιθανές επιφανείες ολισθήσης — Πιθανές βαθύτερες επιφανείες ερυσμού.



Εικόνα 6.24 Ενδεικτικό προσομοίωμα εξέλιξης του μηχανισμού αστοχίας της σύνθετης κατολίσθησης Τυμφρηστού.

6.4.3. Επιμέρους μηχανισμοί αστοχίας

Τόσο κατά την επιτόπου αυτοψία στο πεδίο, όσο και κατά την διερεύνηση της σύνθετης κατολίσθησης βάσει μεταγενέστερων αναλύσεων της, εκτιμήθηκαν παράλληλα εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου της, οι παρακάτω επιμέρους μηχανισμοί αστοχίας:

- 1) Ερπυσμοί:** οι μηχανισμοί αυτοί εντοπίζονται κυρίως σε συγκεντρώσεις υλικών κατολίσθησης (επιφανειακά και βαθύτερα) και κορημάτων σε όλη την έκταση της κατολίσθησης, καθώς και σε αποσαθρώματα της επιφανειακής αποσαθρωμένης ζώνης του ψαμμιτο-ιλυολιθικού φλύσχη του υποβάθρου. Τα υλικά αυτά όταν διαποτιστούν και κορεσθούν με νερό, έρπουν με έναν αργό ρυθμό προς τα κατάντη, ακόμα και σε περιοχές με μικρές κλίσεις (15° - 20°) (Μαλδέρος et al., 1999a). Παράλληλα, στο πεδίο παρατηρήθηκαν, τοπικές ενδείξεις απόκλισης των κορμών δέντρων από την κατακόρυφο, που ενισχύουν τις εκτιμήσεις για πιθανές βαθύτερες ερπυστικές ολισθήσεις των σχηματισμών του υποβάθρου.
- 2) Περιτροφικές ολισθήσεις προοδευτικού και οπισθοδρομικού τύπου μικρότερης κλίμακας:** οι αστοχίες αυτές εντοπίζονται εντός της κύριας κατολίσθησης, ενώ με μεγαλύτερη συχνότητα και ένταση εμφανίζονται εντός του πιο ενεργού τμήματος της. Σε αυτές τις περιοχές τα υλικά κατολίσθησης (επιφανειακά και βαθύτερα) και πιθανώς τα βαθύτερα υλικά του υποβάθρου, ενεργοποιούνται από την δράση έντονων βροχοπτώσεων, τα νερά των οποίων εισέρχονται στα χαλαρά υλικά της κατολίσθησης (υδροπερατά) και στην πιο αποδιοργανωμένη και ανοιχτή δομή του υποβάθρου, δημιουργώντας επικρεμάμενους υδροφόρους ορίζοντες, που φορτίζουν τα υλικά τους και προκαλούν την εκδήλωση αστοχιών. Πολλές φορές η ενεργοποίηση αυτών των υλικών γίνεται από κατάντη προς ανάντη εξαιτίας της απώλειας στήριξης του εδάφους και της συνακόλουθης υπέρβασης της διατμητικής αντοχής του στις περιοχές αυτές, λόγω της διαβρωτικής δράσης του τοπικού ρέματος, που εκδηλώνονται με την μορφή διαδοχικών ολισθήσεων οπισθοδρομικού τύπου.
- 3) Βραχοκαταπτώσεις:** στα πιο σταθερά τμήματα της ευρύτερης κατολίσθησης, δηλαδή σε περιοχές ευρισκόμενες στα όρια της, αλλά και στις πιο σταθερές ράχες εντός των ορίων της, όπου εμφανίζεται το ψαμμιτικό φλυσχικό υπόβαθρο, παρατηρούνται φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων. Η βραχόμαζα στις περιοχές αυτές παρουσιάζει έντονη τεκτονική καταπόνηση και μια δομή ανοιχτού τύπου η οποία ελέγχεται από παρακατακόρυφα συστήματα ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες αυτές σταδιακά ανοίγουν και διευρύνονται από την επίδραση της ροής του νερού, κατά μήκος αυτών. Το φαινόμενο αυτό σε συνδυασμό με την αφαίρεση μάζας στην βάση της βραχόμαζας, λόγω διάβρωσης, από την δράση του τοπικού ρέματος, και την έντονη καταπόνηση της βραχόμαζας από την πιθανή ολίσθηση της βάσης της, οδηγούν στην σταδιακή αποκόλληση και ανατροπή των επικρεμάμενων όγκων και στην αποκάλυψη νέων φρέσκων επιφανειών, επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία στην πάροδο του χρόνου.
- 4) Ροές κορημάτων:** Τα κορήματα που δημιουργούνται ή προϋπάρχουν σε τοπικές περιοχές εντός της κατολίσθησης, από την παραπάνω περιγραφείσα αποτόνωση της βραχόμαζας, λόγω της σταδιακής αποδιοργάνωσής της και αστοχίας της δια του μηχανισμού βραχοκατάπτωσης, ανάλογα με την κλίση του φυσικού εδάφους και το βαθμό κορεσμού τους από νερά βροχοπτώσεων-χιονοπτώσεων, είναι επιρρεπή στην εκδήλωση εδαφικών ασταθειών από ολισθήσεις έως ερπυσμούς και ροές, ακόμα και λασποροές στα κατώτερα τμήματα του πόδα της ευρύτερης κατολίσθησης.


ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΞΕΩΝ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΣΕ ΣΤΑΔΙΑ:


ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΜΑΝΔΥΑΣ

ΚΟΡΗΜΑΤΑ


 Κορήματα ψαμμικής κυρίως σύστασης προσμειγμένα με μικρό ποσοστό αργιλολύας. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 2 m και 4 m.


ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

ΨΑΜΜΙΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

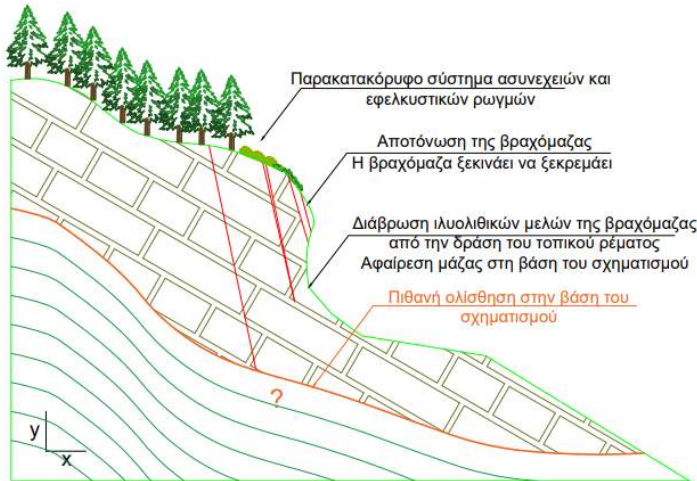
 Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη διαβραχόμαζα αποτελούμενη από λεπτόκοκκους έως μεσόκοκκους ψαμίτες, με συχνές παρεμβολές ιλυολίθων, που εμφανίζουν έναν μεταβαλλόμενο βαθμό κερματισμού (Φλύσσης τύπου VII).

ΙΛΥΟΛΙΘΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

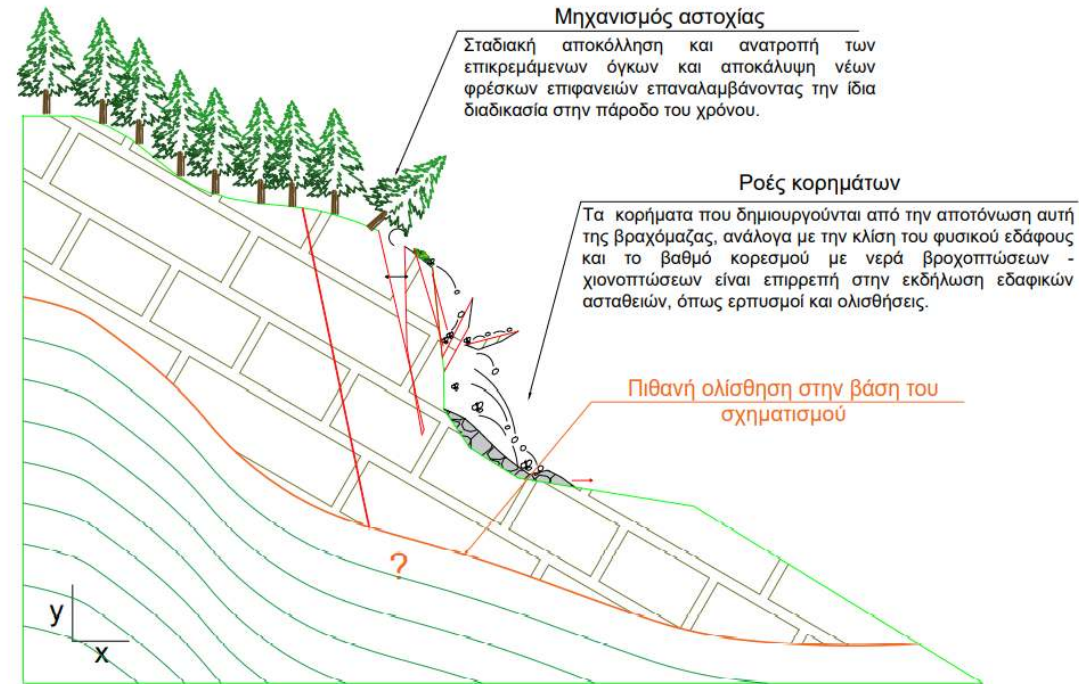
 Έντονα τεκτονισμένη, διαταραγμένη, και πτυχωμένη βραχόμαζα αποτελούμενη από βραχώδεις ιλυολίθους έντονα κερματισμένους έως κατακερματισμένους, με λεπτές παρεμβολές ψαμμικών ενστρώσεων (Φλύσσης τύπου VIII).

 Στάθμη νερού εντός των ασυρχειών και των ρωγμών.

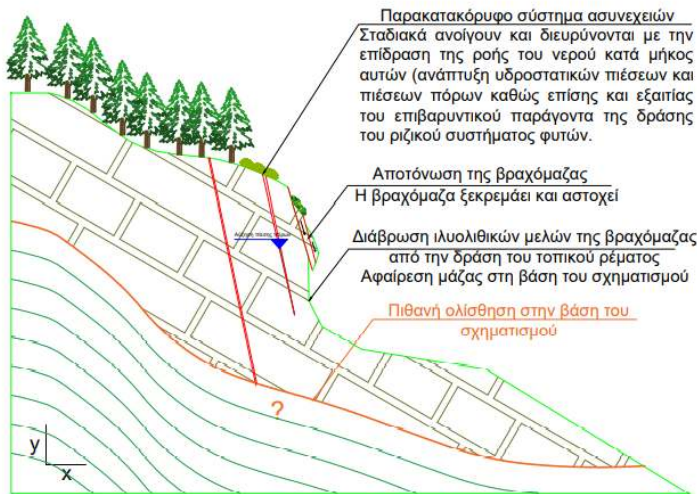
A)



Γ)



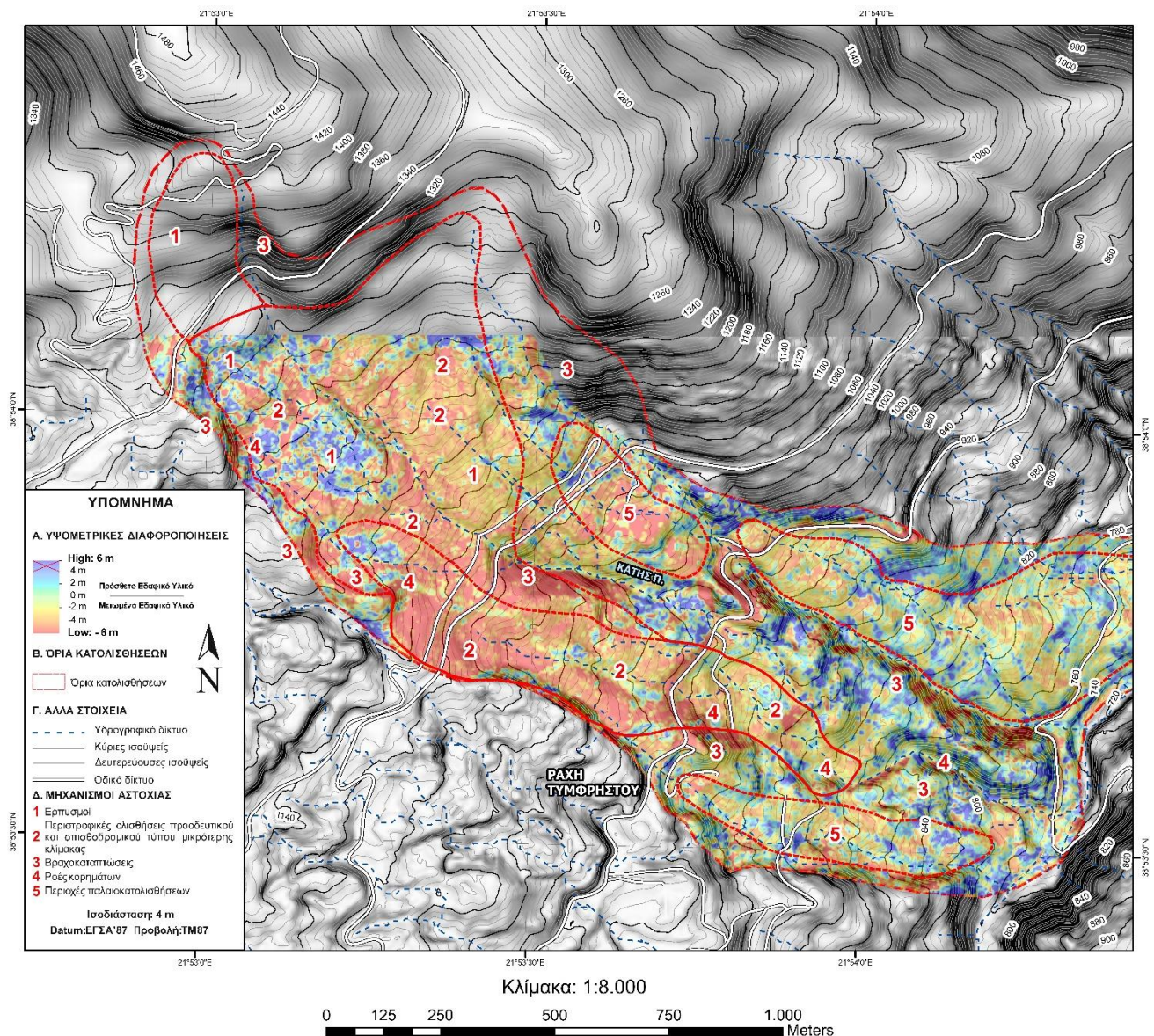
B)



Εικόνα 6.25 Ενδεικτικό προσομοίωμα μηχανισμού βραχοκαταπτώσεων περιοχής μελέτης.

5) **Περιοχές παλαιοκατολισθήσεων:** στις περιοχές αυτές, παρότι καταλαμβάνουν μια αξιόλογη έκταση, δεν παρατηρούνται σοβαρές ενδείξεις ενεργοποίησης και μετατόπισης των υλικών τους. Εξαιρέση αποτελούν περιορισμένες εμφανίσεις ολισθήσεων στα πλευρικά τους όρια καθώς και κάποιες τοπικές ενδείξεις μικρών εδαφικών ερπυσμών. Στο πεδίο εντός των παλαιοκατολισθήσεων παρατηρήθηκαν τοπικές διαδοχικές επιπεδώσεις του αναγλύφου. Οι εμφανίσεις αυτές πιθανώς δεν ταυτίζονται με τα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής, αλλά οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι οι περιοχές αυτές αποτελούν καλλιεργήσιμες εκτάσεις που αναδιαμορφώθηκαν, κατά την πάροδο του χρόνου, μετά από ανθρώπινη επέμβαση.

Οι θέσεις όλων των παραπάνω επιμέρους μηχανισμών αστοχίας, όπως αυτοί εκτιμήθηκαν στο πεδίο και από την μετέπειτα ανάλυση της ευρύτερης κατολίσησης, αποτυπώνονται στον παρακάτω χάρτη:



Εικόνα 6.26 Χάρτης DEM of DIFFERENCE (DoD) της περιοχής μελέτης, αναφερόμενος στις υψομετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους 2007 (ALS) και 2019 (UAV), για χρονική ανάλυση δώδεκα ετών, πάνω στον οποίο αποτυπώνονται, οι θέσεις των εκτιμημένων επιμέρους μηχανισμών αστοχίας της ευρύτερης σύνθετης κατολίσησης. Επί του χάρτη με κόκκινο αποτυπώνονται τα τελικά όρια της ευρύτερης κατολίσησης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την αποτελούν.

6.5. Ενδεικτικές διερευνητικές αναλύσεις ευστάθειας έναντι ολίσθησης

Στα πλαίσια ολοκλήρωσης των επιμέρους αναλύσεων για την διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής, εκτελέστηκαν τρεις ενδεικτικές διερευνητικές αναλύσεις ευστάθειας, έναντι ολίσθησης, με την μέθοδο οριακής ισορροπίας, τόσο σε στατικές συνθήκες (χωρίς σεισμό), όσο και σε δυναμικές συνθήκες σεισμού, έχοντας ως στόχο την προσομοίωση του μηχανισμού αστοχίας της ευρύτερης κατολίσθησης και την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας των κύκλων ολίσθησης που εκτιμήθηκαν για την κατολίσθηση, κατά την γεωτεχνική ανάλυση του υπεδάφους της περιοχής (Βλ. Κεφάλαιο 5 «5.6. Γεωλογική – Γεωτεχνική ανάλυση υπεδάφους»).

6.5.1. Μεθοδολογία

Η μέθοδος οριακής ισορροπίας ULS (Ultimate Limit State method) βασίζεται στην εξέταση της ισορροπίας των δυνάμεων εκείνων που τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση σε ένα πρανές (δυνάμεις βαρύτητας, πύση πόρων κ.λπ.), κατά μήκος μιας συγκεκριμένης επιφάνειας ολίσθησης (θραύσης) και των δυνάμεων εκείνων που ασκούνται κατά μήκος της επιφάνειας αυτής και αντιτίθενται στην ολίσθηση (πχ. διατμητική αντοχή) (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Η διερεύνηση της ευστάθειας έναντι ολίσθησης ενός πρανούς, με αυτή την μέθοδο, επιτελείται μέσω του υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας.

Ο συντελεστής ασφαλείας εκφράζει την πιθανότητα ενός πρανούς να αστοχήσει υπό μια συγκεκριμένη εντατική κατάσταση, και στην πιο απλοϊκή μορφή του, ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων (ή ροπών) που αντιστέκονται στην ολίσθηση προς τις δυνάμεις (ή ροπές) που τείνουν να την προκαλέσουν (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Σε συνθήκες οριακής ισορροπίας ο δείκτης αυτός είναι περίπου ίσος με την μονάδα ενώ για τιμές μικρότερες της μονάδας, αναμένεται διατμητική αστοχία του πρανούς.

$$F_s = \frac{P_{\text{ΠΑΘ}}}{P_{\text{ΕΝΕΡΓ}}}$$

Όπου:

F_s = Συντελεστής ασφαλείας

$P_{\text{ΠΑΘ}}$ = δυνάμεις που αντιστέκονται στην ολίσθηση

$P_{\text{ΕΝΕΡΓ}}$ = δυνάμεις που προκαλούν την ολίσθηση

Επιπλέον μια βασική παραδοχή της μεθόδου οριακής ισορροπίας, είναι να ικανοποιείται το κριτήριο θραύσης Mohr – Coulomb, κατά μήκος της ενδεχόμενης επιφάνειας ολίσθησης, που αποτελεί ουσιαστικά μια γραμμική σχέση της διατμητικής αντοχής, σε ένα επίπεδο ή σε μια επιφάνεια ολίσθησης, σε συνάρτηση με την κάθετο ενεργό τάση που δρα σε αυτή (Barnes, 2010), ήτοι:

$$\tau = c' + \sigma_n' \cdot \tan \phi'$$

Όπου:

τ = διατμητική αντοχή

c' = ενεργός συνοχή

σ_n' = ορθή ενεργός τάση κάθετη στην επιφάνεια θραύσης

ϕ' = ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής

Ανάλογα με τον ορισμό της αστοχίας που υιοθετείται και τις εφαρμοζόμενες συνθήκες στράγγισης η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται αναλόγως.

Συνεπώς, σε μια κατολίσθηση, η αστοχία εκδηλώνεται λόγω της διατμητικής αστοχίας του εδάφους σε μια επιφάνεια στο εσωτερικό της, λόγω εξίσωσης της διατμητικής αντοχής του εδαφικού αυτού σχηματισμού με τις επιβαλλόμενες φυσικές ή εξωγενείς διατμητικές τάσεις (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Έτσι λοιπόν εκτιμώντας τις δυνάμεις που δρουν πάνω σε μια εδαφική μάζα σε ένα εξεταζόμενο πρηνές, μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη διατμητική αντίσταση για να ισορροπήσει η μάζα αυτή. Στη συνέχεια συγκρίνοντας την διατμητική αυτή αντίσταση, με την εκτιμώμενη διατμητική αντοχή του εδάφους, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστή ασφαλείας του πρηνούς.

Στην παρούσα διπλωματική διατριβή, οι εργασίες και οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας των εκτιμημένων κύκλων ολίσθησης, της υπό μελέτη κατολίσθησης, επιτελέστηκαν, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού Slide 5.0 Rocscience Inc., και διά της εφαρμογής της απλοποιημένης μεθόδου λωρίδων (Simplified Method of Slices), του Bishop (1955).

Πιο αναλυτικά, εκτελέστηκαν δύο ενδεικτικές διερευνητικές αναλύσεις ευστάθειας, έναντι ολίσθησης, κατά ULS, μια για στατικές συνθήκες (χωρίς σεισμό), και μια για δυναμικές συνθήκες σεισμού, για τις τρεις ενδεικτικές διατομές A – A1, B – B1 και Γ – Γ1, που κατασκευάστηκαν προγενέστερα στο στάδιο διερεύνησης του υπεδάφους (Βλ. Κεφάλαιο 5 «5.6.2. Ενδεικτικές τομές»).

Επί του λογισμικού, για κάθε μια ανάλυση εισήχθησαν η γεωμετρία και η στρωματογραφία της εκάστοτε εξεταζόμενης διατομής, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους στρωμάτων που την αποτελούν, βάσει του ενδεικτικού γεωτεχνικού προσομοιώματος του υπεδάφους που κατασκευάστηκε για την περιοχή μελέτης (Βλ. Κεφάλαιο 5 «5.6.4. Γεωτεχνικό προσομοίωμα»).

Η επιρροή του εντατικού πεδίου της κατολίσθησης, από την δράση των υπογείων υδάτων, προσδιορίστηκε μέσω του συντελεστή πίεσης πόρων r_u , και όχι μέσω της σχεδίασης της επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς τα δεδομένα από μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα αναφέρονται σε ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα από το 1996 έως το 1999 και δεν ανταποκρίνονται στο σημερινό υφιστάμενο υδρολογικό καθεστώς.

Ο συντελεστής πίεσης πόρων r_u , που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει τις συνθήκες της ολικής ή τοπικής πίεσης πόρων σε ένα πρηνές, είναι ουσιαστικά ένα μέγεθος, συνάρτηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, που εκφράζει τον λόγο της πίεσης του νερού των πόρων προς την ολική τάση σε κάποιο σημείο του πρηνούς (Barnes, 2010), ήτοι:

$$r_u = \frac{u}{\gamma \cdot h}$$

Όπου:

r_u = συντελεστής πίεσης πόρων

γ = φαινόμενο βάρος

h = πάχος στρώματος

u = πίεση του νερού των πόρων

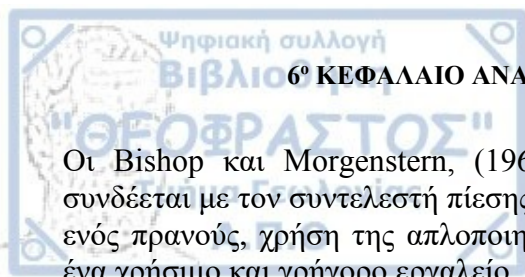
και:

$$u = \gamma_w \cdot Z_w$$

Όπου:

γ_w = φαινόμενο βάρος του νερού

Z_w = ύψος νερού



Οι Bishop και Morgenstern, (1960), εκτίμησαν πως ο συντελεστής ασφαλείας ενός πρανούς συνδέεται με τον συντελεστή πίεσης πόρων r_u , και η εφαρμογή του, για την εκτίμηση της ευστάθειας ενός πρανούς, χρήση της απλοποιημένης μεθόδου Bishop σε συνθήκες ενεργών τάσεων, αποτελεί ένα χρήσιμο και γρήγορο εργαλείο.

Βέβαια, η προσέγγιση αυτή, με την επιλογή μια ενιαίας τιμής r_u για κάθε στρώμα του εξεταζόμενου πρανούς, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα του συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει, και για αυτό τον λόγο η επιλογή των τιμών της, θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, οι τιμές του συντελεστή πίεσης πόρων r_u που ελήφθησαν για κάθε ένα στρώμα, αντιπροσωπεύουν τις δυσμενέστερες συνθήκες πίεσης τους από την δράση υπογείων υδάτων, και για αυτό τον λόγο τα αποτελέσματα των διερευνητικών αναλύσεων, μπορούν να χαρακτηριστούν ως συντηρητικά.

Αναλυτικά οι μηχανικές ιδιότητες και οι τιμές του συντελεστή πίεσης πόρων r_u που ελήφθησαν, για κάθε ένα στρώμα, για την εκτέλεση των αναλύσεων παρατίθενται στον **Πίνακα 6 – 17**.

Τέλος, για τον έλεγχο της κατολίσθησης σε συνθήκες σεισμού, ακολουθώντας τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό, (ΕΑΚ, 2004), που κατατάσσει την ευρύτερη περιοχή στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση $a = 0,24g$, εκτελέστηκαν για κάθε μια διατομή, διερευνητικές αναλύσεις ευστάθειας, έναντι ολίσθησης, κατά ULS, για δυναμικές συνθήκες σεισμού, επιβαρύνοντας το εντατικό πεδίο του εκάστοτε πρανούς με τις ακόλουθες πρόσθετες ενεργές επιταχύνσεις:

- 3) κατά την οριζόντια διεύθυνση: $a_h = 0,5 \cdot a = 0,12g$.
- 4) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση: $a_v = 0,25 \cdot a = 0,06g$.

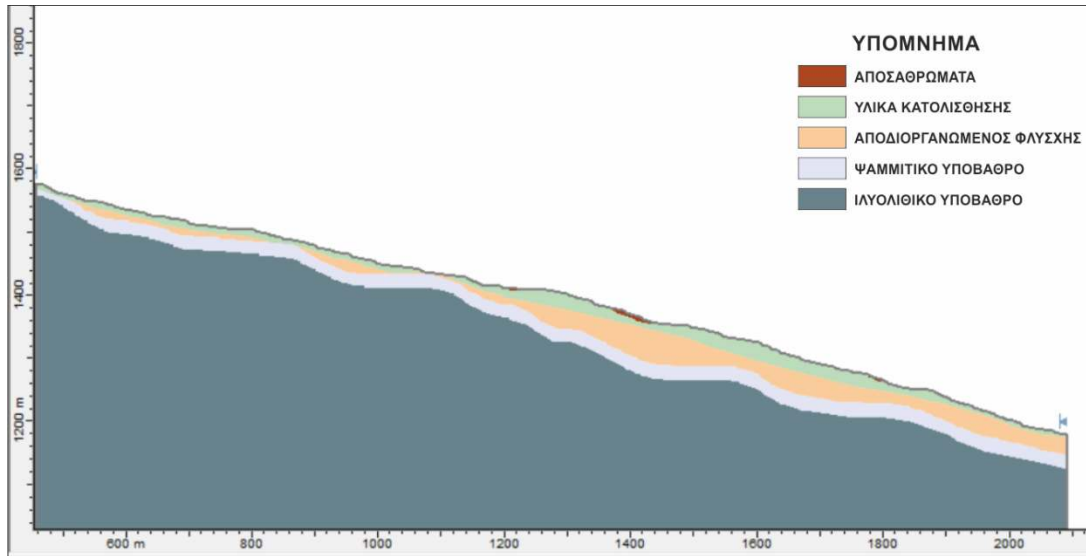
Πίνακας 6-17 Οι τιμές ενεργών αντοχών c' και ϕ' , και του συντελεστή πίεσης πόρων r_u , που δόθηκαν στους σχηματισμούς, για την εκτέλεση ενδεικτικών διερευνητικών αναλύσεων ευστάθειας, έναντι ολίσθησης.

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ γ (kN/m ³)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΣΥΝΟΧΗ c' (kN/m ²)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ϕ' (°)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ r_u
ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΑΤΑ	22	0	15	0,3
ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	22,5	0	18	0,3
ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ	23	20	23	0,2
ΨΑΜΜΙΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	25	3.020	27,5	0,12
ΙΛΥΟΛΙΘΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	24	1.500	26,9	0,1

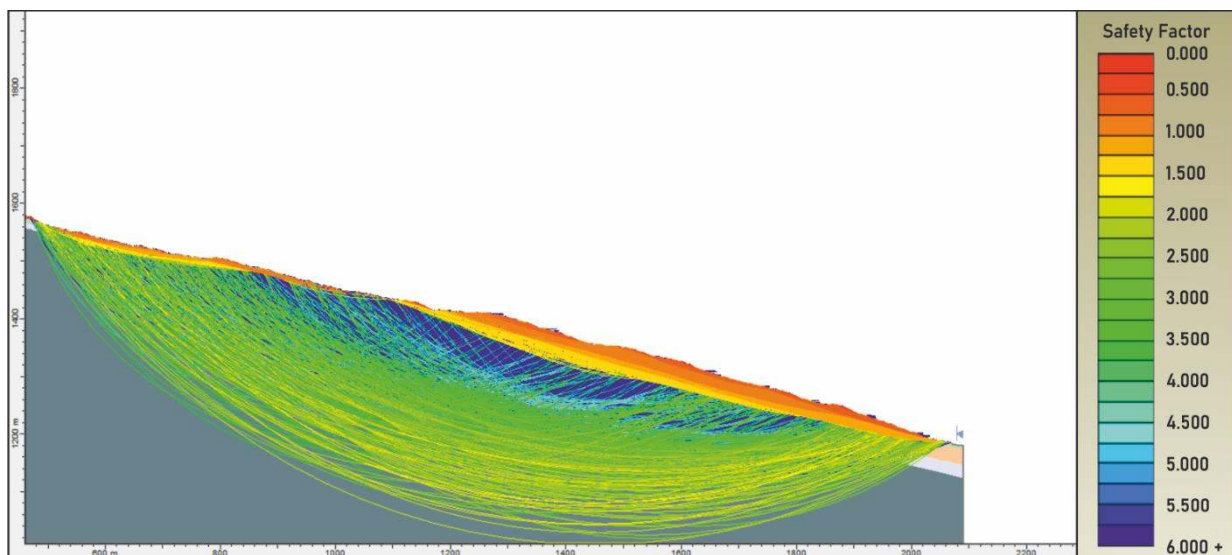
6.5.2. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των διερευνητικών ενδεικτικών αναλύσεων ευστάθειας της περιοχής, αναφερόμενα στις περιοχές των διατομών Α – Α1, κατά μήκος της κύριας κατολίσθησης, Β – Β1 και Γ – Γ1, κατά μήκος των επιμέρους μεμονωμένων παλαιοκατολισθήσεων, παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω:

1. Ενδεικτική ανάλυση ευστάθειας διατομής Α – Α1 κατά μήκος της κύριας κατολίσθησης



Εικόνα 6.27 Γεωλογικό προσομοίωμα υπολογιστικής διατομής Α – Α1.



Εικόνα 6.28 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για στατικές συνθήκες. Υπολογιστική διατομή Α – Α1.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, για την υπολογιστική διατομή A – A1, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) Οι επιφανειακοί κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή οι κύκλοι εντός των σχηματισμών των αποσαθρωμάτων και των πιο επιφανειακών υλικών κατολίσθησης, σε ένα βάθος περίπου από 1 m έως συντηρητικά περίπου 6 m, φαίνεται να έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από την μονάδα ($F_s < 1$) με τιμές από 0.7 έως 0.9 δίνοντας αστοχίες κατά μήκος αυτών των επιφανειών.
- 2) Οι βαθύτεροι κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή σε βάθη περίπου από 8m έως 15 m και τοπικά έως ~25 m (γεώτρηση B6), εντός των υλικών κατολίσθησης και λίγο βαθύτερα στα πρώτα μέτρα του αποδιοργανωμένου φλύσχη, παρουσιάζουν έναν συντελεστή ασφαλείας $F_s \geq 1$ με τιμές από ~1 έως 1.1. Για τους κύκλους αυτούς προκύπτουν συνθήκες οριακής ευστάθειας.
- 3) Για τα υλικά των κατολισθήσεων, γνωρίζοντας στην πραγματικότητα, τόσο από την γενικότερη ανάλυση της περιοχής, όσο και από παρατηρήσεις στο πεδίο, πως τα υλικά αυτά πράγματι βρίσκονται σε μια οριακή κατάσταση ισορροπίας, επιβεβαιώνεται, βάσει της ανωτέρω ανάλυσης και του συντελεστή ασφαλείας με τιμές κοντά στην μονάδα, οι μηχανικές ιδιότητες και η τιμή τ_u που επιλέχθηκαν για αυτά τα υλικά. Οι τιμές των παραμέτρων για τα ίδια υλικά θεωρούνται ικανοποιητικές, και δεν προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού τους με ανάδρομες αναλύσεις (Back Analysis), αλλά μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν με σχετική ακρίβεια και στις υπόλοιπες αναλύσεις.
- 4) Οι πιο βαθιοί κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή οι κύκλοι βαθύτερα εντός του αποδιοργανωμένου φλύσχη και στην διεπιφάνεια με το ψαμμιτικό υπόβαθρο, παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας $F_s \geq 1.5$ συνεπώς για αυτούς του κύκλους επικρατούν συνθήκες ευστάθειας.
- 5) Τέλος, οι δυσμενέστεροι πιθανοί κύκλοι ολίσθησης της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο ιλυολιθικό υπόβαθρο, παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας $F_s \geq 2$, συνεπώς και για αυτούς του κύκλους επικρατούν συνθήκες ευστάθειας.
- 6) Για τους πιο βαθείς πιθανούς κύκλους, των περιπτώσεων 4) και 5), τα αποτελέσματα της εν λόγω ανάλυσης, έρχονται σε αντίθεση με της προαναφερθείσες εκτιμήσεις για αυτούς του κύκλους.

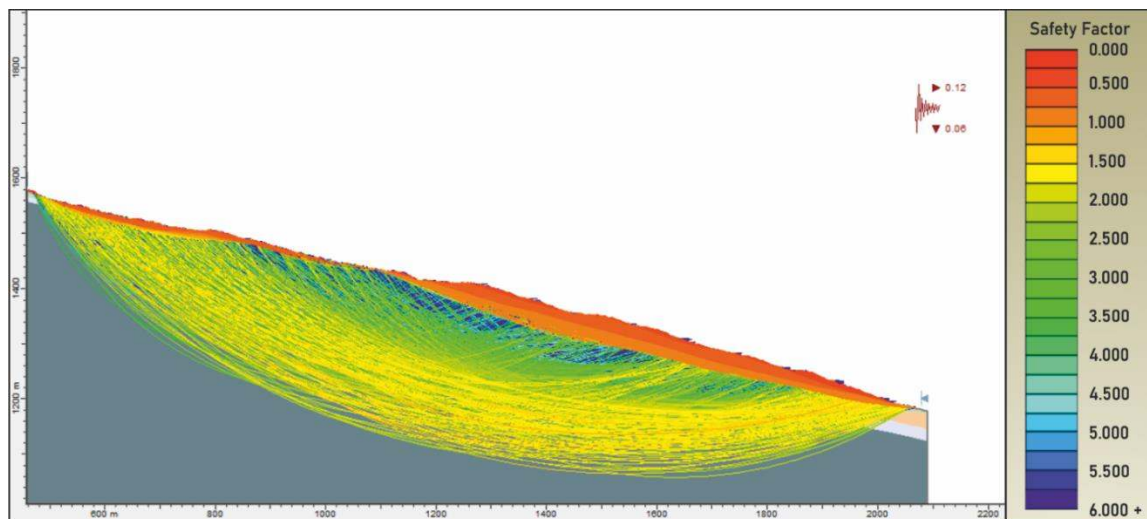
Για να διασταυρωθεί αν πράγματι στην ευρύτερη κατολίσθηση συμβαίνουν αυτές οι βαθύτερες ολισθήσεις, απαιτείται μια αναλυτικότερη διερεύνηση του βαθύτερου αυτού υποβάθρου, με την εκτέλεση ενός γεωερευνητικού προγράμματος, με γεωτρήσεις που να ξεπερνούν τα 50 m βάθος, και την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών, για την διερεύνηση των γεωτεχνικών ιδιοτήτων του εδάφους με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς όπως προαναφέρθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή οι γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών αυτών εκτιμήθηκαν με την επίλυση εμπειρικών κριτηρίων.

Παράλληλα, το γεγονός ότι οι σχηματισμοί του υποβάθρου είναι έντονα πτυχωμένοι με πολλές δυσαρμονικές μικροπτυχώσεις, καθιστούν την ακρίβεια του γεωλογικού μοντέλου της κατολίσθησης υπό αμφισβήτηση.

Τέλος, η προσέγγιση της ευστάθειας αυτών των σχηματισμών, με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας, που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, τη θεωρία της

ισορροπίας των δυνάμεων, ίσως δεν είναι η βέλτιστη για τον προσδιορισμό της ευστάθειας, και μια ανάλυση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method), ίσως είχε καλύτερα αποτελέσματα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά για την ανάλυση της παραμόρφωσης και της κατανομής των τάσεων σε ένα υλικό και δεν απαιτεί από πριν την θεώρηση του σημείου ή του σχήματος της πιθανής επιφάνειας ολίσθησης, αλλά ορίζει την αστοχία αυτόματα με φυσικό τρόπο εντός της μάζας, στα σημεία εκείνα που η διατμητική αντοχή τους είναι ανεπαρκής να αντισταθεί στις διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται σε αυτά (Griffiths & Lane, 1999).

Παρόλα αυτά, όλες οι αναλύσεις που εκτελέστηκαν για την εκτίμηση της ευστάθειας της κατολίσθησης έναντι ολίσθησης, με την μέθοδο ULS, έχουν ενδεικτικό χαρακτήρα και η προσέγγιση του προβλήματος με το παρόν σύνολο δεδομένων, είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική καθώς αποτυπώνει με ακρίβεια το μεγαλύτερο σύνολο των κατολισθητικών συνθηκών της περιοχής.



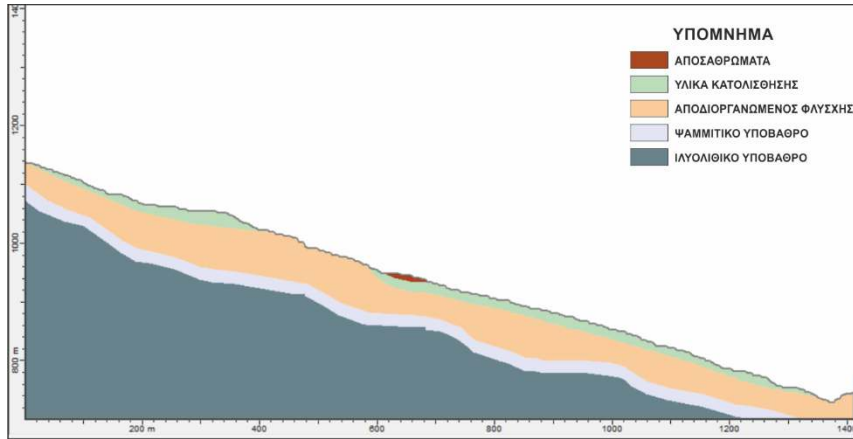
Εικόνα 6.29 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για δυναμικές συνθήκες σεισμού. Υπολογιστική διατομή A – A1.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, με πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση για την υπολογιστική διατομή A – A1, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

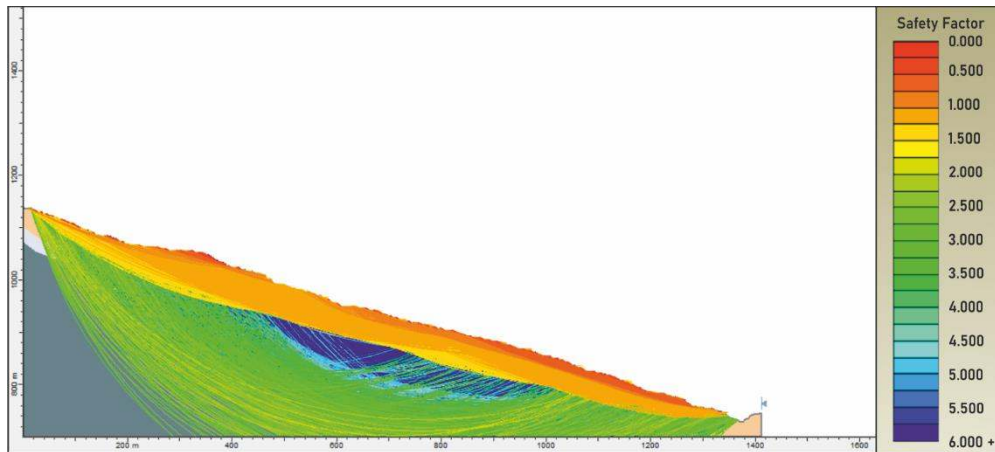
- 1) Οι επιφανειακοί κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή οι κύκλοι εντός των σχηματισμών των αποσαθρωμάτων και των πιο επιφανειακών υλικών κατολίσθησης, σε ένα βάθος περίπου από 1 m έως συντηρητικά περίπου 6 m, φαίνεται να έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από την μονάδα ($F_s < 1$) με τιμές από 0.0 έως 0.5 δίνοντας αστοχίες κατά μήκος αυτών των επιφανειών.
- 2) Οι βαθύτεροι κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή σε βάθος περίπου από 8m έως 15 m και τοπικά έως ~25 m (γεώτρηση B6), εντός των υλικών κατολίσθησης και λίγο βαθύτερα στα πρώτα μέτρα του αποδιοργανωμένου φλύσχη, παρουσιάζουν πλέον, συντελεστή ασφαλείας $F_s \leq 1$ με τιμές από ~0.5 έως 1 δίνοντας αστοχίες κατά μήκος και αυτών των επιφανειών.
- 3) Οι πιο βαθείς κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή οι κύκλοι βαθύτερα εντός του αποδιοργανωμένου φλύσχη και στην διεπιφάνεια του με το ψαμμιτικό υπόβαθρο, υπό καθεστώς σεισμού παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας $F_s \cong 1$ με τιμές από ~0.8 έως 1.2. Για τους κύκλους αυτούς προκύπτουν συνθήκες αστοχίας ή οριακής ευστάθειας.

4) Τέλος, για τους δυσμενέστερους πιθανούς κύκλους ολίσθησης, της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο ιλυολιθικό υπόβαθρο, συνεχίζουν να επικρατούν συνθήκες ευστάθειας, και σε καθεστώς σεισμικής φόρτισης, παρουσιάζοντας έναν συντελεστή ασφαλείας $F_s \geq 2$.

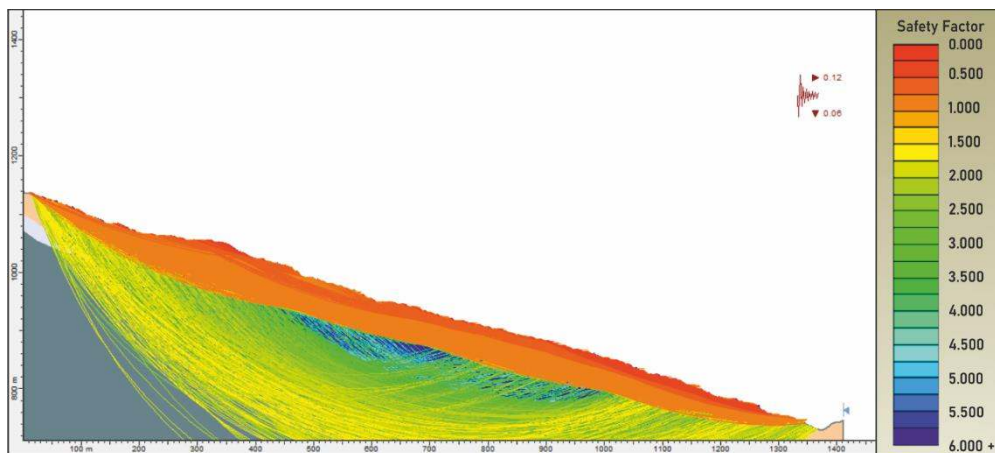
2. Ενδεικτικές αναλύσεις ευστάθειας διατομών Β – Β1 και Γ – Γ1 κατά μήκος των επιμέρους παλαιοκατολισθήσεων



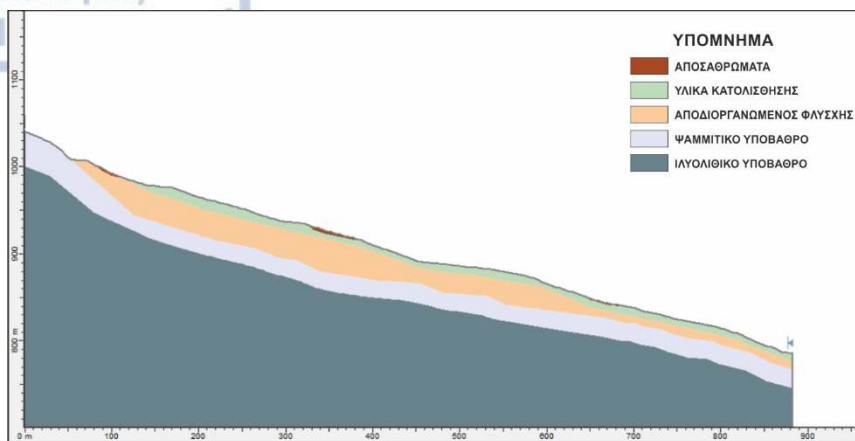
Εικόνα 6.30 Γεωλογικό προσομοίωμα υπολογιστικής διατομής Β – Β1.



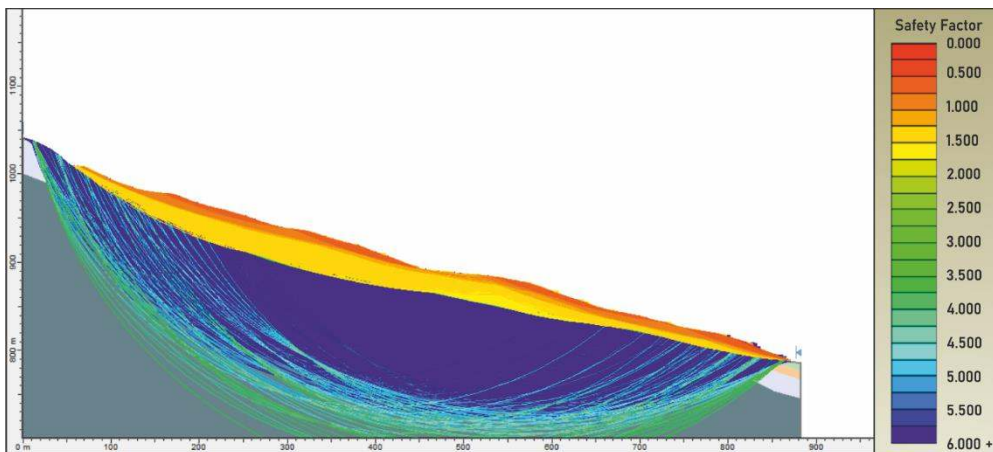
Εικόνα 6.31 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για στατικές συνθήκες. Υπολογιστική διατομή Β – Β1.



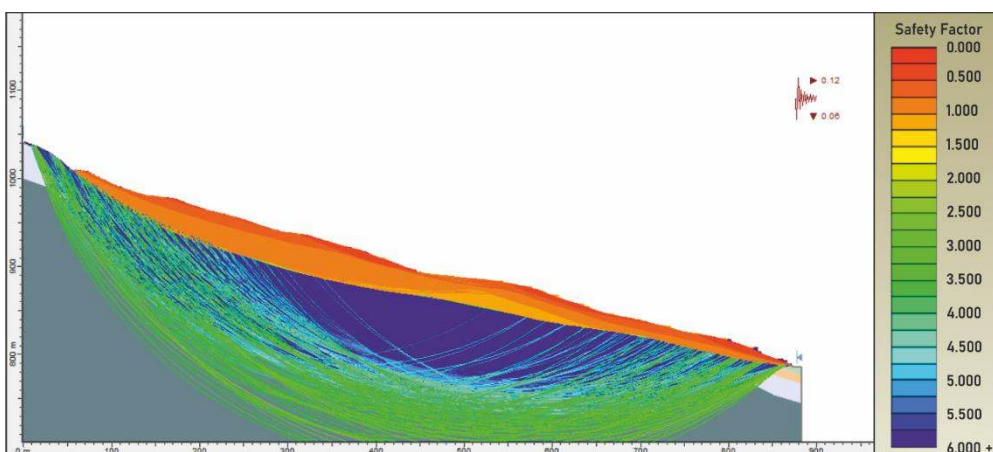
Εικόνα 6.32 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για δυναμικές συνθήκες σεισμού. Υπολογιστική διατομή Β – Β1.



Εικόνα 6.33 Γεωλογικό προσομοίωμα υπολογιστικής διατομής Γ – Γ1.



Εικόνα 6.34 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για στατικές συνθήκες. Υπολογιστική διατομή Γ – Γ1.



Εικόνα 6.35 Αποτελέσματα διερευνητικής ανάλυσης ευστάθειας, έναντι ολίσθησης για δυναμικές συνθήκες σεισμού. Υπολογιστική διατομή Γ – Γ1.

Ανάλογα αποτελέσματα με την διερευνητική ανάλυση ευστάθειας, έναντι ολίσθησης, τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές συνθήκες με πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση, για την υπολογιστική διατομή A – A1, προκύπτουν και για τις υπολογιστικές τομές B – B1 και Γ – Γ1.

Πιο αναλυτικά από τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) Οι επιφανειακοί κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή οι κύκλοι εντός των σχηματισμών των αποσαθρωμάτων και των πιο επιφανειακών υλικών κατολίσθησης, σε βάθος περίπου από 4 m έως συντηρητικά περίπου 8 m, φαίνεται να έχουν συντελεστή ασφαλείας ίσο με την μονάδα ($F_s = 1$) με τιμές από 1 έως 1.1. Για τους κύκλους αυτούς προκύπτουν συνθήκες οριακής ευστάθειας, με εξαίρεση κάποιους τοπικούς επιφανειακούς κύκλους, έως 1.5 m βάθους, που παρατηρούνται αστοχίες.
- 2) Οι βαθύτεροι κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή σε ένα βάθος περίπου από 8m έως 15 m, εντός των υλικών κατολίσθησης, παρουσιάζουν έναν συντελεστή ασφαλείας $F_s \geq 1$ με τιμές από 1.2 έως 1.5 συνεπώς για αυτούς του κύκλους επικρατούν συνθήκες ευστάθειας.
- 3) Οι πιο βαθείς κύκλοι ολίσθησης, δηλαδή οι κύκλοι βαθύτερα εντός του αποδιοργανωμένου φλύσχη και στην διεπιφάνεια του με το ψαμμιτικό υπόβαθρο, καθώς και των δυσμενέστερων ακόμα βαθύτερων πιθανών κύκλων ολίσθησης, της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο ιλυολιθικό υπόβαθρο, της παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας $F_s \geq 1.5$ συνεπώς και για αυτούς του κύκλους επικρατούν συνθήκες ευστάθειας.
- 4) Οι αναλύσεις με πρόσθετη σεισμική φόρτιση 0.12 ως προς το οριζόντιο και 0.06 ως προς το κατακόρυφο δείχνουν πως ο συντελεστής ασφαλείας F_s για όλες τις προηγούμενες αναλύσεις μικραίνει παρουσιάζοντας απομείωση της τάξης 30%.

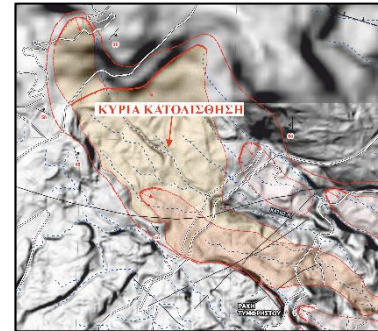
6.6. Αναλυτικά μητρώα κατολισθήσεων

Με την ολοκλήρωση όλων των προαναφερθέντων αναλύσεων, και έχοντας πλέον αναλυθεί με μεγάλη λεπτομέρεια, οι ιδιαίτερες κατολισθητικές συνθήκες της περιοχής, με μια πληθώρα εργασιών τόσο από την μεμονωμένη επεξεργασία των ψηφιακών μοντέλων εδάφους της περιοχής και την εκτέλεση εξειδικευμένων αναλύσεων, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, επί αυτών, όσο και από την λεπτομερή αξιολόγηση της περιοχής επιτόπου στο πεδίο, κατασκευάστηκαν τέσσερα αναλυτικά μητρώα κατολισθήσεων.

Τα μητρώα αυτά, αναφέρονται, τόσο στην ευρύτερη κατολίσθηση Τυμφρηστού, όσο και στις επιμέρους κατολισθήσεις που την αποτελούν, και αποτελούνται από προσωπικές παρατηρήσεις και επισημάνσεις του υποφαινόμενου, αναφορικά με την αναδιαμόρφωση του αναγλύφου της περιοχής, από φαινόμενα κατολισθήσεων, έτσι ώστε σε μελλοντικό χρόνο, διά των επισημάνσεων αυτών, να μπορούν να προβλεφθούν πιθανοί κίνδυνοι, τόσο από νέες εμφανίσεις μεμονωμένων κατολισθήσεων, όσο και από μια επικείμενη ενεργοποίηση ολόκληρης της κατολίσθησης Τυμφρηστού, και να κατασκευαστούν στοχευμένα έργα υποδομής για την αποτροπή των εκάστοτε καταστροφών.

Τα εν λόγω αναλυτικά μητρώα κατολισθήσεων παρατίθενται διεξοδικά παρακάτω:

A/A	ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ	
Γενικά στοιχεία	Τοποθεσία	Ράχη Τυμφρηστού (Ν. Φθιώτιδας)
	Χρήση Γης	Δασική έκταση
	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Παρουσία δύο οδικών δικτύων εντός της κατολίσθησης, ήτοι παλαιού και νέου οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου.

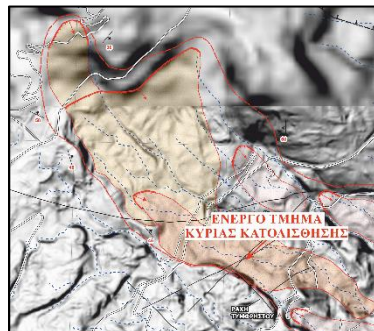


Γεωλογία	Γεωτεκτονική θέση	Ζώνη Ωλονού Πίνδου	Υδρογεωλογικό καθεστώς	Βροχοπτώσεις	Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής που ανέρχεται περίπου σε 1380 mm.
	Εδαφικοί σχηματισμοί	Επιφανειακά προϊόντα αποσάθρωσης, διάβρωσης και μεταφοράς και αποθέσεις που δημιουργήθηκαν κατά την πρόσφατη γεωλογική περίοδο του Τεταρτογενούς, μαζί με παλαιά και νέα υλικά κατολίσθησης.		Περατότητα	Ο φλύσχης της περιοχής στο σύνολο είναι πρακτικά αδιαπέρατος. Εξάιρεση αποτελεί η επιφανειακή αποδιοργανωμένη ζώνη του, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί από ημιπερατή έως και υδροπερατή. Αντίθετα, οι επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί του Τεταρτογενούς (ποτάμιες αποθέσεις, κορήματα και προϊόντα κατολίσθησεων) είναι γενικά υδροπερατές. Η κυκλοφορία του νερού μπορεί να συνεχίζεται και σε μεγαλύτερα βάθη εντός του υποβάθρου, κατά μήκος διαρρήξεων και σημαντικών διακλάσεων κυρίως του ψαμμιτικού υποβάθρου.
	Ημιβραχώδεις σχηματισμοί	Έντονα αποδιοργανωμένος, επιφανειακά ισχυρά αποσαθρωμένος φλύσχης (Φλύσχης τύπου VIII).		Δράση υπογείων υδάτων	Η παρουσία υπογείων υδάτων, εντός των υλικών της κατολίσθησης επιβαρύνει σημαντικά την ευστάθεια τους, φορτίζοντας τα μέσω της αύξησης των πιέσεων πόρων, με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής τους και την εκδήλωση αστοχιών.
	Σχηματισμοί υποβάθρου	Φλυσικό υπόβαθρο ηλικίας Άνω Κρητιδικού – Κάτω Τριτογενούς, διαχωριζόμενο σε δύο επιμέρους ανεξάρτητες φάσεις, το κυρίως ψαμμιτικό υπόβαθρο (Φλύσχης τύπου III έως VII) και το πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο (Φλύσχης τύπου VIII).		Πηγές	Σε τοπικά σημεία εντός του τμήματος αυτού αποτυπώθηκαν περιοχές πηγών. Τα σημεία αυτά, στα οποία εκφορτίζεται το νερό φανερόνουν ένα ακατάστατο καθεστώς περατότητας εντός των υλικών της. Όταν η κυκλοφορία του νερού διακόπτεται από πιο αδιαπέρατα στρώματα τότε δημιουργούνται σημεία εξόδου του νερού (πηγές) στην επιφάνεια του εδάφους οι οποίες με την σειρά τους φορτίζουν και τροφοδοτούν με νερό τα κατώτερα τμήματα της κατολίσθησης.

Υλικά κατολίσθησης	Προέλευση	Προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο ορίζοντα του φλύσχικου υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI)	Γεωτεχνικές παράμετροι	Αποσαθρώματα	$\gamma = 22 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 15^\circ, r_u = 0,3$
	Περιγραφή	Μελανόχρωμη χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής αλλά και ιλλολιθικής σύστασης.		Υλικά κατολίσθησης	$\gamma = 22,5 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 18^\circ, r_u = 0,3$
	Πάχος	Το πάχος των υλικών διαφέρει από θέση σε θέση και κυμαίνεται από 6 έως 15 m και τοπικά έως 20 m.		Αποδιοργανωμένος φλύσχης	$\gamma = 23 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 20 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 23^\circ, r_u = 0,2$
	Έκταση	Σε όλη την έκταση της οριοθετημένης κεντρικής κατολίσθησης (0,63 km ²).		Ψαμμιτικό υπόβαθρο	$\gamma = 25 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 3 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 27,5^\circ, r_u = 0,12$
	Εξάπλωση	Σε όλο το μήκος της κύριας κατολίσθησης (2.000 m).		Ιλλολιθικό υπόβαθρο	$\gamma = 24 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 1,5 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 26,9^\circ, r_u = 0,1$
Γεωμετρία κατολίσθησης	Μήκος	~ 2.000 m	Ενεργότητα	Μικρή ενεργότητα στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης, χαρακτηριζόμενη από μικρής έντασης ολισθήσεις και εδαφικούς ερπυσμούς, πλήρως ενεργό το κατώτερο τμήμα της, χαρακτηριζόμενο από έντονες εκδηλώσεις εδαφικών ασταθειών, όπως ολισθήσεις, εδαφικοί ερπυσμοί και ροές κορημάτων, ακόμα και λασποροές στα κατώτερα τμήματα του πόδα της.	
	Πλάτος	100 - 600 m		Μηχανισμός αστοχίας	Προοδευτική περιστροφική ολίσθηση (Progressive Rotational Slide) που μεταβαίνει με την πάροδο του χρόνου, από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης, προοδευτικού τύπου στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου, στα κατώτερα τμήματα, σε μια βαθύτερη αργή βαθιά ολίσθηση της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο πιο ιλλολιθικό υπόβαθρο, σε όλη την έκταση της κατολίσθησης.
	Υψομετρική διαφορά	560 m			
	Εμβαδόν	0,63 km ²			
	Μέση κλίση	~ 15° - 20°			
Βάθος	Με βεβαιότητα μέχρι τα 20 m, με μικρότερη πιθανότητα στην διεπιφάνεια του αποδιοργανωμένου φλύσχη με το ψαμμιτικό υπόβαθρο, και με ακόμα πιο μικρή πιθανότητα έως και την διεπιφάνεια του ψαμμιτικού υποβάθρου με το ιλλολιθικό υπόβαθρο.				
Επισημάνσεις:	Ο ευρύτερος χώρος, της κατολίσθησης, βρίσκεται υπό την συνεχή επίδραση δυναμικών παραγόντων αποσταθεροποίησης, τόσο από διαδικασίες όπως η διάβρωση και αποσάθρωση που δρουν στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και από την περιστασιακή ενεργοποίηση της κατολίσθησης, η οποία ενεργοποιείται τόσο από μια πιθανή εκδήλωση αργής βαθιάς ολίσθησης της βάσης της, σε όλη την έκταση της, όσο και από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις. Παράλληλα, μικρότερες τοπικές αστοχίες εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, όπως επιφανειακές ολισθήσεις μικρότερης κλίμακας, ροές εδαφών και κορημάτων, και προϊόντα από βραχοκαταπτώσεις, συμβάλλουν στην περαιτέρω ενεργοποίηση του φαινομένου, αναδιαμορφώνοντας την γεωμετρία της πλαγιάς και φορτίζοντας με πρόσθετο υλικό την κατολίσθηση. Τέλος οι απότομες μεταβολές στη στάθμη του υπογείου ορίζοντα, κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, μπορεί να προκαλούν την εκδήλωση μετακινήσεων, εντός των επιφανειακών υλικών κατολίσθησης αλλά και βαθύτερα επί του αποδιοργανωμένου φλύσχη, από καθίζηση λόγω της πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού.				

Πίνακας 6-18 Αναλυτικό μητρώο Κύριας κατολίσθησης.

A/A	ΕΝΕΡΓΟ ΤΜΗΜΑ ΚΥΡΙΑΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	
Γενικά στοιχεία	Τοποθεσία	Ράχη Τυμφρηστού (Ν. Φθιώτιδας)
	Χρήση Γης	Δασική έκταση
	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Παρουσία δύο οδικών δικτύων εντός της κατολίσθησης, ήτοι παλαιού και νέου οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου.

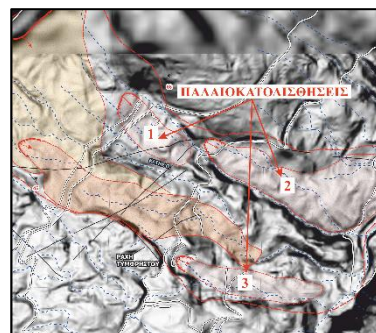


Γεωλογία	Γεωτεκτονική θέση	Ζώνη Ωλονού Πίνδου	Υδρογεωλογικό καθεστώς	Βροχοπτώσεις	Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής που ανέρχεται περίπου σε 1380 mm.
	Εδαφικοί σχηματισμοί	Επιφανειακά προϊόντα αποσάθρωσης, διάβρωσης και μεταφοράς και αποθέσεις που δημιουργήθηκαν κατά την πρόσφατη γεωλογική περίοδο του Τεταρτογενούς, μαζί με παλαιά και νέα υλικά κατολίσθησης.		Περατότητα	Ο φλύσχος της περιοχής στο σύνολο είναι πρακτικά αδιαπέρατος. Εξάιρεση αποτελεί η επιφανειακή αποδιοργανωμένη ζώνη του, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί από ημιπερατή έως και υδροπερατή. Αντίθετα, οι επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί του Τεταρτογενούς (ποτάμιες αποθέσεις, κορήματα και προϊόντα κατολίσθησεων) είναι γενικά υδροπερατές. Η κυκλοφορία του νερού μπορεί να συνεχίζεται και σε μεγαλύτερα βάθη εντός του υποβάθρου, κατά μήκος διαρρήξεων και σημαντικών διακλάσεων κυρίως του ψαμμιτικού υποβάθρου.
	Ημιβραχώδεις σχηματισμοί	Έντονα αποδιοργανωμένος, επιφανειακά ισχυρά αποσαθρωμένος φλύσχος (Φλύσχος τύπου VIII).		Δράση υπογείων υδάτων	Η παρουσία υπογείων υδάτων, εντός των υλικών της κατολίσθησης επιβαρύνει σημαντικά την ευστάθεια τους, φορτίζοντας τα μέσω της αύξησης των πιέσεων πόρων, με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής τους και την εκδήλωση αστοχιών.
	Σχηματισμοί υποβάθρου	Φλυσχικό υπόβαθρο ηλικίας Άνω Κρητιδικού – Κάτω Τριτογενούς, διαχωριζόμενο σε δύο επιμέρους ανεξάρτητες φάσεις, το κυρίως ψαμμιτικό υπόβαθρο (Φλύσχος τύπου III έως VII) και το πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο (Φλύσχος τύπου VIII).		Πηγές	Σε τοπικά σημεία εντός του τμήματος αυτού αποτυπώθηκαν περιοχές πηγών. Τα σημεία αυτά, στα οποία εκφορτίζεται το νερό φανερόνουν ένα ακατάστατο καθεστώς περατότητας εντός των υλικών της. Όταν η κυκλοφορία του νερού διακόπτεται από πιο αδιαπέρατα στρώματα τότε δημιουργούνται σημεία εξόδου του νερού (πηγές) στην επιφάνεια του εδάφους οι οποίες με την σειρά τους φορτίζουν και τροφοδοτούν με νερό τα κατώτερα τμήματα της κατολίσθησης.

Υλικά κατολίσθησης	Προέλευση	Προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο ορίζοντα του φλυσχικού υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI)	Γεωτεχνικές παράμετροι	Αποσαθρώματα	$\gamma = 22 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 15^\circ, r_u = 0,3$
	Περιγραφή	Μελανόχρωμη χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής αλλά και ιλλολιθικής σύστασης.		Υλικά κατολίσθησης	$\gamma = 22,5 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 18^\circ, r_u = 0,3$
	Πάχος	Το πάχος των υλικών διαφέρει από θέση σε θέση και κυμαίνεται από 6 έως 15 m και τοπικά έως 20 m.		Αποδιοργανωμένος φλύσχης	$\gamma = 23 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 20 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 23^\circ, r_u = 0,2$
	Έκταση	Σε όλη την έκταση της οριοθετημένης κεντρικής κατολίσθησης (0,20 km ²).		Ψαμμιτικό υπόβαθρο	$\gamma = 25 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 3 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 27,5^\circ, r_u = 0,12$
	Εξάπλωση	Σε όλο το μήκος της κύριας κατολίσθησης (1.250 m).		Ιλλολιθικό υπόβαθρο	$\gamma = 24 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 1,5 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 26,9^\circ, r_u = 0,1$
Γεωμετρία κατολίσθησης	Μήκος	~ 1.250 m	Ενεργότητα	Πλήρως ενεργή κατολίσθηση χαρακτηριζόμενη από έντονες εκδηλώσεις εδαφικών ασταθειών, από επιφανειακές ολισθήσεις, εδαφικούς ερπυσμούς και ροές κορημάτων, μέχρι και λασποροές στα κατώτερα τμήματα της.	
	Πλάτος	100 - 200 m		Μηχανισμός αστοχίας	Ο κύριος μηχανισμός ενεργοποίησης αυτού του τμήματος, πέρα του μηχανισμού της προοδευτικής περιστροφικής ολίσθησης, στο σύνολο της κύριας κατολίσθησης, είναι ο μηχανισμός των διαδοχικών οπισθοδρομικού τύπου ολισθήσεων προς τα ανάντη. Το φαινόμενο αυτό ξεκινάει από τα κατώτερα τμήματα της κατολίσθησης, όπου εδαφικά ή βραχώδη τμήματα της χαλαρώνουν και αστοχούν κάτω από την επίδραση διαβρωτικών φαινομένων (πχ. επίδραση ποταμού Κατή στον πόδα της κατολίσθησης) και διαδίδεται προς τα ανάντη λόγω της απώλειας στήριξης των ανάντη τμημάτων και της συνακόλουθης υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε ζώνες αδυναμίας των άνωθεν τμημάτων.
	Υψομετρική διαφορά	320 m			
	Εμβαδόν	0,20 km ²			
	Μέση κλίση	~ 20° - 25°			
Βάθος	Με βεβαιότητα μέχρι τα 20 m, με μικρότερη πιθανότητα στην διεπιφάνεια του αποδιοργανωμένου φλύσχη με το ψαμμιτικό υπόβαθρο, και με ακόμα πιο μικρή πιθανότητα έως και την διεπιφάνεια του ψαμμιτικού υποβάθρου με το ιλλολιθικό υπόβαθρο.				
Επισημάνσεις:	Το επιμέρους αυτό τμήμα της κύριας κατολίσθησης, απομονώθηκε από το σύνολο της και οριοθετήθηκε ως μια ξεχωριστή κατολίσθηση, λόγω των έντονων ενδείξεων ενεργότητας που επισημάνθηκαν τόσο κατά την διερεύνηση του στο πεδίο όσο και από τις μεταγενέστερες αναλύσεις της χρονικής εξέλιξης των ευρύτερων κατολισθητικών φαινομένων. Στο τμήμα αυτό παρατηρούνται έντονες ενδείξεις κατολισθητικών κινήσεων, χαρακτηριζόμενες από πολλές θραύσεις, μετατοπίσεις και καταπτώσεις του εδάφους, καθώς και από την παρουσία πολλών επιμέρους μικρότερης κλίμακας περιστροφικών ολισθήσεων. Ο κύριος μηχανισμός αστοχίας στην περιοχή αυτή εκτιμάται ως ο μηχανισμός διαδοχικών οπισθοδρομικού τύπου ολισθήσεων προς τα ανάντη, και τα υλικά της περιοχής αυτής τουλάχιστον κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι κορεσμένα με νερό και βρίσκονται σε οριακή έως ασταθή κατάσταση ισορροπίας. Έτσι μια πιθανή αφαίρεση μάζας στη βάση τους, από την δράση τοπικών ρεμάτων, ή μια πιθανή φόρτιση τους από υλικά που βρίσκονται σε υψηλότερα τμήματα, μπορεί εύκολα να τα ενεργοποιήσει.				

Πίνακας 6-19 Αναλυτικό μητρώο Ενεργού τμήματος Κύριας κατολίσθησης.

A/A	ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΤΟΠΙΚΕΣ ΠΑΛΑΙΟΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	
Γενικά στοιχεία	Τοποθεσία	Ράχη Τυμφρηστού (Ν. Φθιώτιδας)
	Χρήση Γης	Καλλιεργήσιμες εκτάσεις
	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Παρουσία ανθρώπινου παράγοντα ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

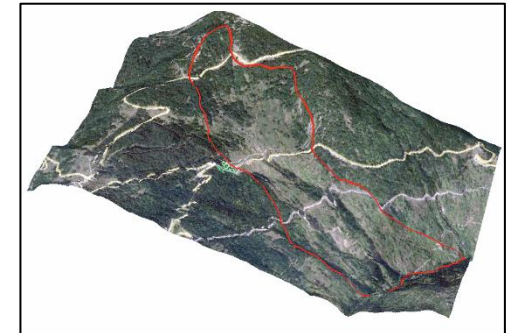
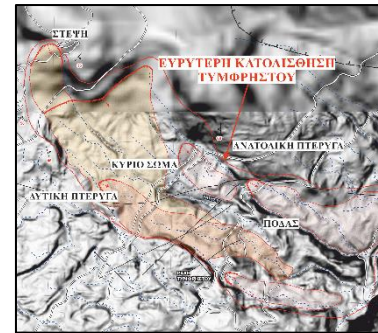


Γεωλογία	Γεωτεκτονική θέση	Ζώνη Ωλονού Πίνδου	Υδρογεωλογικό καθεστώς	Βροχοπτώσεις	Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής που ανέρχεται περίπου σε 1380 mm.
	Εδαφικοί σχηματισμοί	Επιφανειακά προϊόντα αποσάθρωσης, διάβρωσης και μεταφοράς και αποθέσεις που δημιουργήθηκαν κατά την πρόσφατη γεωλογική περίοδο του Τεταρτογενούς, μαζί με παλαιά και νέα υλικά κατολίσθησης.		Περατότητα	Ο φλύσχος της περιοχής στο σύνολο είναι πρακτικά αδιαπέρατος. Εξάιρεση αποτελεί η επιφανειακή αποδιοργανωμένη ζώνη του, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί από ημιπερατή έως και υδροπερατή. Αντίθετα, οι επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί του Τεταρτογενούς (ποτάμιες αποθέσεις, κορήματα και προϊόντα κατολίσθησεων) είναι γενικά υδροπερατές. Η κυκλοφορία του νερού μπορεί να συνεχίζεται και σε μεγαλύτερα βάθη εντός του υποβάθρου, κατά μήκος διαρρήξεων και σημαντικών διακλάσεων κυρίως του ψαμμιτικού υποβάθρου.
	Ημιβραχώδεις σχηματισμοί	Έντονα αποδιοργανωμένος, επιφανειακά ισχυρά αποσαθρωμένος φλύσχος (Φλύσχος τύπου VIII).		Δράση υπογείων υδάτων	Η παρουσία υπογείων υδάτων, εντός των υλικών της κατολίσθησης επιβαρύνει σημαντικά την ευστάθεια τους, φορτίζοντας τα μέσω της αύξησης των πιέσεων πόρων, με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής τους και την εκδήλωση αστοχιών.
	Σχηματισμοί υποβάθρου	Φλυσχικό υπόβαθρο ηλικίας Άνω Κρητιδικού – Κάτω Τριτογενούς, διαχωριζόμενο σε δύο επιμέρους ανεξάρτητες φάσεις, το κυρίως ψαμμιτικό υπόβαθρο (Φλύσχος τύπου III έως VII) και το πιο αλυολιθικό υπόβαθρο (Φλύσχος τύπου VIII).		Πηγές	Σε τοπικά σημεία εντός του τμήματος αυτού αποτυπώθηκαν περιοχές πηγών. Τα σημεία αυτά, στα οποία εκφορτίζεται το νερό φανερόνουν ένα ακατάστατο καθεστώς περατότητας εντός των υλικών της. Όταν η κυκλοφορία του νερού διακόπτεται από πιο αδιαπέρατα στρώματα τότε δημιουργούνται σημεία εξόδου του νερού (πηγές) στην επιφάνεια του εδάφους οι οποίες με την σειρά τους φορτίζουν και τροφοδοτούν με νερό τα κατώτερα τμήματα των κατολισθήσεων.

Υλικά κατολίσθησης	Προέλευση	Προέρχονται από παλαιές ολισθήσεις του υποκείμενου αποδιοργανωμένου οριζοντα του φλυσχικού υποβάθρου (Φλύσχης τύπου XI)	Γεωτεχνικές παράμετροι	Αποσαθρώματα	$\gamma = 22 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 15^\circ, r_u = 0,3$
	Περιγραφή	Μελανόχρωμη χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής αλλά και ιλυολιθικής σύστασης.		Υλικά κατολίσθησης	$\gamma = 22,5 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 18^\circ, r_u = 0,3$
	Πάχος	Το πάχος των υλικών αυτών εκτιμάται της τάξης των 4 – 8m.		Αποδιοργανωμένος φλύσχης	$\gamma = 23 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 20 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 23^\circ, r_u = 0,2$
	Έκταση	Σε όλη την έκταση των ορίων των παλαιοκατολισθήσεων.		Ψαμμιτικό υπόβαθρο	$\gamma = 25 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 3 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 27,5^\circ, r_u = 0,12$
	Εξάπλωση	Σε όλο το μήκος των παλαιοκατολισθήσεων.		Ιλυολιθικό υπόβαθρο	$\gamma = 24 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 1,5 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 26,9^\circ, r_u = 0,1$
Γεωμετρία κατολίσθησης	Μήκος	Παλαιοκατολισθήσεις: 1) ~ 420 m. 2) ~ 1.000 m. 3) ~700 m.	Ενεργότητα	Εντός των περιοχών αυτών δεν παρατηρούνται σοβαρές ενδείξεις ενεργοποίησης και μετατόπισης των υλικών τους. Εξάιρεση αποτελούν περιορισμένες εμφανίσεις ολισθήσεων στα πλευρικά τους όρια καθώς και κάποιες τοπικές ενδείξεις μικρών εδαφικών ερπυσμών.	
	Πλάτος	Παλαιοκατολισθήσεις: 1) 170 m. 2) 100 – 500 m. 3) 120 m.		Μηχανισμός αστοχίας	Επί των περιοχών αυτών παρατηρούνται κυρίως επιφανειακές μικρής κλίμακας περιστροφικές ολισθήσεις και εδαφικοί ερπυσμοί. Τα υλικά των περιοχών αυτών όταν διαποτιστούν και κορεσθούν με νερό, ολισθαίνουν με έναν πολύ αργό ρυθμό προς τα κατάντη.
	Υψομετρική διαφορά	Παλαιοκατολισθήσεις: 1) 120 m. 2) 300 m. 3) 180 m.			
	Εμβαδόν	Παλαιοκατολισθήσεις: 1) 0,05 km ² . 2) 0,20 km ² . 3) 0,07 km ² .			
	Μέση κλίση	~ 15° - 20°			
Βάθος	Με βεβαιότητα μέχρι τα 8 m και με πολύ μικρή πιθανότητα βαθύτερα εντός του αποδιοργανωμένου φλύσχη.				
Επισημάνσεις:	Στο πεδίο εντός των παλαιοκατολισθήσεων παρατηρήθηκαν τοπικές διαδοχικές επιπεδώσεις του αναγλύφου. Οι εμφανίσεις αυτές πιθανώς δεν ταυτίζονται με τα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής, αλλά οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι οι περιοχές αυτές αποτελούν καλλιεργήσιμες εκτάσεις που αναδιαμορφώθηκαν, κατά την πάροδο του χρόνου, μετά από ανθρώπινη επέμβαση.				

Πίνακας 6-20 Αναλυτικό μητρώο επιμέρους τοπικών Παλαιοκατολισθήσεων.

A/A	ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΣΥΝΘΕΤΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΥ	
Γενικά στοιχεία	Τοποθεσία	Ράχη Τυμφρηστού (Ν. Φθιώτιδας)
	Χρήση Γης	Δασική έκταση
	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Παρουσία δύο οδικών δικτύων εντός της κατολίσθησης, ήτοι παλαιού και νέου οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου. Παρουσία ανθρώπινου παράγοντα ανά τακτά χρονικά διαστήματα.



Γεωλογία	Γεωτεκτονική θέση	Ζώνη Ωλονού Πίνδου	Υδρογεωλογικό καθεστώς	Βροχοπτώσεις	Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής που ανέρχεται περίπου σε 1380 mm.
	Εδαφικοί σχηματισμοί	Επιφανειακά προϊόντα αποσάθρωσης, διάβρωσης και μεταφοράς και αποθέσεις που δημιουργήθηκαν κατά την πρόσφατη γεωλογική περίοδο του Τεταρτογενούς, μαζί με παλαιά και νέα υλικά κατολίσθησης.		Περατότητα	Ο φλύσχος της περιοχής στο σύνολο είναι πρακτικά αδιαπέρατος. Εξάιρεση αποτελεί η επιφανειακή αποδιοργανωμένη ζώνη του, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί από ημιπερατή έως και υδροπερατή. Αντίθετα, οι επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί του Τεταρτογενούς (ποτάμιες αποθέσεις, κορήματα και προϊόντα κατολίσθησεων) είναι γενικά υδροπερατές. Η κυκλοφορία του νερού μπορεί να συνεχίζεται και σε μεγαλύτερα βάθη εντός του υποβάθρου, κατά μήκος διαρρήξεων και σημαντικών διακλάσεων κυρίως του ψαμμιτικού υποβάθρου.
	Ημιβραχώδεις σχηματισμοί	Έντονα αποδιοργανωμένος, επιφανειακά ισχυρά αποσαθρωμένος φλύσχος (Φλύσχος τύπου VIII).		Δράση υπογείων υδάτων	Η παρουσία υπογείων υδάτων, εντός των υλικών της κατολίσθησης επιβαρύνει σημαντικά την ευστάθεια τους, φορτίζοντας τα μέσω της αύξησης των πιέσεων πόρων, με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής τους και την εκδήλωση αστοχιών.
	Σχηματισμοί υποβάθρου	Φλύσχο υπόβαθρο ηλικίας Άνω Κρητιδικού – Κάτω Τριτογενούς, διαχωριζόμενο σε δύο επιμέρους ανεξάρτητες φάσεις, το κυρίως ψαμμιτικό υπόβαθρο (Φλύσχος τύπου III έως VII) και το πιο αλυολιθικό υπόβαθρο (Φλύσχος τύπου VIII).		Πηγές	Σε τοπικά σημεία εντός του τμήματος αυτού αποτυπώθηκαν περιοχές πηγών. Τα σημεία αυτά, στα οποία εκφορτίζεται το νερό φανερόνουν ένα ακατάστατο καθεστώς περατότητας εντός των υλικών της. Όταν η κυκλοφορία του νερού διακόπτεται από πιο αδιαπέρατα στρώματα τότε δημιουργούνται σημεία εξόδου του νερού (πηγές) στην επιφάνεια του εδάφους οι οποίες με την σειρά τους φορτίζουν και τροφοδοτούν με νερό τα κατώτερα τμήματα της κατολίσθησης.

Υλικά κατολίσθησης	Προέλευση	Προέρχονται από τον υποκείμενο αποδιοργανωμένο ορίζοντα του φλυσχικού υποβάθρου (Φλύσξης τύπου XI)	Γεωτεχνικές παράμετροι	Αποσαθρώματα	$\gamma = 22 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 15^\circ, r_u = 0,3$
	Περιγραφή	Μελανόχρωμη χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, κυμαινόμενης πλαστικότητας από θέση σε θέση, μαζί με γωνιώδη τεμάχια (θραύσματα, χάλικες, κροκάλες) ψαμμιτικής αλλά και ιλυολιθικής σύστασης.		Υλικά κατολίσθησης	$\gamma = 22,5 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 18^\circ, r_u = 0,3$
	Πάχος	Το πάχος των υλικών διαφέρει από θέση σε θέση και κυμαίνεται από 6 έως 15 m και τοπικά έως 20 m.		Αποδιοργανωμένος φλύσξης	$\gamma = 23 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 20 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi' = 23^\circ, r_u = 0,2$
	Έκταση	Εντός των οριοθετημένων επιμέρους κατολισθήσεων.		Ψαμμιτικό υπόβαθρο	$\gamma = 25 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 3 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 27,5^\circ, r_u = 0,12$
	Εξάπλωση	Σε όλο το μήκος της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης (2.500 m).		Ιλυολιθικό υπόβαθρο	$\gamma = 24 \text{ (kN/m}^3\text{)}, c' = 1,5 \text{ (MN/m}^2\text{)}, \phi' = 26,9^\circ, r_u = 0,1$
Γεωμετρία κατολίσθησης	Μήκος	~ 2.500 m	Ενεργότητα	Η ευρύτερη σύνθετη κατολίσθηση Τυμφρηστού αποτελεί κατ' ουσία μια εκτεταμένη παλαιοκατολίσθηση, η οποία βρίσκεται στο στάδιο περιστασιακής ενεργοποίησης της, κυρίως στο δυτικό τμήματα της, που ενεργοποιείται τόσο από μια πιθανή εκδήλωση αργής βαθιάς ολίσθησης της βάσης της, σε όλη την έκταση της, όσο και από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης, προοδευτικού τύπου στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου, στα κατώτερα τμήματα της.	
	Πλάτος	850 m		Μηχανισμός αστοχίας	Προοδευτική περιστροφική ολίσθηση (Progressive Rotational Slide) που μεταβαίνει με την πάροδο του χρόνου, από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης, προοδευτικού τύπου στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου, στα κατώτερα τμήματα, σε μια βαθύτερη αργή βαθιά ολίσθηση της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο, σε όλη την έκταση της κατολίσθησης.
	Υψομετρική διαφορά	1200 m			
	Εμβαδόν	1,75 km²			
	Μέση κλίση	~ 20° - 25°			
Βάθος	Με βεβαιότητα μέχρι τα 20 m, με μικρότερη πιθανότητα στην διεπιφάνεια του αποδιοργανωμένου φλύσχη με το ψαμμιτικό υπόβαθρο, και με ακόμα πιο μικρή πιθανότητα έως και την διεπιφάνεια του ψαμμιτικού υποβάθρου με το ιλυολιθικό υπόβαθρο.				
Επισημάνσεις:	Η εν λόγω σύνθετη κατολίσθηση σε μεγάλα τμήματα της γενικά βρίσκεται σε ευαίσθητη κατάσταση ισορροπίας και τοπικά μάλιστα στο δυτικό της τμήμα είναι σταθής. Αυτό οφείλεται στις ιδιαίτερα απότομες εγκάρσιες κλίσεις του, στην ευαισθησία των γεωλογικών σχηματισμών και κυρίως της επιφανειακής ζώνης τους, στους παράγοντες της αποσάθρωσης και διάβρωσης, και τέλος στο ιδιαίτερα πλούσιο σε βροχοπτώσεις κλίμα της περιοχής, που έχει σαν αποτέλεσμα το διαποτισμό μέχρι τον βαθμό κορεσμού της επιφανειακής ζώνης του φλύσχη και των χαλαρών σχηματισμών που επικάθονται σε αυτόν, ήτοι κορήματα αποσαθρώματα και υλικά κατολισθήσεων. Αποτελέσματα όλων των παραπάνω παραγόντων αποσταθεροποίησης, είναι η ύπαρξη επιμέρους παλαιών και νέων ενεργών κατολισθήσεων, καθώς και εκτεταμένων εδαφικών ερπυσμών και ροές κορημάτων. Παράλληλα στα πιο σταθερά τμήματα της, δηλαδή σε περιοχές στα όρια της, αλλά και στις πιο σταθερές ράχες εντός των ορίων της, όπου εμφανίζεται το ψαμμιτικό φλυσχικού υποβάθρου, παρατηρούνται φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, τα υλικά των οποίων, τροφοδοτούν τον ευρύτερο κατολισθητικό χώρο και συμβάλλουν στην περεταίρω ενεργοποίηση του φαινομένου, αναδιαμορφώνοντας την γεωμετρία της πλαγιάς και φορτίζοντας με πρόσθετο υλικό την κατολίσθηση.				

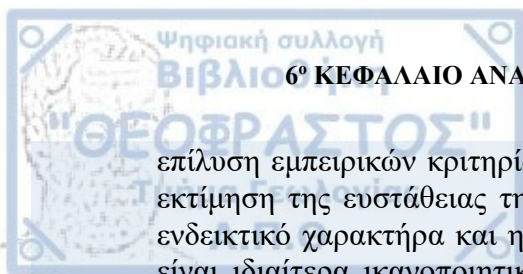
Πίνακας 6-21 Αναλυτικό μητρώο Ευρύτερης Κατολίσθησης Τυμφρηστού.

6.7. Συμπεράσματα ανάλυσης κατολισθητικών συνθηκών περιοχής μελέτης

Απ' όσα αναφέρθηκαν με λεπτομέρεια, στο παρόν κεφάλαιο για τις ιδιαίτερες συνθήκες των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής μελέτης προκύπτουν τα εξής σημαντικά συμπεράσματα:

1. Η εξεταζόμενη κατολίσθηση Τυμφρηστού αποτελεί μια σύνθετη κατολίσθηση, κατηγορίας μεγάλων κατολισθήσεων, κλίμακας φυσικού πρηνούς, και συγκροτείται από επιμέρους μεμονωμένες μικρότερες κατολισθήσεις, που δρουν ταυτόχρονα και εξελίσσονται με διαφορετικές διαδικασίες σε διάφορα τμήματά της.
2. Η επιφανειακή διερεύνηση και αποτύπωση του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, επιτελέστηκε με μια σειρά εργασιών στο πεδίο και διαμέσου της οπτικής ερμηνείας των διαθέσιμων ψηφιακών μοντέλων εδάφους υψηλής ανάλυσης HRDEM. Παράλληλα, η εφαρμογή της μεθόδου PCA (Principal Components Analysis) μετασχημάτισε μεμονωμένες τοπογραφικές πληροφορίες σε μια νέα σύνθεση δεδομένων, επέτρεψε την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας των πλαγιών, και την λεπτομερή αναγνώριση μορφολογικών ενδείξεων κατολισθήσεων, που σε συνδυασμό με τις επιτόπου παρατηρήσεις και επιστημονικές μετρήσεις στο πεδίο, πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου, οδήγησε στην τελική οριοθέτηση των κατολισθήσεων της περιοχής, και την αποτύπωση τους σε όλους τους θεματικούς χάρτες και τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν για αυτή.
3. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, από την εφαρμογή της μεθόδου σε δύο διαφορετικά ψηφιακά μοντέλα, που αποκτήθηκαν με διαφορετικές μεθόδους αποτύπωσης, ήτοι ψηφιακό μοντέλο 2007, από αποτύπωση της περιοχής με τεχνικές ALS και ψηφιακό μοντέλο Νοεμβρίου 2019, από αποτύπωση της περιοχής μέσω της χρήσης μη επανδρωμένου αεροσκάφους UAV, φαίνεται πως η μέθοδος PCA εφαρμόζεται καλύτερα για το μικρότερης ανάλυσης, 5 x 5 [m/ pixel], ψηφιακό μοντέλο του 2007 (ALS), έναντι του πολύ πιο υψηλής ανάλυσης, 1 x 1 [m/ pixel], ψηφιακού μοντέλου του Νοεμβρίου 2019 (UAV), και αυτό γιατί τα σημάδια των κατολισθήσεων πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, κατά την διερεύνηση τους σε μεγάλη κλίμακα, όπως αυτή με την χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων UAV, δεν είναι αμέσως προφανή και ο εντοπισμός τους προϋποθέτει την εμπειρική γνώση των ιδιοτήτων των γεωλογικών υλικών που συμμετέχουν σε αυτές τις κινήσεις.
4. Όσον αφορά την ενεργότητα, την ευρύτερη σύνθετη κατολίσθηση αποτελεί ουσιαστικά μια παλαιοκατολίσθηση, η οποία βρίσκεται στο στάδιο περιστασιακής ενεργοποίησης της, κυρίως στο δυτικό τμήματά της, που ενεργοποιείται τόσο από μια πιθανή εκδήλωση αργής, βαθιάς ολίσθησης της βάσης της, σε όλη την έκτασή της, όσο και από επιφανειακές διαδοχικές ολίσθησεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης, προοδευτικού τύπου στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου, στα κατώτερα τμήματά της.
5. Το παραπάνω συμπέρασμα, προέκυψε από μια σειρά αναλύσεων που αφορούσαν, τόσο την ποιοτική οπτική ερμηνεία δορυφορικών εικόνων της περιοχής αναφερόμενες σε ένα χρονικό εννέα ετών (2010 – 2019), όσο και από την αυτοματοποιημένη εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, διά της εφαρμογής υπολογιστικών πράξεων για την παραγωγή ενός Ψηφιακού μοντέλου διαφοράς (DEM of Difference), σε σχέση με τις διαχρονικές αλλαγές της μορφολογίας και τις μετατοπίσεις του εδάφους για περίοδο αναφοράς δώδεκα ετών.

6. Από τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων, επαληθεύτηκαν οι ενδείξεις ενεργότητας του κατώτερου τμήματος της κύριας κατολίσθησης, το οποίο απομονώθηκε και οριοθετήθηκε ως μια ξεχωριστή κατολίσθηση, ενώ παράλληλα εντοπίστηκαν οι ζώνες απομείωσης και συσσώρευσης υλικών της επιφανείας του εδάφους, επαληθεύοντας σε έναν αποδεκτό βαθμό τον διαχωρισμό της ευρύτερης κατολίσθησης στα επιμέρους χαρακτηριστικά τμήματα, της πρότερης γεωμορφολογικής ανάλυσης. Βέβαια, τα αποτελέσματα της οπτικής διερεύνησης και σύγκρισης της μορφολογίας του εδάφους, από δορυφορικές εικόνες της περιοχής, δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθώς δεν εντοπίστηκαν ιδιαίτερες ενδείξεις ενεργότητας για τον χαρακτηρισμό της εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.
7. Με βάση τα αποτελέσματα όλων παραπάνω επιμέρους αναλύσεων που εκτελέστηκαν για την διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής Ράχης Τυμφρηστού, καθώς και την επαλήθευση των αρχικών εκτιμήσεων και παρατηρήσεων που επιτελέστηκαν στο πεδίο, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η σημερινή γεωμετρία της ευρύτερης πλαγιάς, προέκυψε από αστοχίες του εδάφους, που συνέβησαν στο παρελθόν και συνεχίζουν να συμβαίνουν μέχρι και σήμερα.
8. Πιο συγκεκριμένα ο κύριος μηχανισμός αστοχίας, που ενεργεί στην ευρύτερη περιοχή, βάσει της γεωμετρίας της πλαγιάς, των ενδείξεων της αρχικής κλίσης της, αλλά και από την τοποθέτηση των υλικών κατολίσθησης στα κατώτερα τμήματα της, εκτιμάται ως ο μηχανισμός της προοδευτικής περιστροφικής ολίσθησης (Progressive Rotational Slide).
9. Ο μηχανισμός προοδευτικής περιστροφικής ολίσθησης με την πάροδο του χρόνου μεταβαίνει από επιφανειακές κυρίως διαδοχικές ολισθήσεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης, προοδευτικού τύπου στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου, στα κατώτερα τμήματα, σε μια βαθύτερη, αργή, βαθιά ολίσθηση της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο, σε όλη την έκταση της κατολίσθησης.
10. Για την προσομοίωση του μηχανισμού αστοχίας της ευρύτερης κατολίσθησης και την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας των κύκλων ολίσθησης που εκτιμήθηκαν για αυτήν, κατά την γεωτεχνική ανάλυση του υπεδάφους της περιοχής, εκτελέστηκαν τρεις ενδεικτικές διερευνητικές αναλύσεις ευστάθειας, έναντι ολίσθησης, με την μέθοδο οριακής ισορροπίας (ULS), τόσο σε στατικές συνθήκες (χωρίς σεισμό), όσο και σε δυναμικές συνθήκες σεισμού. Τα αποτελέσματα, των αναλύσεων αυτών, έδειξαν πως το μεγαλύτερο ποσοστό των αστοχιών συμβαίνει επιφανειακά από 1 έως 8 m, ενώ για βαθύτερα τμήματα, με βεβαιότητα, έως και τα 20 m, προκύπτουν συνθήκες οριακής ευστάθειας. Αντίθετα με μικρότερη πιθανότητα εκτιμήθηκαν αστοχίες ερπυστικού χαρακτήρα, λόγω μιας πιθανής βαθιάς ολίσθησης, τόσο στην διεπιφάνεια του αποδιοργανωμένου φλύσχη με το ψαμμιτικό υπόβαθρο, όσο και στην διεπιφάνεια του ψαμμιτικού υποβάθρου με το ιλυολιθικό υπόβαθρο, με ακόμα πιο μικρή πιθανότητα.
11. Για να διασταυρωθεί αν πράγματι στην ευρύτερη σύνθετη κατολίσθηση λαμβάνουν χώρα βαθύτερες ολισθήσεις, απαιτείται μια αναλυτικότερη διερεύνηση του βαθύτερου υποβάθρου, με την εκτέλεση ενός γεωερευνητικού προγράμματος, με γεωτρήσεις που να ξεπερνούν τα 50 m βάθος, και την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών, για την διερεύνηση των γεωτεχνικών ιδιοτήτων του εδάφους με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς όπως προαναφέρθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή οι γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών εκτιμήθηκαν με την



επίλυση εμπειρικών κριτηρίων. Παρόλα αυτά, όλες οι αναλύσεις που εκτελέστηκαν για την εκτίμηση της ευστάθειας της κατολίσθησης έναντι ολίσθησης, με την μέθοδο ULS, έχουν ενδεικτικό χαρακτήρα και η προσέγγιση του προβλήματος με το παρόν σύνολο δεδομένων, είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική καθώς αποτυπώνει με ακρίβεια το μεγαλύτερο σύνολο των κατολισθητικών συνθηκών της περιοχής.

Εν κατακλείδι, ο ευρύτερος χώρος, της κατολίσθησης, βρίσκεται υπό την συνεχή επίδραση δυναμικών παραγόντων αποσταθεροποίησης, τόσο από διαδικασίες όπως η διάβρωση και αποσάθρωση που δρουν στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και από την περιστασιακή ενεργοποίηση της κατολίσθησης, που ενεργοποιείται τόσο από μια πιθανή εκδήλωση αργής, βαθιάς ολίσθησης της βάσης της, σε όλη την έκταση της, όσο και από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις.

Η κατολίσθηση δεν φαίνεται να έχει ανακτήσει μια έστω υποβαθμισμένη, μακροχρόνια ισορροπία αλλά αντίθετα κατά καιρούς και ιδιαίτερα σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων εμφανίζει περεταίρω αστάθειες. Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης της, εμφανίζονται σποραδικά ή και εποχιακά και έχουν σταδιακά αποτελέσματα, και για αυτό τον λόγο ο προσδιορισμός ενός σαφούς μηχανισμού αστοχίας είναι δύσκολος.

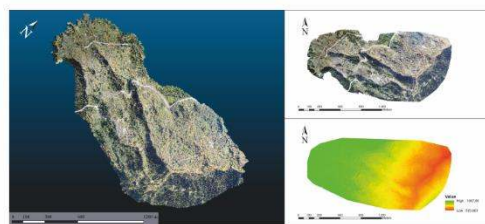
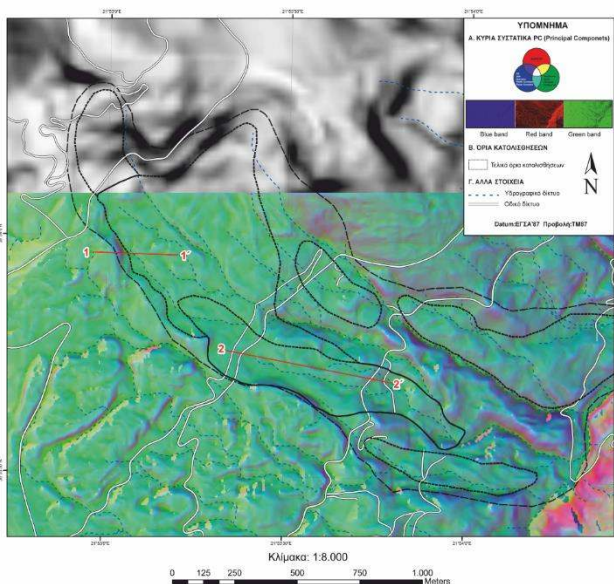
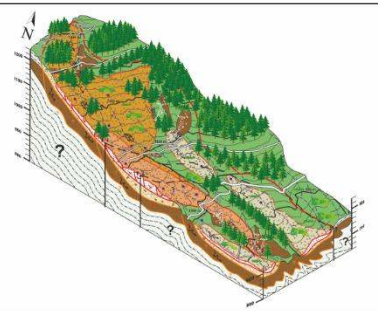
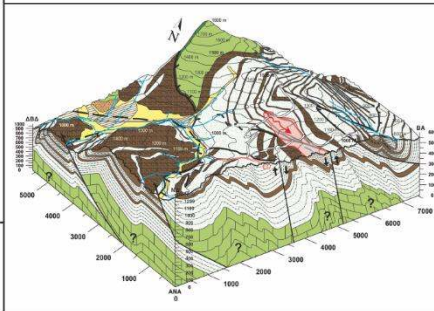
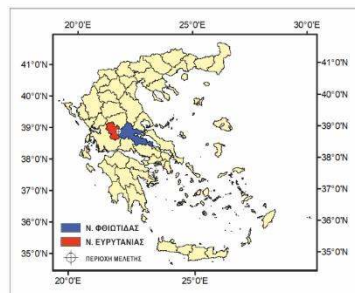
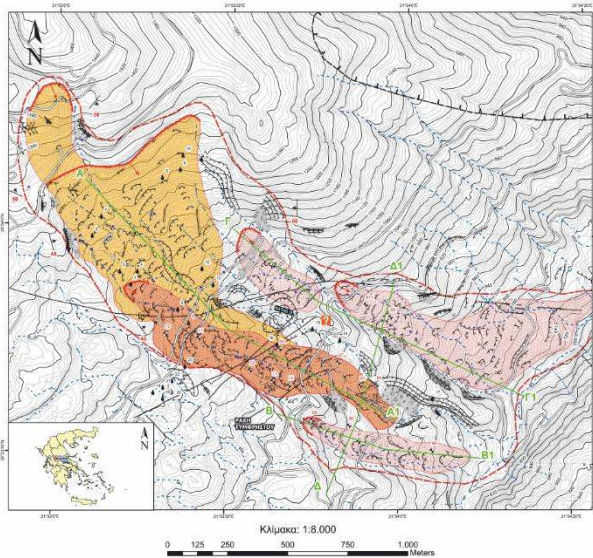
Παράλληλα, μικρότερες τοπικές αστοχίες εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, όπως επιφανειακές ολισθήσεις μικρότερης κλίμακας, ροές εδαφών και κορημάτων, και προϊόντα από βραχοκαταπτώσεις, στα πιο σταθερά τμήματα της, συμβάλλουν στην περεταίρω ενεργοποίηση του φαινομένου, αναδιαμορφώνοντας την γεωμετρία της πλαγιάς και φορτίζοντας με πρόσθετο υλικό την κατολίσθηση.

Τέλος, απότομες μεταβολές στη στάθμη του υπογείου ορίζοντα, κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, μπορεί, να ενεργοποιούν περαιτέρω το φαινόμενο προκαλώντας την εκδήλωση μετακινήσεων, εντός των επιφανειακών υλικών κατολίσθησης αλλά και βαθύτερα επί του αποδιοργανωμένου φλύσχη, λόγω καθιζήσεων, εξαιτίας της πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού.

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Περιοχή εντός ρέματος, στον χώρο της κύριας κατολίθησης, επί του παλαιού οδικού δικτύου Λάμιας – Καρπενησίου, όπου παρατηρούνται αστοχίες και παραμορφώσεις επί του τεχνικού αντιστήριξης με λιθοπληρωμένα συρματοκιβώτια (σαρζανέτια), καθώς και φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων επί των ψαμμιτικών τμημάτων του εμφανιζόμενου φλυσχικού υποβάθρου.



7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η μελέτη της εκτεταμένης σύνθετης κατολίσθησης, που τοποθετείται στους πρόποδες της ανατολικής πλευράς του ορεινού όγκου Τυμφρηστού, στην περιοχή "Ράχη Τυμφρηστού", Δυτικά του χωριού Τυμφρηστός, κατά μήκος του οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου, με την χρήση Συστημάτων μη Επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV).

Η εξετασθείσα κατολίσθηση, ως φαινόμενο, δεν εξελίσσεται σαν μια ραγδαία ενιαία κατολίσθηση, αλλά αποτελεί ουσιαστικά μια σύνθετη και εκτεταμένη περιοχή αστάθειας, κατηγορίας μεγάλων κατολισθήσεων, κλίμακας φυσικού πρανούς, που συγκροτείται από επιμέρους μεμονωμένες μικρότερες κατολισθήσεις, που δρουν ταυτόχρονα και εξελίσσονται με διαφορετικές διαδικασίες σε διάφορα τμήματά της.

Λόγω της ιδιαίτερα πολύπλοκης μορφολογίας της περιοχής, η οποία συντίθεται από ένα μοναδικό σύνολο συνθηκών, που διαμηνύουν την ύπαρξη μιας γενικευμένης αστάθειας του εδάφους, η διερεύνηση της εν λόγω κατολίσθησης καθίσταται ιδιαίτερα προκλητική, τόσο στην αναγνώριση και αποτύπωση της, όσο και στην κατανόηση των κατολισθητικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σ' αυτήν. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η εκτέλεση ειδικών εξιδεικευμένων αναλύσεων προκειμένου να προσδιοριστούν οι μηχανισμοί και η συχνότητα εμφάνισης των αστοχιών της.

Το γενικό ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας καθορίζεται από ένα σύνολο επιμέρους αναλύσεων της περιοχής, που αφορούσαν στον προσδιορισμό της έκτασης, του τύπου, των μηχανισμών και της συχνότητας εμφάνισης των αστοχιών του εδάφους στην περιοχή μελέτης, καθώς και εν τέλει στην απογραφή όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών σε αναλυτικά μητρώα κατολισθήσεων, αποτελούμενα από παρατηρήσεις και επισημάνσεις αναφορικά με την αναδιαμόρφωση του αναγλύφου της περιοχής, έτσι ώστε σε χρόνο μέλλοντα να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα πρόβλεψης δυνητικών κινδύνων, τόσο από νέες εμφανίσεις κίνησης, όσο και από μια επικείμενη ενεργοποίηση ολόκληρης της κατολίσθησης, με σκοπό να κατασκευαστούν στοχευμένα έργα υποδομής για την αποτροπή των εκάστοτε καταστροφών.

Η συνεισφορά της τρέχουσας τεχνολογίας των συστημάτων UAV για το παρόν μελετητικό εγχείρημα υπήρξε καθοριστική, καθώς παρείχε ορθοφωτογραφίες και υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα εδάφους HRDEM, για διαφορετικές χρονικά σαρώσεις της περιοχής, σε χαμηλό κόστος, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο τα δεδομένα και τις υποθέσεις για την ερμηνεία και εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.

Συνοψίζοντας λοιπόν, τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής είναι τα ακόλουθα:

7.1.1. Συμπεράσματα για: την αποτύπωση της ευρύτερης κατολίσθησης

Από την εκτελεσθείσα επιφανειακή ανάλυση του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, που επιτελέστηκε με μια σειρά εργασιών τόσο στο πεδίο, όσο και διαμέσου της οπτικής ερμηνείας δείγματος πέντε διαθέσιμων ψηφιακών μοντέλων εδάφους υψηλής ανάλυσης HRDEM, που αποτελούνταν από τέσσερις αποτυπώσεις της στενής περιοχής μελέτης, ληφθήσες με την χρήση μη

επανδρωμένου αεροσκάφους UAV, για τα έτη 2018 – 2020, και από μια προγενέστερη αποτύπωση της περιοχής, πραγματοποιημένης με τεχνικές ALS (Airborne Laser Scanning), για το έτος 2007, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

Στο ΒΔ πρानές της περιοχής Ράχη Τυμφρηστού (ανάμεσα στη σήραγγα και στο χωριό Τυμφρηστός) οριοθετήθηκε μια εκτεταμένη σύνθετη κατολίσθηση, που αποτελείται από επιμέρους πολλές ενεργές ή μη κατολισθήσεις, και συνιστά κατ' ουσία τον ευρύτερο κατολισθητικό χώρο της υπό μελέτη περιοχής.

Η εν λόγω σύνθετη κατολίσθηση σε μεγάλα τμήματα της βρίσκεται γενικά σε ευαίσθητη κατάσταση ισορροπίας και τοπικά μάλιστα είναι ασταθής. Αυτό οφείλεται στις ιδιαίτερα απότομες εγκάρσιες κλίσεις της, στην ευαισθησία των γεωλογικών σχηματισμών που την συνθέτουν και κυρίως της επιφανειακής ζώνης τους, στους παράγοντες της αποσάθρωσης και διάβρωσης, και τέλος στο ιδιαίτερα πλούσιο σε βροχοπτώσεις κλίμα της περιοχής που έχει σαν αποτέλεσμα το διαποτισμό της επιφανειακής ζώνης του φλύσχη και των χαλαρών σχηματισμών που επικάθονται σε αυτόν, ήτοι κορήματα αποσαθρώματα και υλικά κατολισθήσεων, μέχρι τον βαθμό κορεσμού τους. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω εντοπίζεται η εκδήλωση επιμέρους παλαιών και νέων ενεργών κατολισθήσεων, καθώς και εκτεταμένων εδαφικών ερπυσμών.

Παράλληλα, εντός της ευρύτερης κατολίσθησης, λόγω του ότι πρόκειται για μια εκτεταμένη σύνθετη κατολίσθηση και όχι για μια μεμονωμένη ενιαία κατολίσθηση, απομονώθηκαν και αποτυπώθηκαν ξεχωριστά πέντε επιμέρους κατολισθήσεις. Με τον διαχωρισμό αυτό και την τμηματική ανάλυση των επιμέρους κατολισθήσεων έγινε δυνατή η ταξινόμηση και η διερεύνηση της συχνότητας εμφάνισης κατολισθητικών φαινομένων για το σύνολο του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου.

Εντός των επιμέρους αυτών κατολισθήσεων, εντοπίστηκαν πολλές περιοχές χαρακτηριζόμενες από αλλεπάλληλες επιπεδώσεις, ταπεινώσεις, αναθλώσεις και ανορθώσεις της μορφολογίας του εδάφους, οι οποίες αποτελούν ενδείξεις κατολισθητικών φαινομένων περιστροφικού χαρακτήρα. Εντονότερες ενδείξεις κατολισθητικών κινήσεων, παρατηρήθηκαν επί του νέο οδικό δίκτυο Λαμίας – Καρπενησίου. Αντίθετα, περιοχές χωρίς σοβαρές ενδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης και μετατόπισης του εδάφους, χαρακτηρίστηκαν ως τοπικές περιοχές παλαιοκατολισθήσεων. Τέλος, σε όλη την έκταση εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, χαρτογραφήθηκαν περιοχές ελασσόνων τοπικών αστοχιών, οι οποίες συμβάλλουν στην περεταίρω ενεργοποίηση του φαινομένου.

Τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά από την διερεύνηση της περιοχής διαφαίνεται ότι το υπόβαθρο της περιοχής δομείται εντός φλυσχικών σχηματισμών, της Ζώνης της Πίνδου, οι οποίοι λιθολογικά αποτελείται κυρίως από εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών. Η διαφορετική σύσταση και η έντονη τεκτονική καταπόνηση του φλυσχικού υποβάθρου συνθέτουν μια ασθενής βραχώμαζα, η οποία ακόμα και στα βαθύτερα τμήματα της δεν εξασφαλίζει ιδιαίτερα καλές συνθήκες ισορροπίας, και φαίνεται να είναι υπεύθυνη για την δημιουργία των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής.

7.1.2. Συμπεράσματα για: την εξαγωγή πρόσθετων δεδομένων, χρήση εφαρμογών μηχανικής μάθησης, όπως η μέθοδος PCA, από τα ήδη υπάρχοντα

Απαραίτητη πηγή πληροφοριών και δεδομένων, για τη ποσοτική χωροθέτηση και διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης της εξεταζόμενης κατολίσθησης αποτέλεσαν τα υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα εδάφους HRDEM, που κατασκευάστηκαν για την περιοχή.

Ειδικότερα, έχοντας ως στόχο την ενίσχυση της οπτικής ερμηνείας των ψηφιακών αυτών μοντέλων της περιοχής, δηλαδή του μοντέλου του 2007 (ALS) και των μοντέλων 2018 – 2020 (UAV), κατασκευάστηκαν για το καθένα, δέκα θεματικά επίπεδα δεδομένων (Layers). Τα επίπεδα αυτά αποτελούν ένα σύνολο μετρητικών δεδομένων συναρτήσει του υψομέτρου που μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν και να ερμηνευθούν για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών μετακινήσεων του εδάφους αλλά και για την αποτύπωση της κατολίσθησης.

Κάθε ένα από τα θεματικά επίπεδα που κατασκευάστηκαν παρείχε διαφορετικές ενδείξεις σχετικά με τη φύση της τοπογραφίας και για αυτό τον λόγο η παρατήρηση κάθε επιπέδου μεμονωμένα ήταν περίπλοκη και χρονοβόρα, ενώ η σύνδεση τους με τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων δεν ήταν άμεσα προφανής.

Συνακόλουθα, προέκυψε η ανάγκη για τον μετασχηματισμό των μεμονωμένων θεματικών επιπέδων σε μια σύνθεση πολλαπλών στρωμάτων που θα παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία και θα επιτρέπει τον εντοπισμό διαφορετικών μορφολογικών ενδείξεων κατολισθήσεων.

Ο μετασχηματισμός αυτός επιτεύχθηκε δια της εφαρμογής της μεθόδου «Ανάλυσης Κύριων Συστατικών» ή «Principal Components Analysis (PCA)», η οποία εκτελέστηκε χρήση της εντολής "**Principal Components**" του λογισμικού ArcMap. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου PCA, ένα σύνολο αλληλένδετων μεταβλητών (αρχικά επίπεδα δεδομένων) μετασχηματίζεται με ορθογωνικό γραμμικό τρόπο σε ένα νέο σύνολο συσχετισμένων ή μη συσχετιζόμενων μεταβλητών, που ονομάζονται «Κύρια Συστατικά» (Principal Components).

Η εφαρμογή της μεθόδου στο ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας, επέτρεψε την απομείωση των αρχικών αλληλένδετων μεταβλητών (αρχικά επίπεδα δεδομένων) και τον εν συνεχεία μετασχηματισμό τους σε ένα νέο σύνολο δεδομένων με την μορφή εικόνας (Raster), χαρακτηριζόμενης από την σύνθεση των τριών βασικών χρωμάτων: Κόκκινο – Πράσινο – Μπλε (R – G – B) ως αποτέλεσμα πολύστρωματικής σύνθεσης τριών Κύριων Συστατικών, αποτελούμενων κατά μέσο όρο από το 90% της συνολικής διακύμανσης της διαθέσιμης πληροφορίας των μεμονωμένων θεματικών επιπέδων.

Κατόπιν εφαρμογής της μεθόδου PCA, επί των ψηφιακών μοντέλων εδάφους του έτους 2007 (ALS) και του έτους 2019 (UAV), από κάθε μια νέα ενισχυμένη εικόνα που προκύπτει για το εκάστοτε εξεταζόμενο ψηφιακό μοντέλο, παρέχονται σημαντικές πληροφορίες τόσο για την αναγνώριση και οριοθέτηση κατολισθητικών φαινομένων, όσο και για την χαρτογράφηση της ευρύτερης μορφολογίας του εδάφους.

7.1.3. Συμπεράσματα για: τα αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου επαυξημένης ανάλυσης και την τελική οριοθέτηση της κατολίσθησης

Η ανάπτυξη και εφαρμογή της ως άνω μεθοδολογίας επέτρεψε την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας των πλαγιών, και την λεπτομερή αναγνώριση μορφολογικών ενδείξεων κατολισθήσεων, που σε συνδυασμό με τις επιτόπου παρατηρήσεις και επισημάνσεις στο πεδίο, πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου, οδήγησε στην τελική οριοθέτηση των κατολισθήσεων της περιοχής, και την αποτύπωση τους σε όλους τους θεματικούς χάρτες και τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν για αυτήν.

Βάσει των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της μεθόδου PCA για το ψηφιακό μοντέλο του 2007 (ALS), επιτεύχθηκε η αποτύπωση των ορίων της ευρύτερης κατολίσθησης και των επιμέρους κατολισθήσεων που την απαρτίζουν, καθώς και ο προσδιορισμός επιφανειών κατακρημνίσεων αλλά και τοπικών, μικρότερων κατολισθήσεων. Αντίθετα τα αποτελέσματα για το ψηφιακό μοντέλο του 2019 (UAV) φαίνεται να επηρεάζονται από την βλάστηση της περιοχής και ο εντοπισμός σαφών μορφολογικών χαρακτηριστικών δεν ήταν εύκολος. Η ανάλυση 1 x 1 [m/ pixel] του εν λόγω ψηφιακού μοντέλου, παρότι είναι μεγαλύτερη, φαίνεται να παρουσιάζει περιορισμένο βαθμό απόδοσης, σε σχέση με την αναγνώριση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, από την εφαρμογή της μεθόδου στα δύο αυτά εξεταζόμενα μοντέλα προκύπτει πως η μέθοδος PCA εφαρμόζεται καλύτερα για το μικρότερης ανάλυσης, 5 x 5 [m/ pixel], ψηφιακό μοντέλο του 2007 (ALS). Η ανάλυση 1 x 1 [m/ pixel] του ψηφιακού μοντέλου του 2019 (UAV), παρότι είναι μεγαλύτερη, φαίνεται να παρουσιάζει έναν περιορισμένο βαθμό απόδοσης, σε σχέση με την αναγνώριση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής και αυτό γιατί τα σημάδια των κατολισθήσεων πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, κατά την διερεύνηση τους σε μεγάλη κλίμακα, όπως αυτή με την χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων UAV, δεν είναι άμεσα προφανή.

7.1.4. Συμπεράσματα για: τον μηχανισμό αστοχίας του εδάφους στην περιοχή

Ο ευρύτερος χώρος, της κατολίσθησης, βρίσκεται υπό την συνεχή επίδραση δυναμικών παραγόντων αποσταθεροποίησης, τόσο από διαδικασίες όπως η διάβρωση και αποσάθρωση που δρουν στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και από την περιστασιακή ενεργοποίηση της κατολίσθησης.

Η κατολίσθηση δεν φαίνεται να έχει ανακτήσει μια έστω υποβαθμισμένη, μακροχρόνια ισορροπία αλλά αντίθετα κατά καιρούς και ιδιαίτερα σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων εμφανίζει περεταίρω αστάθειες. Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης της, εμφανίζονται σποραδικά ή και εποχιακά και έχουν σταδιακά αποτελέσματα, και για αυτό τον λόγο ο προσδιορισμός ενός σαφούς μηχανισμού αστοχίας είναι δύσκολος.

Ο πιθανότερος κύριος μηχανισμός αστοχίας, που ενεργεί στην ευρύτερη περιοχή, βάσει της γεωμετρίας της πλαγιάς, των ενδείξεων της αρχικής κλίσης της, αλλά και από την εναπόθεση υλικών κατολίσθησης στα κατώτερα τμήματα της, εκτιμάται ως ο μηχανισμός της προοδευτικής περιστροφικής ολίσθησης (Progressive Rotational Slide).

Ο μηχανισμός αυτός με την πάροδο του χρόνου μεταβαίνει από επιφανειακές κυρίως διαδοχικές ολισθήσεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης, προοδευτικού τύπου στα ανώτερα και οπισθοδρομικού τύπου, στα κατώτερα τμήματα, σε μια βαθύτερη, αργή, βαθιά ολίσθηση της βάσης του ψαμμιτικού υποβάθρου πάνω στο πιο ιλυολιθικό υπόβαθρο, σε όλη την έκταση της κατολίσθησης.

Παράλληλα, μικρότερες τοπικές αστοχίες εντός του ευρύτερου κατολισθητικού χώρου, αναφορικά: επιφανειακές ολισθήσεις μικρότερης κλίμακας, ροές εδαφών και κορημάτων, προϊόντα από βραχοκαταπτώσεις στα πιο σταθερά τμήματα της, ακόμα και καθιζήσεις του εδάφους εξαιτίας της απότομης πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, συμβάλλουν στην περεταίρω ενεργοποίηση του φαινομένου, αναδιαμορφώνοντας την γεωμετρία της πλαγιάς και φορτίζοντας με πρόσθετο υλικό την κατολίσθηση.

Τα παραπάνω επαληθεύτηκαν σε έναν αποδεκτό βαθμό, από την εκτέλεση τριών ενδεικτικών διερευνητικών αναλύσεων ευστάθειας έναντι ολίσθησης, με την μέθοδο οριακής ισορροπίας (ULS), τόσο σε στατικές συνθήκες (χωρίς σεισμό), όσο και σε δυναμικές συνθήκες σεισμού, που είχαν ως στόχο την προσομοίωση του μηχανισμού της ευρύτερης κατολίσθησης και την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας των κύκλων ολίσθησης που εκτιμήθηκαν για αυτήν.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών, έδειξαν πως το μεγαλύτερο ποσοστό των αστοχιών συμβαίνει επιφανειακά από 1 έως 8 m, ενώ για βαθύτερα τμήματα, έως και τα 20 m, προκύπτουν με βεβαιότητα συνθήκες οριακής ευστάθειας. Αντίθετα, για να διασταυρωθεί αν πράγματι στην ευρύτερη κατολίσθηση συμβαίνουν βαθύτερες των 20 m ολισθήσεις, απαιτείται επιπλέον έρευνα και αναλυτικότερη διερεύνηση του βαθύτερου υποβάθρου.

Παρόλα αυτά, οι αναλύσεις που επιτελέστηκαν για την εκτίμηση της ευστάθειας της κατολίσθησης έναντι ολίσθησης, με την μέθοδο ULS, έχουν ενδεικτικό χαρακτήρα και η προσέγγιση του προβλήματος με το παροντικό σύνολο δεδομένων καθίσταται ιδιαίτερα ικανοποιητική καθώς αποτυπώνει με ακρίβεια το μεγαλύτερο σύνολο των κατολισθητικών συνθηκών της περιοχής.

7.1.5. Συμπεράσματα για: την συχνότητα εμφάνισης των αστοχιών

Στα πλαίσια διερεύνησης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής μελέτης, εκτελέστηκε παράλληλα αριθμός ορισμένων συγκριτικών αναλύσεων για την ίδια περιοχή, με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σχέση με την ενεργότητα και εξέλιξη των φαινομένων. Οι αναλύσεις αυτές συνοψίζονται αφενός, στην ποιοτική οπτική ερμηνεία δορυφορικών εικόνων της περιοχής αναφερόμενες σε ένα χρονικό εννέα ετών (2010 – 2019), και αφετέρου στην αυτοματοποιημένη εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων, διά της εφαρμογής υπολογιστικών πράξεων, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, για την παραγωγή ενός Ψηφιακού μοντέλου διαφοράς DoD (DEM of Difference), σε σχέση με τις διαχρονικές αλλαγές της μορφολογίας και τις μετατοπίσεις του εδάφους (Change Detection).

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων, εκτιμάται πως η ευρύτερη σύνθετη κατολίσθηση βρίσκεται στο στάδιο περιστασιακής ενεργοποίησης της, με πιο ενεργό το δυτικό κυρίως τμήμα της το οποίο ενεργοποιείται τόσο από μια πιθανή εκδήλωση αργής βαθιάς ολίσθησης της βάσης της, σε όλη την έκταση της, όσο και από επιφανειακές διαδοχικές ολισθήσεις, εντός του πιο αποδιοργανωμένου φλύσχη και των υλικών κατολίσθησης.

Παράλληλα, διά των αναλύσεων αυτών, επαληθεύτηκαν οι αρχικές εκτιμήσεις που έγιναν στο πεδίο σχετικές με ενδείξεις ενεργότητας στο δυτικό κατώτερο τμήμα της κατολίσθησης, το οποίο απομονώθηκε και οριοθετήθηκε ως μια ξεχωριστή κατολίσθηση, ενώ παράλληλα εντοπίστηκαν οι ζώνες απομείωσης και συσσώρευσης των υλικών της επιφανείας του εδάφους, επαληθεύοντας σε έναν αποδεκτό βαθμό τον διαχωρισμό της ευρύτερης κατολίσθησης στα επιμέρους χαρακτηριστικά τμήματα της.

Βέβαια, τα αποτελέσματα της οπτικής διερεύνησης και σύγκρισης της μορφολογίας του εδάφους, από δορυφορικές εικόνες της περιοχής, δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθώς δεν εντοπίστηκαν ιδιαίτερα εμφανείς ενδείξεις ενεργότητας για τον χαρακτηρισμό της εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση αυτή αποτελεί γρήγορη και πολύτιμη τεχνική εντοπισμού νέων κατολισθήσεων, και για τον λόγο αυτό δεν παραλήφθηκε από το ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Συμπερασματικά, για τον ευρύτερο κατολισθητικό χώρο της εξεταζόμενης περιοχής δεν εντοπίζεται ένα σταθερό μοτίβο εμφάνισης αστοχιών καθώς πολλά τμήματα του δεν είναι αμέσως προφανή ως προς την πιθανή ενεργοποίησή τους, και η αστοχία του εδάφους, εντός αυτού του χώρου δεν συμβαίνει σε τακτική βάση.

Παρόλα αυτά, στο δυτικό τμήμα του εν λόγω χώρου υπάρχει μια επιμέρους πλήρως ενεργή κατολίσθηση, χαρακτηριζόμενη από έντονες εκδηλώσεις εδαφικών ασταθειών, επιφανειακές ολισθήσεις, εδαφικούς ερπυσμούς και ροές κορημάτων, μέχρι και λασποροές στα κατώτερα τμήματα της, η οποία φαίνεται να είναι υπεύθυνη για την ευρύτερη ενεργοποίηση του φαινομένου.

7.1.6. Συμπεράσματα για: τους παράγοντες που δρουν στην περιοχή και είναι υπεύθυνοι για την γένεση κατολισθητικών φαινομένων

Οι δυσμενείς παράγοντες που δρουν και είναι υπεύθυνοι για την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή μελέτης είναι πολλοί. Οι σημαντικότεροι εξ αυτούς παρατίθενται παρακάτω:

- 1) Το ιδιαίτερα ορεινό και απότομο ανάγλυφο της περιοχής, που χαρακτηρίζεται από ισχυρές και απότομες κλίσεις φυσικών πρανών.
- 2) Οι συχνές βροχοπτώσεις – χιονοπτώσεις και οι χαμηλές θερμοκρασίες, που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή και έχουν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλης χειμαρρώδους επιφανειακής απορροής, τον διαποτισμό μέχρι και κορεσμό, των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών και της επιφανειακής αποσαθρωμένης έως και αποδιοργανωμένης ζώνης του γεωλογικού υποβάθρου.
- 3) Η επιφανειακή διάβρωση, που εμφανίζεται είναι ιδιαίτερα ισχυρή κατά μήκος της κοίτης των χειμάρρων της περιοχής, και σε περιοχές με περιορισμένη βλάστηση και προκαλεί την υποσκαφή του υπεδάφους και την εκδήλωση ασταθειών.
- 4) Η έντονη τεκτονική καταπόνηση του γεωλογικού υποβάθρου, από την δράση της πτυχωσιγενούς τεκτονικής της Αλπικής Ορογένεσης, που προκάλεσε την πτύχωση και παραμόρφωση του φλυσχικού υποβάθρου. Λόγω της συμμετοχής τόσο των άκαμπτων (ψαμμίτες) όσο και των εύκαμπτων (ιλυόλιθοι, αργιλικόι σχιστόλιθοι) μελών του φλύσχη, που παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά έναντι των πτυχωσιγενών δυνάμεων προκλήθηκαν τοπικά έντονες δυσαρμονικές μικροπτυχώσεις, διατμήσεις έως και μυλωνιτώσεις.
- 5) Ο έντονος κερματισμός, από την ρηξιγενή νεοτεκτονική που ακολούθησε, και η έντονη αποσάθρωση της επιφανειακής ζώνης του φλυσχικού υποβάθρου, το οποίο στο μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων, αλλά και από ιλυολίθους σε εναλλαγές με αργιλικούς σχιστόλιθους, συνθέτουν μια ασθενή βραχώμαζα, με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, επιρρεπή στην εκδήλωση αστοχιών.
- 6) Η ύπαρξη χαλαρών επιφανειακών σχηματισμών, όπως κορήματα και αποσαθρώματα, τα οποία λόγω του απότομου αναγλύφου και του διαποτισμού τους από επιφανειακά ύδατα, βρίσκονται σε οριακή κατάσταση ευστάθειας ή ακόμη και έρπουν.
- 7) Η ύπαρξη παλαιών κατολισθήσεων οι οποίες εύκολα μπορούν να επαναδραστηριοποιηθούν.

- 8) Η παρουσία πολλών επιμέρους μικρότερης κλίμακας ενεργών κατολισθήσεων, που αναδιαμορφώνουν την γεωμετρία της πλαγιάς και φορτίζουν την περιοχή με πρόσθετο υλικό συμβάλλοντας στην ενεργοποίηση ολόκληρου του κατολισθητικού φαινομένου.

7.2. Ενδεικτικά μέτρα σταθεροποίησης και ελέγχου της κατολίσθησης

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες και έχοντας μια πλήρη εικόνα της γεωμετρίας και των ιδιαίτερων δυσμενών συνθηκών της κατολίσθησης, προτείνονται ενδεικτικά κάποια πιθανά μέτρα σταθεροποίησης και ελέγχου της κατολίσθησης, έτσι ώστε σε μελλοντικό χρόνο, να αποφευχθούν οι κίνδυνοι, τόσο από νέες εμφανίσεις κίνησης, όσο και από μια επικείμενη ενεργοποίηση ολόκληρης της ασταθούς περιοχής, και να κατασκευαστούν στοχευμένα έργα υποδομής για την αποτροπή των εκάστοτε καταστροφών.

7.2.1. Για το σύνολο της κατολίσθησης

Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και την γεωμετρία της εξεταζόμενης κατολίσθησης, η περίπτωση επέμβασης μέσω εκσκαφών για την δημιουργία ηπιότερου αναγλύφου και τον μετριασμό των κινητήριων δυνάμεων είναι πρακτικώς αδύνατη σε όλη την έκταση της κατολίσθησης.

Συνεπώς η προσπάθεια σταθεροποίησης της, θα πρέπει να περιοριστεί στην αύξηση των δυνάμεων αντίστασης. Ο κυριότερος τρόπος για την επίτευξη αυτού του σκοπού, είναι με την κατασκευή μεγάλης κλίμακας στοχευμένων έργων που αποσκοπούν στην αύξηση της αντοχής του εδάφους, μέσω μείωσης της πίεσης πόρων και ελέγχου των επιφανειακών και υπογείων υδάτων.

Τα έργα αυτά θα πρέπει να αποσκοπούν:

- 1) Στην απομάκρυνση των επιφανειακών υδάτων, μέσω της εκτροπής τους από θέσεις εντός της ασταθούς περιοχής σε ρέματα πιο σταθερών περιοχών.
- 2) Αποστράγγιση των υπογείων υδάτων των ασταθών ζωνών, μέσω στραγγιστικών τάφρων (ακόμη και στραγγιστικών σηράγγων), στραγγιστηρίων, καθώς και μέσω οριζοντίων γεωτρήσεων.

Με αυτό τον τρόπο τα αποστραγγιζόμενα ύδατα θα καταλήγουν με ελεγχόμενο τρόπο προς τα κατάντη της κατολίσθησης, χωρίς όμως να επηρεάζουν μέσω της διάβρωσης και της διήθησης την ισορροπία του εδάφους.

Βέβαια, επειδή το μήκος εναπόθεσης των κατολισθημένων υλικών είναι πολύ μεγάλο (της τάξης 2,5 km), καθώς και η υψομετρική διαφορά από τα ανάντη στα κατάντη (~1200 m), ένα πιθανό σύστημα στράγγισης, όπως η κατασκευή στραγγιστικών σηράγγων, θα πρέπει να αποτελείται από διαδοχικά τμήματα έτσι ώστε να συλλαμβάνονται τα υπόγεια νερά από όλα τα υψόμετρα, προκειμένου το σύστημα να είναι αποτελεσματικό.

Φυσικά όλα τα παραπάνω προϋποθέτουν μια πιο εμπειριστατωμένη γεωτεχνική και υδρογεωλογική έρευνα καθώς και εξειδικευμένες μελέτες επί των αποστραγγιστικών έργων που θα επιλεγούν να κατασκευαστούν.

7.2.2. Παρακολούθηση της κατολίσθησης

Ιδιαίτερα χρήσιμη για την αποφυγή μεγάλης κλίμακας καταστροφών, είναι η επί μονίμου βάσεως περιοδική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της κατολίσθησης μέσω μετρήσεων της πίεσης των πόρων, από πιεζόμετρα, αλλά και ελέγχου των μετακινήσεων από μετρήσεις αποκλισιομέτρων.

Επισημαίνεται ότι στην περιοχή κατά το στάδιο της γεωτεχνικής έρευνας το έτος 1999, τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης (πιεζόμετρα και κλισιόμετρα) σε όλες τις γεωτρήσεις, καθώς και αποκλισιόμετρα επί των γεωτρήσεων Γ1 – Γ3, για της οποίες ελήφθησαν μετρήσεις αναφοράς. Ωστόσο, εξαιτίας του περιορισμένου χρόνου παρακολούθησης των μετρήσεων των αποκλισιομέτρων δεν εντοπίστηκαν χαρακτηριστικές μετακινήσεις του εδάφους, ενώ με την πάροδο του χρόνου η συστηματική παρακολούθηση των μετρήσεων εγκαταλείφθηκε.

Επί του παρόντος προτείνεται ο καθαρισμός όλων των υπάρχοντων γεωτρήσεων, η τοποθέτηση νέων οργάνων παρακολούθησης εντός αυτών (πιεζόμετρα, κλισιόμετρα και αποκλισιόμετρα) και η συστηματική παρακολούθηση και καταγραφή των αποτελεσμάτων των εν λόγω οργάνων, μέριμνα της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας και του Δήμου Μακρακώμης.



Εικόνα 7.1 Υφιστάμενη κατάσταση σωλήνων αποκλισιομέτρων εντός των γεωτρήσεων.

Παράλληλα, η παρακολούθηση της επιφανείας του εδάφους, με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης, αντίστοιχες με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική διατριβή, για την ανίχνευση των μορφολογικών αλλαγών (Change Detection), και την απογραφή νέων κατολισθήσεων, κατά την διαχρονική εξέλιξη του φαινομένου, αποτελεί μια φθηνή και αποτελεσματική λύση για την παρακολούθηση της κατολίσθησης, και γι' αυτόν τον λόγο προτείνεται να εκτελούνται τέτοιου είδους έρευνες σε τακτά, μικρής περιοδικότητας, χρονικά διαστήματα.

7.2.3. Τοπικές επιφανειακές επεμβάσεις

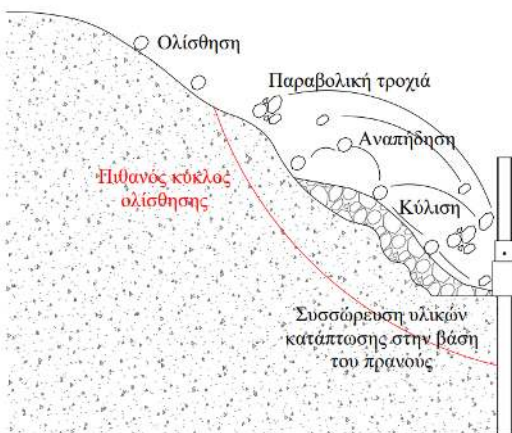
Όσον αφορά τις περιοχές ορυγμάτων, επί των δύο οδικών δικτύων που διέρχονται εντός της κατολισθαίνουσας μάζας, ήτοι νέο και παλιό οδικό δίκτυο Λαμίας – Καρπενησίου, τα υλικά κατάπτωσης τόσο από τις επιφανειακές αστοχίες του εδάφους ανάντη των ορυγμάτων, όσο και από επιτόπου αστοχίες από ολισθήσεις του εδάφους πάνω στα ορύγματα, συσσωρεύονται επί του οδοστρώματος των παρακείμενων οδών λόγω έλλειψης ικανού ερείσματος για την απόθεσή τους. Το φαινόμενο εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για την ασφάλεια των κινούμενων οχημάτων επί των οδών αυτών. Οι συνεχείς καθαρισμοί δεν λύνουν το πρόβλημα και ο κίνδυνος για σοβαρά

ατυχήματα παραμένει και μεγιστοποιείται κατά τις χειμερινές περιόδους, από την αντίστοιχη αύξηση των διαβρωτικών παραγόντων κατά τις περιόδους αυτές, σύμφωνα με μαρτυρίες των κατοίκων, του οικισμού Τυμφρηστού, που συλλέχθηκαν και καταγράφηκαν κατά την περίοδο μελέτης.

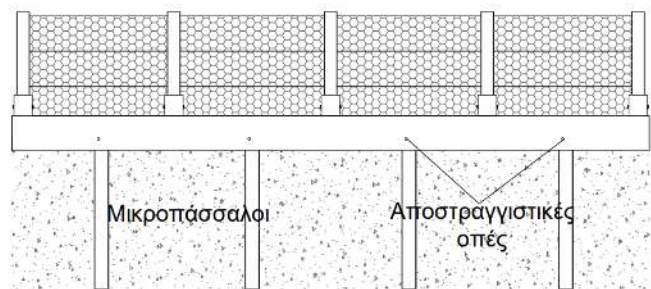
Για τις εν λόγω θέσεις και με γνώμονα την ασφάλεια των διερχομένων από τα σημεία αυτά, είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων για την προστασία από ατυχηματικά γεγονότα με βασικό κριτήριο σχεδιασμού την διάρκεια της παρεχόμενης προστασίας σε βάθος χρόνου δηλαδή την δυνατότητα συντήρησης και επανάχρησης των έργων προστασίας μετά από κάθε εκδηλούμενη κατάπτωση. Η έλλειψη επαρκούς χώρου ερείσματος στο πόδα του πρανούς και η άμεση γειτνίαση με λωρίδα κυκλοφορίας της οδού αποτελεί την βασική δυσκολία σχεδιασμού μιας κλασσικής λύσης της μορφής τοίχου αντιστήριξης, αφού δεν υπάρχει χώρος για την κατασκευή του απαιτούμενου θεμελίου.

Ενδεικτικά λοιπόν για την αντιμετώπιση των ως άνω προβλημάτων προτείνεται η κατασκευή πετάσματος οπλισμένου σκυροδέματος μετά φράχτη ανάσχεσης καταπτώσεων. Η κατασκευή αυτή αποτελείται από τοίχιο οπλισμένου σκυροδέματος, που θεμελιώνεται επί του εδάφους με μικροπασσάλους, πάνω στον οποίο τοποθετούνται δοκοί, επί των οποίων τοποθετείται ο φράχτης ανάσχεσης.

ΤΟΜΗ:



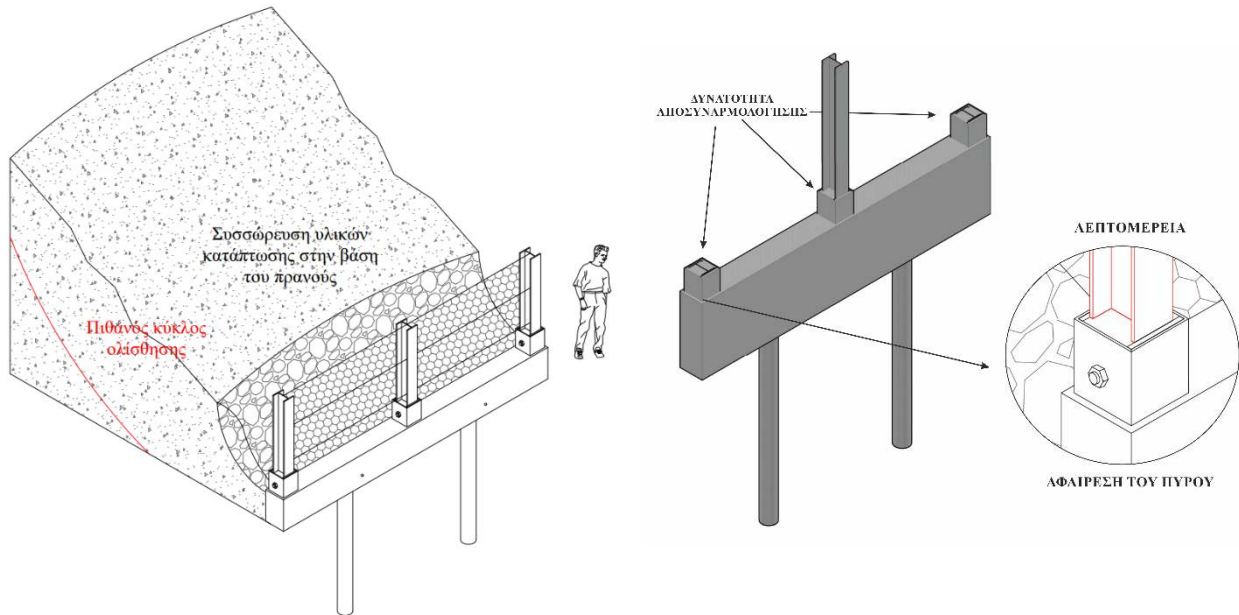
ΠΡΟΣΟΨΗ:



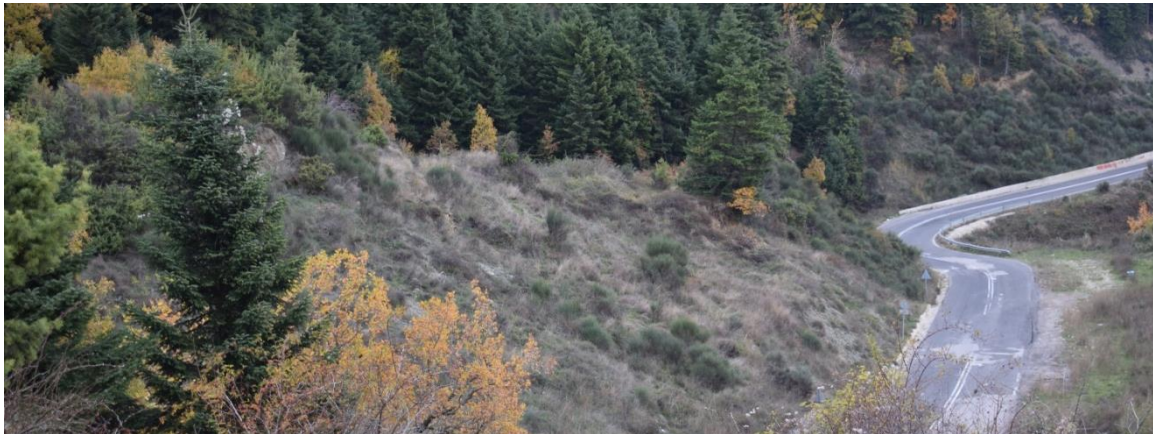
Εικόνα 7.2 Ενδεικτική τομή και κάτοψη προτεινόμενης λύσης.

Με την προτεινόμενη αυτή λύση επιτυγχάνονται:

- 1) Θεμελίωση απευθείας επί μικροπασσάλων περιορίζοντας τον χώρο κατασκευής επί του υφιστάμενου ερείσματος. Η χρήση των μικροπασσάλων, εκτός από την θεμελίωση του τεχνικού, μπορούν να ευνοήσουν σε έναν βαθμό και στην σταθεροποίηση της βάσης του ορύγματος, καθώς, ανάλογα με την διάταξη και διαστασιολόγησή τους, μπορούν να αντιτίθενται έναντι επιφανειακών και λίγο βαθύτερων ολισθήσεων, μετριάζοντας κατά αυτόν τον τρόπο τις επιπτώσεις από την δράση αυτών των επιφανειακών ενεργών ολισθήσεων, σε κάποιον βαθμό.
- 2) Με την κατασκευή του φράχτη ανάσχεσης καταπτώσεων επιτυγχάνεται η προστασία των διερχομένων επί της οδού οχημάτων.
- 3) Η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης, καθαρισμού και επανατοποθέτησης του φράχτη, επιτυγχάνει, για πολλαπλούς θεωρητικά κύκλους, την ομαλή λειτουργία του τεχνικού.



Εικόνα 7.3 Τρισδιάστατο προσομοίωμα προτεινόμενης λύσης και κατασκευαστικές λεπτομέρειες.



Εικόνα 7.4 Ενδεικτική περιοχή εφαρμογής της εν λόγω λύσης επί του νέο οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου, εντός του πιο ενεργού τμήματος της κύριας κατολίσθησης κοντά στο δυτικό όριο της ευρύτερης σύνθετης κατολίσθησης.

Για την διαστασιολόγηση της εν λόγω λύσης και τον προσδιορισμό του βάθους των μικροπασσάλων απαιτείται η γνώση της γεωμετρίας του υφιστάμενου ορύγματος και η εκτίμηση των κατολισθητικών κινήσεων που λαμβάνουν χώρα τόσο επιφανειακά, όσο και βαθύτερα κάτω από την βάση του ορύγματος. Απαραίτητος, μετά την διαστασιολόγηση, κρίνεται ο έλεγχος ευστάθειας του τεχνικού έναντι ολίσθησης και ο υπολογισμός των δυναμικών, ενεργητικών και παθητικών ωθήσεων που θα δράσουν πάνω του.

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις και καθιζήσεις του οδοστρώματος, σε τοπικές θέσεις επί των οδών της περιοχής, που οφείλονται από ολισθητικές έως ερπυστικές κινήσεις του εδάφους, οι συνεχείς επισκευές και ασφαλτοστρώσεις των οδών δεν λύνουν το πρόβλημα. Μια ενδεικτική λύση είναι η εξυγίανση των τμημάτων της οδού, διά οπλισμένων διατρημάτων με ενέματα ειδικής σύνθεσης, και την χρήση γεωπλεγμάτων και γαιώδুক্তων στις κεφαλές των διατρημάτων, και η ανακατασκευή της στρώσης κυκλοφορίας της οδού. Για την ακριβή ερμηνεία του φαινομένου και την διαστασιολόγηση της παρούσας λύσης απαιτείται ειδική γεωτεχνική έρευνα, δια δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών στις περιοχές που παρατηρούνται αυτά τα φαινόμενα.



Εικόνα 7.5 Ρωγμές και αστοχίες επί του οδοστρώματος από την δράση κατολισθητικών φαινομένων και καθιζήσεων, σε περιοχή εντός της κύριας κατολίσθησης, επί του παλαιού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου.

Τέλος, αναφορικά με τα ήδη υφιστάμενα έργα υποδομής επί των οδών της περιοχής, ήτοι μεμονωμένοι τοίχοι αντιστήριξης με λιθοπληρωμένα συρματοκιβώτια (σαρζανέτια) και τοιχία σκυροδέματος, κατά την επιτόπου αυτοψία στην περιοχή παρατηρήθηκαν αστοχίες επί των έργων αυτών. Για αυτό τον λόγο προτείνεται η επιδιόρθωση και αποκατάσταση των υφιστάμενων αυτών έργων καθώς και ο τακτικός έλεγχος τους από φορείς του Δήμου Μακρακώμης, έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη και ομαλή λειτουργία τους στο εγγύς και απώτερο μέλλον.



Εικόνα 7.6 Ενδεικτικές αστοχίες επί των ήδη υφιστάμενων έργων υποδομής. **1)** Αστοχίες και παραμορφώσεις σε τεχνικό αντιστήριξης με σαρζανέτια, σε περιοχή ρέματος, εντός της κύριας κατολίσθησης, επί του παλαιού οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου. **2)** Αστοχίες συρματοκυβωτίων επί λιθόρριπτου τοίχου αντιστήριξης σε περιοχή εντός της κύριας κατολίσθησης, επί του παλαιού οδικού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου. **3)** Μετατοπισμένα τοιχία σκυροδέματος σε περιοχή ανάντη του παλαιού δικτύου Λαμίας – Καρπενησίου, επί της τοπικής οδού, στα ανώτερα τμήματα της κύριας κατολίσθησης.

7.2.4. Πιθανή διέλευση νέου οδικού δικτύου

Σε περίπτωση διέλευσης ενός πιθανού, νέου οδικού δικτύου από την περιοχή μελέτης, με χάραξη που θα ξεκινάει από την σήραγγα Τυμφρηστού και θα διέρχεται, πιθανώς μέσω κατασκευής γέφυρας ή και όχι, από τα κατώτερα τμήματα της κατολίσθησης (περιοχή του πόδα) και θα συνεχίζει μέχρι την Λαμία, παρακάμπτοντας τον οικισμό Τυμφρηστό λόγω του μεγάλου υψόμετρου του, της κακής βατότητας και των πολλαπλών ελιγμών του υφιστάμενου δρόμου της περιοχής, θα πρέπει να υπάρξει η δέουσα μέριμνα, τόσο ερευνητικά και μελετητικά όσο και κατασκευαστικά, έτσι ώστε να αποκλειστεί η πιθανή προώθηση (ολίσθηση) ολόκληρης της κατολίσθησης προς τα κατάντη και η σίγουρη επιφανειακή προχώρηση των ολισθαινόντων υλικών (που μπορούν μάλιστα να λάβουν και την μορφή λασποροής).

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση διέλευσης μέσω κατασκευής γέφυρας, λόγω των πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων του φλυσχικού υποβάθρου της περιοχής (που εκτιμάται μάλλον απαγορευτικό για την θεμελίωση βάθρων γέφυρας, με πιθανή εξαίρεση τις πιο σταθερές περιοχές των ράχων στην περιοχή του πόδα της κατολίσθησης), θα πρέπει να εκτελεστεί μια ενδελεχής γεωτεχνική έρευνα, διά εκτέλεσης δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών, με στόχο την λεπτομερή ανάλυση και τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του υποβάθρου έναντι θεμελίωσης βάθρων.

Η οποιαδήποτε πιθανή νέα διέλευση δρόμου, από την εξεταζόμενη προβληματική αυτή περιοχή, συνιστάται να αποφευχθεί, διαφορετικά θα πρέπει οπωσδήποτε να προηγηθούν η κατασκευή στραγγιστικών έργων, καθώς και τοπικών σταθεροποιητικών ειδικών κατασκευών, που θα εξασφαλίζουν διά της λειτουργίας τους την ευστάθεια της περιοχής, παρέχοντας την ελάχιστη απαιτούμενη ασφάλεια για την διέλευση του δρόμου. Σε κάθε περίπτωση η ανάγκη παρακολούθησης της κατολίσθησης, για ένα τέτοιο εγχείρημα (κατασκευής νέου οδικού δικτύου) κρίνεται πλέον απαραίτητη, τόσο μέσω της επιφανειακής παρακολούθησης, με μεθόδους και τεχνικές Τηλεπισκόπησης, όσο και από την ενόργανη παρακολούθηση του υπεδάφους.

7.2.5. Πρόληψη και περιβαλλοντική διαχείριση κατολισθήσεων

Για την ορθή διαχείριση των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής και ειδικότερα όταν τέτοιου είδους φαινόμενα εμφανίζονται και ενεργοποιούνται ως συνέπειες φυσικών καταστροφών και θεομηνιών, δεδομένης της περιόδου εντατικής έξαρσης αντίστοιχων φαινομένων, λόγω περιοδικών γεωλογικών κύκλων, κλιματικών αλλαγών και άλλων παραγόντων, που γίνονται αισθητά στον σημερινό, εξοπλισμένο με τεχνολογία αιχμής κόσμο μας, απαιτείται ειδικός στρατηγικός σχεδιασμός που θα στοχεύει στον μετριασμό του κινδύνου που εγκυμονούν, για τον ανθρώπινο πολιτισμό, τέτοιου είδους φαινόμενα, πάντα με γνώμονα το κοινωνικό και πλανητικό όφελος.

Υπό αυτό το στρατηγικό πρίσμα οι τακτικές που ενδείκνυται να ακολουθηθούν, θα πρέπει να εφαρμόζουν συγκεκριμένα μέτρα που είτε θα στοχεύουν στην τροποποίηση των συνθηκών κλίσης της κατολίσθησης για τη μείωση της αστάθειας και τον περιορισμό της καταστροφικής της ικανότητας, είτε στην αποφυγή των βλαβερών επιπτώσεων της κατολίσθησης χωρίς παρεμβολή στην εμφάνισή της. Αναμφίβολα, στα πιθανά μέτρα μετριασμού της κατολίσθησης μπορούν και οφείλουν να περιλαμβάνονται καλοσχεδιασμένα εξειδικευμένα τεχνικά έργα ή εντατικές χωματουργικές εργασίες. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί πως τέτοιες μέθοδοι σταθεροποίησης και προστασίας είναι συχνά δαπανηρές και μπορεί να προκαλέσουν μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στο οικοσύστημα της περιοχής. Παράλληλα, δεν μπορούν πάντα να εγγυηθούν την πλήρη προστασία, ενώ απαιτούν προσεκτικό μηχανολογικό σχεδιασμό και κατάλληλη συντήρηση.

Για τους λόγους αυτούς, μεταξύ όλων των πιθανών επιλογών, η αποφυγή κατασκευής εγκαταστάσεων και υποδομών σε περιοχές που απειλούνται από κατολισθήσεις, όπως η περιοχή μελέτης, είναι η καλύτερη εναλλακτική. Βέβαια, σε περιπτώσεις που η περιοχή δεν μπορεί να αποφευχθεί και λάβει χώρα αποδοχή του ευρύτερου κινδύνου, τότε κρίνεται απαραίτητη τουλάχιστον η παρακολούθηση του φαινομένου, με παράλληλη χρήση παραδοσιακών γεωτεχνικών εργαλείων και εργαλείων της επιστήμης της πληροφορικής για την υποστήριξη των ενδιαφερομένων στη διαχείριση κινδύνου και στις σχεδιαζόμενες και υλοποιούμενες πολιτικές μετριασμού του φαινομένου, και η συνεργασία μεταξύ επιστημόνων της γης, διαχειριστών κινδύνου και της υπεύθυνης πολιτικής προστασίας της περιοχής έτσι ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος στρατηγικός σχεδιασμός έναντι φυσικών κινδύνων όπως οι κατολισθήσεις και οι συνέπειες τους στο κοινωνικό και φυσικό περιβάλλον.

Τέλος, είναι αναγκαία η συνεργασία των εποπτικών, επιστημονικών αρχών με τις τοπικές διοικητικές αρχές για τον σχεδιασμό και την εγκαθίδρυση μηχανισμών αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης που δύναται να προκύψουν στην περιοχή, ιδιαίτερα στα σημεία συνάντησης του φυσικού περιβάλλοντος με το οδικό δίκτυο και ακόμη περισσότερο με τις πλησιέστερες κατοικημένες περιοχές.

7.3. Προτάσεις νέας έρευνας

Η συστηματική παρακολούθηση της κατολίσθησης Τυμφρηστού μπορεί να προσφέρει πολύτιμες ενδείξεις και πληρέστερη εικόνα για τον μηχανισμό και την δυναμική εξέλιξη του φαινομένου. Η ταχεία και ακριβής ταυτοποίηση νέων κατολισθητικών κινήσεων καθώς και η συνεχής άντληση σχετικών πληροφοριών, αποτελούν τη βάση για την εκτίμηση και ανακούφιση των πιθανών επακόλουθων καταστροφών. Η δυνατότητα περισυλλογής ποσοτικών δεδομένων σχετικά με την μορφολογία του εδάφους, χρήση των συστημάτων μη επανδρωμένων εναέριων αεροσκαφών UAV, συνιστά ένα χρήσιμο, χαμηλού κόστους, αξιόπιστο και πρόσθετο εργαλείο για την παρακολούθηση και εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής. Τα υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα εδάφους, που κατασκευάστηκαν για την παρούσα, μέσω τεχνικών φωτογραμμετρίας, για διαφορετικές χρονικά αποτυπώσεις της περιοχής, παρέχουν ένα ευρύ σύνολο δεδομένων που μπορούν εύκολα να αξιολογηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατολίσθησης, αλλά και για τον άμεσο εντοπισμό πιθανών δυνητικών αστοχιών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρές καταστροφές. Παράλληλα, η εφαρμογή εξειδικευμένων τεχνικών και μεθόδων της επιστήμης της πληροφορικής, στο ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επέτρεψε την αναλυτικότερη αξιολόγηση της μορφολογίας του εδάφους και την λεπτομερή αναγνώριση μορφολογικών "υπογραφών" κατολισθήσεων. Επιπροσθέτως, δόθηκε η δυναμική ευκαιρία αξιολόγησης του βαθμού απόδοσης τέτοιων μεθόδων σε θέματα έρευνας της γήινης επιφάνειας και στην παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων με αυτοματοποιημένο τρόπο.

Εν κατακλείδι, η μεθοδολογία έρευνας που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή, φαίνεται εκ του αποτελέσματος να αποτελεί μια φθηνή και αποτελεσματική λύση για την παρακολούθηση της κατολίσθησης, και γι' αυτόν τον λόγο θα ήταν εύλογο, έρευνες, υπό το ίδιο ή παραπλήσιο ερευνητικό πλαίσιο, να εκτελούνται συστηματικά για την περιοχή, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο.

Τέλος, η παρούσα έρευνα διαπίστωσε την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης σε συγκεκριμένα πεδία, τα οποία διατυπώνονται στις παρακάτω προτάσεις:

1. Διαχρονική τακτική παρακολούθηση του φαινομένου με μεθόδους Τηλεπισκόπησης και με εξειδικευμένες αναλύσεις μέσω εφαρμογής σύγχρονων αυτοματοποιημένων μεθόδων της επιστήμης της πληροφορικής.
2. Ενόργανη παρακολούθηση του φαινομένου, με συντήρηση υπάρχοντων υποδομών παρακολούθησης και εγκατάσταση νέων.
3. Εκτέλεση εξειδικευμένων τοπικών γεωτεχνικών ερευνών για κτήση και ολοκλήρωση της γνώσης της γεωμετρίας του εδάφους της περιοχής και αργιολογικές επιλύσεις επικείμενων τεχνικών παρεμβάσεων.
4. Διεξαγωγή εξειδικευμένων διερευνήσεων και αναλύσεων φαινομένων (πχ. ενεργοποίηση κατολισθήσεων από την δράση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων) για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων (πχ. αύξηση της αντοχής του εδάφους, μέσω μείωσης της πίεσης πόρων και ελέγχου των επιφανειακών και υπογείων υδάτων) που θα αποσκοπούν στην κατασκευή στοχευμένων έργων υποδομής για την επίλυση του προβλήματος (πχ. αποστράγγιση μέσω πλέγματος οριζοντίων γεωτρήσεων).

1. **Abdi, H. and Williams, L. J., (2010).** Principal component analysis. Wiley Interdiscip Rev Comput Stat 2(4), pp. 433– 459. doi: 10.1002/wics.101.
2. **Aggitalis, G. and Malios, Y., (2000).** Geomechanical measurements of Tymfristos Road Tunnel Greece. Tunnelling 97. The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 211 – 221.
3. **Antonio, A., (2016).** Drones: new tools for natural risk mitigation and disaster response, Current Science, 110(6), pp. 958 – 959.
4. **Arbanas, Z., Dugonjic, S., Benac, C., (2013).** Causes of Small Scale Landslides in Flysch Deposits. Landslide Science and Practice, Vol. 1, pp 221 – 226. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013. doi:10.1007/978-3-642-31325-7_29.
5. **Barnes, G, (2010).** Soil mechanics: Principles and Practice. 3rd ed. Publisher: Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2010.
6. **Bathrellos, G. D., Kalivas, D. P., Skilodimou, H. D., (2017).** Landslide Susceptibility Assessment Mapping: A Case Study in Central Greece. In Remote Sensing of Hydrometeorological Hazards, Petropoulos, G.P., Islam, T., Eds CRC Press, Taylor & Francis Group: London, UK, 2017, pp. 493 – 512, ISBN-13: 978-1498777582.
7. **Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F., (2018).** Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Scientific Data, 5, 180214. doi: 10.1038/sdata.2018.214.
8. **Bell, F. G., (2007).** Engineering Geology. 2nd Edition, An Imprint of Elsevier, Butterworth-Heinemann. Published 15th December 2006.
9. **Bieniawski, Z. T., (1989).** Engineering Rock Mass Classifications. A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. Toronto: John Wiley & Sons.
10. **Bishop, A. W., (1955).** The Use of Slip Surface in The Stability of Analysis Slopes Geotechnique Vol. 5, pp. 7 – 17. London.
11. **Bishop, A. W. and Morgenstern, N., (1960).** Stability Coefficients for Earth Slopes. Geotechnique, Vol. 19, No. 4, pp. 129 – 150.
12. **Blasio, F. V., (2011).** Introduction to the Physics of Landslides Lecture Notes on the Dynamics of Mass Wasting. Dordrecht Heidelberg London New York. Publisher: Springer.
13. **Chandler, J. H., (1999).** Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research, Earth Surface Processes and Landforms. 24, pp. 51 – 63.

14. **Colomina, I. and Molina, P., (2014).** Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Volume 92, June 2014, pp. 79 – 97.
15. **Cruden, D. M., (1978).** Discussion of Hocking's Paper. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 217.
16. **Cruden, D. M. and Varnes, D. J., (1996).** Landslide types and processes. In Turner, A. K., and Schuster, R. L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington, DC: National Academy Press, pp. 36–75. Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council.
17. **Deere, D. U., (1963).** Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes, *Rock Mechanics and Engineering Geology* 1(1): 18. Vienna: Springer.
18. **Dilts TE, (2015)** Topography tools for ArcGIS 10.1. Accessed 5th of March 2021.
19. **Evans, J. S., Oakleaf, J., Cushman, S. A., Theobald, D., (2014).** An ArcGIS toolbox for surface gradient and geomorphometric modeling, version 2.0-0. Accessed 5th of March 2021.
20. **Fookes, P. G, Lee, E. M. and Griffiths, J. S., (2007).** *Engineering Geomorphology Theory and Practice*. Dunbeath: Whittles Publishing. 312 pp. doi:10.1177/03091333080320030502.
21. **Gaddis, L. R. and Plant, J. J., (2001).** The roughness of natural terrain: a planetary and remote sensing perspective. *J Geophys Res* 106(E12), pp.32–777. doi:10.1029/2000je001429.
22. **Giordan D. et al., (2020).** The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol 79, pp. 3437 – 3481. Published online: 1 April 2020 *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. doi: 10.1007/s10064-020-01766-2.
23. **Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., Dorsch, S. J., (2006).** Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology* 73(1), pp. 131 – 148.
24. **Griffiths, D. V. and Lane, P. A., (1999).** Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique* 49 No. 3, pp. 387 – 403.
25. **Gunn, D. A., Chambers, J. E. Hobbs, P. R. N., Ford, J. R., Wilkinson, P.B., Jenkins, G. O., Merritt, A., (2013).** Rapid observations to guide the design of systems for long-term monitoring of a complex landslide in the Upper Lias clays of North Yorkshire, UK. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 46 (2013), pp.323 – 336. doi:10.1144/qjegh2011-028.
26. **Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., (1999).** Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, pp. 181 – 216.

27. **Guzzeti F. et al., (2012).** Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Article in *Earth-Science Reviews* 112:pp.42 – 66.
28. **Henry, J. B., Malet, J. P., Maquaire, O., Grussenmeyer, P., (2002).** The Use of Small-Format and Low-Altitude Aerial Photos for the Realization of High-Resolution DEMs in Mountainous Areas: Application to the Super Sauze Earthflow (Alpes De Haute Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, pp. 1339 – 1350.
29. **Highland, L. M. and Bobrowsky, P., (2008).** The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides. Reston, VA: US Geological Survey. United States Geological Survey Circular 1325. 129 pp.
30. **Hocking, G., (1976).** A Method for Distinguishing Between Single and Double Plane Sliding of Tetrahedral Wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 13, No. 7, pp. 225 – 226.
31. **Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L., (2014).** The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, pp. 167 – 194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y.
32. **ISPRS, (2015).** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W5, pp.11 – 14, 2015.
33. **Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., (2012).** Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards* 61(1), pp. 5 – 28.
34. **James, L., Hodgson, M., Ghoshal, S. and Latiolais, M., (2012).** Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*, pp. 181 – 198.
35. **James, M. R., Robson, S. and Smith, M. W., (2017).** 3-D uncertainly based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (12), pp.1769 – 1788. ISSN 0197-9337.
36. **Jebur, M. N., Pradhan, B., Tehrany, M. S., (2014).** Optimization of landslide conditioning factors using very high-resolution airborne laser scanning (LiDAR) data at catchment scale. *Rem Sens Environ* 152, pp. 150 – 165.
37. **Jolliffe, I., (2002).** Principal component analysis. Wiley, New York.
38. **Karantanellis, E., Marinos, V. and Vassilakis, E., (2019).** "3D Hazard Analysis and Object-Based Characterization of Landslide Motion Mechanism using UAV Imagery". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019 ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands.

39. **Karantanellis, E., Marinos, V., Vassilakis, E. and Christaras, B., (2020).** Object-Based Analysis Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Site-Specific Landslide Assessment. *Remote Sensing*. 2020, 12, 1711. doi:10.3390/rs12111711.
40. **Kilias, A. A., Tranos, M. D., Papadimitriou, E. E. and Karakostas, V. G., (2008).** The recent crustal deformation of the Hellenic orogen in Central Greece; the Kremasta and Sperchios Fault Systems and their relationship with the adjacent large structural features. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 159: 533–547, Stuttgart.
41. **Kilias, A. A., Thomaidou, E., Katrivanos, E., Vamvaka, A., Fassoulas, C., Pipera, K., Falalakis, G., Avgerinas, S., Sfeikos, A., (2016).** A geological cross-section through northern Greece from Pindos to Rhodope Mountain Ranges: a field guide across the External and Internal Hellenides. *Journal of the Virtual Explorer*, pp. 1 – 107.
42. **Kontogianni, V., Tzortzis, A., Stiros, S., (2004).** Deformation and Failure of the Tymfristos Tunnel, Greece. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*.
43. **Köppen, W., (1936).** Das geographische System der Klimate. In: Köppen W, Geiger R (eds) *Handbuck der Klimatologie Bd. 1, Teil C*. Gebrüder Bornträger, Berlin.
44. **Lane, S. N., James, T. D. and Crowell, M. D., (2000).** The application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research, *Photogrammetric Record*, 16 (95): pp. 793 – 821.
45. **Lazzari M, Gioia D., (2017).** UAV images and historical aerial-photos for geomorphological analysis and hillslope evolution of the Uggiano medieval archaeological site (Basilicata, southern Italy). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.
46. **Leroueil, S., Vaunat, J., Picarelli, L., Locat, J., Faure, R. and Lee, H., (1996).** A geotechnical characterisation of slope movements. *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Vol. 1*, pp. 53 – 74.
47. **Lin J. et al., (2017).** Landslide Identification and Information Extraction Based on Optical and Multispectral UAV Remote Sensing Imagery. *Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 57 012017.
48. **Lollino, G., Giordan, D., Crosta, G., Corominas, J., Azzam, R. and Wasowski, J. S., (2015).** *Engineering Geology for Society and Territory Volume 2 Landslide Processes*. Switzerland. Publisher: Springer.
49. **Lucieer, A., de Jong, S. M. and Turner, D., (2014).** Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 38(1), pp. 97– 116.
50. **Mantovani, F., Soeters, R., van Westen, C. J., (1996).** Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* 15, 213 – 225.
51. **Marinos, V., Marinos, P. and Hoek, E., (2005).** The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, pp.55 – 65.

52. **Marinos, V., (2010).** New proposed GSI classification charts for weak or complex rock masses. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 4(3):1248-1258.
53. **Marinos, V., (2017).** A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. doi: 10.1007/s10064-017-1151-z.
54. **Marinos, V. and Tsiambaos, G., (2017).** Strength and deformability of specific sedimentary and ophiolitic rocks. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 43(3):1259.
55. **McKean J and Roering J., (2004).** Objective landslide detection and surface morphology mapping using high resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*. Vol 57, Issues 3 – 4, 10 February 2004, pp. 331 – 351. doi:10.1016/S0169-555X(03)00164-8.
56. **Miller, C. L. and Laflamme, R. A., (1958).** The Digital Terrain Model-Theory and Application. *Photogrammetric Engineering*, Vol. XXIV, No.3, pp. 433 - 442, June 1958.
57. **Morgenstern, N.R. and Tchalenko, L.S., (1967)** Shear strength properties of natural soils and rocks, Vol. 1, 147, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
58. **Nex, F. and Remondino, F., (2014).** UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6 (1), pp. 1 – 15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x.
59. **Niethammer, U., James, M. R., Rothmund, S., Travelletti, J. and Joswig, M., (2012).** UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, pp. 2 – 11. doi: 10.1016/j.enggeo.2011.03.012.
60. **Papadopoulos, A. M., Mertzanis, A. and Pantera, A., (2007).** Dendrogeomorphological observations in a landslide on Tymfristos mountain in Central Greece. Stokes et al. (eds), *Eco- and Ground Bioengineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, pp. 223–230. 2007. Publisher: Springer.
61. **Pawluszek, K. and Borkowski, A., (2016).** Landslides identification using airborne laser scanning data derived topographic terrain attributes and support vector machine classification. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences-XXIII ISPRS congress, Prague, Czech Republic*, pp. 12–19.
62. **Pawluszek, K., (2018).** Landslide features identification and morphology investigation using high-resolution DEM derivatives. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, Springer; International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, vol. 96(1), pp. 311 – 330, March. doi: 10.1007/s11069-018-3543-1.
63. **Petkovšek, A., Maček, A., Mikoš, M. and Majes. B., (2013).** Mechanisms of Active Landslides in Flysch. *Landslides: Global Risk Preparedness*, 149, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013. doi: 10.1007/978-3-642-22087-6-10.

64. **Pike, R. J. and Wilson, S. E., (1971).** Elevation relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area altitude analysis. *Bull Geol Soc Am* 82, pp. 1079 – 1084.
65. **Pourghasemi, H. R., Mohammady, M., Pradhan, B., (2012).** Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena* 97, pp. 71 – 84.
66. **Remondino, F., (2011).** UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, 2011, ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14-16 September 2011, Zurich, Switzerland.*
67. **Scaioni, M., (2014).** Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China.
68. **Scaioni, M.; Longoni, L.; Melillo, V.; Papini, M., (2014).** Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. *Remote Sens.*, 6, 9600-9652.
69. **Sharpe, C.F.S., (1938).** Landslides and Related Phenomena. Columbia University Press, New York.
70. **Skempton, A. W., Hutchinson, J., (1969).** Stability of natural slopes and embankment foundations. In: Soil mechanics and foundation engineering conference proceeding/Mexico/. Berkshire, TRID, pp. 291 – 340.
71. **Solanas Pérez, A., Manolov, R., Leiva Ureña, D., Richard's, M. M., (2011).** Retaining principal components for discrete variables. *Anu de Psicol* 41(1–3), pp. 33 – 50.
72. **Tarolli, P., Sofa, G., Dalla Fontana, G., (2012).** Geomorphic features extraction from high-resolution topography: landslide crowns and bank erosion. *Nat Hazards* 61(1), pp. 65 – 83.
73. **Terzaghi, K., (1950).** Mechanism of landslides. In Paige, S. (ed.), *Application of Geology to Engineering Practice*. New York: Geological Society of America, pp. 83–123.
74. **Turc, L., (1951).** Nouvelles formules pour le bilan d'eau en fonction des valeurs moyennes annuelles de précipitations et de la température, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 233, pp. 633-635.
75. **Turner, D., Lucieer, A., de Jong, S. M., (2015).** Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sens* 7:1736–1757.
76. **U.S. Geological Survey (USGS), (2004).** Landslide Types and Processes, Fact Sheet 20043072.

77. **Van Den Eeckhaut M and Hervás, J., (2012).** State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk. *Geomorphology* 139, pp. 545 – 558.
78. **Varnes, D. J., (1978).** Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslides, analysis and control, special report 176: transportation research board.* National Academy of Sciences, Washington, DC, pp 11 – 33.
79. **Vasuki, Y., Holden, E. J., Kovesi, P., Micklethwaite, S., (2014).** Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: an image analysis approach. *Comput. Geosci.* 69, pp. 22 – 32.
80. **Wang, J. and Peng, X., (2009).** GIS-based landslide hazard zonation model and its application. *Procedia Earth Planetary Science*, Vol 1, Issue 1, September 2009, pp. 1198 – 1204.
81. **Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, M. J., (2012).** Structure-from-motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, pp. 300 – 314.
82. **Wheaton, J. M., J. Brasington, S. E. Darby, and D. A. Sear, (2010).** Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), pp. 136 – 156. doi: 10.1002/esp.1886.
83. **Williams R. D., (2012).** DEMs of Difference. In *geomorphological techniques.* British society of Geomorphology, 17 pp.
84. **Wilson, J. P. and Gallant, J. C., (2000).** *Terrain analysis principles and applications.* Wiley and Sons, New York.
85. **WP/WLI., (1994).** A suggested method for reporting landslide causes, *International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (Chairman ME Popescu), Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 50(1), pp.71 – 74. doi:10.1007/BF02594958.
86. **Yu, M., Huang, Y., Zhou, J. et al., (2017).** Modeling of landslide topography based on micro-unmanned aerial vehicle photography and structure-from-motion. *Environ Earth Sci* 76, 520 (2017). doi:10.1007/s12665-017-6860-x.
87. **Zhao, C. and Lu, Z., (2018).** Remote Sensing of Landslides – A Review. *Remote Sensing* 2018, 10 (2), 279. doi: 10.3390/rs10020279.

1. **ΕΑΚ, (2004).** Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2004. Εκδόσεις: Εκτυπωτική Αττικής.
2. **Βουδούρης, Κ., (2013).** Τεχνική υδρογεωλογία - Υπόγεια νερά. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
3. **Δανδίκια, Μ., (2018).** Αποτύπωση κατολισθητικών φαινομένων σε περιβάλλον Φλύσχη στο Επαρχιακό Οδικό Δίκτυο στον Τυμφορηστό Ευρυτανίας – Φθιώτιδας με τη χρήση ΣΜΗΕΑ (Uav). Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
4. **Καβουνίδης, Σ., Σωτηρόπουλος, Α., Παπαδόπουλος, Κ., Μπαρδάνης, Μ., (2010).** Διαδοχικές Κατολισθήσεις σε Φλύσχη. Βόλος: 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ.
5. **Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν., (2002).** Τεχνική γεωλογία. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
6. **Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν., (2007).** Γεωλογία Τεχνικών Έργων. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
7. **Κωστόπουλος, Σ., Καβουνίδης, Σ., Ντούνιας, Γ., (1996).** Εκτίμηση συμπεριφοράς βραχώμαζας: Η περίπτωση της σήραγγας Τυμφορηστού. Εταιρία Γεωτεχνικών Μελετών.
8. **Μαλδέρος, Γ., Κωνσταντινίδης, Π., Ζαρκούδης, Μ., Παρασκούδης, Β., (1996).** Γεωτεχνική Έρευνα και Μελέτη Ανατολικής Πρόσβασης Σήραγγας Τυμφορηστού. Εταιρία Γεωτεχνικών Μελετών ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.
9. **Μαλδέρος, Γ., Κωνσταντινίδης, Π., Ζαρκούδης, Μ., Παρασκούδης, Β., (1999a).** Γεωτεχνική Έρευνα Περιοχών Κατολίσθησης που αφορούν στις Λύσεις 2 και 4 και Μελέτη Ανατολικής Πρόσβασης Σήραγγας Τυμφορηστού. Εταιρία Γεωτεχνικών Μελετών ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.
10. **Μαλδέρος, Γ., Κωνσταντινίδης, Π., Ζαρκούδης, Μ., Παρασκούδης, Β., (1999b).** Γεωλογική Έκθεση Ανατολικής Πρόσβασης Σήραγγας Τυμφορηστού. Εταιρία Γεωτεχνικών Μελετών ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.
11. **Μουντράκης, Δ. Μ., (2010).** Γεωλογία και Γεωτεχνική εξέλιξη της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις: University Studio Press.
12. **Παπαζάχος Β., Παπαζάχος Β., (2003).** Οι σεισμοί της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
13. **Χρηστάρας, Β. Χατζηαγγέλου, Μ., (2011).** Απλα βήματα στην εδαφομηχανική. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις: University Studio Press.

Διαδικτυακές πηγές

1. Επίσημη ιστοσελίδα Γεωδυναμικού ινστιτούτου: www.gein.noa.gr
2. Επίσημη ιστοσελίδα Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας: <http://www.oasp.gr>
3. Επίσημη ιστοσελίδα κατασκευαστών του προγράμματος ArcMap, Environmental Systems Research Institute (ESRI): <https://desktop.arcgis.com/>
4. Επίσημη ιστοσελίδα Ηλεκτρονικής εγκυκλοπαίδειας Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/>
5. Ηλεκτρονική ιστοσελίδα Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών: <https://www.meteo.gr/about-meteo.cfm>
6. Ηλεκτρονική ιστοσελίδα Κλιματικού Άτλαντα της Ελλάδας (Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας): <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>
7. Περιβάλλον δορυφορικών εικόνων Google Earth: <https://www.google.com/intl/el/earth/>

Λογισμικά

1. **ArcMap 10.5** | Geographic Information System (GIS) Software | Environmental Systems Research Institute (ESRI).
2. **ArcScene 10.5** | 3D visualization Application that allows you to view your GIS data in three dimensions | Environmental Systems Research Institute (ESRI).
3. **AutoCAD 2017** | Commercial computer-aided design and drafting Software application | Autodesk Inc.
4. **Cloud Compare** | 3D point cloud processing Software | GNU General Public License | Available at: <https://www.danielgm.net/cc/>
5. **CorelDRAW X6** | Computer graphics Software | Cowpland Research Laboratory (Corel) Corporation.
6. **Dips 5.0** | Stereographic projection Program for the analysis and presentation of orientation based geological data | Rocscience Inc.
7. **Pix4D mapper** | Professional photogrammetry Software for drone mapping | Pix4D.
8. **RocData 5.0** | Interactive Toolkit for the analysis of rock and soil strength data | Rocscience Inc.
9. **Slide 5.0** | 2D Geotechnical Software | Rocscience Inc.
10. **Strater 5.0** | Well Log, Borehole and Cross Section Plotting Software | Golden Software LLC.