



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΟ ΑΝΗΛΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ
ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ ΧΑΤΖΗΘΕΟΔΟΣΙΟΥ
Α.Ε.Μ: 4843

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΑΡΙΝΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018



Στους γονείς μου...



© Θεμιστοκλής Χατζηθεοδοσίου, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΟ ΑΝΗΛΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

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 τον συγγραφέα.

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



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, στο τμήμα Γεωλογίας. Με την ανάθεση της εργασίας, μου δόθηκε μια μοναδική ευκαιρία να ασχοληθώ περαιτέρω με την Εφαρμοσμένη Γεωλογία και να εμβαθύνω τις γνώσεις μου ένα βήμα παραπάνω σε έννοιες Τεχνικής Γεωλογίας όπως οι κατολισθήσεις, με τις οποίες θα ήθελα να ασχοληθώ πιο εντατικά στο άμεσο μέλλον.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, κύριο Βασίλειο Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία, καθώς και τους καθηγητές κύριο Θωμά Μακεδών και κύριο Γεώργιο Παπαθανασίου για την εξαιρετική συνεργασία και βοήθεια που μου παρείχαν κατά την διαδικασία εκπόνηση της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη, τον υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας Ευστράτιο Καραντανέλλη για την καθοδήγηση και τις πληροφορίες που μου παρείχε κατά την διαδικασία εκπόνησης του κεφαλαίου σχετικά με την μελέτη των κατολισθήσεων με την χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), καθώς και για την διαρκή βοήθεια του, τόσο στην διαδικασία λήψης των δεδομένων UAV κατά τη διάρκεια της εργασίας στην ύπαιθρο, όσο και στην μετέπειτα επεξεργασία τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Νίκο Νάσκο, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό της εταιρίας Γεώγνωση Α.Ε για τα πολύτιμα στοιχεία και τις πληροφορίες που μου παρείχε για την περιοχή μελέτης .

Τέλος, η εργασία αυτή δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση της οικογένειάς μου η οποία στάθηκε δίπλα μου, υποστηρίζοντας με καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	16
ABSTRACT.....	17

ΜΕΡΟΣ Α΄

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ –ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ UAV

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1.Αντικείμενο	19
1.2.Περιοχή μελέτης.....	20
1.3.Σκοπός.....	22
1.4.Μεθοδολογία	22
2.ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	23
2.1.Ορισμοί.....	23
2.2.Ταξινόμηση κατολισθήσεων	24
2.3.Κατηγορίες κατολισθήσεων	25
2.4.Αίτια εκδήλωσης κατολισθήσεων	31
2.5.Φαινόμενα κατολισθήσεων σε σχηματισμό φλύσχη.....	36
2.5.1.Γεωλογικό πρότυπο φλύσχη.....	36
2.5.2.Τεχνικογεωλογικό πρότυπο φλύσχη.....	37
2.6.Μελέτη περίπτωσης "ροής κορημάτων σε περιβάλλον φλύσχη στην περιοχή της Βόρειας Ιστρίας στην Κροατία."	40
2.6.1.Ανάλυση αστοχιών περιόδων 1979 και 2003.....	44
2.6.2.Συμπεράσματα.....	46
2.7.Μέθοδοι αντιμετώπισης κατολισθήσεων	47

3. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΥΜΕΝΩΝ (ΣμηΕΑ) (UAV) (Unmanned Aerial Vehicle)	52
3.1.Αναγνώριση κατολισθήσεων με συμβατικές μεθόδους	52
3.2.Αναγνώριση κατολισθήσεων με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης – Τηλεανίχνευσης (Remote Sensing)	53
3.3.Οπτικοί αισθητήρες για αναγνώριση κατολισθήσεων	54
3.4.Ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές SLR (Digital Cameras).....	55
3.5.Πολυφασματικές κάμερες	57
3.6.Τηλεκατευθυνόμενα μη επανδρωμένα συστήματα λήψης εικόνων (UAV)	59
3.7.Μέθοδος Φωτογραμμετρίας	60
3.8. Μέθοδος SfM (Structure for Motion)	60
3.9.Μεθοδολογία UAV	62
3.9.1.Σχέδιο πτήσης.....	62
3.9.2.Βαθμονόμηση καμερών και Προσανατολισμός εικόνων	62
3.9.3.Κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου	63
3.10.Μελέτη περίπτωσης κατολίσθησης στην περιοχή Wenchuan στην Κίνα.....	64
3.10.1.Παραγωγή NDVI με πολυφασματική κάμερα	65
3.10.2.Μέθοδος αεροτριγωνισμού για την παραγωγή 3D μοντέλου	66
3.10.3.Αναγνώριση της επιφάνειας ολίσθησης και του χώρου εναπόθεσης της υπό μελέτη κατολίσθησης - μέτρηση κατολισθαίνουσας μάζας.....	68
3.10.4.Εκτίμηση όγκου αποθεμάτων εδάφους	70
3.10.5.Συμπεράσματα.....	71

ΜΕΡΟΣ Β΄

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ – ΣΤΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

4.ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	73
4.1.Γεωτεκτονική θέση.....	73
4.2.Λιθοστρωματογραφία	74
4.3.Τεκτονική	75
4.4.Γεωλογία ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	76
4.5.Στοιχεία σεισμικότητας.....	79
4.6.Υδρολογικά στοιχεία.....	81
4.7.Υδρολιθολογικά στοιχεία σχηματισμών	86

5.ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	87
5.1.Θέση – Μορφολογία	87
5.2.Γενική Γεωλογική περιγραφή περιοχής	89
5.3.Γεωλογία στενής περιοχής	91
5.3.1.Στρωματογραφία και χαρακτηριστικά εδάφους.....	93
5.3.2.Τομές Γεωτεχνικής – Γεωλογικής έρευνας στην περιοχή.....	97
5.4.Γεωλογία περιοχής νέας χάραξης της Εγνατίας Οδού	99
5.5.Ιστορικό κατολισθήσεων.....	104
5.6.Αποτύπωση και αξιολόγηση κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή έρευνας	107
5.6.1.Συμπεράσματα επιτόπου αυτοψίας	107
5.6.2.Αποτελέσματα χρήσης του UAV στις δύο υπό μελέτη περιοχές.....	120
5.7.Κατολίσθηση Ανηλίου 1990.....	128
5.7.1.Γεωμετρία κατολίσθησης	128
5.7.2.Γεωλογία κατολίσθησης.....	129
5.7.3.Τομές Γεωτεχνικής – Γεωλογικής έρευνας στην περιοχή.....	131

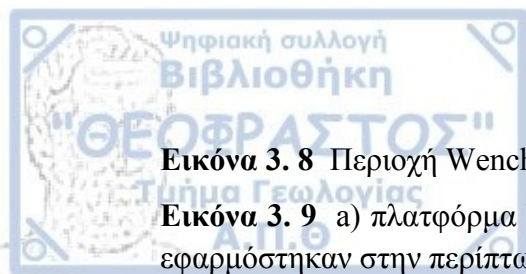


ΜΕΡΟΣ Γ΄

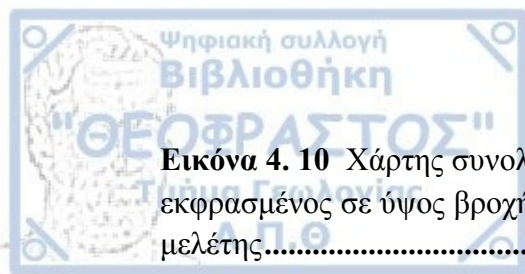
ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ – ΠΙΘΑΝΑ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	137
6.1.Τεχνικογεωλογικές ενότητες	138
6.2.Υπόγειος ορίζοντας	143
6.3.Μηχανισμός αστοχίας	144
7.ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	145
7.1.Παράμετροι υλικών – αναλύσεις – συντελεστής ασφαλείας	145
7.2.Μελέτη με πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση της τάξης 0.08	148
7.3.Συμπεράσματα αναλύσεων	151
8.ΠΙΘΑΝΑ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ	152
9.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	154
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	156

Εικόνα 1. 1 Η περιοχή έρευνας στον χάρτη, με μπλε σημειώνεται η περιοχή μελέτης	20
Εικόνα 1. 2 Η περιοχή έρευνας στον χάρτη	21
Εικόνα 2. 1 Χαρακτηριστικά τμήματα περιστροφικής ολίσθησης	28
Εικόνα 2. 2 Σχηματική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ διατμητικής τάσης και διατμητικής αντοχής	32
Εικόνα 2. 3 Ταξινόμηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων κατά WP/WLI (1994)	34
Εικόνα 2. 4 Φωτογραφία ροής κορημάτων στην περιοχή Krbavcići.....	41
Εικόνα 2. 5 Γεωλογικός χάρτης εξεταζόμενης περιοχής 1. Λευκή Ίστρια – Παλαιογενείς ασβεστόλιθοι, 2. Γκρίζα Ίστρια – αργιλίτης, φλύσχης και Τεταρτογενείς αποθέσεις, 3. Ανάστροφο ρήγμα, 4. Κατολίσθηση, 5. Ροές κορημάτων, 6. Γεωλογική τομή 7. Ρυάκια.....	41
Εικόνα 2. 6 Γεωλογική τομή περιοχής μελέτης. (1. Παλαιογενείς ασβεστόλιθοι, 2. Αργιλίτης, 3. Παλαιογενής φλύσχης, 4. Τεταρτογενείς αποθέσεις)	42
Εικόνα 2. 7 Γεωλογικός χάρτης της κατολίσθησης της περιόδου Ιανουαρίου 1979 και της ροής συντριμμάτων της περιόδου Ιανουαρίου 2003. 1. Οδικός χώρος, 2. Τεταρτογενείς αποθέσεις, 3. Προεξοχές Παλαιογενούς φλύσχη, 4. Προεξοχές Παλαιογενούς αργιλίτη, 5. Προεξοχές εδάφους, 6. Διατμητικό εμπόδιο, 7. Συμπιεστικό εμπόδιο, 8. Φαράγγι, 9. Περιοδική πηγή	45
Εικόνα 2. 8 Μέσα αποστράγγισης υπόγειων υδάτων	48
Εικόνα 2. 9 Μέθοδοι σταθεροποίησης πρανών	51
Εικόνα 3. 1 Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (Digital Camera/ Sony Alpha 7R).....	55
Εικόνα 3. 2 Αρχή λειτουργίας μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής	56
Εικόνα 3. 3 Πολυφασματική κάμερα Sequiua σχεδιασμένη για γεωργικές εφαρμογές. Προσφέρει υψηλή ακρίβεια, ευελιξία και πολύ μικρό μέγεθος και βάρος	57
Εικόνα 3. 4 Δεξιά: πολυφασματική ψευδοχρωματική εικόνα. Αριστερά: παραγόμενη εικόνα NDVI.....	58
Εικόνα 3. 5 Αριστερά: Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα, Δεξιά: Τηλεχειριστήριο και οθόνη παρακολούθησης.....	59
Εικόνα 3. 6 Structure for motion (SfM). Αντί για ένα ενιαίο στερεοφωνικό ζεύγος, η τεχνική SfM απαιτεί πολλαπλές, επικαλυπτόμενες φωτογραφίες ως είσοδο για την εξαγωγή χαρακτηριστικών και αλγορίθμων αναδόμησης 3-D.....	61
Εικόνα 3. 7 Ροή εργασιών για την επεξεργασία δεδομένων UAV	62



Εικόνα 3. 8 Περιοχή Wenchuan στον χάρτη.....	64
Εικόνα 3. 9 α) πλατφόρμα UAV σταθερής πτέρυγας β) πολυφασματική κάμερα που εφαρμόστηκαν στην περίπτωση Wenchuan	65
Εικόνα 3. 10 Αριστερά: Ψευδοχρωματική εικόνα περιοχής μελέτης, Δεξιά: Εικόνα δείκτη βλάστησης NDVI περιοχής μελέτης.....	66
Εικόνα 3. 11 Δεδομένα εδάφους 3D της καταστροφικής περιοχής.....	67
Εικόνα 3. 12 Δημιουργία δεδομένων DEM και DOM από οπτικές εικόνες UAV	68
Εικόνα 3. 13 Αναγνώριση και διάκριση της επιφάνειας ολίσθησης και του χώρου εναπόθεσης σε: α) οπτική εικόνα που συλλέχθηκε το 2011 και β) ψευδο – έγχρωμη εικόνα που συλλέχθηκε το 2013	69
Εικόνα 3. 14 Αναγνώριση και διάκριση επιφάνειας ολίσθησης και χώρου εναπόθεσης σε 3D σενάριο	69
Εικόνα 3. 15 Μέτρηση κατολισθαίνουσας μάζας. Περίπτωση μελέτης με UAV στα Σέρβια Κοζάνης. Αριστερά πάνω ορθομοωσαϊκό περιοχής μελέτης, δεξιά πάνω DSM περιοχής (με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα υψόμετρα), στο κέντρο το μοντέλο της περιοχής	70
Εικόνα 4. 1 Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας, με ροζ χρώμα η ζώνη της Πίνδου	73
Εικόνα 4. 2 Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη της ζώνης Ωλονού – Πίνδου αποτελούμενη από 4 μεγαενότητες.....	74
Εικόνα 4. 3 Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής 1:50.000, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η περιοχή έρευνας.....	76
Εικόνα 4. 4 Μεγέθυνση της ευρύτερης περιοχής μελέτης στο γεωλογικό χάρτη, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η περιοχή έρευνας. Κλίμακα: 1:5000	77
Εικόνα 4. 5 Σχηματικές λιθοστρωματογραφικές στήλες των φλυσχικών σχηματισμών. 1:Ιλυόλιθος,2:Ψαμμίτης,3:Κόκκινος πηλίτης,4:Κροκαλοπαγές,5:Τεκτονικός ορίζοντας.....	78
Εικόνα 4. 6 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, εντός του κόκκινου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης	79
Εικόνα 4. 7 Ενδεικτικός χάρτης υδρολογικών ισοζυγίων λεκανών υδατικού διαμερίσματος Ηπείρου, με κόκκινο σημειώνεται η περιοχή μελέτης	81
Εικόνα 4. 8 Χάρτης συνολικής κατακρήμνισης στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm), εντός του άσπρου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης	82
Εικόνα 4. 9 Χάρτης συνολικής απορροής στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm), εντός του άσπρου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης.....	83



Εικόνα 4. 10 Χάρτης συνολικής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm), εντός του κόκκινου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης..... **84**

Εικόνα 4. 11 Χάρτης του δείκτη ξηρότητας στον ελλαδικό χώρο, εντός του κόκκινου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης **85**

Εικόνα 5. 1 Η περιοχή έρευνας όπως φαίνεται από το Google Maps Pro **87**

Εικόνα 5. 2 Με κόκκινο η αρχική χάραξη της Εγνατίας Οδού, με κίτρινο η τελική.. **88**

Εικόνα 5. 3 Δίδυμη σήραγγα Εγνατίας Οδού στο Ανήλιο **88**

Εικόνα 5. 4 Μορφολογία Ανηλίου, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η γεωμετρία της πλαγιάς, με κίτρινο χρώμα το ρέμα ανάμεσα στο Ανήλιο και το Μέτσοβο **89**

Εικόνα 5. 5 Απόσπασμα Γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ φύλλο ΜΕΤΣΟΒΟ 1:50.000..... **90**

Εικόνα 5. 6 Απόσπασμα Γεωλογικής οριζοντιογραφίας 1:1000 σήραγγας Ανηλίου και εκατέρωθεν προσπελάσεων. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το Δυτικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας, με κίτρινο σημειώνεται το Ανατολικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας, ενώ με μπλε χρώμα σημειώνεται το τέλος του τμήματος Β και η αρχή του τμήματος Α..... **92**

Εικόνα 5. 7 Η χάραξη της σήραγγας του 1990 (με μαύρο χρώμα). Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το Δυτικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας, με κίτρινο σημειώνεται το Ανατολικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας. Και η τελική χάραξη της δίδυμης σήραγγας μέσα στον ορεινό όγκο **92**

Εικόνα 5. 8 Απόσπασμα από γεωλογική τομή σήραγγας Ανηλίου 1: 1000 **93**

Εικόνα 5. 9 Απόσπασμα οριζοντιογραφίας 1:1000 της δυτικής πρόσβασης και του ισόπεδου κόμβου. Με κόκκινο σημειώνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4..... **93**

Εικόνα 5. 10 Γεωτρήσεις Γ3 και Γ4..... **96**

Εικόνα 5. 11 Γεωτρήσεις Γ1 και Γ2 γεωλογικής έρευνας Δυτικής πρόσβασης σήραγγας Ανηλίου **97**

Εικόνα 5. 12 Εγκάρσιες τομές Α – Α΄, Β – Β΄, Γ – Γ΄ γεωλογικής έρευνας Δυτικής πρόσβασης σήραγγας Ανηλίου **97**

Εικόνα 5. 13 Τομή Α -Α΄ **98**

Εικόνα 5. 14 Τομή Β -Β΄ **98**

Εικόνα 5. 15 Περιοχή μελέτης. Στην εικόνα φαίνεται η ασταθής μορφολογία της περιοχής **99**

Εικόνα 5. 16 Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής 1:5000 **100**

Εικόνα 5. 17 Τυπικές πτυχές σε σχηματισμό Κόκκινου φλύσχη..... **102**

Εικόνα 5. 18 Τυπικές πτυχές ψαμμίτη σε σχηματισμό Κόκκινου φλύσχη **102**

Εικόνα 5. 19 Ψαμμίτικα μπλοκ διαφόρων μεγεθών και σχήματος περικυκλωμένα από εδαφικό υλικό αργίλου.....	103
Εικόνα 5. 20 Κατολίσθηση του 1990 (Με κόκκινο τα όρια της κατολίσθησης, με μπλε η σήραγγα του ανατολικού μετώπου του Ανηλίου).....	105
Εικόνα 5. 21 Κατολίσθηση στην ανατολική είσοδο του Ανηλίου, με κόκκινο σημειώνονται τα όρια της κατολίσθησης	107
Εικόνα 5. 22 Κατολίσθηση στην ανατολική είσοδο του Ανηλίου. Σημάδια αναγνώρισης: επιφανειακές διαρρήξεις, φρύδια από μικρότερες κατολισθήσεις, εξάρσεις και βυθίσματα του ανάγλυφου	108
Εικόνα 5. 23 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχις, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσχι που απαντάται στην περιοχή έρευνας	109
Εικόνα 5. 24 Εικόνα φλύσχι τύπου X που συναντάται στην περιοχή	110
Εικόνα 5. 25 Υλικά κατολίσθησης που συναντάται στην περιοχή	110
Εικόνα 5. 26 Φρύδι μικρότερης κατολίσθησης στην περιοχή	111
Εικόνα 5. 27 Ρωγμές και διαρρήξεις κατάντη του δρόμου σημάδι κατολίσθησης ..	111
Εικόνα 5. 28 Εξάρσεις του αναγλύφου, σημάδι ύπαρξης κατολίσθησης	112
Εικόνα 5. 29 Ρωγμές σε οικία σημάδι κατολίσθησης	112
Εικόνα 5. 30 Κάμψη του κορμού του δέντρου σημάδι κατολίσθησης	113
Εικόνα 5. 31 Κατολίσθηση δυτικής εισόδου, με κόκκινο σημειώνονται τα όρια της κατολίσθησης	113
Εικόνα 5. 32 Περιοχή κοντά στο φρύδι της κατολίσθησης	114
Εικόνα 5. 33 Περιοχή στο μέσο της κατολίσθησης, παρατηρούνται τα υλικά της κατολίσθησης	114
Εικόνα 5. 34 Περιοχή κοντά στον πόδα της κατολίσθησης	115
Εικόνα 5. 35 Παρουσία πηγών στην περιοχή, σημαντική συνεισφορά του νερού στην εξέλιξη του φαινομένου	115
Εικόνα 5. 36 Δυτικό όριο κατολίσθησης, με κίτρινο η επαφή του φλύσχι τύπου X (κόκκινο) με παχυστρωματώδεις ψαμμίτες (μπλε).....	116
Εικόνα 5. 37 Σήραγγα του ανατολικού μετώπου του Ανηλίου	116
Εικόνα 5. 38 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχις, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσχι που απαντάται στην περιοχή έρευνας.....	117
Εικόνα 5. 39 Εικόνα φλύσχι τύπου XI που συναντάται στην περιοχή	118
Εικόνα 5. 40 Εξάρσεις του αναγλύφου, σημάδι ύπαρξης κατολίσθησης	118
Εικόνα 5. 41 Κάμψη του κορμού του δέντρου σημάδι κατολίσθησης	119

Εικόνα 5. 42 Φρύδια μικρότερων κατολισθήσεων	119
Εικόνα 5. 43 Πλατφόρμα UAV μοντέλο DJI Phantom 3 Professional	120
Εικόνα 5. 44 Σχέδιο πτήσης, με κόκκινες κουκίδες παρουσιάζονται τα σημεία που ελήφθησαν οι εικόνες.	121
Εικόνα 5. 45 Ορθομωσαϊκό κατολίσθησης.	122
Εικόνα 5. 46 DSM κατολίσθησης. Με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα.	122
Εικόνα 5. 47 Ορθομωσαϊκό του πρανούς στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης όπου παρατηρούνται καταπτώσεις βράχων.	123
Εικόνα 5. 48 Ορθομωσαϊκό από άλλη γωνία, του πρανούς στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης όπου παρατηρούνται καταπτώσεις βράχων.	123
Εικόνα 5. 49 3D μοντέλο περιοχής ανατολικής εισόδου.	124
Εικόνα 5. 50 DSM περιοχής έρευνας. Με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα.	125
Εικόνα 5. 51 Σχέδιο πτήσης, με κόκκινες κουκίδες παρουσιάζονται τα σημεία που ελήφθησαν οι εικόνες.....	125
Εικόνα 5. 52 Ορθομωσαϊκό περιοχής έρευνας.	126
Εικόνα 5. 53 DSM περιοχής μελέτης. Με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα.	126
Εικόνα 5. 54 3D μοντέλο περιοχής, με κόκκινο σημειώνονται τα όρια της κατολίσθησης.	127
Εικόνα 5. 55 Γενική άποψη της περιοχής της κατολίσθησης. Λόγος μέσου μήκους / μέσου πλάτους $200/90 = 2,22$	128
Εικόνα 5. 56 Αξονομετρικό διάγραμμα περιοχής. Με κόκκινο σημειώνεται η κατολίσθηση, με κίτρινο οι γεωτρήσεις που έλαβαν χώρα για την μελέτη της.....	129
Εικόνα 5. 57 Απόσπασμα τοπογραφικού διαγράμματος περιοχής Ανατολικού μετώπου 1:500, μέσα στον κάναβο σημειώνεται η κατολίσθηση	130
Εικόνα 5. 58 Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής της κατολίσθησης 1:500	131
Εικόνα 5. 59 Απόσπασμα οριζοντιογραφίας θέσης των τομών	132
Εικόνα 5. 60 Τομή 1 – 1.....	132
Εικόνα 5. 61 Τομή 2 – 2.....	133
Εικόνα 5. 62 Τομή 4 – 4.....	133
Εικόνα 5. 63 Τομή 8 – 8.....	134
Εικόνα 5. 64 Τομή 9 – 9.....	134
Εικόνα 5. 65 Τομή 10 – 10.....	135
Εικόνα 6. 1 Μοντέλο κατολίσθησης	137

Εικόνα 6. 2 Υλικά κατολίσθησης, άργιλος με χαλίκια και πέτρες	138
Εικόνα 6. 3 Φλύσξης τύπου XI.....	139
Εικόνα 6. 4 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσξης, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσχη που απαντάται στην περιοχή έρευνας.....	140
Εικόνα 6. 5 Διαγράμματα τάσης από την ανάλυση Rockdata	141
Εικόνα 6. 6 Φλύσξης τύπου X	141
Εικόνα 6. 7 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσξης, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσχη που απαντάται στην περιοχή έρευνας.....	142
Εικόνα 6. 8 Διαγράμματα τάσης από την ανάλυση Rockdata.	143
Εικόνα 7. 1 Ανάλυση ευστάθειας όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.15.	147
Εικόνα 7. 2 Ανάλυση ευστάθειας όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.20.....	147
Εικόνα 7. 3 Ανάλυση ευστάθειας όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.25.	148
Εικόνα 7. 4 Ανάλυση ευστάθειας με σεισμική επιβάρυνση 0.08 όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.15.....	149
Εικόνα 7. 5 Ανάλυση ευστάθειας με σεισμική επιβάρυνση 0.08 όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.20.....	150
Εικόνα 7. 6 Ανάλυση ευστάθειας με σεισμική επιβάρυνση 0.08 όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.25.....	150

Πίνακας 2. 1 Ταξινόμηση κατολισθητικών κινήσεων Varnes (1978)	25
Πίνακας 2. 2 Γενικευμένος πίνακας κατολισθήσεων	31
Πίνακας 2. 3 Αναλυτικά οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI 1994)	35
Πίνακας 2. 4 Περιγραφή και βαθμονόμηση αντιπροσωπευτικών τύπων φλύσχη	38
Πίνακας 2. 5 Περιγραφή και βαθμονόμηση αντιπροσωπευτικών τύπων φλύσχη	38
Πίνακας 2. 1 Τύποι βραχομαζών φλύσχη	39
Πίνακας 2. 7 Διαστάσεις κατολίσθησης	46
Πίνακας 4. 1 Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη της εικόνας 4.4	77
Πίνακας 4. 2 Πίνακας σεισμικής επικινδυνότητας του νομού Ιωαννίνων με βάση τον παραπάνω χάρτη, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης	80
Πίνακας 4. 3 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους: $A = a \cdot g$ (g : επιτάχυνση βαρύτητας) ..	81
Πίνακας 4. 4 Υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης των Ιωαννίνων	84
Πίνακας 5. 1 Λεπτομέρειες πτήσης.	120
Πίνακας 5. 2 Λεπτομέρειες πτήσης.	121
Πίνακας 6. 1 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 1	138
Πίνακας 6. 2 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 2	140
Πίνακας 6. 3 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 3	143
Πίνακας 6. 4 Συνοπτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.	144
Πίνακας 7. 1 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 1	145
Πίνακας 7. 2 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 2	146
Πίνακας 7. 3 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 3	146
Πίνακας 7. 4 Αναλυτικά οι παράμετροι των γεωυλικών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα Slide 5.0 και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας ανά γεωτεχνική ανάλυση.	146
Πίνακας 7. 5 Αναλυτικά οι παράμετροι των γεωυλικών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα Slide 5.0 και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας ανά γεωτεχνική ανάλυση με πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση	149

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κατολισθήσεις αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο με σημαντικό παράγοντα διακινδύνευσης τόσο για το περιβάλλον και τις υποδομές όσο και για τον άνθρωπο. Η εκδήλωση ενός κατολισθητικού φαινομένου μπορεί να έχει δυσάρεστες κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις, η αποκατάσταση των οποίων μπορεί να αποβεί εξαιρετικά δαπανηρή. Τα αίτια των κατολισθητικών φαινομένων είναι πολλά και εξαρτώνται από γεωλογικούς, τεκτονικούς, υδρογεωλογικούς, τοπογραφικούς και κλιματικούς παράγοντες που σε συνδυασμό με τον ανθρωπογενή παράγοντα προκαλούν τη γένεση των αστοχιών. Παρόλο που η εμπειρία για την κατανόηση, αναγνώριση και αντιμετώπιση των κινδύνων κατολίστεσης έχει αυξηθεί σημαντικά, εντούτοις η πολυπλοκότητα του φαινομένου ενέχει σημαντικές δυσκολίες τόσο στη διερεύνηση του όσο και στην επιλογή και το σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων προστασίας.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και ανάλυση ευστάθειας της περιοχής του Ανηλίου δίνοντας έμφαση κυρίως σε δύο περιοχές με την μεγαλύτερη ένδειξη αστάθειας, στην ανατολική και δυτική είσοδο του χωρίου. Η έρευνα έγινε λαμβάνοντας υπόψη μια μεγάλη ποικιλία πηγών, όπως επιστημονικά άρθρα, τεχνικές εκθέσεις, επιστημονικά έγγραφα από πανεπιστημιακές βιβλιοθήκες, το διαδίκτυο και εφημερίδες, από την επιτόπου γεωλογική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της περιοχής καθώς και με την χρήση της μεθόδου UAV.

Μετά από την επιτόπου τεχνικογεωλογική αξιολόγηση, και διερεύνηση με την μέθοδο UAV στις δυο περιοχές έρευνας επιλέχτηκε η κατολίστεση της δυτικής εισόδου του Ανηλίου και δημιουργήθηκε το μοντέλο της για την κατανόηση του φαινομένου και του μηχανισμού αστοχίας της.

Στην συνέχεια, με την χρήση του λογισμικού RocData (Rocscience Inc.) και την εφαρμογή του τύπου Hoek – Brown εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών του υποβάθρου της κατολίστεσης, ενώ από στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης που έλαβαν χώρα στο παρελθόν εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των υλικών κατολίστεσης. Έπειτα, με την χρήση του προγράμματος Slide 5.0 (Rocscience Inc.) έγινε ανάλυση ευστάθειας της περιοχή για διαφορετικές τιμές πίεσης πόρων και εκτιμήθηκε ο κύκλος ολίσθησης και ο συντελεστής ασφαλείας.

Τέλος, για την σταθεροποίηση της ασταθούς μάζας προτάθηκαν κάποια πιθανά μέτρα αντιστήριξης βασισμένα κυρίως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στο μηχανισμό της κατολίστεσης.

Λέξεις κλειδιά: Κατολισθήσεις, Ανήλιο, Φλύσχης, UAV, Ευστάθεια πρανών.

ABSTRACT

Landslides are a natural phenomenon with a significant risk factor for both the environment and the structures as well as for humans. The occurrence of a landslide phenomenon can have unpleasant socio-economic repercussions and their recovery can be extremely costly. The causes of landslide phenomena are many and depend on geological, tectonic, hydrogeological, topographical and climatic factors that in conjunction with the anthropogenic factor cause the creation of failures. Although the experience of understanding, recognizing and addressing landslide risks has increased significantly, the complexity of the phenomenon poses considerable difficulties both in its investigation, selection and design of the appropriate protection measures.

The subject of the present work was the technical geological evaluation and stability analysis of the area of Anilio Greece, with emphasis mainly on two areas with the highest degree of instability, on the eastern and western entrance of the village. The research was conducted considering a wide variety of sources, such as scientific articles, technical reports, scientific papers from university libraries, the World Wide Web and newspapers, as well as on-site geological and geotechnical assessment of the area and UAV investigation.

After the on-site geotechnical assessment and UAV investigation in the two research areas, the landslide of the west entrance of Anilio was chosen and a landslide model was created to analyze the phenomenon and failure mechanism. Then, with the use of the RocData software (Rocscience Inc.) and the application of the Hoek-Brown type, the geotechnical parameters of the landslide formation formulas were evaluated, while from laboratory test data that was previously performed, the geotechnical parameters of the slide materials were evaluated also. Then, using the Slide 5.0 program (Rocscience Inc.), a stability analysis was performed for different pore pressure values, and the slip cycle and safety factor were evaluated.

Finally, for the stabilization of the unstable mass, some possible retaining measures were proposed based mainly on the geometrical characteristics and the mechanism of the landslide.

Keywords: Landslides, Anilio, Flysch, UAV, Slope stability



ΜΕΡΟΣ Α΄

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ – ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ UAV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση, η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και η ανάλυση ευστάθειας της περιοχής Ανηλίου στα Ιωάννινα, δίνοντας έμφαση κυρίως σε δύο περιοχές με την μεγαλύτερη ένδειξη αστάθειας, στην ανατολική και δυτική είσοδο του χωρίου. Η έρευνα έγινε λαμβάνοντας υπόψη μια μεγάλη ποικιλία πηγών, όπως επιστημονικά άρθρα, τεχνικές εκθέσεις, επιστημονικά έγγραφα από πανεπιστημιακές βιβλιοθήκες, το διαδίκτυο και εφημερίδες, καθώς και από την επιτόπου γεωλογική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της περιοχής.

Πιο αναλυτικά, η παρούσα εργασία αποτελείται από τρία μέρη:

Το πρώτο μέρος (Α ΜΕΡΟΣ) αποτελεί το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας στο οποίο αναλύονται τα γενικά στοιχεία των κατολισθήσεων και η μέθοδος ανίχνευσης και ανάλυσης των κατολισθήσεων με την χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV).

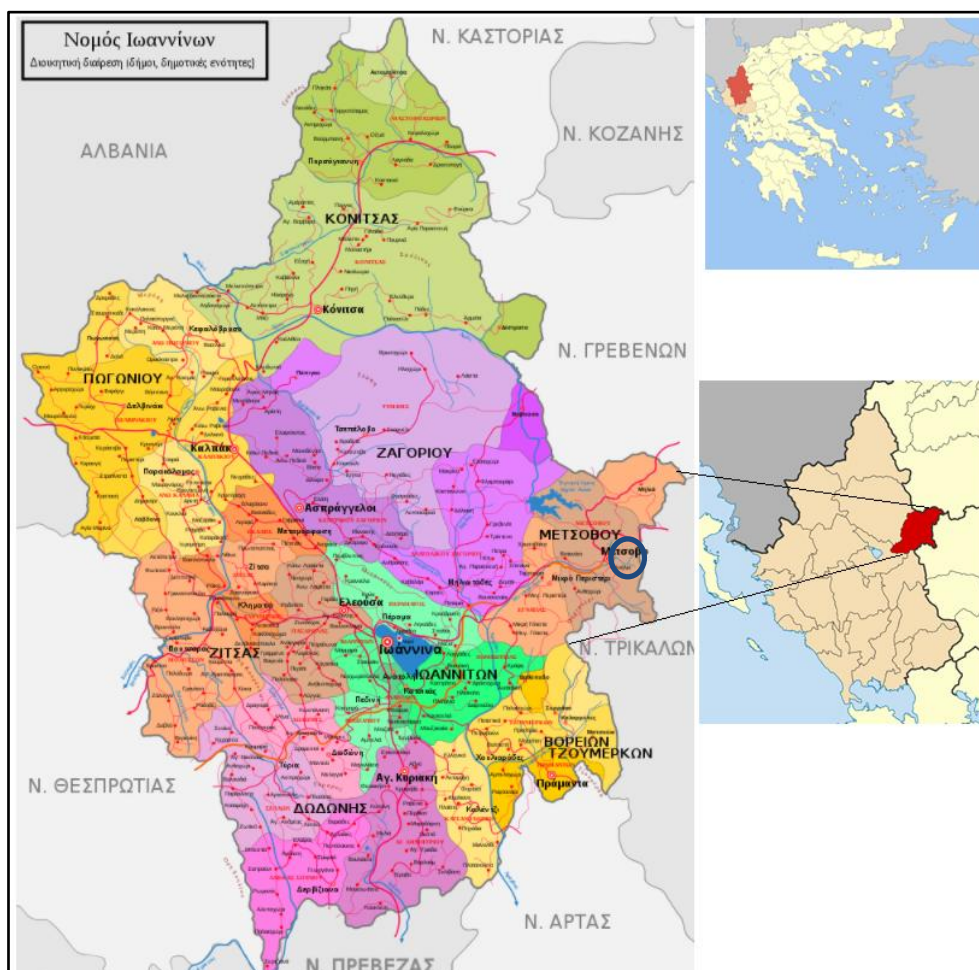
Το δεύτερο μέρος (Β' ΜΕΡΟΣ) αποτελείται από πληροφορίες όσον αφορά τις γεωλογικές – τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής του Ανηλίου. Ξεκινώντας πιο γενικά από την γεωλογία της ευρύτερης περιοχής και καταλήγοντας στην ανάλυση της στενής περιοχής μελέτης. Επίσης, σε αυτό το κομμάτι της εργασίας γίνεται μια σύντομη αναφορά σε παλαιότερες κατολισθήσεις που έλαβαν χώρα στη περιοχή μέσα από τεχνικές εκθέσεις, ενώ παράλληλα από επιτόπου παρατηρήσεις και με την χρήση της μεθόδου UAV, έγινε μια λεπτομερής επισκόπηση της περιοχής με στόχο την διερεύνηση της για κατολισθήσεις και τον εντοπισμό της γενικότερης αστάθειας.

Στο τρίτο μέρος (Γ' ΜΕΡΟΣ) και αφού επιλέχτηκε από το μέρος Β' η κατολίσθηση της δυτικής εισόδου του Ανηλίου, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο της δυνητικά ασταθής μάζας. Στη συνέχεια, με την χρήση του λογισμικού RocData (Rocscience Inc.) και την εφαρμογή του τύπου Hoek – Brown εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών του υποβάθρου, ενώ από στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης που έλαβαν χώρα στο παρελθόν εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των υλικών κατολίσθησης. Έπειτα, με την χρήση του προγράμματος Slide 5.0 (Rocscience Inc.) έγινε ανάλυση ευστάθειας της περιοχή για διαφορετικές τιμές πίεσης πόρων, έτσι ώστε να προσομοιωθεί η πολύ σημαντική παρουσία και συμβολή του νερού στην εξέλιξη του φαινομένου, και υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας της περιοχής.

Τέλος, το τελευταίο κομμάτι της διπλωματικής αποτελεί μια σύντομη αναφορά στα πιθανά μέτρα ασφαλείας τα οποία θα μπορούσαν να σχεδιαστούν έτσι ώστε η υπό μελέτη αστάθης μάζα να σταθεροποιηθεί. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα μέτρα που προτείνονται δεν προκύπτουν από αναλυτική εκτίμηση αλλά βασίζονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μηχανισμό της κατολίσθησης.

1.2. Περιοχή μελέτης

Το Ανήλιο είναι μια ορεινή περιοχή της βόρειας Πίνδου, που απαντάται στο ανατολικό τμήμα του νομού Ιωαννίνων και ανήκει στην ευρύτερη περιοχή του Μετσόβου.



Εικόνα 1. 1 Η περιοχή έρευνας στον χάρτη, με μπλε σημειώνεται η περιοχή μελέτης (εικόνες από Wikipedia).

Το Ανήλιο, όπως γίνεται κατανοητό και από την ετυμολογία¹ της λέξης, βρίσκεται αρκετές ώρες της μέρας υπό σκιά. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον αυξημένο αριθμό κατακρημνίσεων (έως θεομηνίες) που λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη περιοχή, καθιστούν την περιοχή κορεσμένη για το μεγαλύτερο διάστημα του έτους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δυσχερή έως αδύνατη απομάκρυνση (αποστράγγιση) των υδάτων και κατά συνέπεια, σε συνδυασμό με τις πτωχές μηχανικές ιδιότητες των γεωυλικών της περιοχής, την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων.



Εικόνα 1. 2 Η περιοχή έρευνας στον χάρτη (Από Google Maps, τροποποιημένο).

Η περιοχή του Ανήλιου γεωλογικά εντάσσεται στη ζώνη Ωλονού – Πίνδου με κυρίαρχο σχηματισμό τον φλύσχη. Η μηχανική συμπεριφορά του φλύσχη ως βραχώμαζα εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων και προσδίδει γενικά φτωχές μηχανικές ιδιότητες δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα όσον αφορά την ευστάθεια.

Συμπερασματικά, η περιοχή μελέτης εξαιτίας της μοναδικής της γεωλογίας αλλά και των συνθηκών που επικρατούν σε αυτήν αποτελεί πρόκληση για ένα τεχνικό γεωλόγο καθώς η μελέτη της θα επιφέρει σημαντικές πληροφορίες τόσο για την κατανόηση και αναγνώριση, όσο και για την αντιμετώπιση τέτοιων κατολισθητικών φαινομένων.

¹ Η ονομασία προκύπτει από το συνθετικό "αν - ήλιος" που σημαίνει χωρίς ήλιο, ανήλιαγος.

1.3. Σκοπός

Ο ευρύτερος σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων στην ευρύτερη περιοχή του Ανηλίου και η κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται κυρίως την διαδικασία με την οποία μελετάτε μια περιοχή, για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση κατολισθήσεων, μέσα από βιβλιογραφικά στοιχεία, από επιτόπου παρατηρήσεις και από την χρήση της μεθόδου UAV.

1.4. Μεθοδολογία

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εκτελέστηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Συγκέντρωση βιβλιογραφίας και στοιχείων που αφορούν τις γεωλογικές – τεχνικογεωλογικές συνθήκες και τα κατολισθητικά φαινόμενα για την περιοχή μελέτης.
- Επιτόπου αξιολόγηση των κατολισθητικών φαινομένων (κυρίως χαρακτήρες αναγλύφου, θραύσεις δρόμων-σπιτιών κλπ).
- Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των βραχομαζών της στενής περιοχής.
- Μελέτη και κατανόηση τεχνικών εκθέσεων από παλαιότερες έρευνες στην στενή περιοχή της κατολίσθησης.
- Ανάλυση και αξιολόγηση πληροφοριών από φύλλα γεωτρήσεων και από γεωλογικές τομές.
- Δημιουργία 3D μοντέλων των εξεταζόμενων περιοχών με την εφαρμογή της μεθόδου UAV.
- Δημιουργία υπολογιστικού ομοιώματος για την υπό μελέτη κατολίσθηση της δυτικής εισόδου του Ανηλίου.
- Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών της κατολίσθησης με την χρήση του λογισμικού RocData (Rocscience Inc.) και την εφαρμογή του τύπου Hoek-Brown.
- Επεξεργασία δεδομένων και ανάλυση ευστάθειας με την χρήση του προγράμματος Slide 5.0 (Rocscience Inc.).
- Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για διαφορετικές τιμές πίεσης πόρων και εκτίμηση της τιμής του με την εφαρμογή πρόσθετης σεισμικής επιβάρυνσης.
- Εκτίμηση πιθανών μέτρων αντιστήριξης.

2. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Οι κατολισθήσεις αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο με σημαντικό παράγοντα διακινδύνευσης τόσο για το περιβάλλον και τις υποδομές όσο και για τον άνθρωπο. Η εκδήλωση ενός κατολισθητικού φαινομένου μπορεί να έχει δυσάρεστες κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις, η αποκατάσταση των οποίων μπορεί να αποβεί εξαιρετικά δαπανηρή. Τα αίτια των κατολισθητικών φαινομένων είναι πολλά και εξαρτώνται από γεωλογικούς, τεκτονικούς, υδρογεωλογικούς, τοπογραφικούς και κλιματικούς παράγοντες που σε συνδυασμό με τον ανθρωπογενή παράγοντα προκαλούν τη γένεση των αστοχιών.

Οι πρώτες προσπάθειες για τη μελέτη και έρευνα των κατολισθήσεων ξεκίνησαν στις αρχές του 1950, με πολλές αναθεωρήσεις και βελτιώσεις έκτοτε. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα και θεωρίες που σε συνδυασμό με δεδομένα κατολισθήσεων του παρελθόντος, αποτελούν ένα σημαντικό οδηγό για την μελέτη (πρόβλεψη, αποκατάσταση, αντιμετώπιση) των κατολισθητικών φαινομένων.

Παρόλο που η εμπειρία για την κατανόηση, αναγνώριση και αντιμετώπιση των κινδύνων κατολίσθησης έχει αυξηθεί σημαντικά, εντούτοις η πολυπλοκότητα του φαινομένου ενέχει σημαντικές δυσκολίες τόσο στη διερεύνηση του όσο και στην επιλογή και το σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων προστασίας. Βασική προϋπόθεση για αυτό είναι η πλήρης κατανόηση των συνθηκών και των διαδικασιών που προκάλεσαν ή μπορούν να προκαλέσουν μια κατολίσθηση.

2.1. Ορισμοί

Κατά καιρούς αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να δώσουν έναν ορισμό στον όρο "κατολίσθηση". Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιοι από τους ορισμούς των κατολισθητικών φαινομένων:

- Σύμφωνα με τον Terzaghi (1950), η κατολίσθηση ορίζεται ως «μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρσανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω».
- Σύμφωνα με τον Varnes (1978), η κατολίσθηση ή ο όρος «μετακίνηση των μαζών» ορίζεται ως «η μετακίνηση τμήματος πρσανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό». 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. Ο ορισμός του Varnes είναι ο επικρατέστερος από το 1978 έως σήμερα.
- Σύμφωνα με τον Cruden (1991), η κατολίσθηση ορίζεται ως «η κίνηση μίας μάζας πετρωμάτων, συντριμμάτων ή γης κάτω από μια κλίση».

- Σύμφωνα με τους Highland και Bobrowsky (2008) η κατολίσθηση ορίζεται ως «μια κατηφορική κίνηση του βράχου ή του εδάφους, ή και των δύο, όπου εμφανίζονται στην επιφάνεια, είτε ως καμπύλη ρήξη είτε ως επίπεδη ρήξη, στην οποία μεγάλο μέρος του υλικού συχνά κινείται ως μια συνεκτική ή ημισφαιρική μάζα με μικρή εσωτερική παραμόρφωση».

2.2. Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθητικών φαινομένων με επικρατέστερη και πιο πληρέστερη την ταξινόμηση του Varnes (1978). Η ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση τον Varnes βασίζεται σε δύο βασικές παραμέτρους. Η πρώτη περιγράφει την φύση του υλικού. Γίνεται ουσιαστικά η διάκριση του βραχώδους υπόβαθρου και των εδαφικών σχηματισμών (βράχος, έδαφος). Ενώ η δεύτερη περιγράφει τον τύπο της μετακίνησης.

Για την εύλογη ανάλυση και ταξινόμηση των κατολισθήσεων δίνονται οι ορισμοί για τη φύση του υλικού καθώς και οι τύποι των μετακινήσεων:

- Βράχος ή Υπόβαθρο (rock ή bedrock): ο Varnes ορίζει το υπόβαθρο, ως μια σταθερή ή σκληρή μάζα η οποία πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης ήταν άθικτη στη φυσικής της θέση.
- Έδαφος (soil): «είναι ένα σύνολο στερεών σωματιδίων ορυκτών και 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» (1978) (μετάφραση από τον συγγραφέα).
- Γη (earth): με τον όρο «Γη» ο Varnes περιγράφει ένα υλικό το οποίο αποτελείται κατά 80% ή και περισσότερο από σωματίδια που είναι μικρότερα από 2 mm, με ανώτατο όριο σωματιδίων το μέγεθος της άμμου.
- Ιλύς (Mud): με τον όρο «ιλύ» ο Varnes περιγράφει ένα υλικό το οποίο αποτελείται κατά 80% ή και περισσότερο από σωματίδια που είναι μικρότερα από 0,06 χιλιοστά, με ανώτατο όριο σωματιδίων το μέγεθος της αργίλου.
- Κορήματα (Debris): με τον όρο «κορήματα» ο Varnes περιγράφει ένα υλικό το οποίο 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.

Οι κινηματικοί τύποι κατά Varnes χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:

- ❖ Πτώσεις (falls)
- ❖ Ανατροπές (toppling)
- ❖ Ολισθήσεις (slides)
- ❖ Εξαπλώσεις (spreads)
- ❖ Ροές (flows)

2.3. Κατηγορίες κατολισθήσεων

Οι κατηγορίες των κατολισθητικών κινήσεων συναθροίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2. 2 Ταξινόμηση κατολισθητικών κινήσεων Varnes (1978)

Τύπος κίνησης		Τύπος μετακινούμενου υλικού		
		Βραχώδεις υπόβαθρο	Μηχανικά 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	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Πλευρική εξάπλωση		Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροή		Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός)	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
			(ερπυσμός εδάφους)	
Σύνθετη		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων		

Αναλυτικά οι κατολισθητικές κινήσεις κατά Varnes (1978) είναι οι παρακάτω:

- **Καταπτώσεις βράχων (rock falls):** Ο Varnes περιγράφει τον όρο «καταπτώσεις βράχων» ως την αποκόλληση ενός τμήματος μιας μάζας (κυρίως πετρώματος αλλά και συνεκτικού εδάφους) από ένα απότομο πρανές, κατά μήκος μια επιφάνειας με πολύ μικρή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Η κίνηση αυτή πραγματοποιείται με την μορφή της κύλισης και της αναπήδησης.

Οι καταπτώσεις βράχων υλοποιούνται κυρίως σε σχηματισμούς με εναλλαγές πετρωμάτων (πχ. φλύσχης) εξαιτίας της διαφορικής διάβρωσης των σχηματισμών με αποτέλεσμα την δημιουργία εξαρμάτων, που με την επίδραση της βαρύτητας αποκολλούνται από την κύρια μάζα. Επίσης καταπτώσεις βράχων πραγματοποιούνται σε ομογενείς συμπαγείς σχηματισμούς εξαιτίας των ρωγμών που υπάρχουν στα πετρώματα αυτά, είτε από την αποτόνωση της βραχομάζας (χαλάρωση της βραχομάζας), είτε από την δράση του νερού που έχει την ιδιότητα να διευρύνει προϋπάρχουσες ασυνέχειες (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

- **Ανατροπές βράχων (rock topples):** Οι ανατροπές βράχων κατά Varnes περιγράφουν την κίνηση η οποία οφείλεται σε τάσεις που προκαλούν

περιστροφή προς τα έξω, γύρω από ένα σημείο ή άξονα που εντοπίζεται κάτω από το κέντρο βάρους της βραχώδους ή εδαφικής μάζας που επηρεάζεται. Στη συνέχεια, τμήματα αποχωρίζονται από την υπόλοιπη μάζα, αναπηδώντας και πέφτοντας προς τα κατόντη του πρηνούς. Το φαινόμενο σταδιακά μπορεί να εξελιχθεί σε κατάρπωση ή ακόμη και σε ολίσθηση της μετακινούμενης μάζας. Εξαρτάται από την γεωμετρία της επιφάνειας αποχωρισμού και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Οι ανατροπές βράχων προκαλούνται κυρίως από την βαρύτητα και από δυνάμεις που ωθούν σε ανατροπή από γειτονικά τεμάχια. Επίσης, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας είναι η δράση του νερού, που γεμίζει τις ασυνέχειες της βραχομάζας, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδροστατικής πίεσης που ωθεί και αυτή με την σειρά της τμήματα της βραχομάζας σε ανατροπή.

Οι ανατροπές, σε βραχώδεις σχηματισμούς, ανάλογα με τον μηχανισμό αστοχίας μπορούν να διακριθούν στις εξής υποκατηγορίες (από Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

1. Ανατροπή λόγω κάμψης (flexural toppling)
 2. Ανατροπή τεμαχίων (block toppling)
 3. Ανατροπή τεμαχίων λόγω κάμψης (block – flexural toppling)
 4. Δευτερογενείς ανατροπές (secondary toppling)
- **Ολισθήσεις (slides):** Κατά Varnes, με τον όρο «ολίσθηση» ορίζεται η προς τα κατόντη κίνηση μιας αποσπώμενης μάζας από ένα βραχώδες ή εδαφικό πρηνές που προϋποθέτει τη διατμητική παραμόρφωση, μετατόπιση ή θραύση του υλικού κατά μήκος επιφανειών θραύσης ή ζωνών διάτμησης. Η μετακίνηση αυτή είναι προοδευτική. Συχνά τα πρώτα σημάδια μετακίνησης είναι η εμφάνιση ρωγμών στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος της οποίας διαμορφώνεται το κύριο μέτωπο της ολίσθησης. Η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει πέρα από τον πόδα της επιφάνειας θραύσης, καλύπτοντας την αρχική εδαφική επιφάνεια στο πρηνές, η οποία τελικά μεταπίπτει σε επιφάνεια διαχωρισμού.

Οι ολισθήσεις χωρίζονται σε περιστροφικές και μεταθετικές (Varnes, 1978):

- ❖ **Περιστροφικές ολισθήσεις (rotational slides):** Αποτελούν 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

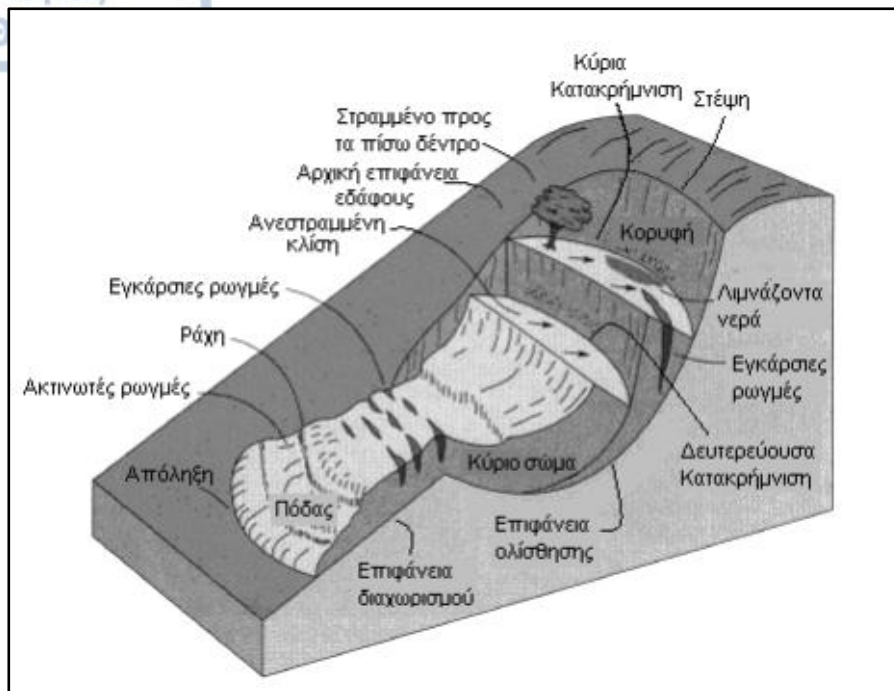
παράλληλο στον άξονα γύρω από τον οποίο η μάζα ολισθαίνει (Varnes, 1978).

Οι περιστροφικές ολισθήσεις συμβαίνουν σε ομοιογενή υλικά καθώς και σε ιδιαίτερα ασυνεχείς βραχομάζες, δηλαδή σε βραχομάζες με πολλές οικογένειες ασυνεχειών, επειδή αυτού του είδους οι βραχομάζες συμπεριφέρονται ως ισότροπο υλικό (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Η υπό μελέτη κατολίσθηση της παρούσας εργασίας αποτελεί μια περιστροφική ολίσθηση και για αυτό το λόγο παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά μιας περιστροφικής ολίσθησης (Κούκη, Σαμπατακάκη, 2007).

Τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- **Στέψη (crown):** Καλείται το ανώτερο σταθερό τμήμα του φυσικού εδάφους, το πλησιέστερο προς την κύρια κατακρήμνιση.
- **Κύρια κατακρήμνιση (main scarp):** Καλείται το απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της ολίσθησης (δηλαδή την στέψη), που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
- **Κορυφή (top):** Καλείται το πιο ψηλό σημείο επαφής μεταξύ της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.
- **Κεφαλή (head):** Ονομάζονται τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης, κατά μήκος της επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.
- **Δευτερεύουσα κατακρήμνιση (minor scarp):** Αποτελεί μια δευτερεύουσα επιφάνεια θραύσης της μετακινούμενης μάζας που έχει προέλθει από διαφορικές μετακινήσεις της μάζας αυτής.
- **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.
- **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.
- **Απόληξη (toe):** Αποτελεί το κατώτερο, συνήθως κυρτό όριο της μετακινούμενης μάζας. Είναι ουσιαστικά το τμήμα της κατολίσθησης που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της.
- **Επιφάνεια ολίσθησης (surface of rupture):** Καλείται η επιφάνεια που αποτελεί επέκταση της κύριας κατακρήμνισης κάτω από τη μετακινούμενη μάζα της κατολίσθησης, πάνω στην οποία γίνεται η ολίσθηση.
- **Επιφάνεια διαχωρισμού (surface of separation):** Αποτελεί το τμήμα της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους που καλύπτεται από τον πόδα της κατολίσθησης.
- **Αρχική επιφάνεια εδάφους (original ground surface):** Ονομάζεται η επιφάνεια του εδάφους πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης.



Εικόνα 2. 1 Χαρακτηριστικά τμήματα περιστροφικής ολίσθησης (Varne, 1978)

(Μετάφραση από Κούκη, Σαμπατακάκη, 2007)

❖ **Μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides):** Ο Varne αναφέρει ότι, στις μεταθετικές ολισθήσεις η μετακινούμενη μάζα που αποχωρίζεται από το πρανές 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.

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

Οι μεταθετικές ολισθήσεις διαφέρουν κατά πολύ από τις περιστροφικές και η διάκρισή τους είναι καίριας σημασίας.

Πιο συγκεκριμένα, στις περιστροφικές ολισθήσεις με την εξέλιξη του φαινομένου η μετακινούμενη μάζα τείνει να ισορροπήσει σε μια νέα θέση, αντίθετα στις μεταθετικές η μετακινούμενη μάζα συνεχίζει ανεξέλεγκτα. (εξαρτάται βέβαια και από

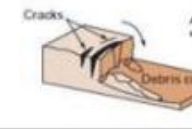
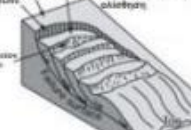
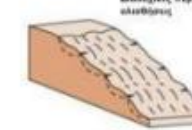
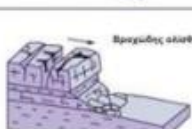
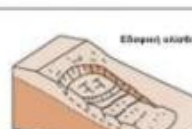
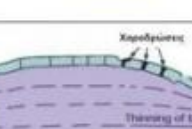
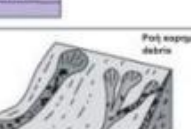
την κλίση της επιφάνειας αποχωρισμού). Επίσης κατά την μεταθετική ολίσθηση η μετακινούμενη μάζα μπορεί να σπάσει καθώς ακόμη και να εξελιχθεί σε εδαφική ροή, αν η περιεκτικότητα σε νερό των υλικών που προκαλούν την ολίσθηση, αυξηθεί (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

- **Εξαπλώσεις – εκτάσεις (spreads):** Με τον όρο «εξάπλωση – εκτάσεις» περιγράφεται η πλευρική κίνηση συνεκτικών υλικών τα οποία υπέρκεινται μαλακών υλικών. Οι βασικοί τύποι πλευρικών εξαπλώσεων είναι οι παρακάτω:
- **Εξάπλωση τεμαχών (block spreads):** Κατά Varnes ως εξάπλωση τεμαχών ορίζεται: «Οι βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που υπέρκεινται άλλων ασθενέστερων, διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές σε τεμάχια. Το υποκείμενο υλικό συνθλίβεται και συχνά καλύπτει τις ρωγμές που δημιουργούνται. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα, χωρίς όμως καλά καθορισμένη επιφάνεια διάτμησης ή κάποια ζώνη πλαστικής ροής που να ελέγχει τη μετακίνηση, η οποία τις περισσότερες φορές είναι εξαιρετικά αργή αλλά η επιφάνειά της κατά κανόνα πολύ μεγάλη (λωρίδες αρκετών χιλιομέτρων)» (μετάφραση από Κούκη, Σαμπατακάκη, 2007).
- **Εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads):** Κατά Papathanassiou, 2006 εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης ορίζονται: «Πλευρικές μετατοπίσεις δημιουργούνται λόγω ολισθητικών κινήσεων υπερκείμενων εδαφικών σχηματισμών πάνω σε ρευστοποιημένα στρώματα είτε προς τα κάτω λόγω βαρύτητας, σε πρανή με κλίση μικρότερη των τριών μοιρών (Youd και Garriss, 1995), είτε προς την κατεύθυνση ελεύθερης όψης, όπως σε θέσεις αναχωμάτων ποταμών (Kramer, 1996). Οι κινήσεις αυτές λαμβάνουν χώρα όταν η αντοχή του ρευστοποιήσιμου σχηματισμού δεν αρκεί για να αντισταθμίσει τις πλευρικές δυνάμεις οι οποίες ενεργούν στο υπερκείμενο μη ρευστοποιήσιμο επιφανειακό στρώμα (Kramer, 1996; Cooke και Mitchell, 1999)».
- **Ροές εδαφών:** κατά Varnes οι ροές εδαφών είναι φαινόμενα συνεχών σχετικών μετακινήσεων στο χώρο που εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά αλλά και σε βραχώδεις υπόβαθρο. Στο βραχώδες υπόβαθρο, οι αντίστοιχες μετακινήσεις περιλαμβάνουν τις πολύ αργές παραμορφώσεις που κατανέμονται ανάμεσα σε κοντινές ρωγμές – διακλάσεις, καθώς και εκείνες που παρατηρούνται μέσα στη μάζα του πετρώματος και προέρχονται από κάμψη, πτύχωση ή διόγκωση. Επίσης, οι ροές αφορούν την μετακίνηση κάποιου ρευστού, έτσι γίνεται αντιληπτό ότι το υλικό θα πρέπει να περιέχει μια ικανή ποσότητα νερού ώστε να συμπεριφέρεται ως ρευστό (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Οι ροές εδαφών χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- **Ροές βραχώδους υποβάθρου (bedrock flows):** Όπως προαναφέρθηκε σε αυτή την κατηγορία ροών περιλαμβάνονται οι παραμορφώσεις της βραχομάζας. Αυτές οι παραμορφώσεις κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές και μικρές ή μεγάλες ρωγμές – διακλάσεις ή ακόμη μικρορωγμές, χωρίς εντοπισμό της μετατόπισης κατά μήκος μιας συγκεκριμένης επιφάνειας. Οι μετακινήσεις είναι εξαιρετικά αργές και λίγο πολύ σταθερές στο χρόνο (Varnes, 1978).
 - **Ροές κορημάτων (debris flows):** Οι ροές κορημάτων αναφέρονται στα χαλαρά υλικά. Οι ροές τέτοιου τύπου είναι εύκολες στην αναγνώριση σε σχέση με εκείνες στο βραχώδες υπόβαθρο καθώς οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες και πολύ πιο ευκρινείς. Οι επιφάνειες ολίσθησης μέσα στη μετακινούμενη μάζα δεν είναι ορατές.
 - **Ερπυσμός (creep):** Αξίζει να σημειωθεί και μια άλλη υποκατηγορία των ροών εδαφών η οποία όμως δεν ταξινομείται στις κύριες αστοχίες. Αυτή η κατηγορία είναι ο ερπυσμός εδάφους, που αφορά συνήθως τα πρώτα 2-3 cm του εδάφους, όμως σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει τα 2-3 m, και οφείλεται στην δράση της βαρύτητας. Ο ερπυσμός ουσιαστικά αποτελεί μια πολύ βραδεία κίνηση του μανδύα αποσάθρωσης των εδαφικών σχηματισμών ή των υλικών της ζώνης αποσάθρωσης και των πετρωμάτων που έχουν υποστεί ισχυρό κερματισμό. Η αργή αυτή κίνηση δεν επιτρέπει τη δημιουργία επιφάνειας ολίσθησης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).
- **Σύνθετες μετακινήσεις πρανών (composite slides):** Κατά Dikau (1996) όλα τα είδη των κατολισθήσεων περιλαμβάνουν παραπάνω από ένα τύπο κίνησης και μπορούν να δρουν ταυτόχρονα σε διαφορετικά μέρη της επιφάνειας δράσης και να εξελίσσονται με διαφορετικές διαδικασίες.
Ο Varnes (1978) πρότεινε την ταξινόμηση των σύνθετων μετακινήσεων έτσι ώστε να κατατάξει τις διαφορετικού τύπου μετακινήσεις που γίνονται κατά καιρούς είτε ακόμη και ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας.
Οι πιο σημαντικές σύνθετες μετακινήσεις είναι οι περιστροφικές ή μεταθετικές ολισθήσεις που μεταβαίνουν σε ροές εδαφών (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

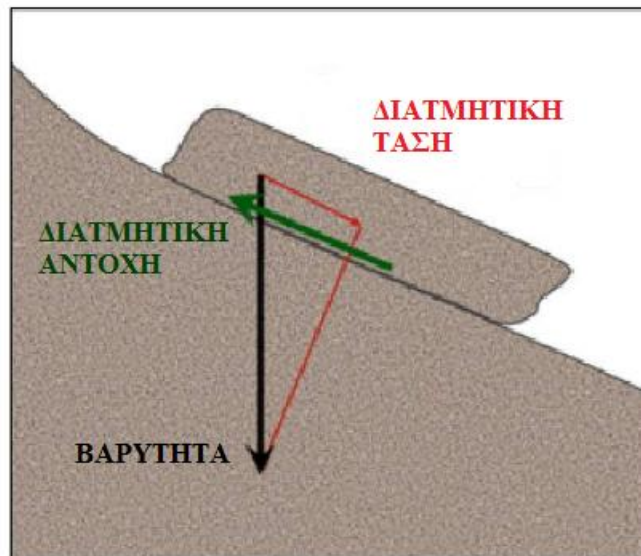
Πίνακας 2. 3 Γενικευμένος πίνακας κατολισθήσεων (Varnes 1978, τροποποιημένο από τους Cruden & Varnes 1996)

Υλικό	Βράχος	Debris	Έδαφος
Τύπος αλυσίδας			
ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ			
	Κατάπτωση βράχων	Κατάπτωση κορμμάτων (debris)	Εδαφική κατάπτωση
ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ			
	Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορμμάτων (debris)	Ανατροπή εδάφους
ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ			
	Μεμονωμένη περιφερειακή ολίσθηση	Πακτική περιφερειακή ολίσθηση	Διαδοχικές περιφερειακές ολίσθησεις
ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΕΣ (ΕΠΙΠΤΕΔΕΣ)			
	Βραχικός ολίσθηση	Ολίσθηση κορμμάτων (debris)	Εδαφική ολίσθηση
ΕΞΑΠΛΩΣΕΙΣ			
	Χρησμός βράχων	Π.χ. Προσθήκη υλικού λόγω διάβρωσης και κορυμνισμάτων	Εδαφική εξάπλωση
ΡΟΕΙΣ			
	Παρορμητικός ροή debris	Ροή κορμμάτων debris	Εδαφική ροή (κορμμάκια ροή)
ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ			
	Π.χ. Κατάπτωση - εδαφική ροή με κατάπτωση βράχων και debris	Π.χ. Σύνθετη, μη-εγκλωβισμένη, περιφερειακή/ολίσθηση με μετατόπιση σε εδαφική ροή στην κορυφή	

2.4. Αίτια εκδήλωσης κατολισθήσεων

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων προκαλείται από μια συνδυασμένη δράση πολλών παραγόντων. Για τη μελέτη ενός κατολισθητικού φαινομένου αρχικά, εξετάζεται η ευστάθεια των πρανών. Ουσιαστικά, αναλύονται οι δυνάμεις που δρουν στο πρανές έτσι ώστε να προκύψει ο μηχανισμός αστοχίας. Στη μάζα του πρανούς ενεργούν δυνάμεις που αντιδρούν στην ολίσθηση και δυνάμεις οι οποίες ωθούν σε αυτήν. Οι δυνάμεις αυτές αναπτύσσονται σε κάθε σημείο διατμητική τάση στην οποία αντιδρά η διατμητική αντοχή του υλικού. Η διατμητική τάση αναπτύσσεται παράλληλα στην επιφάνεια που δρουν οι εξωτερικές δυνάμεις ενώ η ορθή τάση κάθετα σε αυτήν.

Η διατμητική αντοχή του υλικού, καθορίζεται από τις μηχανικές του ιδιότητες δηλαδή την εσωτερική τριβή ϕ και τη συνοχή c των επιμέρους τεμαχίων του βράχου ή του εδαφικού υλικού.



Εικόνα 2. 2 Σχηματική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ διατμητικής τάσης και διατμητικής αντοχής.

Τα αίτια των κατολισθήσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στα εξωγενή τα οποία προκαλούν αύξηση της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο πρανές και στα ενδογενή αίτια που προκαλούν μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού (Terzaghi, 1950).

Τα ενδογενή αίτια που αναφέρονται στη μείωση της αντοχής είναι τα εξής:

- Οι διαβρωτικές διεργασίες.
- Η φυσική και χημική αποσάθρωση.
- Οι υπερβολικές διακυμάνσεις του περιεχόμενου νερού.
- Η αύξηση της πίεσης πόρων.
- Αύξηση του φαινόμενου ειδικού βάρους

Τα εξωγενή αίτια που αναφέρονται στην αύξηση των τάσεων είναι τα εξής:

- Υπερφόρτιση του πρανούς.
- Εκσκαφές στη βάση του πρανούς.
- Αύξηση του ύψους και της κλίσης του πρανούς.
- Φυσικές ή τεχνητές δονήσεις

Πάνω στο θέμα της ανάλυσης ευστάθειας των πρανών υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία στην οποία, μεταξύ άλλων, αναπτύσσονται οι κύριοι παράγοντες που ρυθμίζουν την ευστάθεια των πρανών, και συντελούν στην αύξηση της διατμητικής τάσης και μείωση της διατμητικής αντοχής.

Σύμφωνα με τους Duncan et. al., 1992, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών είναι οι παρακάτω:

- **Ο τύπος των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής** (πχ. Οι χαλαροί σχηματισμοί είναι πιο επιρρεπείς σε κατολισθήσεις σε σχέση με τα βραχώδη υλικά του υποβάθρου).
- **Ο προσανατολισμός και η τεκτονική των σχηματισμών.** Ένας σχηματισμός που αποτελείται από εναλλαγές πολλών ετερογενών πετρωμάτων, είναι πολύ πιθανό να παρουσιάσει φαινόμενα κατολίσθησης, λόγω των πολλών πιθανών επιφανειών αστοχίας. Όταν η διάταξη της στρώσης ή της σχιστότητας του σχηματισμού είναι ομόρροπη με τον προσανατολισμό του πρανούς, τότε μπορεί να προκληθούν ολισθήσεις που συμβάλουν στη δημιουργία κορημάτων.
- **Η κλίση του πρανούς.** Οι κατολισθήσεις είναι πιο πιθανόν να αναπτυχθούν σε απότομα πρανή.
- **Η παρουσία νερού.** Το μεγαλύτερο ποσοστό των κατολισθήσεων λαμβάνει χώρα σε περιοχές με αυξημένα ποσοστά ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Το νερό, που μπορεί να είναι επιφανειακό ή υπόγειο, είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην ευστάθεια των πρανών αφού προκαλεί στη βραχομάζα:

- ❖ τον κορεσμό της.
- ❖ τη πρόσθετη φόρτιση.
- ❖ τη δημιουργία υδροστατικών πιέσεων.
- ❖ την αυξομείωση της πίεσης των πόρων.
- ❖ την εσωτερική διάβρωση.
- ❖ τη χαλάρωση κατά μήκος των επιφανειών ασυνέχειας με τη συνεχή διεύρυνση τους.
- ❖ τη μεταβολή του όγκου στην περίπτωση δημιουργίας παγετού.

Φυσικά, όταν το νερό βρίσκεται σε μικρές ποσότητες μέσα στους πόρους λεπτόκοκκων σχηματισμών μπορεί και να αυξήσει τη διατμητική τους αντοχή. Αυτό συμβαίνει γιατί τα μόρια του νερού στο περίβλημα κάθε κόκκου έλκουν το ένα το άλλο στοιχείο που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνοχής. Όμως, με τη συνεχή αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό, το υλικό αρχικά καθίσταται πλαστικό και στη συνέχεια με την εξέλιξη του φαινομένου χάνει τη διατμητική του αντοχή και μεταβαίνει στη ρευστή φάση. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στις περιπτώσεις των αργιλικών υλικών.

- **Οι εδαφικές δονήσεις.** Οι ισχυρές δυναμικές φορτίσεις όπως ο σεισμός, χαλαρώνουν τα εδαφικά υλικά επιφέροντας αστάθεια. Κατά τη διάρκεια του σεισμικού κραδασμού, σε πρανή που αποτελούνται από χαλαρά ή μικρής

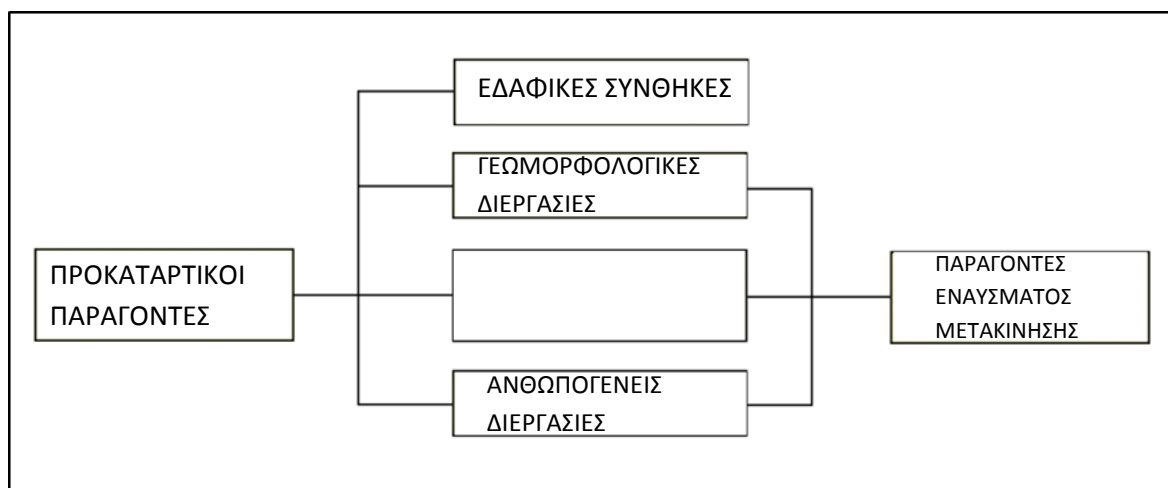
συνεκτικότητας υλικά επέρχεται μείωση της συνοχής και το πρηνές οδηγείται σε αστοχία.

- **Η φυτοκάλυψη.** Πολλά δέντρα διαθέτουν ένα βαθύ ριζικό σύστημα που ευνοεί στην ευστάθεια εδαφικών υλικών καθώς μειώνει τη διαβρωτική δράση του νερού. Συνεπώς με την απομάκρυνση τέτοιου είδους φυτοκάλυψης αυξάνουν οι πιθανότητες εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων. Από την άλλη πλευρά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο η μείωση της εδαφικής υγρασίας και η μηχανική αποσάθρωση που προκαλείται από τη δράση των δράση των ριζών με τη διεύρυνση των ρωγμών σε βραχώδεις σχηματισμούς όσο και το πρόσθετο φορτίο της δενδρώδους φυτοκάλυψης.
- **Η διαβρωτική δράση.** Πρηνή που προσεγγίζουν κοίτες υδατορεμάτων ή ακτές με αυξημένη δράση του κυματισμού, υφίστανται τις συνέπειες της αφαίρεσης της αντιστήριξης ποδός που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ευστάθειας και υπέρβαση της διατμητικής αντοχής, που οδηγούν με την σειρά τους σε αστοχία.

Η Ομάδα Εργασίας της UNESCO για τις κατολισθήσεις (Working Party on World Landslide Inventory WP/WLI 1994) πρότεινε μία γενικότερη ταξινόμηση για τα αίτια εκδήλωσης των κατολισθήσεων (από Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Αυτή η προτεινόμενη ταξινόμηση υποδιαιρεί τους παράγοντες με βάση την προέλευσή τους σε παράγοντες που αναφέρονται:

- ❖ σε εδαφικές συνθήκες.
- ❖ σε γεωμορφολογικές διεργασίες.
- ❖ σε φυσικές διεργασίες.
- ❖ σε ανθρώπινες διεργασίες.



Εικόνα 2. 3 Ταξινόμηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων κατά WP/WLI (1994) (από Κούκη, Σαμπατακάκη 2007 τροποποιημένο από τον συγγραφέα)

Πίνακας 2. 4 Αναλυτικά οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI 1994) (Από Κούκη, Σαμπατακάκη, 2007)

ΕΔΑΦΙΚΕΣ 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 πρानούς
5	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρानούς
6	Διάβρωση της βάσης του πρानούς από παγετώνα
7	Διάβρωση των πλευρών του πρानούς
8	Εσωτερική διάβρωση
9	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρानούς
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 διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Εκσκαφές στη βάση (πόδα) του πρानούς
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.)

2.5. Φαινόμενα κατολισθήσεων σε σχηματισμό φλύσχη

Ο φλύσχος αποτελεί έναν ιδιαίτερο σχηματισμό και αυτό κυρίως οφείλεται στον τρόπο σχηματισμού του ο οποίος προσδίδει γενικά φτωχές μηχανικές ιδιότητες με συνέπεια να δημιουργεί σημαντικά προβλήματα όσον αφορά τα τεχνικά έργα. Η ιδιαιτερότητα των φλυσχικών σχηματισμών επικεντρώνεται στα παρακάτω:

- Ετερογένεια.
- Έντονη στρωσιγένεια με μεγάλη εμμονή.
- Έντονη τεκτονική διαταραχή.
- Γεωλικά με χαμηλή αντοχή.
- Ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων.
- Ανάπτυξη διεπιφανειών ολίσθησης λόγω της δράσης του νερού.
- Φαινόμενο αποσάθρωσης.

2.5.1. Γεωλογικό πρότυπο φλύσχη.

Ο σχηματισμός του φλύσχη σύμφωνα με τον BERNHARD STUDER (1827), δεν αποτελεί ένα συγκεκριμένο πετρογραφικό σχηματισμό, αντιθέτως, αποτελείται από συνεχείς εναλλαγές ψαμμιτικών στρωμάτων και λεπτόκοκκων πηλινικών υλικών, όπως ιλυόλιθο, αργιλόλιθο και αργιλικό σχιστόλιθο. Ο σχηματισμός του συνδέεται με την τεκτονική εξέλιξη μιας λεκάνης, κλείνοντας τον κύκλο ιζηματογένεσης πριν την παροξυσμική πτύχωση και ορογένεση της. Πιο συγκεκριμένα, η ύπαρξη του σχετίζεται με το κλείσιμο μιας ωκεάνιας λεκάνης.

Οι συμπιεστικές δυνάμεις που δρουν κατά το κλείσιμο του ωκεανού, υποχρεώνουν την ωκεάνια λιθόσφαιρα να βυθιστεί κάτω από την ηπειρωτική (ή κάτω από μια άλλη ωκεάνια λιθόσφαιρα αντίστοιχα). Έτσι, στην λεκάνη που σχηματίζεται ανάμεσα σε αυτές τις δύο λιθόσφαιρες αποτίθενται τα υλικά διάβρωσης των δύο φλοιών, που στη συνέχεια θα υποστούν λιθοποίηση (διαγέννεση) και θα αποτελέσουν τον φλύσχη. Με το κλείσιμο της ωκεάνιας λεκάνης ακολουθεί η σύγκρουση των δυο πλακών. Εξαιτίας της έντονης συμπιεστικής τεκτονικής που ρηγματώνει και πτυχώνει την περιοχή, ο φλύσχος εμφανίζεται έντονα καταπονημένος και πτυχωμένος. Ο φλύσχος βάσει τεκτοορογενετικής εξέλιξης αποτελεί έναν ενδιάμεσο σχηματισμό μεταξύ ηριτικών ασβεστόλιθων της υφαλοκρηπίδας και κερατολίθων (πετρώματα από διαγέννεση ιζημάτων βαθιάς θάλασσας), και για αυτό το λόγο, μπορεί να εμφανίζει μεταβατικές ζώνες με αυτά τα πετρώματα, τα οποία εξαιτίας της έντονης τεκτονικής καταπόνησης έχουν χάσει τα χαρακτηριστικά τους (Κίλιας, 2009).

Ο σχηματισμός του φλύσχη απαντάται σε περιοχές οι οποίες έχουν πρόσφατη γεωλογική δραστηριότητα και όχι σε παλαιότερα κράσπεδα. Στον Ελλαδικό χώρο απαντάται σε πολλές ενότητες όπως στην ενότητα της Πίνδου, Ιονίου, Γαββρόβου – Τρίπολης, Παξών, Παρνασσού – Γκιώνας, όπως και με μεταμορφωμένες μορφές στις εσωτερικές ενότητες των Ελληνίδων.

Συχνά, σε περιοχές με μεγάλες ζώνες επωθήσεων ο φλύσχη μπορεί να εμφανίζεται με την μορφή τεκτονικών λεπιών. Οι τεκτονικές αυτές λεπιώσεις διαταράσσουν έντονα τα πλαστικά του μέλη (ιλυόλιθοι, αργιλικοί σχιστόλιθοι, λεπτοστρωματώδεις εναλλαγές ψαμμίτη – ιλυόλιθου), δημιουργώντας μια σειρά από ζώνες με διατμημένα υλικά. Λιγότερο τεκτονισμένος και με ομαλή στρωματογραφική ακολουθία μπορεί να εμφανιστεί πίσω από το κύριο μέτωπο μιας μεγάλης επώθησης και αυτό διότι κατά την διαδικασία της πτύχωσης τα ψαμμιτικά του μέλη κατάφεραν εν μέρει να «αντισταθούν» στην παραμορφωτική αυτή διαδικασία.

Ο σχηματισμός του φλύσχη στο σύνολο του αποτελεί έναν αδιαπέρατο σχηματισμό. Όμως, υπόγεια ύδατα μπορούν να κινούνται μέσα στους ψαμμιτικούς του ορίζοντες με αποτέλεσμα πολλές φορές να παγιδεύονται στους πιο αργιλικούς ορίζοντες χωρίς την δυνατότητα εκτόνωσής τους και κατά συνέπεια να αναπτύσσονται υδροστατικές πιέσεις απομειώνοντας έτσι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού.

Τέλος το φαινόμενο της αποσάθρωσης είναι πολύ έντονο σε σχηματισμούς τύπου φλύσχη μέσω του μηχανισμού της σχιστοποίησης και σχάσης, στα ιλυολιθικά κυρίως στρώματα, αλλά συνήθως δεν συνεχίζεται σε βάθος.

2.5.2. Τεχνικογεωλογικό πρότυπο φλύσχη

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας αλλά και της ποικιλίας που παρουσιάζει ο φλύσχη ως προς την λιθολογία, την δομή και την τεκτονική του καταπόνηση, χρήζει ειδικού τεχνικογεωλογικού χαρακτηρισμού.

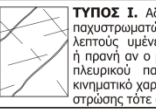
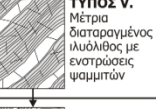
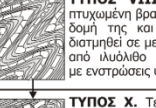
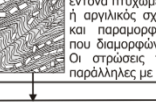
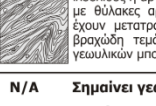
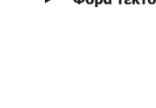
Για την αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών του προτάθηκε ένα σύστημα ταξινόμησης των λιθολογικών μορφών φλύσχη σε 11 τύπους (I έως XI) με βάση τα ποσοστά συμμετοχής των ψαμμιτικών έναντι των ιλυολιθικών μελών αλλά και της τεκτονικής τους διαταραχής (Μαρίνος, 2010, **πίνακας 2.4**).

Αντίστοιχα για τη βαθμονόμηση του φλύσχη προτάθηκε ένα νέο διάγραμμα ταξινόμησης GSI (Μαρίνος, 2010, **πίνακας 2.5**) με το οποίο αναθεωρήθηκε το διάγραμμα των Marinos & Hoek (2001). Το νέο αυτό διάγραμμα είναι συνάρτηση των τύπων του φλύσχη και της ποιότητας των ασυνεχειών και σε αυτό προτείνονται τιμές GSI από 10 έως και 35 για χαοτικές έως έντονα διαταραγμένες δομές αντίστοιχα.

Πίνακας 2. 5 Περιγραφή και βαθμονόμηση αντιπροσωπευτικών τύπων φλύσχη (Μαρίνος, 2010)

ΤΥΠΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΔΟΜΗ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ GSI	ΤΥΠΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΔΟΜΗ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ GSI	ΤΥΠΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΔΟΜΗ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ GSI
Τύπος I. Αδιατάρακτος μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου	Δομή: Τεμαχώδης (B) Ποιότητα Ασυνεχών: Πολύ Καλή - Καλή (VG-G) GSI : 60-65		Τύπος II. Αδιατάρακτος ιλυόλιθος με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη	Δομή: Τεμαχώδης (B) Ποιότητα Ασυνεχών: Καλή - Μέτρια (G - F) GSI : 55-65	
Τύπος IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώδης αποτελούμενη από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες	Δομή: Πολύ Τεμαχώδης (VB) Ποιότητα Ασυνεχών: Καλή - Μέτρια (G - F) GSI : 45-55		Τύπος V. Μέτρια διαταραγμένη βραχώδης αποτελούμενη από ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη	Δομή: Πολύ Τεμαχώδης (VB) Ποιότητα Ασυνεχών: Μέτρια - Πτωχή (P - VP) GSI : 40-55	
Τύπος VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώδης η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη - ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες	Δομή: Πτυχωμένη - Πολύ Διαταραγμένη (BD) Ποιότητα Ασυνεχών: Μέτρια - Πτωχή (F - P) GSI : 25-40		Τύπος VIII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώδης η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί-διατηρεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται κυρίως από ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη	Δομή: Πτυχωμένη - Πολύ Διαταραγμένη (BD) Ποιότητα Ασυνεχών: Μέτρια - Πτωχή (F - P) GSI : 20-35	
Τύπος X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, ρηγματωμένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμικά τεμάχια τα οποία διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή	Δομή: Αποδιοργανωμένη (D) Ποιότητα Ασυνεχών: Πτωχή - Πολύ Πτωχή (P- VP) GSI : 15-25		Τύπος XI. Τεκτονικός έντονα διατηρημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική δομή με θύλακες αργίλου	Δομή: Φυλλώδης-διατηρημένη (F) Ποιότητα Ασυνεχών: Πτωχή - Πολύ Πτωχή (P-VP) GSI : 10-20	
Η γεωτεχνική ταξινόμηση βασίστηκε στο νέο διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώδεις όπως ο φλύσχη (Μαρίνος, 2007)					

Πίνακας 2. 6 Περιγραφή και βαθμονόμηση αντιπροσωπευτικών τύπων φλύσχη (Μαρίνος, 2010)

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (B. Μαρίνος, 2007)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (κυρίως επίπεδα στρώσης)		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →						
Ετερογενείς βραχώδεις εννοούνται εδώ αυτές που εναλλάσσονται στρώματα σαφώς διαφορετικών λιθολογικών τύπων με σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά αντοχής τους. Για τον φλύσχη αυτές οι εναλλαγές αναφέρονται κυρίως με ιλυόλιθους. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται και αργιλικό σχιστόλιθο. Βασίζονται στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχών (κυρίως της στρώσης) της βραχώδους επιλέξετε το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Η επιλογή της δομής πρέπει να καθορίζεται με βάση την τεκτονική διαταραχή (αδιατάρακτη, μέτρια διαταραγμένη, πολύ πτυχωμένη - διαταραγμένη, αποδιοργανωμένη, διατηρημένη), την αναλογία ψαμμιτών και ιλυόλιθων και την εκτεταμένη εσωτερική στρωματοποίηση τους. Στους τύπους IV και V όταν το πάχος των τρωπέων του ψαμμίτη είναι μεγάλο (~50 cm) προτείνεται η αύξηση της τιμής GSI κατά 5 μονάδες. Από τον τύπο IV και στους επόμενους τύπους τα επίπεδα στρώσης διακρίνονται μέσα στη μάζα του ιλυόλιθου. Επιλέξτε τη θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών π.χ. από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων προς κάθε κατεύθυνση. Τονίζει ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασταθείς επιπέδες επιφάνειες (όπως διατηρημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δομημένη προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η αντοχή ορισμένων βραχωδών μειώνεται από τη παρουσία του υπέρου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτρησης, πτώσης και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.										
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ										
	ΤΥΠΟΣ I. Αδιατάρακτος, μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές πολύ λεπτές μίξεις ιλυόλιθου. Σε αβαθείς στρώσεις ή προνή αν ο μηχανικός αστάθεις λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμπόδισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI		ΤΥΠΟΣ II. Αδιατάρακτος συμπαγής ιλυόλιθος (δεν διακρίνονται τα επίπεδα στρώσεων) με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών		80	I	II	N/A	N/A	
	ΤΥΠΟΣ III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων		ΤΥΠΟΣ IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαζα που αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες		60	III	IV	V	VI	N/A
	ΤΥΠΟΣ V. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμιτών		ΤΥΠΟΣ VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραιές ενστρώσεις ψαμμιτών		50					
	ΤΥΠΟΣ VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες		ΤΥΠΟΣ VIII. Έντονα διαταραγμένη-πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί-διατηρεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο ή και αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη		40	N/A	VII	VIII		
	ΤΥΠΟΣ IX. Αποδιοργανωμένη βραχώμαζα που αντιστάται συνήθως σε μεγάλες ζώνες ρηγμάτων ή/και έντονης αποσάθρωσης. Στον τύπο αυτό αντιστάται κυρίως καθαρά γεωλογικά με διαταραγμένο ιλυολιτικό υλικό ανάμεσα		ΤΥΠΟΣ X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατηρημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή. Οι στρώσεις του ψαμμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιλυόλιθου		30	N/A		IX	X	
	ΤΥΠΟΣ XI. Τεκτονικός ισχυρά διατηρημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα ψαμμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχωδή τεμάχια. Οριακά η συμπεριφορά των γεωλογικών μπορεί να προσομοιωθεί με εδαφικά			20	N/A			XI		
N/A	Σημείνει γεωλογικός αδύνατος συνδυασμός. Αλλού, εκτός των σκιασμένων περιοχών, περιπτώσεις όχι αδύνατες αλλά πολύ απίθανο να υπάρχουν									
→	Φορά τεκτονικής διαταραχής αντίστοιχης λιθολογίας									

Πίνακας 2. 7 Τύποι βραχομαζών φλύσχη (Μαρίνος, 2010)



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



Τύπος II. Αδιατάρακτος ιλυόλιθος με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη



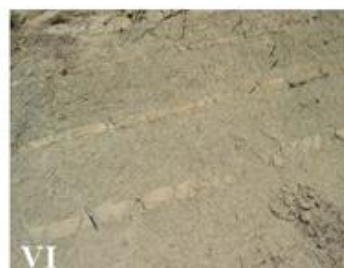
Τύπος III. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη



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



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



Τύπος VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραιές λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη



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



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



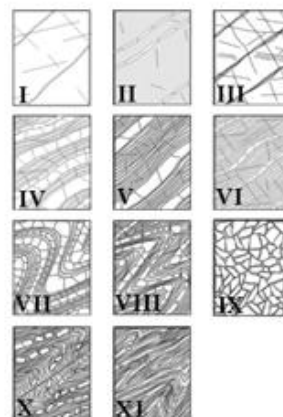
Τύπος IX. Αποδιοργανωμένη – Κατακερματισμένη βραχώμαζα



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



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



2.6. Μελέτη περίπτωσης "ροής κορημάτων σε περιβάλλον φλύσχη στην περιοχή της Βόρειας Ίστριας στην Κροατία."

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές για εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων σε σχηματισμό φλύσχη. Μια από αυτές είναι η μελέτη περίπτωσης "ροής κορημάτων σε περιβάλλον φλύσχη στην περιοχή της Βόρειας Ίστριας στην Κροατία" (Arbanas et.al, 2006). Η συγκεκριμένη μελέτη επιλέχτηκε ως παράδειγμα έτσι ώστε να αναλυθεί περαιτέρω η γεωτεχνική του συμπεριφορά του φλύσχη και ο μηχανισμός αστοχίας του.

Πιο αναλυτικά, το χειμώνα του 1979 στο χωρίο Krbavcici κοντά στην πόλη Buzet στην περιοχή της βόρειας Ίστριας, που βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Κροατίας, έλαβε χώρα μια κατολίσθηση που κατέστρεψε το ανάχωμα του δρόμου και προκάλεσε την ολίσθηση του ορίζοντα κατά μήκος περίπου 300m. Η περιοχή ενεργοποιήθηκε ξανά τον Ιανουάριο του 2003, όπου έλαβε χώρα μια κατολίσθηση της μορφή ροής κορημάτων και έθεσε σε κίνδυνο τις υποδομές μιας γέφυρας που είχε κατασκευαστεί πάνω από την παλιά ασταθή ζώνη (κατολίσθηση του 1979), ωστόσο τα μέτρα ταχείας παρέμβασης απέτρεψαν κάθε πιθανή ζημιά. Έκτοτε μέχρι και σήμερα, η περιοχή αυτή έχει δώσει πλήθος μετακινήσεων με την μορφή σύνθετων ή ροής κορημάτων, και χρήζει συνεχείς παρακολούθησης.

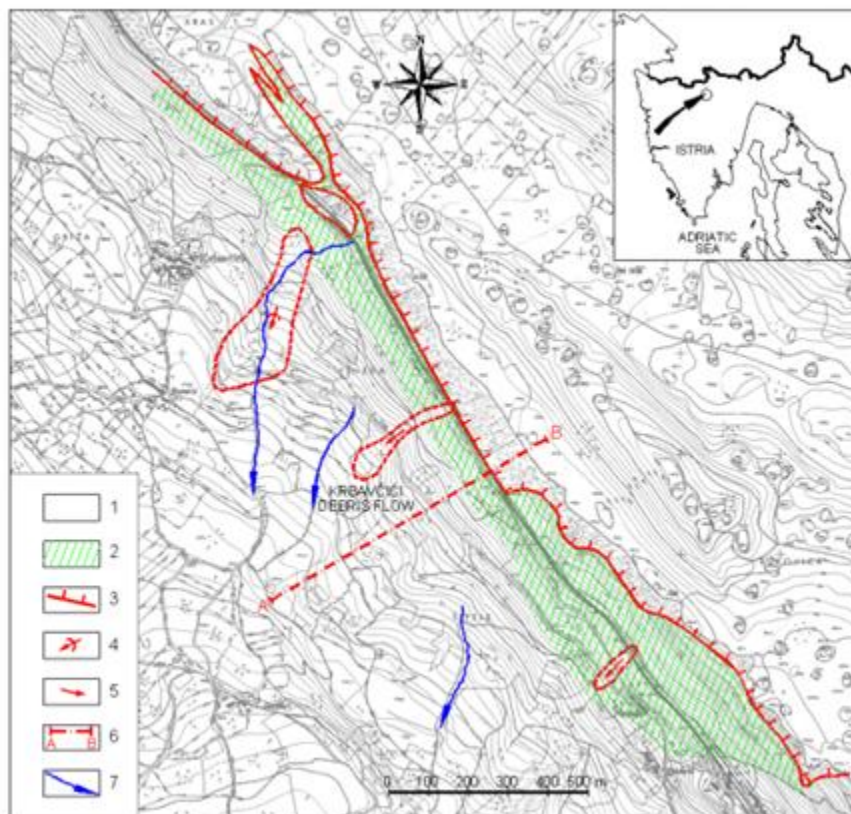
Σύμφωνα με τον Arbanas et.al, 2006 στο βόρειο τμήμα της χερσονήσου της Ίστριας υπάρχει ένα σαφές ορατό όριο μεταξύ δυο γεωμορφολογικών σχηματισμών, αυτό της λοφώδεις Παλαιογενούς λεκάνης φλύσχη ονομαζόμενης ως Γκρίζα Ίστρια (Gray Istria) και της υπερυψωμένης οροσειράς Cicarija, που αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα, λεγόμενης ως Λευκή Ίστρια (White Istria). Στο όριο μεταξύ αυτών των δύο μονάδων αναπτύσσονται πολυάριθμες μετακινήσεις μαζών όπως καταπτώσεις βράχων, σύνθετες κατολισθήσεις και πιο συχνά ροές κορημάτων. Οι μετακινήσεις αυτές οφείλονται κυρίως στην ύπαρξη του σχηματισμού φλύσχη, ο οποίος διαβρώνεται και σχηματίζει δυνητικά ασταθείς κατακρημνίσεις εδάφους που γεμίζουν τις μεγάλες χαράδρες της Γκρίζας Ίστριας μέχρι την ασβεστολιθική πλαγιά της Λευκής Ίστριας.

Η διαδικασία ροής κορημάτων αποτελεί ένα ιδιαίτερο φαινόμενο προς παρακολούθηση, και αυτό γιατί εμφανίζεται ξαφνικά και ξαφνικά σταματάει. (Arbanas, 2006).



Εικόνα 2. 4 Φωτογραφία ροής κορημάτων στην περιοχή Krbavcici (φωτογραφία από Arbanas, Jan, 2003)

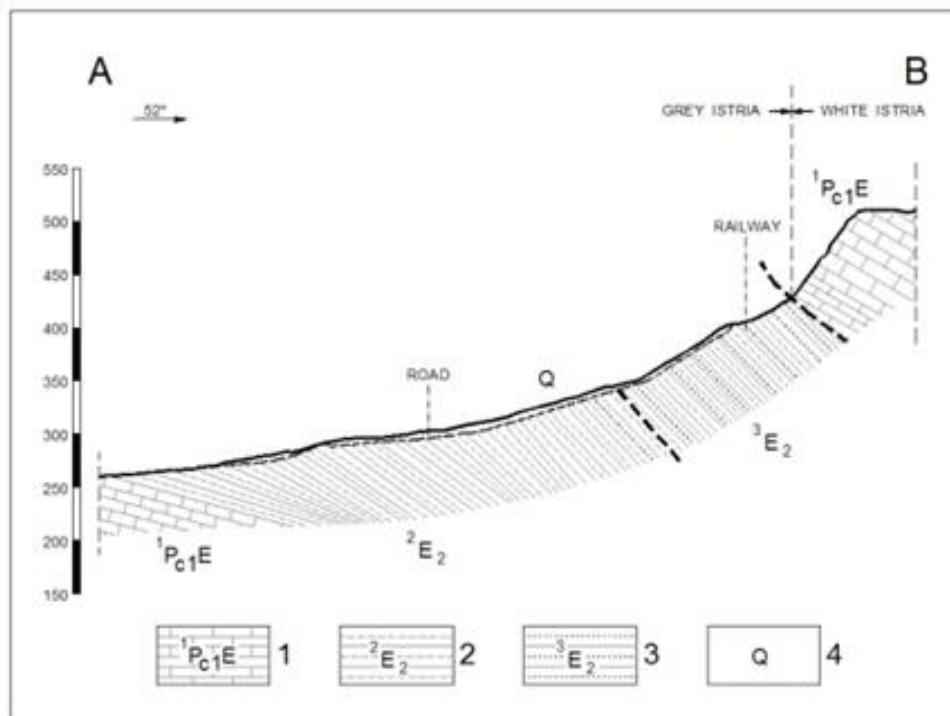
Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή του φαινομένου ροής κορημάτων και οι μηχανισμοί ενεργοποίησης που προκαλούν την αστάθεια στην περιοχή του χωρίου Krbavcici.



Εικόνα 2. 5 Γεωλογικός χάρτης εξεταζόμενης περιοχής (1. Λευκή Ίστρια – Παλαιογενείς ασβεστόλιθοι, 2. Γκρίζα Ίστρια – αργίλιτες, φλύσχος και Τεταρτογενείς αποθέσεις, 3. Ανάστροφο ρήγμα, 4. Κατολίσθηση, 5. Ροές κορημάτων, 6. Γεωλογική τομή (βλέπε εικόνα 2.6), 7. Ρυάκια) (από Arbanas, 2006).

Η γεωμορφολογικά δεσπόζουσα ανύψωση της Λευκής Ίστριας σχηματίστηκε μέσα σε ένα σύμπλεγμα ανθρακικών πετρωμάτων ηλικίας Κρητιδικού – Παλαιογενούς και εκτείνεται με κατεύθυνση ΒΔ - ΝΑ. Αντίθετα η λοφώδης περιοχή της νοτιοδυτικής λεκάνης της Γκρίζας Ίστριας σχηματίστηκε σε περιβάλλον φλύσχη ηλικίας Παλαιογενούς. Η κινηματική των δομικών στοιχείων στο περιθώριο αυτό, μεταξύ του ανθρακικού καλύμματος της Λευκή Ίστριας και του Παλαιογενούς φλύσχη της Γκρίζας Ίστριας, βασίζεται στην σχέση μεταξύ των σχετικά άκαμπτων ανθρακικών πετρωμάτων και των σχετικά εύκαμπτων υλικών του φλύσχη, κάτω από ένα καθεστώς ταυτόχρονων παραμορφώσεων.

Η επίδραση αυτών των παραμορφώσεων εμφανίζεται πιο έντονη στην επαφή (ζώνη υπερθέρμανσης) των δυο σχηματισμών, και έχει ως αποτέλεσμα την ολίσθηση των ασβεστολιθικών μπλοκ βράχου πάνω στα πιο εύθραυστα πετρώματα φλύσχη (από Arbanas, 2006).



Εικόνα 2. 6 Γεωλογική τομή περιοχής μελέτης. (1. Παλαιογενείς ασβεστόλιθοι, 2. Αργιλίτης, 3. Παλαιογενής φλύσχη, 4. Τεταρτογενείς αποθέσεις) (από Arbanas Z., 2006).

Σύμφωνα με τον Arbanas et.al, 2006 τα ρεύματα των κορημάτων στις καταθέσεις φλύσχη στην βόρεια Ίστρια δεν αποτελούν τυπικό φαινόμενο αστάθειας. Η ανάπτυξη των περιγραφόμενων κινήσεων, οφείλεται στο γεγονός ότι οι σχηματισμοί της περιοχής μελέτης παρουσιάζουν μια προδιάθεση σε αστοχία εξαιτίας της έντονης γεωμορφολογίας τους (μακρύα στενή χαράδρα).

Τα φαινόμενα ροής κορημάτων στην βόρεια Ίστρια, εμφανίζονται σε απολιθωμένες ρεματίες που κόβουν βαθιά το υπόβαθρο του φλύσχη και γεμίζουν με την πάροδο του χρόνου με υλικά που φέρνει η βαρύτητα από τα υψομετρικά υψηλότερα τμήματα της ζώνης φθοράς του φλύσχη με τους ασβεστολίθους. Τα υλικά αυτά αποτελούν ένα μίγμα τεμαχιδίων ασβεστολιθικών χονροειδών κόκκων και λεπτής αργίλου που πληρώνουν τις χαράδρες, σαν ένα κάλυμμα, με ασταθές υλικό πάχους λίγων μέτρων. Η πλήρωση αυτή των χαραδρών προκαλεί μετατόπιση των επιφανειακών ροών, ενώ οι υπόγειες ροές στο αργιλικό κάλυμμα εξακολουθούν να είναι ενεργές, λόγω της υδρολιθολογικής φύσης του σχηματισμού.

Ο κορεσμός των καταθέσεων του φλύσχη μέσα στις χαράδρες και η αύξηση της στάθμης των υπογείων υδάτων αποτελούν τους κύριους ενεργοποιητικούς μηχανισμούς των ροών κορημάτων, καθώς:

- Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό των αργιλικών τμημάτων των αποθέσεων προκαλεί μείωση στις συνεκτικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων και μείωση της αντοχής. Επιπρόσθετα, λόγω της αύξησης της περιεκτικότητας σε νερό, σε ορισμένα τμήματα των αποθέσεων, επιτυγχάνεται το όριο υδαρότητας² με αποτέλεσμα την πλήρη απώλεια της υπολειμματικής αντοχής³ του υγροποιημένου στρώματος.
- Η αύξηση της στάθμης του υπογείου νερού με την σειρά της, προκαλεί αύξηση της πίεσης πόρων και μείωση της αντοχής του αργιλικού καλύμματος. Η αύξηση αυτή, μπορεί να προκαλέσει, τον κορεσμό και την αύξηση του όγκου του καλύμματος στα ανώτερα τμήματα, μέσω της τριχοειδής ανύψωσης του νερού, προσθέτοντας με αυτόν τον τρόπο ένα επιπλέον φορτίο που ωθεί σε ολίσθηση. Τέλος η αύξηση της υπόγειας στάθμης προκαλεί σημαντική αύξηση των υδροστατικών δυνάμεων που αποκλίνουν από τις βαρυτικές, και ωθούν και αυτές σε ολίσθηση.

Όλες οι αιτίες που περιγράφηκαν προηγουμένως προκαλούν από κοινού την εμφάνιση της αστάθειας στη περιοχή αλλά εξαρτώνται, από το μέγεθος και τον βαθμό των παραπάνω φαινομένων (από Arbanas, 2006).

² Όριο υδαρότητας: καλείται η περιεκτικότητα της φυσικής υγρασίας του εδάφους, που συμπεριφέρεται σαν υγρό σώμα.

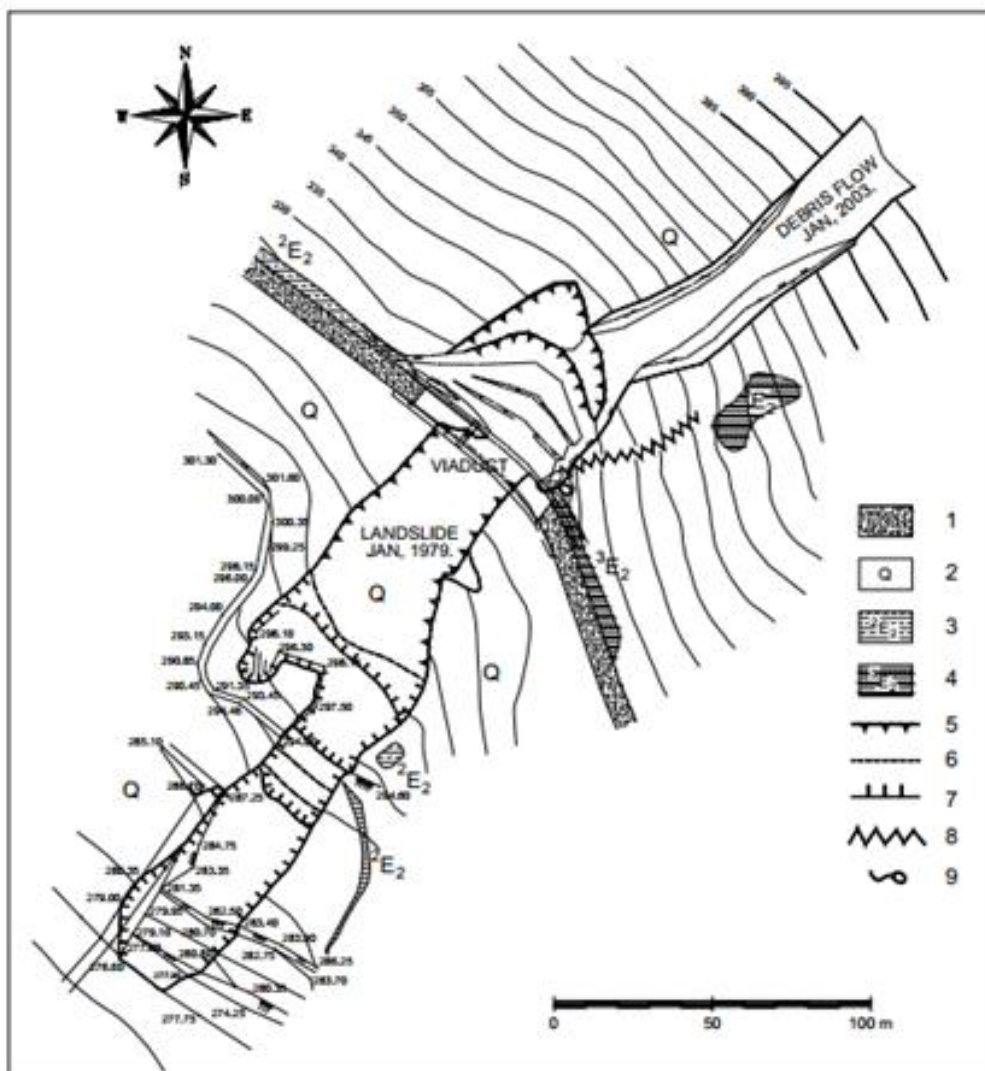
³ Υπολειμματική αντοχή: εννοείται η αντοχή που φέρει ένα σώμα αφότου έχει αστοχήσει.

2.6.1. Ανάλυση αστοχιών περιόδων 1979 και 2003.

Η ολίσθηση που σημειώθηκε τον Ιανουάριο του 1979, ενεργοποιήθηκε μετά από μια περίοδο έντονων βροχοπτώσεων και επηρέασε την πλαγιά της περιοχής, πλάτους 40m και μήκους 250m (βλέπε εικόνα 2.7). Η κατολίσθηση παρέσυρε το σώμα του υφιστάμενου στην περιοχή δρόμου, και το μετέφερε σε απόσταση 300m από την πλαγιά στον πόδα της κατολίσθησης. Ύστερα από εκτεταμένη μελέτη και ταξινόμηση της κατολίσθησης ο δρόμος ανακατασκευάστηκε με την οικοδόμηση μιας οδογέφυρας πάνω από την κατολίσθηση.

Την περίοδο του Ιανουαρίου του 2003 και πάλι μετά από μια έντονη περίοδο βροχοπτώσεων, εκδηλώθηκε στην περιοχή το φαινόμενο ροής κορημάτων, από την ενεργοποίηση του αργιλικού καλύμματος στην πλαγιά της χαράδρας. Η ολίσθηση προκλήθηκε από τον κορεσμό σε νερό του αργιλικού καλύμματος, που είχε ως αποτέλεσμα την επίτευξη της υγρής κατάστασης της μάζας. Η ταχύτητα της ολισθαίνουσας υγροποιημένης πλέον μάζας αυξανόταν από μέρα σε μέρα (από 10cm/ ημέρα έως 5m/ ημέρα) με αποτέλεσμα να περάσει πάνω από την παλαιότερη κατολίσθηση της περιόδου του 1979 (βλέπε εικόνα 2.7) και να φτάσει σε σημείο να "απειλή" την οδογέφυρα που διερχόταν πάνω από την παλιά κατολίσθηση.

Ωστόσο, η ζημιές αποφεύχθηκαν χάρη στην έγκαιρη παρέμβαση με άμεσα μέτρα προστασίας, απομακρύνοντας 25.000 m³ του ολισθαίνοντος σώματος μακριά από την περιοχή. Επίσης, παρότι η διακοπή των βροχοπτώσεων και η επακολούθηση μιας ξηρής περιόδου στην περιοχή βοήθησαν στο να σταματήσουν οι μαζικές αυτές κινήσεις, λόγω εισροής νερού στην ολισθαίνουσα μάζα, στα ανώτερα τμήματα της πλαγιάς εξακολουθούν να εκδηλώνονται μετακινήσεις οι οποίες χρήζουν πλήρους αποκατάστασης (από Arbanas, 2006).



Εικόνα 2. 7 Γεωλογικός χάρτης της κατολίσθησης της περιόδου Ιανουαρίου 1979 και της ροής συντριμμάτων της περιόδου Ιανουαρίου 2003. (1. Οδικός χώρος, 2. Τεταρτογενείς αποθέσεις, 3. Προεξοχές Παλαιογενούς φλύσχη, 4. Προεξοχές Παλαιογενούς αργιλίτη, 5. Προεξοχές εδάφους, 6. Διατμητικό εμπόδιο, 7. Συμπιεστικό εμπόδιο, 8. Φαράγγι, 9. Περιοδική πηγή) (από Arbanas, 2006).

Μετά την συγκέντρωση των στοιχείων από την γεωλογική χαρτογράφηση και τα αποτελέσματα έρευνας με γεωτρήσεις στην περιοχή, εκτιμήθηκε η επιφάνεια ολίσθησης και ο όγκος της εκτοπιζόμενης μάζας.

Η γεωμετρία της κατολίσθησης περιγράφεται σύμφωνα με την προτεινόμενη ονοματολογία WP/WLIN για κατολισθήσεις στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2. 8 Διαστάσεις κατολίσθησης (από Arbanas, 2006)

Διαστάσεις αστάθειας	Αστάθεια		
	Ιανουάριος, 1979	Ιανουάριος, 2003	Συνολικά
Συνολικό μήκος κατολίσθησης, L (m)	242	140	347
Μήκος εκτοπιζόμενης μάζας, Ld (m)	240	137	345
Μήκος επιφάνειας ρήξης, Lr (m)	220	130	310
Πλάτος εκτοπιζόμενης μάζας, Wd (m)	55	40	55
Πλάτος επιφάνειας ρήξης, Wr (m)	45	50	50
Βάθος εκτοπιζόμενης μάζας, Dd (m)	5	4	5
Βάθος επιφάνειας ρήξης, Dr (m)	6	16	16
Συνολικό ύψος από την απόληξη έως την κορώνα της κατολίσθησης ΔΗ (m)	62	69	117

2.6.2. Συμπεράσματα

Από την μελέτη της περίπτωσης "ροής κορημάτων σε περιβάλλον φλύσχη στην περιοχή της Βόρειας Ιστρίας στην Κροατία" γίνονται αντιληπτά τα παρακάτω:

- Ο μηχανισμός ενεργοποίησης μιας κατολίσθησης σε περιβάλλον φλύσχη εξαρτάται από δυο βασικούς παράγοντες: Από τις γεωτεχνικές ιδιότητες των υλικών του και από την παρουσία, τόσο του επιφανειακού νερού όσο και του υπογείου.
- Οι κατολισθήσεις σε περιβάλλον φλύσχη φέρουν έναν υψηλό βαθμό επικινδυνότητας και η εργασία αποκατάστασης τους προβλέπεται από ιδιαίτερα απαιτητική έως ακατόρθωτη.

Για αυτό το λόγω, δημιουργείται μια ανάγκη συνεχής παρακολούθησης τέτοιου είδους μετακινήσεων (όπως πχ. Ροής κορημάτων) είτε με επιτόπου έρευνες είτε με την εφαρμογή νέων μεθόδων Τηλεπισκόπησης και Τηλεανίχνευσης, αλλά και με ταυτόχρονη, τακτική παρακολούθηση των κατακρημνισμάτων της εξεταζόμενης περιοχής από μετεωρολογικούς σταθμούς, έτσι ώστε να μπορούν να προβλεφτούν και να εξυγιανθούν πολύ πριν αστοχήσουν.

2.7. Μέθοδοι αντιμετώπισης κατολισθήσεων

Για τις εργασίες σταθεροποίησης μιας κατολίσθησης απαιτείται ένας στρατηγικός σχεδιασμός μέτρων προστασίας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της με το βέλτιστο οικονομικό κόστος άλλα και με την ελάχιστη επέμβαση στο περιβάλλον.

Οι μέθοδοι σταθεροποίησης αποσκοπούν στον έλεγχο των δυνάμεων που ασκούνται στα πρανή εξαιτίας της κλίσης τους, της εδαφικής και πετρογραφικής τους κατάστασης καθώς και στον έλεγχο των δυνάμεων που προκαλεί η παρουσία του υπόγειου και επιφανειακού νερού. Ουσιαστικά οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν μείωση των δυνάμεων ολίσθησης και αύξηση των δυνάμεων συγκράτησης (από Χρηστάρας, 2011).

Ένα βασικό στάδιο της θεραπείας μιας κατολίσθησης είναι η συλλογή και η απομάκρυνση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων που οδηγούνται στην περιοχή της κατολίσθησης, έτσι ώστε η ασταθής μάζα του πρανούς να αποφορτιστεί. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποστράγγιση.

Η αποστράγγιση διακρίνεται σε επιφανειακή και σε υπόγεια:

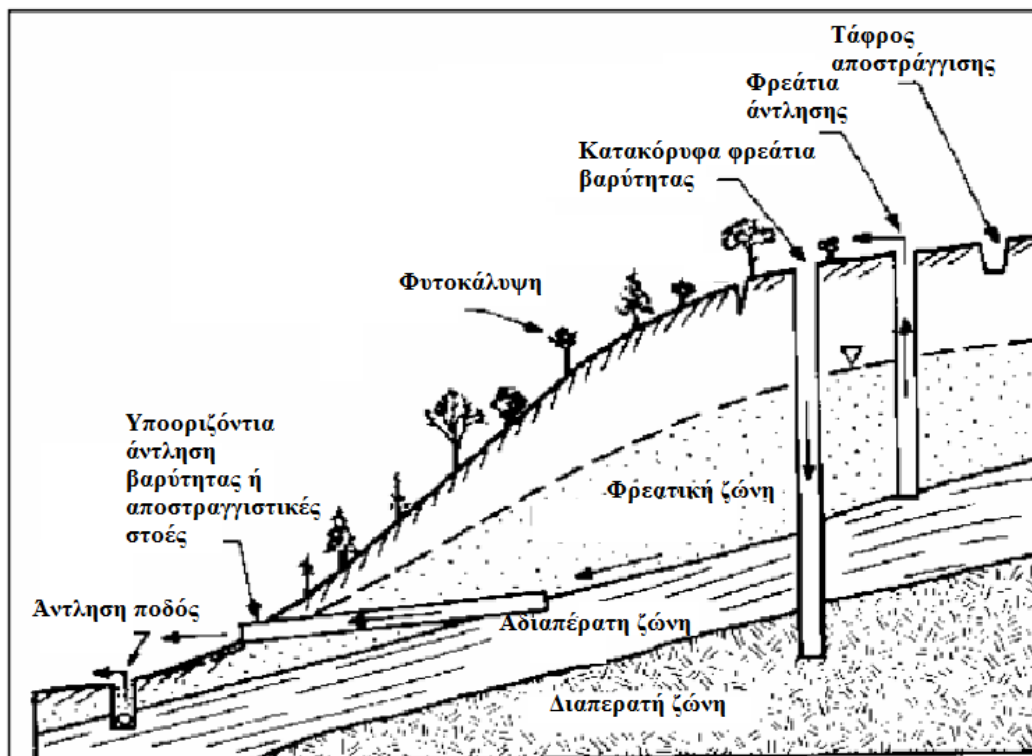
Επιφανειακή αποστράγγιση: Η επιφανειακή αποστράγγιση, ελέγχει την επιφανειακή απορροή και συμβάλλει στη σταθεροποίηση του πρανούς. Σε μια κατολίσθηση η παρουσία επιφανειακών υδάτων ενισχύει την αύξηση των δυνάμεων ολίσθησης. Έτσι λοιπόν, απαιτείται η απομάκρυνση των υδάτων και η κατάλληλη διαμόρφωση των πρανών με κλίσεις που να επιτρέπουν στο νερό να απομακρύνεται προς τα κατόντη της κατολισθαίνουσας μάζας.

- ❖ Μέσα επιφανειακής αποστράγγισης: Κατασκευή αποστραγγιστικών τάφρων, υδατοστεγών αποστραγγιστικών δικτύων και εύκαμπτων αγωγών μέσα από τους οποίους θα απομακρύνεται το νερό. Διαμόρφωση όλων των εδαφικών ανωμαλιών και κοιλοτήτων μέσα στην ολισθαίνουσα μάζα με στόχο την εκτόνωση των υδάτων και την μείωση της πίεσης πόρων (από Χρηστάρας, 2011).

Υπόγεια αποστράγγιση: Η υπόγεια αποστράγγιση αποτελεί ένα από τα πλέον αποτελεσματικά μέτρα θεραπείας. Η παρουσία υπόγειων υδάτων που αυξάνει την πίεση των πόρων λειτουργεί ενάντια στην σταθεροποίηση των κατολισθήσεων, αφού η πίεση των πόρων προστίθεται στις δυνάμεις αστάθειας (από Χρηστάρας, 2011).

❖ Μέσα υπόγειας αποστράγγισης: Για την απομάκρυνση των υπόγειων υδάτων απαιτείται ο υποβιβασμός του υπόγειου υδροφορέα που επιτυγχάνεται με τις παρακάτω μεθόδους αποστράγγισης (από Χρηστάρας, 2011):

- Αποστραγγιστικές σήραγγες και στοές.
- Βαθιές γεωτρήσεις και κατακόρυφα φρεάτια βαρύτητας.
- Κατακόρυφα στραγγιστήρια και φρεάτια άντλησης.
- Υπό – οριζόντια και πλάγια στραγγιστήρια για την υποοριζόντια αποστράγγιση βαρύτητας.



Εικόνα 2. 8 Μέσα αποστράγγισης υπόγειων υδάτων (από Χρηστάρας, 2011).

Οι περαιτέρω μέθοδοι για την θεραπεία μιας κατολίσθησης εξαρτώνται κυρίως από τον τύπο, το μέγεθος και το είδος της κίνησης της, και μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες:

- Στα χωματουργικά έργα
- Στην τεχνητή σταθεροποίηση της βραχώδους που πιθανόν να αστοχήσει (μέτρα ενίσχυσης και αντιστήριξης).

Τα χωματουργικά έργα αναφέρονται στον έλεγχο της γεωμετρίας του πρανούς, και επιτυγχάνουν την εξομάλυνση και σταθεροποίησή του.

- ❖ **Εξομαλύνσεις πρανούς:** Η ευστάθεια ενός πρανούς μπορεί να αυξηθεί με την ελάττωση του βάρους στην κεφαλή και την ενίσχυση του πόδα της κατολισθήσης. Σημειώνεται, πως αφαιρώντας υλικά από την κεφαλή, θα πρέπει να μην διαταραχθεί η ισορροπία του πρανούς στο τμήμα αυτό καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει στην επιδείνωση της κατάστασης. Οι εξομαλύνσεις θα πρέπει να σχεδιασθούν συγχρόνως με την αποστράγγιση του πρανούς, διότι η τελευταία ελαττώνει τον όγκο των χωματουργικών έργων, τα οποία είναι απαραίτητα για την ευστάθειά του.
- ❖ **Κλίσεις πρανών:** Για την επίτευξη της ισορροπίας, τα πρανή διαμορφώνονται με μικρές κλίσεις ή με μεταβαλλόμενες κλίσεις αναβαθμίδων (μεγάλες κλίσεις προς ανάντη μικρότερες προς τα κατόντη) (Christaras, Chatziangelou, 2005).

Τα έργα αντιστήριξης αποτελούν κατασκευές σχεδιασμένες ώστε να δέχονται φορτία, αυξάνοντας τη σταθερότητα των πρανών που αστοχούν. Η κατασκευή τους έχει συνήθως αυξημένο οικονομικό κόστος και γι' αυτό το λόγο απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση.

Τα είδη των αντιστηρίξεων ποικίλουν, παρακάτω αναλύονται κάποια από τα πιο σημαντικά:

- ❖ **Τοίχοι αντιστήριξης:** Εφαρμόζονται για την αύξηση της ευστάθειας πρανών ή για τη σταθεροποίηση μαζών που κατολισθαίνουν. Αποτελούν μεγάλου μεγέθους κατασκευές που υποβάλλονται σε μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις.
- ❖ **Τοίχοι από λιθοπληρωμένα συρματοκιβώτια (σαρζανέτια):** Οι τοίχοι αυτοί αποτελούνται από συρματοκιβώτια που τοποθετούνται κλιμακωτά στο πρανές και με κατάλληλη θεμελίωση. Χαρακτηρίζονται από ευκαμψία καθώς ανέχονται μεγάλες πλευρικές φορτίσεις πριν παραμορφωθούν και τελικά αστοχήσουν. Παρέχουν την δυνατότητα αποστράγγισης (εύκολη διέλευση νερού μέσα από τα δομικά στοιχεία) εξασφαλίζοντας χαμηλές πιέσεις πόρων και κατά συνέπεια χαμηλές ωθήσεις γαιών. Ενώ έχουν σχετικά χαμηλό οικονομικό κόστος.
- ❖ **Χρήση πασσάλων-Φρεατοπασσάλων:** Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η ολισθαίνουσα μάζα δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί με άλλες μεθόδους. Οι πάσσαλοι σταθεροποιούν την μετακινούμενη μάζα καθώς την συνδέουν με την υγιή βραχομάζα που βρίσκεται κάτω από αυτήν.



Τα μέτρα ενίσχυσης της βραχομάζας που συχνά συνδυάζονται και με τα προηγούμενα και έχουν σα σκοπό να βελτιώσουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της, αποτρέποντας κατολισθητικά φαινόμενα είναι:

- ❖ **Μέθοδοι αγκύρωσης μαζών (αγκύρια):** Αποσκοπούν στη σταθεροποίηση μαζών που ολισθαίνουν με την εφαρμογή δυνάμεων αντίθετων ως προς την κατεύθυνση της ολίσθησης, μέσω ενός συστήματος αγκυρώσεων.

Οι τρεις κύριοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό ενός συστήματος ακυρώσεων για τη σταθεροποίηση μιας ασταθούς μάζας είναι:

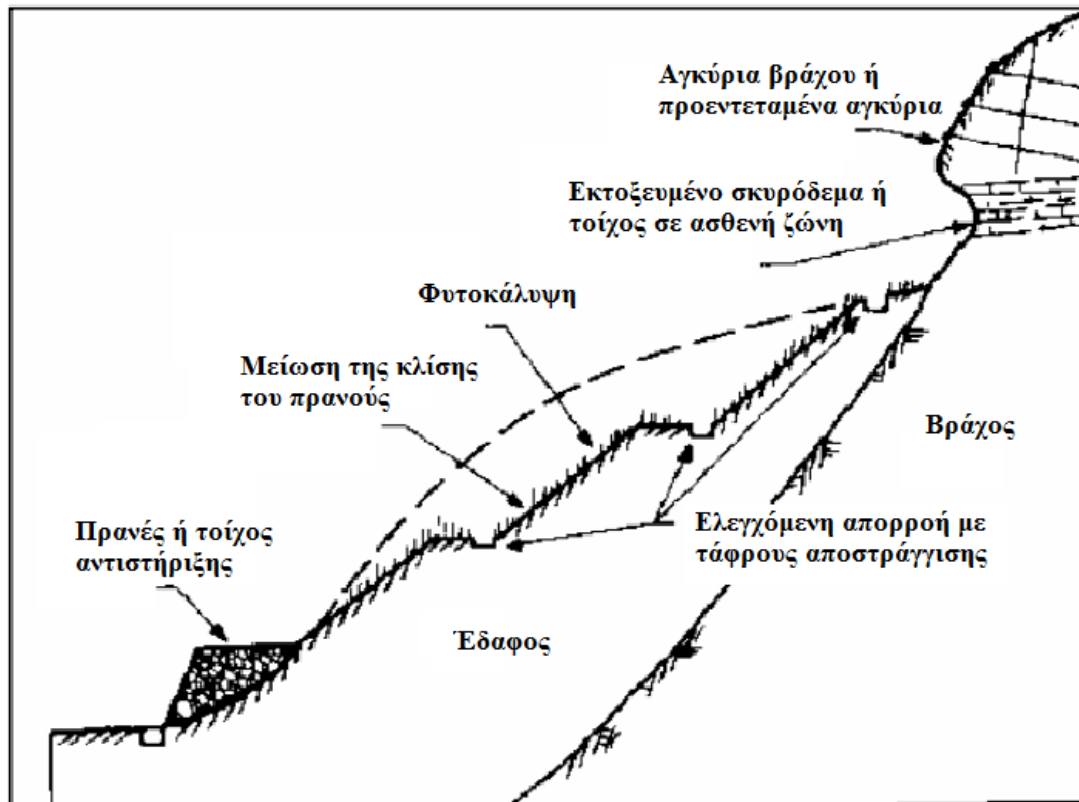
- το φορτίο των αγκυρίων.
- ο χρόνος τοποθέτησής τους.
- η διάρκεια ζωής τους.

- ❖ **Επένδυση με εκτοξευμένο σκυρόδεμα:** Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για την αύξηση της αντοχής της βραχομάζας καθώς και για την αποφυγή της διάβρωσης – αποσάθρωσης μέσω στεγανοποίησης.

- ❖ **Χαλύβδινα πλέγματα ή δίκτυα:** Τα πλέγματα χρησιμοποιούνται για την κατακράτηση των μικρότερων τεμαχίων του πρσανούς τα οποία δεν μπορούν να αντιστηριχτούν με κάποιον άλλο τρόπο. Το μέγεθος αυτών των τεμαχίων είναι σχετικά μικρό όμως παρόλα αυτά με την πτώση τους θα μπορούσαν να προκαλέσουν καταστροφές.

- ❖ **Φυτοκάλυψη:** Η φυτοκάλυψη αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο μέτρο προστασίας καθώς βοηθά στην ελάττωση της κατείσδυσης του επιφανειακού νερού στο πρανές και επομένως συμβάλλει έμμεσα στη σταθεροποίησή του.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε περιπτώσεις που η θεραπεία μιας κατολίσθησης στην περιοχή που κατασκευάζεται κάποιο οδικό έργο δεν μπορεί να επιτευχθεί και η χάραξη δεν μπορεί να αλλάξει τότε μπορεί να γίνει γεφύρωση της ασταθούς περιοχής. Αν και αποτελεί μια μέθοδο υψηλού κόστους, χρησιμοποιείται σε πρνή βουνών με ισχυρές κλίσεις για την παράκαμψη των ασταθών μαζών.



Εικόνα 2. 9 Μέθοδοι σταθεροποίησης πρανών (από Χρηστάρας, 2011).

Όλα τα παραπάνω, οδηγούν στην ανάγκη πρόγνωσης και προληπτικής θεραπείας των περιοχών που μπορεί να κατολισθήσουν. Για αυτό το λόγο, κατά την διαδικασία κατασκευής ενός τεχνικού έργου απαιτείται ένας αυστηρός σχεδιασμός όσο αναφορά τη γεωλογική-γεωτεχνική έρευνα, προσεκτική επιλογή του χώρου θεμελίωσης καθώς και πληρότητα στην εφαρμογή των παρεμβάσεων.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΥΜΕΝΩΝ (ΣμηΕΑ) (UAV) (Unmanned Aerial Vehicle)

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο το φαινόμενο των κατολισθήσεων αποτελεί ένα σημαντικό τύπο φυσικής καταστροφής, που μπορεί να προκαλέσει καταστροφές σε υποδομές, δημιουργώντας μεγάλες οικονομικές και κοινωνικές απώλειες.

Η ταχεία και ακριβής ταυτοποίηση νέων κατολισθήσεων καθώς και η άντληση σχετικών πληροφοριών αποτελούν τη βάση και το θεμέλιο για την εκτίμηση και ανακούφιση των καταστροφών λόγω κατολισθήσεων (Lin, 2017).

Δεδομένου ότι οι τόποι που λαμβάνουν χώρα κατολισθήσεις είναι συχνά απρόσιτοι, η μέθοδος Τηλεανίχνευσης μέσω UAV μπορεί να υιοθετηθεί για την αποτελεσματική και γρήγορη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την κατολίσθηση, με πλεονεκτήματα το χαμηλό κόστος, την ευελιξία κατά την εκτόξευση και προσγείωση, την ασφάλεια και τέλος την υπέρυθρη ανάλυση εικόνας.

3.1. Αναγνώριση κατολισθήσεων με συμβατικές μεθόδους

Με τον όρο "αναγνώριση κατολισθήσεων" αναφέρονται όλες εκείνες οι δραστηριότητες που αποσκοπούν στην αναγνώριση παλαιότερων κατολισθητικών γεγονότων που σημειώθηκαν σε μια περιοχή. Όλες αυτές οι τεχνικές αναγνώρισης επιτρέπουν την ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων, καθώς και την απογραφή περιοχών επιρρεπείς σε εκδήλωση κατολισθητικών δεδομένων (Scaioni, 2014). Για την παραγωγή των απογραφών αυτών, πρέπει να χρησιμοποιούνται οπτικές εικόνες με κλίμακα περίπου 1:10.000 ή μεγαλύτερη (Montovani et.al, 1996). Ουσιαστικά, η αναγνώριση των κατολισθήσεων για την δημιουργία απογραφών, περιλαμβάνει την διερεύνηση μεγάλων περιοχών και την απεικόνιση διάφορων ασταθειών κλίσης σε έναν ενιαίο χάρτη. Εναλλακτικά, για κάθε τύπο κατολίσθησης, κατασκευάζεται και ένας κατάλογος απογραφής.

Τέτοιοι χάρτες χωροταξικού σχεδιασμού, που συλλέγονται με ιστορικές πληροφορίες, σχετικά με τις κατολισθήσεις ονομάζονται γεωμορφολογικοί χάρτες απογραφής (Malamud et.al, 2004) και ταξινομούνται ως ιστορικοί απολογισμοί με βάση γεγονότα, εποχιακές ή πολύχρονες καταγραφές (Guzzeti, 2012).

Κατά Guzzeti (2012), η προετοιμασία για την καταγραφή των κατολισθήσεων βασίζεται στις ακόλουθες βασικές παραδοχές:

- Τα φαινόμενα κατολίσθησης αφήνουν ορατά σημάδια στο έδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με την οπτική ερμηνεία εικόνων και αεροφωτογραφιών αναπαράστασης της τοπογραφικής επιφάνειας, την γρήγορη διαδικασία αναγνώρισης.
- Η μελέτη των διακυμάνσεων, όσον αφορά την ένταση της εικόνας, την υφή και το ίχνος, το σχήμα και οι γραμμές της, πρέπει να σχετίζεται με τις αναμενόμενες συνθήκες εδάφους ή με επιφάνειες γης που σχετίζονται με πιθανές διαδικασίες αστάθειας κλίσης. Οι περισσότερες από αυτές τις ενδείξεις συσχετίζονται με την μορφολογία των κατολισθήσεων, η οποία εξαρτάται αυστηρά από τον τύπο αστοχίας (δηλαδή πτώση, ροή, ολίσθηση κα.) (Soeters .R, 1996) και τον ρυθμό μετατόπισης της κινούμενης μάζας (Gruden, Varnes, 1996).
- Η χρήση χαρτών απογραφής για την μελέτη των κατολισθήσεων, αποτελεί ένα σημαντικό υπόβαθρο στην περαιτέρω ανάλυση των υπό ολίσθηση περιοχών, και αυτό γιατί καταγράφουν την εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων με την πάροδο του χρόνου⁴.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν τις συμβατικές μεθόδους για την κατασκευή ενός καταλόγου κατολίσθησης, που περιορίζονται στην επιτόπου έρευνα και στην ερμηνεία των αεροφωτογραφιών.

3.2. Αναγνώριση κατολισθήσεων με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης – Τηλεανίχνευσης (Remote Sensing)

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στον τομέα της αναγνώρισης των κατολισθήσεων έχει προχωρήσει, και οι επιτόπου επιχειρήσεις εκτελούνται κυρίως ως υποστήριξη και ενσωμάτωση των τεχνικών της Τηλεπισκόπησης - Τηλεανίχνευσης, παρόλο που στο παρελθόν αποτελούσαν το μεγαλύτερο βάρος για την χαρτογράφηση και απογραφή των κατολισθήσεων (Scaioni, 2014).

Η συγκεκριμένη μέθοδος, χρησιμοποιεί τέσσερα είδη κύριων τύπων δεδομένων: δεδομένα από οπτικές ή θερμικές εικόνες, δεδομένα εικόνων ραντάρ μικροκυμάτων και τέλος δεδομένα σάρωσης λέιζερ.

Σε αυτές τις κατηγορίες εφαρμογών, οι οπτικές και θερμικές τεχνικές καθώς και οι τεχνικές με αισθητήρες μικροκυμάτων, επιτυγχάνονται συνήθως από αερομεταφερόμενες ή διαστημικές πλατφόρμες και πιο σπάνια από επίγειες

⁴ Χρόνος: ο Varnes (1984), όσον αφορά την εξέλιξη μιας κατολίσθησης, επισήμανε ότι " το παρελθόν και το παρόν είναι κλειδιά για το μέλλον "

πλατφόρμες. Αντίθετα, τα δεδομένα σάρωσης με λέιζερ υλοποιούνται σε πλατφόρμες που εκπέμπονται και από αεροσκάφη αλλά και επίγεια.

Όσον αφορά τις τεχνικές με λέιζερ το TLS (Terrestrial laser scanning) και το αερομεταφερόμενο LIDAR (Light detection and ranging) μπορούν να παράγουν με ακρίβεια 3D μοντέλα αλλά το υψηλό κόστος λειτουργίας και επεξεργασίας, εμποδίζει την εφαρμογή τους, ιδίως για επαναλαμβανόμενες έρευνες (Manchini et al, 2013, Cassella et al, 2014, Huang et al, 2015), ενώ η χρονική και χωρική ανάλυση τους καθώς και η ακρίβεια του ραδιοεντοπισμού τους είναι γενικά φτωχή.

Αντίθετα στις οπτικές τεχνικές, τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα UAS (Unmanned Aerial Systems), συχνά ονομαζόμενα ως μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle), αντιπροσωπεύουν ένα πολύ ελπιδοφόρο εργαλείο αναγνώρισης κατολισθήσεων, επειδή μπορούν να λειτουργούν σε πολύ χαμηλό ύψος και κατά συνέπεια επιτρέπουν καλύτερη ακρίβεια και γεωμετρική ανάλυση. Τα UAV έχουν την ικανότητα να φτάνουν σε περιοχές που δεν είναι προσβάσιμες από τον άνθρωπο ή αποτελούν πηγές συνεχούς κινδύνου. (Colomina, 2014, Niethammer, 2012).

Συμπερασματικά, η μέθοδος της Τηλεανίχνευσης αποσκοπεί στην:

- Εκμετάλλευση ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας DSM (Digital Surface Model) και ψηφιακών μοντέλων ανύψωσης DEM (Digital Elevation Model) υψηλής ανάλυσης.
- Αυτοματοποίηση της εξαγωγής χαρακτηριστικών και της ανάλυσης εικόνων, συμπεριλαμβανομένων των παγχρωματικών, πολυφασματικών και υπερφασματικών δεδομένων, καθώς και δεδομένων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος SAR (Synthetic Aperture Radar).
- Ενσωμάτωση διαφόρων ειδών δεδομένων – Fusion RS datasets (Remote Sensing).

3.3. Οπτικοί αισθητήρες για αναγνώριση κατολισθήσεων

Οι οπτικοί αισθητήρες εκμεταλλεύονται την ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των κοντινών υπέρυθρων NIR (Near-InfraRed) και των υπέρυθρων συστημάτων μικρού μήκους. Οι αισθητήρες αυτοί, εφαρμόζονται συχνά σε πλατφόρμες εδάφους, αεροπλάνων και σε διαστημικές πλατφόρμες.

Σε γενικές γραμμές, οι οπτικοί αισθητήρες είναι κατάλληλοι για την μελέτη ασταθειών, κυρίως περιστροφικών και μεταθετικών ολισθήσεων, γαιών και συντριμμάτων, αλλά εφαρμόζονται και για τη διερεύνηση πολύπλοκων εδαφικών κινήσεων, χάρη στην ικανότητα εξαγωγής γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και στην ευρεία κάλυψη του εδάφους σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Η ερμηνεία των εικόνων, η οποία μπορεί να γίνει με χειροκίνητες, ημιαυτόματες και αυτόματες προσεγγίσεις, βασίζεται σε αεροφωτογραφίες και στην συνέχεια εκτείνεται σε επίγειες και δορυφορικές εικόνες.

3.4. Ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές SLR (Digital Cameras)

Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές αποτελούν μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες της Τηλεπισκόπησης – Τηλεανίχνευσης, διότι προσφέρουν υψηλής διακριτικής ικανότητας εικόνες σε χαμηλό κόστος.

Μια ψηφιακή κάμερα αποτελείται από έναν πίνακα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Solid-state area array) ο οποίος δημιουργεί μια "δισδιάστατη ψηφιακή εικόνα πλαισίου" (Digital two-dimensional frame image) (Αστάρας, 2011).



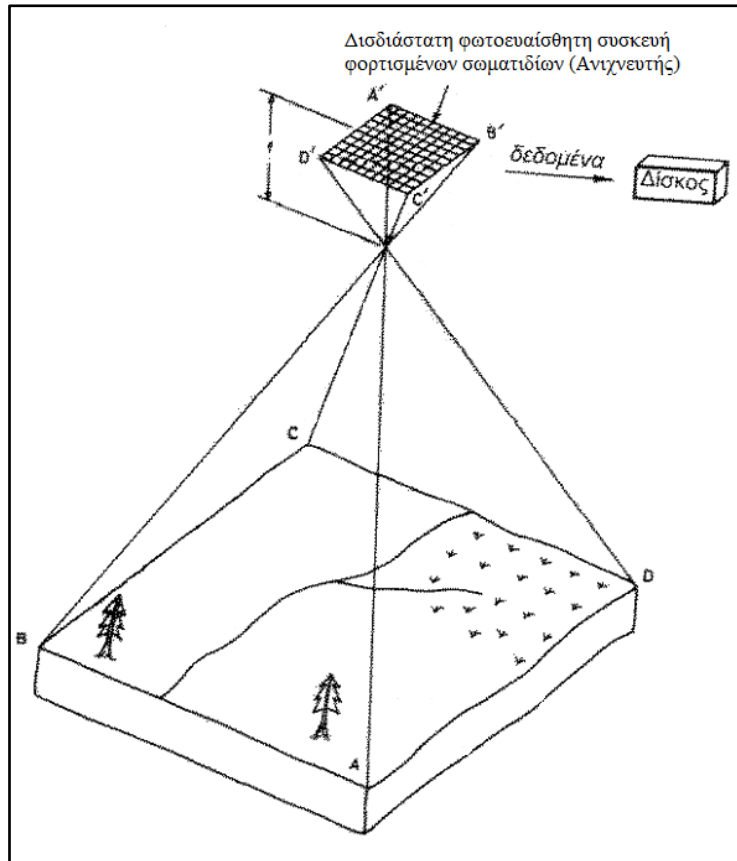
Εικόνα 3. 1 Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (Digital Camera/ Sony Alpha 7R)

(από <http://www.asctec.de/en/uav-uas-drones-rpas-roav>)

Η βασική διαφορά μεταξύ μιας συμβατικής φωτογραφικής μηχανής με φιλμ και μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής, είναι ότι στην τελευταία το φιλμ αντικαταστάθηκε από ηλεκτρονικά κυκλώματα (Solid-state electronics), όπως είναι οι δισδιάστατοι ανιχνευτές / διατάξεις φορτισμένων σωματιδίων.

Οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες, με εκατομμύρια ευαίσθητους μικροαισθητήρες, σχηματίζουν ένα δισδιάστατο πίνακα, τον ονομαζόμενο area array ή μήτρα (matrix), ο οποίος τοποθετείται στην εστιακή απόσταση από το φακό του συστήματος της κάμερας. Ο τυχαίος προσπίπτων φωτισμός εστιάζεται από το οπτικό σύστημα (φακό) πάνω στον πίνακα CCD (Charge-coupled device array), και μετατρέπεται σε ένα αναλογικό σήμα. Το σήμα αυτό, διακριτοποιείται (quantized) για να μετατραπεί σε αντίστοιχες εικόνες (Αστάρας, 2011).

Έτσι, σε μια ψηφιακή κάμερα, η πληροφορία (εικόνα) αποθηκεύεται απευθείας σε ψηφιακή μορφή, χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα κυκλώματα (solid state media).



Εικόνα 3. 2 Αρχή λειτουργίας μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (Gupta, 2003)

(από Αστάρης, 2011)

Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής είναι πολλά όπως: η απευθείας ψηφιακή έξοδος της εικόνας, η ταχύτατη επεξεργασία, η υψηλή ευαισθησία, η καλύτερη ραδιομετρική διακριτική ικανότητα και η υψηλότερη γεωμετρική πιστότητα της εικόνας. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος των εικόνων, καθιστούν της ψηφιακές κάμερες ως ένα πολύτιμο εργαλείο στην μέθοδο της Τηλεπισκόπησης, και κατ' επέκταση στην ερμηνεία και αναγνώριση των κατολισθητικών φαινομένων.

3.5. Πολυφασματικές κάμερες

Για τον εντοπισμό νεοσύστατων κατολισθήσεων, που συνήθως συνοδεύονται από φαινόμενα καλυπτόμενης βλάστησης και εκτεθειμένου υποβάθρου ή γυμνού εδάφους, χρησιμοποιείται η προφανής διαφορά μεταξύ βλάστησης και περιβάλλοντος χώρου, με την χρήση εικόνων NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) πριν και μετά την παρουσία κατολισθήσεων στην περιοχή.

Οι εικόνες NDVI δημιουργούνται με βάση τις πολυφασματικές εικόνες Τηλεπισκόπησης που αποκτούνται από πολυφασματική κάμερα που τοποθετείται σε πλατφόρμα UAV.



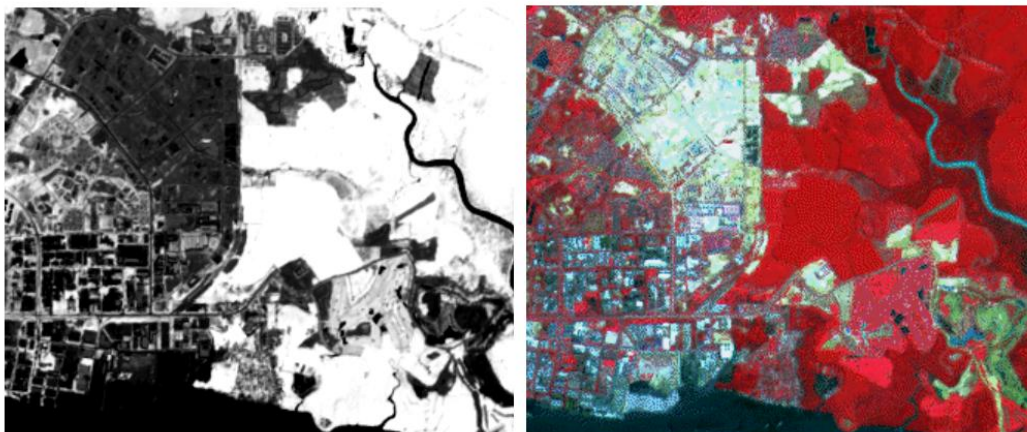
Εικόνα 3. 3 Πολυφασματική κάμερα Sequoia σχεδιασμένη για γεωργικές εφαρμογές. Προσφέρει υψηλή ακρίβεια, ευελιξία και πολύ μικρό μέγεθος και βάρος. (από <http://www.geosense.gr/sequoia/>)

Οι πολυφασματικές κάμερες διαφέρουν από τις φωτογραφικές μηχανές ορατού φωτός SLR που χρησιμοποιούνται συνήθως στις τεχνικές Τηλεπισκόπησης UAV, κυρίως στις παραμέτρους απόδοσης. Τα ειδικά μέτρα και οι διαμορφώσεις μιας πολυφασματικής κάμερας σύμφωνα με τον Lin et al (2017), περιλαμβάνουν:

- Προσανατολισμό εστιακού μήκους και ρύθμιση διαφράγματος φακού: Κατά τη χρήση φωτογραφικών μηχανών SLR για UAV, το εστιακό μήκος του φακού ορίζεται συνήθως στο άπειρο. Ωστόσο, η εστιακή απόσταση του φακού της πολυφασματικής κάμερας πρέπει να ρυθμιστεί ανάλογα με το ύψος της πτήσης του UAV για να παράγει σαφές εικόνες. Το μέγεθος του ανοίγματος του φακού της πολυφασματικής κάμερας θα πρέπει να ρυθμιστεί σύμφωνα με το φως του περιβάλλοντος, αυτό επιτυγχάνεται μέσω εξωτερικής συνδεδεμένης οθόνης LED μετά από πολλές δοκιμαστικές λήψεις.

- Μορφή αποθήκευσης πολυφασματικής εικόνας και ρύθμιση ώρας έκθεσης: Δεδομένου ότι η πολυφασματική κάμερα λαμβάνει συνεχώς φωτογραφίες κατά τη διάρκεια πτήσης της διαδικασίας UAV, το χρονικό διάστημα είναι σχετικά μικρό, συνήθως περίπου 3 δευτερόλεπτα και ο χρόνος για την αποθήκευση των φωτογραφιών στην κάρτα μνήμης είναι μικρότερος από 1 δευτερόλεπτο. Όμως, αν ο χρόνος έκθεσης δεν ρυθμιστεί σωστά, τότε ενδέχεται να συμβεί ασynchρονισμός των δεδομένων και των φωτογραφιών με αποτέλεσμα στην συνέχεια, ο τριγωνισμός των δεδομένων να μην είναι εφικτός.
- Διαμόρφωση εξωτερικής τροφοδοσίας κα συσκευής ενεργοποίησης παλμών: Καθώς δυο μπαταρίες που πωλούνται στην αγορά μπορούν να διατηρήσουν μόνο μια ώρα συνεχής λήψης από μια πολυφασματική κάμερα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια εξωτερική τροφοδοσία, η οποία θα μπορεί να υποστηρίξει συνεχή λήψη 5 ωρών και να ικανοποιεί τις ανάγκες των περισσότερων καθηκόντων UAV. Ταυτόχρονα, επειδή η πολυφασματική κάμερα δεν ενεργοποιείται με το χέρι για να τραβήξει φωτογραφίες όταν ανήκει σε πλατφόρμα UAV, γίνεται απαραίτητο η ρύθμιση μιας συσκευής ενεργοποίησης παλμών, ώστε τα σήματα των παλμών να μπορούν να αποστέλλονται στην πολυφασματική κάμερα από το σύστημα ελέγχου πτήσης – λήψης φωτογραφιών.

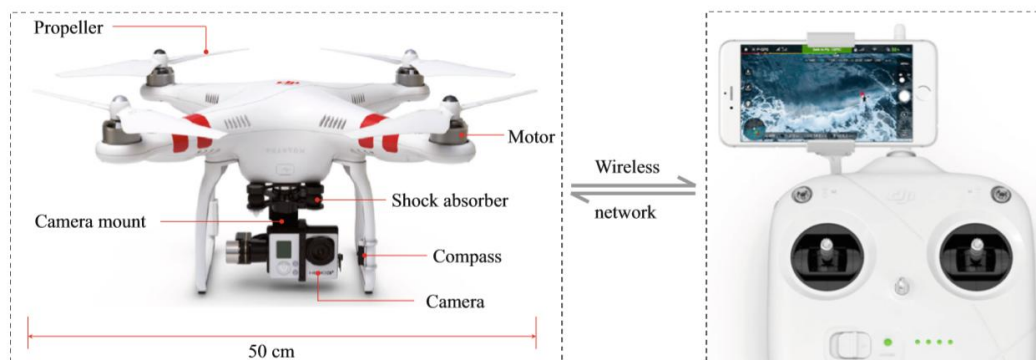
Ουσιαστικά, μια πολυφασματική κάμερα καταγράφει 3 κανάλια, πράσινο, κόκκινο και NIR (κοντινό υπέρυθρο) τα οποία είναι ίσα με τα TM2, TM3 και TM4 του δορυφόρου Landsat 1 (Lin, 2017). Μετά από την διαδικασία λήψης των φωτογραφιών και με την βοήθεια ενός συνοδευτικού λογισμικού αποκτούνται μια ψευδο - έγχρωμη εικόνα και μια εικόνα δείκτης βλάστησης όπως το προαναφερθέν NDVI. Οι φωτογραφίες αυτές είναι βολικές για οπτική ερμηνεία και αποτελούν για τους μελετητές ένα πολύτιμο εργαλείο για την αναγνώριση της βλάστησης και κατ' επέκταση την αναγνώριση νεοσύστατων κατολισθήσεων.



Εικόνα 3. 4 Δεξιά: πολυφασματική ψευδοχρωματική εικόνα. Αριστερά: παραγόμενη εικόνα NDVI.

3.6. Τηλεκατευθυνόμενα μη επανδρωμένα συστήματα λήψης εικόνων (UAV)

Με τον όρο "μη επανδρωμένο εναέριο όχημα" (UAV) ορίζεται ένα αεροσκάφος σχεδιασμένο να λειτουργεί χωρίς την ανθρώπινη παρουσία πιλότου σε αυτό (Ένωση UVS International⁵). 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. 5 Αριστερά: Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα, Δεξιά: Τηλεχειριστήριο και οθόνη παρακολούθησης (από Miao Yu, 2017).

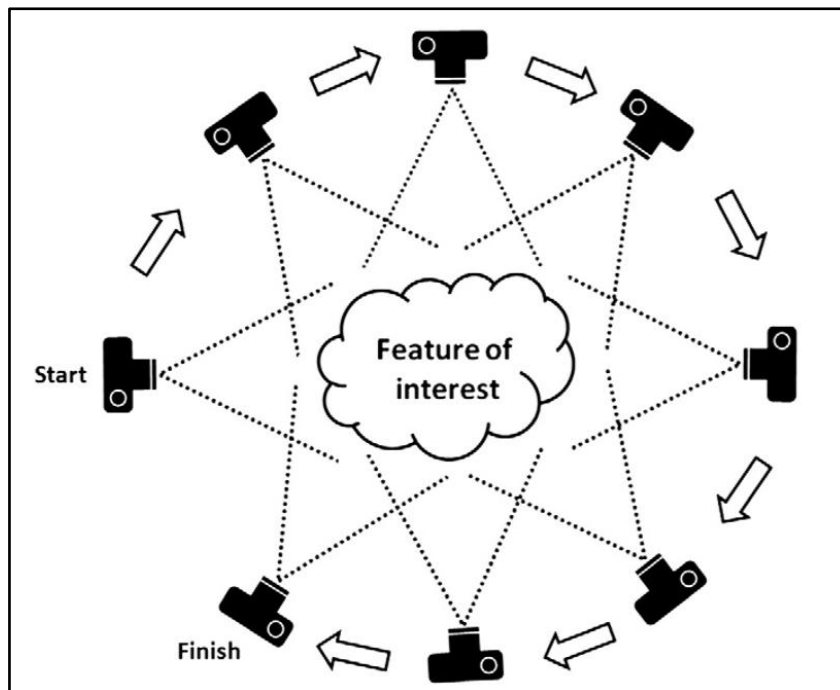
Τα τελευταία χρόνια τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα αποτελούν μια πολύτιμη πηγή δεδομένων για θέματα αναγνώρισης, χαρτογράφησης και απεικόνισης γεωμορφολογικών και συγκεκριμένα κατολισθητικών φαινομένων. Τα UAV παρέχουν ένα πλήθος οπτικών δεδομένων αεροφωτογραφιών που στην συνέχεια αναλύονται με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας, για την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου.

Παρακάτω ακολουθούν τα πλεονεκτήματα της μεθόδου UAV που συμβάλλουν στις εφαρμογές ανίχνευσης και αξιολόγησης των κατολισθήσεων:

- Υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση: Τα UAV έχουν την δυνατότητα να συλλέγουν δεδομένα σε στενή επαφή και από πολλαπλές γωνίες παρέχοντας έτσι ένα μεγάλο χωροταξικό περιβάλλον και μια εικόνα προσωρινής ανάλυσης (Lazzari & Gioia, 2017)
- Υψηλή απόδοση: Λόγω της υψηλής κινητικότητας και της παραγωγής εικόνας σε πραγματικό χρόνο, η χρήση των UAV είναι κατάλληλη για έκτακτες ανάγκες αμέσως μετά από καταστροφές.
- Χαμηλό κόστος: Το χαμηλό λειτουργικό και κόστος συντήρησης καθιστούν τις έρευνες με την χρήση UAV να πραγματοποιούνται επανειλημμένα και σύμφωνα με την επιθυμητή συχνότητα, έτσι ώστε να μπορεί να αναλυθεί.

⁵ UVS International: αποτελεί μια μη κερδοσκοπική ένωση που έχει συσταθεί από το Εμπορικό Επιμελητήριο της Χάγης στην Ολλανδία και αντιπροσωπεύει τους κατασκευαστές μη επανδρωμένων συστημάτων.

Αντίθετα όλα τα παραπάνω επιλύονται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία, βασισμένη σε μια βάση δεδομένων με αυτόματα εξαγόμενα χαρακτηριστικά από ένα σύνολο επικαλυπτόμενων εικόνων (Snavely, 2008).

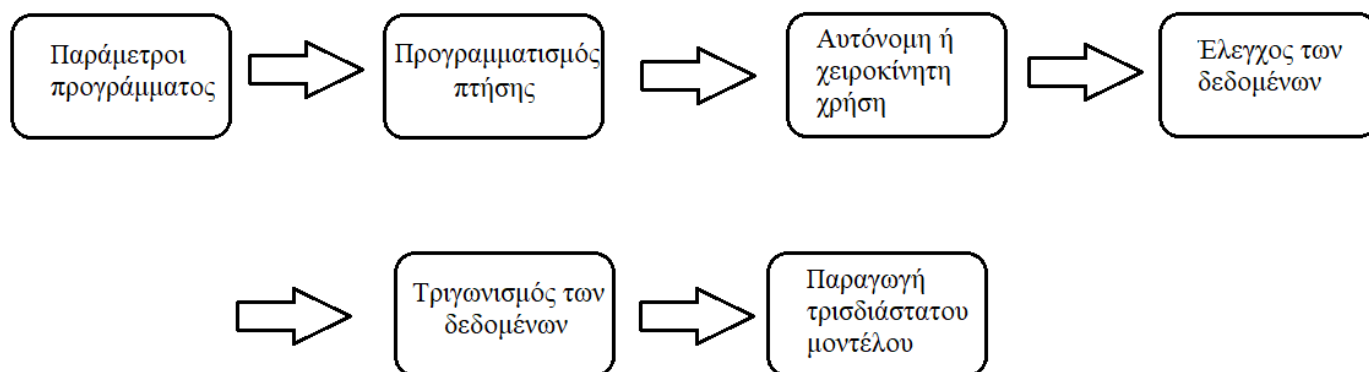


Εικόνα 3. 6 Structure for Motion (SfM). Αντί για ένα ενιαίο στερεοφωνικό ζεύγος, η τεχνική SfM απαιτεί πολλαπλές, επικαλυπτόμενες φωτογραφίες ως είσοδο για την εξαγωγή χαρακτηριστικών και αλγορίθμων αναδόμησης 3-D (Westoby, 2012).

Η μέθοδος ξεκίνησε να αναπτύσσεται από το 1990 και τα εργαλεία της μπορούν να χρησιμοποιούν άμεσα φωτογραφίες που έχουν μεταμορφωθεί από τον χρήστη δημιουργώντας αραιά σύννεφα σημείων 3D (3D point cloud) σε ένα σύστημα συντεταγμένων "χώρου - εικόνας" το οποίο πρέπει να ευθυγραμμίζεται σε ένα πραγματικό σύστημα συντονισμού "αντικειμένου - χώρου" χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματισμό ομοιότητας 3D με βάση ένα μικρό αριθμό γνωστών σημείων ελέγχου εδάφους GCP (Ground Control Points) με γνωστές στο χώρο συντεταγμένες (Westoby, 2012).

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

3.9. Μεθοδολογία UAV



Εικόνα 3. 7 Ροή εργασιών για την επεξεργασία δεδομένων UAV.

3.9.1. Σχέδιο πτήσης

Η αποστολή πτήσης και απόκτησης δεδομένων προγραμματίζεται στο εργαστήριο με ένα ειδικό λογισμικό, γνωρίζοντας από την περιοχή ενδιαφέροντος την απαιτούμενη απόσταση του εδαφικού δείγματος GSD (Ground Sample Distance) και τις εσωτερικές παραμέτρους της τοποθετημένης ψηφιακής κάμερας. Με αυτό τον τρόπο, καθορίζοντας την κλίμακα της εικόνας και το εστιακό μήκος της κάμερας, προκύπτει το ιπτάμενο ύψος. Έπειτα, υπολογίζονται τα κέντρα προοπτικής της κάμερας για τον καθορισμό της διαμήκους και εγκάρσιας επικάλυψης των λωρίδων της εικόνας (Remondino, 2011).

Οι διαδικασίες απογείωσης και προσγείωσης σχετίζονται αυστηρά με το χρησιμοποιούμενο όχημα και τα χαρακτηριστικά του, αλλά συνήθως ελέγχονται από το έδαφος από πιλότο (πχ. Με Τηλεχειριστήριο).

Κατά την διάρκεια της πτήσης η πλατφόρμα UAV παρατηρείται κανονικά από σταθμό ελέγχου που δείχνει δεδομένα πτήσης σε πραγματικό χρόνο όπως: θέση, ταχύτητα, στάση και αποστάσεις, παρατηρήσεις GNSS (Global Navigation Satellite System), κατάσταση μπαταρίας ή καυσίμου, ταχύτητα ρότορα κ.λπ. Τα περισσότερα συστήματα επιτρέπουν στην συνέχεια την απόκτηση δεδομένων εικόνας μετά τον υπολογισμό των σημείων πορείας (waypoints).

3.9.2. Βαθμονόμηση καμερών και Προσανατολισμός εικόνων

Η βαθμονόμηση της κάμερας και ο προσανατολισμός της εικόνας είναι δύο βασικές προϋποθέσεις για οποιαδήποτε μετρική ανακατασκευή από εικόνες. Στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές προτιμάται ο διαχωρισμός των δύο αυτών εργασιών σε δύο διαφορετικά βήματα (Remondino, 2011).

Πράγματι και τα δυο βήματα απαιτούν διαφορετικές γεωμετρίες σημείων μπλοκ (blog points), οι οποίες βελτιστοποιούνται καλύτερα αν υποβληθούν σε επεξεργασία σε χωριστά στάδια. Από την άλλη πλευρά σε πολλές εφαρμογές που απαιτείται χαμηλότερη ακρίβεια, η βαθμονόμηση και ο προσανατολισμός μπορούν να υπολογιστούν ταυτόχρονα με την επίλυση μιας προσαρμογής δέσμης αυτό-βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση της κάμερας πραγματοποιείται γενικά στο εργαστήριο αλλά και κατά την διάρκεια της πτήσης, οι εργασίες της απαιτούν την εξαγωγή κοινών στοιχείων σε όσο το δυνατόν περισσότερες εικόνες.

Σήμερα η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση τεχνικών αυτόματης Τριγωνοποίησης AAT (Automatic Aerial Triangulation). 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).

Όσον αφορά τον προσανατολισμό του αεροχήματος, αυτός επιτυγχάνεται με την χρήση ενός υψηλής ακρίβειας Παγκόσμιου Συστήματος Αναφοράς (GPS), το οποίο χρησιμεύει για τον εντοπισμό της θέσης του αεροχήματος σε πραγματικό χρόνο σε οποιοδήποτε σημείο της Γης (Siebert & Teizer, 2014, Colomina & Molina, 2014).

Η χρήση ψηφιακών φωτογραφιών σε συνδυασμό με την ζωντανή απεικόνιση των λαμβανόμενων πληροφοριών και με την χρήση GPS, παρέχει την δυνατότητα λήψης γεωαναφερμένων δεδομένων υψηλής ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο.

3.9.3. Κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου

Μετά την διαδικασία του προσανατολισμού των εικόνων τα περαιτέρω βήματα στη διαδικασία τρισδιάστατης ανακατασκευής και απεικόνισης είναι η επιφανειακή μέτρηση και η εξαγωγή χαρακτηριστικών. Ξεκινώντας από τις γνωστές παραμέτρους εξωτερικού προσανατολισμού και βαθμονόμησης της κάμερας, μια σκηνή (frame) μπορεί να ανακατασκευαστεί με τεχνικές αυτόματης αντιστοίχισης πυκνών εικόνων ή με διαδραστικές μεθόδους για την ανθρώπινη εξαγωγή διανυσματικών χαρακτηριστικών και πληροφοριών (Remondino, 2011).

Οι διαδραστικές αυτές προσεγγίσεις προσφέρουν σύννεφα μικρών σημείων, τα οποία χρειάζονται διόρθωση και επεξεργασία για την δημιουργία ακριβών σημείων 3D (F. Remondino, 2011). Αντίθετα οι αυτοματοποιημένες μέθοδοι παράγουν ένα πυκνό σύννεφο σημείων που περιγράφει την επιφάνεια της σκηνης και ονομάζεται DSM (Digital Surface Model). Στην συνέχεια, ένας ισχυρός αλγόριθμος αντίστοιχης εικόνας εξάγει πυκνά σύννεφα σημείων 3D με επαρκή ανάλυση για να περιγράψει την επιφάνεια ενός αντικειμένου και τις ασυνέχειες του.

Ουσιαστικά, η πραγματική κατάσταση της σύγχρονης τεχνολογίας UAV περιλαμβάνει την αντιστοίχιση πολλαπλών εικόνων (Seitz et al, 2006, Remondino et al, 2008) με μεθόδους που βασίζονται σε αλγόριθμους ομογενοποίησης ή αλγορίθμων βέλτιστης ροής (Pierrot – Deseilligny & Paparoditis, 2006).

3.10. Μελέτη περίπτωσης κατολίσθησης στην περιοχή Wenchuan στην Κίνα

Η νοτιοδυτική Κίνα είναι μια περιοχή που χαρακτηρίζεται ως ορεινή με οροπέδια. Λόγω του περίπλοκου γεωλογικού περιβάλλοντος και των σκληρών καιρικών συνθηκών που λαμβάνουν χώρα, η περιοχή συνοδεύεται από την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Μετά από μια περίοδο ισχυρών σεισμών το 2010 στις περιοχές Wenchuan, Lushan και Lundian το υπόβαθρο και το έδαφος στην πλησιέστερη επιφάνεια της καταστροφικής περιοχής εμφανίζονται πολύ χαλαρά χωρίς συνοχή, και ο κίνδυνος εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων είναι πολύ υψηλός ιδιαίτερα όταν επηρεάζεται από ισχυρές βροχοπτώσεις και επιφανειακές απορροές (Yin Yueping, 2009) (Lin, 2017).

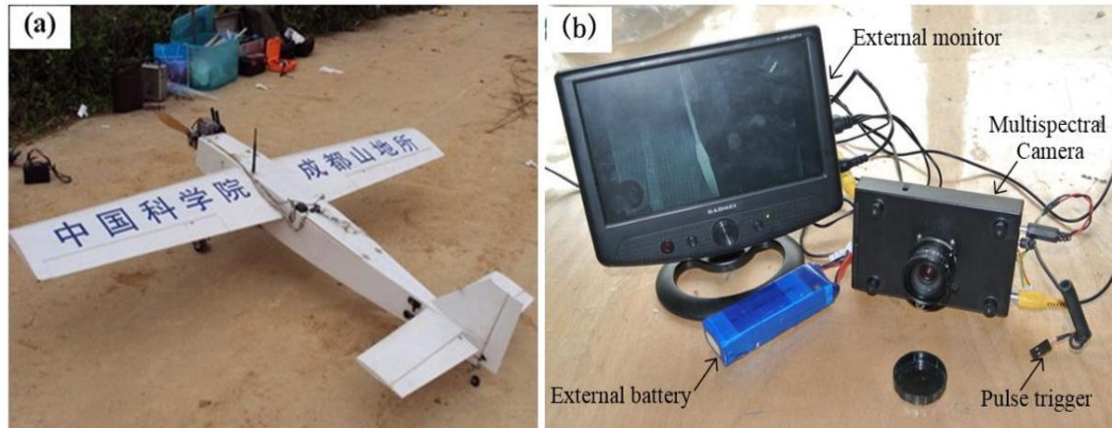
Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό, πως στην περιοχή έπρεπε να πραγματοποιηθεί έγκαιρα η ανίχνευση των κατολισθήσεων για τον εντοπισμό και την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την τοποθεσία και το μηχανισμό τους, τις επιπτώσεις τους στις γύρω περιοχές, τον απαιτούμενο όγκο των χωματουργικών εργασιών και τέλος την αξιολόγηση του κινδύνου κατολίσθησης στις περιοχές που επλήγησαν από τους σεισμούς.



Εικόνα 3. 8 Περιοχή Wenchuan στον χάρτη (από <http://www.maps-of-china.net/wenchuan-earthquake-map/>)

Με τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους, την ευελιξία κατά την πτήση και την δυνατότητα πολύ υψηλής ανάλυσης, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη UAV αποτελούσαν την βέλτιστη λύση για την λήψη εικόνων Τηλεπισκόπησης και την διερεύνηση των πιθανών κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης (Lin, 2017).

Αρχικά, με την εφαρμογή πολυφασματικής κάμερας σε πλατφόρμα UAV, αποκτήθηκαν πολυφασματικές εικόνες για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) έτσι ώστε να αναγνωριστούν οι πρόσφατα εμφανιζόμενες κατολισθήσεις. Στην συνέχεια, με την μέθοδο ορθοφωτογράφισης από τις οπτικές εικόνες UAV κατασκευάστηκε το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής, για την αναγνώριση και την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την κατολίσθηση όπως: η τοποθεσία της, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, η περιοχή επιρροής και ο όγκος του μετακινούμενου υλικού.



Εικόνα 3. 9 α) πλατφόρμα UAV σταθερής πτέρυγας β) πολυφασματική κάμερα που εφαρμόστηκαν στην περίπτωση Wenchuan (Lin, 2017).

3.10.1. Παραγωγή NDVI με πολυφασματική κάμερα

Με την εφαρμογή μιας πολυφασματικής κάμερα στην πλατφόρμα UAV αλλά και με την βοήθεια ενός συνοδευτικού λογισμικού όπως το Pixel Wrench αποκτήθηκαν μια ψευδοχρωματική εικόνα και μια εικόνα δείκτης βλάστησης.

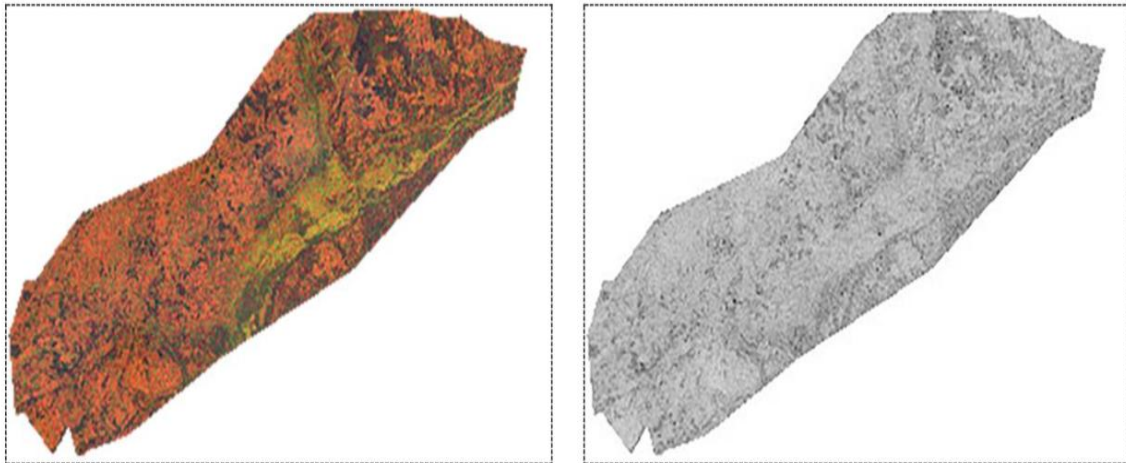
Όπως είναι γνωστό η πράσινη χλωροφύλλη έχει έντονη αντανάκλαση στην ζώνη των κοντινών υπέρυθρων με αποτέλεσμα να εμφανίζεται συνήθως με κόκκινο χρώμα. Αυτό το χρώμα είναι γνωστό ως ψευδοχρωματική εικόνα και γενικά αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην οπτική ερμηνεία της εικόνας.

Αντίθετα, το NDVI πρόκειται για μια εικόνα με γκρι κλίμακα η οποία διαφέρει από την ψευδοχρωματική εικόνα. Όσο ψηλότερος είναι ο δείκτης NDVI, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της απεικονιζόμενης εικόνας και πυκνότερη και ευρύτερη η αντίστοιχη βλάστηση.

Το NDVI είναι ο πιο δημοφιλής δείκτης βλάστησης και ο τύπος του σύμφωνα με τον Lin et al (2017) είναι ο παρακάτω:

$$NDVI = (pnir - pr) / (pnir + pr)$$

Με βάση τον παραπάνω τύπο η εικόνα δείκτης βλάστησης αποκτήθηκε και η περεταίρω μελέτη της περιοχής συνεχίστηκε με την παραγωγή της πανοραμικής ορθοφωτογραφίας από το UAV, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό αυτοματοποιημένου τριγωνισμού, σε συνδυασμό με την χωρική συνάρτηση της εικόνας (x,y,z), των δεδομένων θέσης και την γωνία βήματος. Επίσης, κατά τις διαδικασίες επεξεργασίες παράχθηκε και το αντίστοιχο ψηφιακό μοντέλο εδάφους DSM (Digital Surface Model).

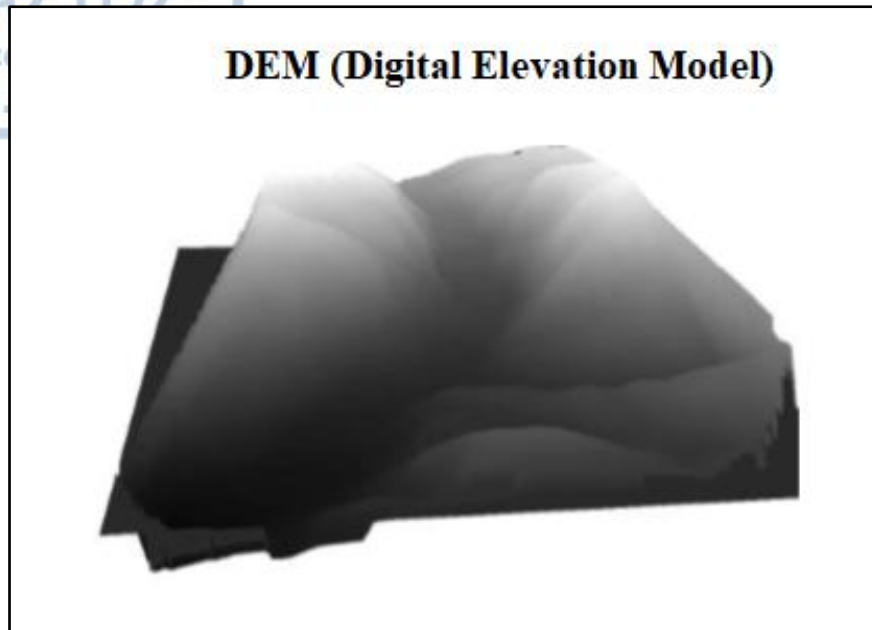


Εικόνα 3. 10 Αριστερά: Ψευδοχρωματική εικόνα περιοχής μελέτης, Δεξιά: Εικόνα δείκτης βλάστησης NDVI περιοχής μελέτης (Lin, 2017)

3.10.2. Μέθοδος αεροτριγωνισμού για την παραγωγή 3D μοντέλου

Οι μελετητές με την χρήση των οπτικών εικόνων UAV, που σε σχέση με τις πολυφασματικές εικόνες έχουν υψηλότερη χωρική ανάλυση και δίνουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την χαρακτηριστικά της περιοχής, συνέχισαν την έρευνα με την δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων εδάφους, βάση των παραμέτρων εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας και τις εξωτερικές παραμέτρους προσανατολισμού δηλαδή δεδομένων θέσης κατά την πτήση του αεροσκάφους.

Πιο συγκεκριμένα, τοποθέτησαν τις αποκτώμενες εικόνες UAV με τα αντίστοιχα δεδομένα εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού σε ένα λογισμικό αεροτριγωνισμού, αναζητώντας αυτόματα σημεία αντιστοίχισης (SfM) μεταξύ παρακείμενων εικόνων και με την διαδικασία της εναέριας τριγωνοποίησης δημιουργήθηκαν τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους 3D της περιοχής μελέτης, ονομαζόμενα ως DEM (Digital Elevation Model) (Lin, 2017).

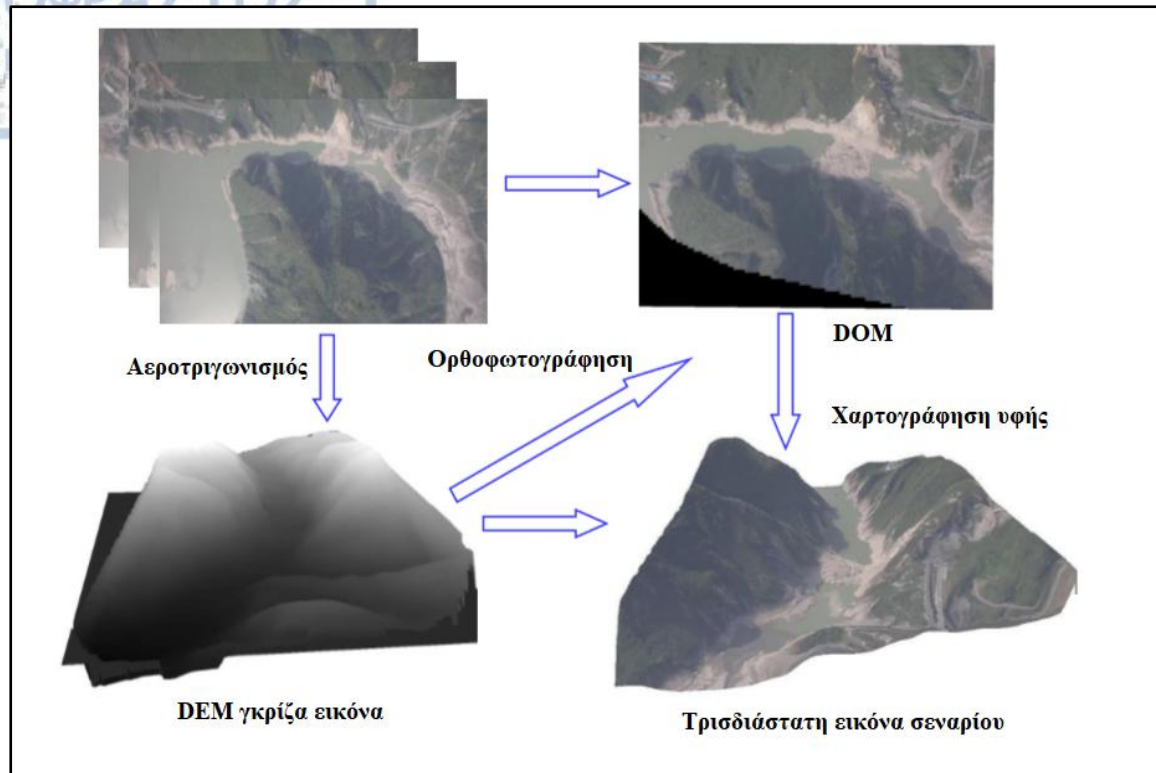


Εικόνα 3. 11 Δεδομένα εδάφους 3D της καταστροφικής περιοχής (Lin, 2017).

Παράλληλα με την δημιουργία του DEM, οι μελετητές δημιούργησαν μια ορθοεικόνα, ονομαζόμενη ως DOM (Digital Orthophoto Map). Ουσιαστικά, μια εικόνα DOM, είναι μια αεροφωτογραφία γεωμετρικά διορθωμένη ("ορθογραφική") έτσι ώστε η κλίμακα να είναι ομοιόμορφη⁶. Σε αντίθεση με μια μη διορθωμένη αεροφωτογραφία μια ορθογραφική εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση πραγματικών αποστάσεων, γιατί ουσιαστικά αποτελεί ακριβής αναπαράσταση της επιφάνειας της Γης, προσαρμοσμένη και διορθωμένη από την παραμόρφωση του φακού και την θέση της κάμερας.

Τέλος, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό απεικόνισης όπως πχ το Arc Scene έγινε δυνατή η χαρτογράφηση υψών, δηλαδή του DOM της περιοχής στόχου της κατολίσθησης στο DEM της ίδιας περιοχής. Δεδομένου ότι τόσο τα δεδομένα DEM όσο και τα δεδομένα DOM, προέρχονται από εικόνες Τηλεπισκόπησης ταίριαξαν μεταξύ τους άριστα δημιουργώντας μια τρισδιάστατη εικόνα σεναρίου κάνοντας την ερμηνεία και αναγνώριση των κατολισθήσεων πιο ακριβή.

⁶ Παραγωγή DOM για ομοιόμορφη κλίμακα εικόνας: Μια φωτογραφία έχει την ίδια έλλειψη παραμόρφωσης με ένα χάρτη (Lear, A.C, 1997)

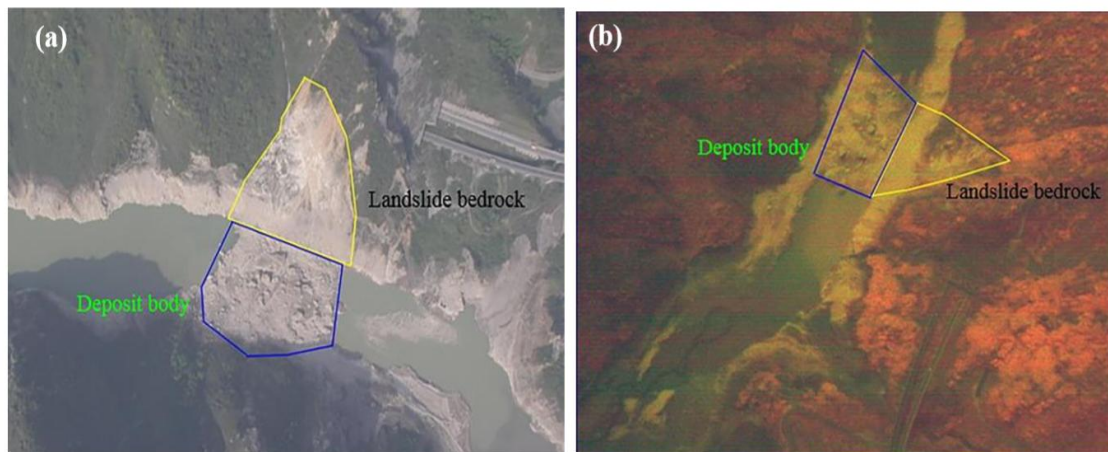


Εικόνα 3. 12 Δημιουργία δεδομένων DEM και DOM από οπτικές εικόνες UAV (Lin, 2017).

3.10.3. Αναγνώριση της επιφάνειας ολίσθησης και του χώρου εναπόθεσης της υπό μελέτη κατολίσθησης - μέτρηση κατολισθαίνουσας μάζας

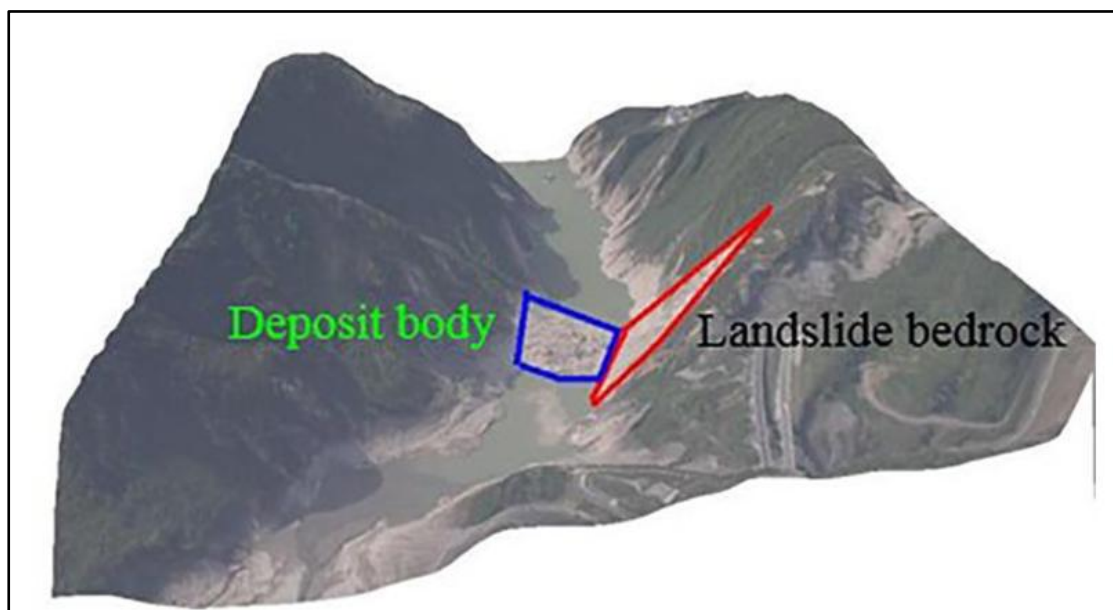
Με την χρήση των οπτικών εικόνων UAV αλλά και των ψευδοχρωματικών εικόνων και των εικόνων NDVI που παράχθηκαν από τις πολυφασματικές εικόνες UAV, αναγνωρίστηκε η επιφάνεια ολίσθησης και ο χώρος εναπόθεσης της κατολίσθησης, από την ανάλυση της βλάστησης στην επιφάνεια της κατολίσθησης και στο περιβάλλοντα χώρο, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές συνθήκες του εδάφους (Lin, 2017).

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 3.12**) η επιφάνεια κλίσης του εδάφους (περιβάλλουσα κίτρινη γραμμή) και το σώμα απόθεσης (περιβάλλουσα περιοχή κυανής γραμμής) σκιαγραφούνται τόσο σε οπτική όσο και σε ψευδο – έγχρωμη εικόνα. Η οπτική και ψευδοχρωματική εικόνα καταγράφονται σε διαφορετικό χρόνο και με διαφορετική γωνία, ώστε να μπορεί να γίνει εύκολη η ερμηνεία του φαινομένου της κατολίσθησης.



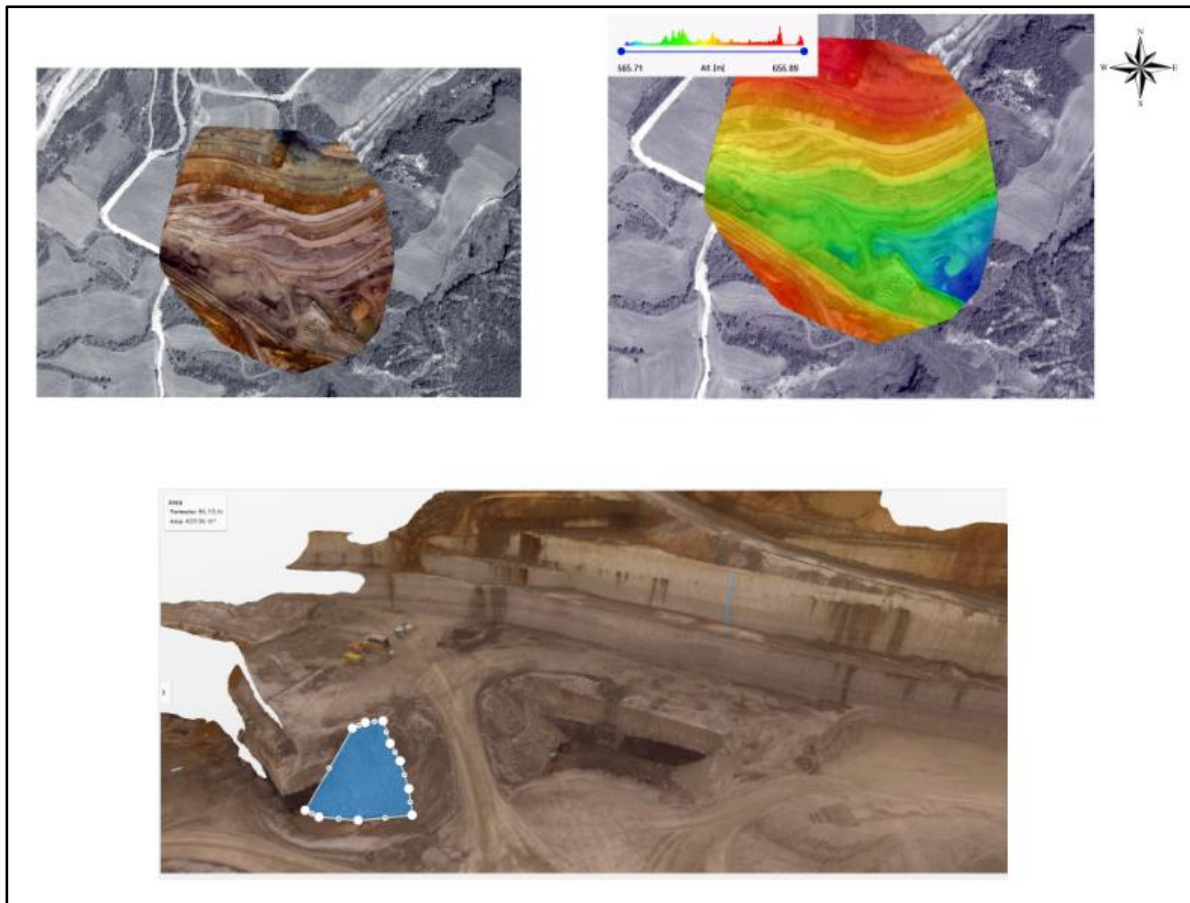
Εικόνα 3. 13 Αναγνώριση και διάκριση της επιφάνειας ολίσθησης και του χώρου εναπόθεσης σε: α) οπτική εικόνα που συλλέχθηκε το 2011 και β) ψευδο – έγχρωμη εικόνα που συλλέχθηκε το 2013 (Lin, 2017).

Οι άμεσα αποκτημένες εικόνες UAV είναι δισδιάστατες, επομένως είναι πολύ εύκολο να ληφθεί η επιφάνεια ολίσθησης της κατολίσθησης καθώς και το σώμα αποθεμάτων στο σύνολό του, αν ληφθεί υπόψη η κατάσταση του γυμνού εδάφους ή υποβάθρου (Lin, 2017). Για την διάκριση λοιπόν της επιφάνειας κλίσης και του σώματος αποθέματος, θα πρέπει πρώτα να εξεταστεί το φυσικό περιβάλλον, δηλαδή το που βρίσκεται το κατολισθέν σώμα. Έπειτα χρησιμοποιείται το 3D μοντέλο σεναρίου (DOM χαρτογραφημένο σε DEM) της περιοχής κατολίσθησης που δημιουργείται από εικόνες UAV. Εκεί, η επιφάνεια κλίσης του εδάφους είναι γενικά απότομη ενώ ο χώρος εναπόθεσης σχετικά επίπεδος. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 3.14**) η διάκριση μεταξύ επιφάνειας ολίσθησης και ολισθαίνουσας μάζας είναι ευκρινής.



Εικόνα 3. 14 Αναγνώριση και διάκριση επιφάνειας ολίσθησης και χώρου εναπόθεσης σε 3D σενάριο (Lin, 2017).

Τέλος, καθώς και το DOM και το DEM είναι γεωαναφερμένα, η περιοχή που επηρεάζεται από την κατολίσθηση μπορεί να μετρηθεί άμεσα με την χρήση εργαλείων μέτρησης σε λογισμικό απεικόνισης 3D σεναρίου όπως το Arc Scene (Kennedy, 2009) (Lin, 2017).



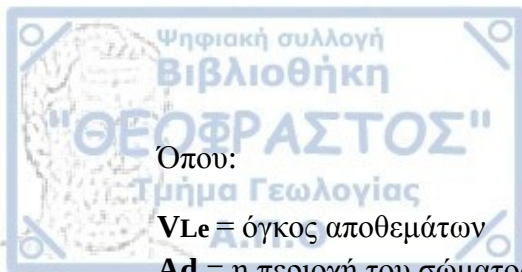
Εικόνα 3. 15 Μέτρηση κατολισθαίνουσας μάζας. Περίπτωση μελέτης με UAV στα Σέρβια Κοζάνης. Αριστερά πάνω ορθομωσαϊκό περιοχής μελέτης, δεξιά πάνω DSM περιοχής (με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα υψόμετρα), στο κέντρο το μοντέλο της περιοχής. (από εργαστήριο τεχνικής γεωλογίας και υδρογεωλογίας του ΑΠΘ).

3.10.4. Εκτίμηση όγκου αποθεμάτων εδάφους

Για τον υπολογισμό των χωματογενικών εδάφους χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος, κατά την οποία πολλαπλασιάζεται η επιφάνεια του σώματος αποθέματος που μετράτε από την οπτική εικόνα με το εκτιμώμενο ύψος του σώματος του αποθέματος.

Ο τύπος για τον υπολογισμό των χωματογενικών σύμφωνα με τον Jiayuan Lin et al (2017) είναι ο παρακάτω:

$$V_{Le} = A_d \cdot (H_e + D_r)$$



Όπου:

VLe = όγκος αποθεμάτων

Ad = η περιοχή του σώματος αποθέματος

He = ύψος αποθέματος που εκτείνεται πάνω από την επιφάνεια του ποταμού

Dr = μέσο βάθος τοπικού ποταμού

3.10.5. Συμπεράσματα

Στην περίπτωση μελέτης της πληγείσας από σεισμό περιοχής Wenchuan, μελετήθηκε μια τυπική κατολίσθηση ως παράδειγμα για την διαδικασία ενσωμάτωσης πολυφασματικής κάμερας σε πλατφόρμα UAV για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης NDVI, την τρισδιάστατη παραγωγή εδάφους με οπτικές εικόνες και την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την κατολίσθηση όπως: τοποθεσία, πληγείσα περιοχή και όγκος χωματογενικών.

Οι διαφορετικές μεταβολές της επιφάνειας ολίσθησης και του αποθέματος από το 2011 έως το 2013 συζητήθηκαν για την εύρεση των πιθανών λόγων εκδήλωσης της κατολίσθησης, καθώς εκτιμήθηκε και ο όγκος των αποθεμάτων πριν και μετά την κατολίσθηση.

Τα αποτελέσματα της μελέτης απέδειξαν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής των συστημάτων UAV στην ταχεία αναγνώριση και εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με νέες κατολισθήσεις κάτω από δύσκολες φυσικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένου του σύνθετου εδάφους και των ανεπαρκών υλικών του υποβάθρου.



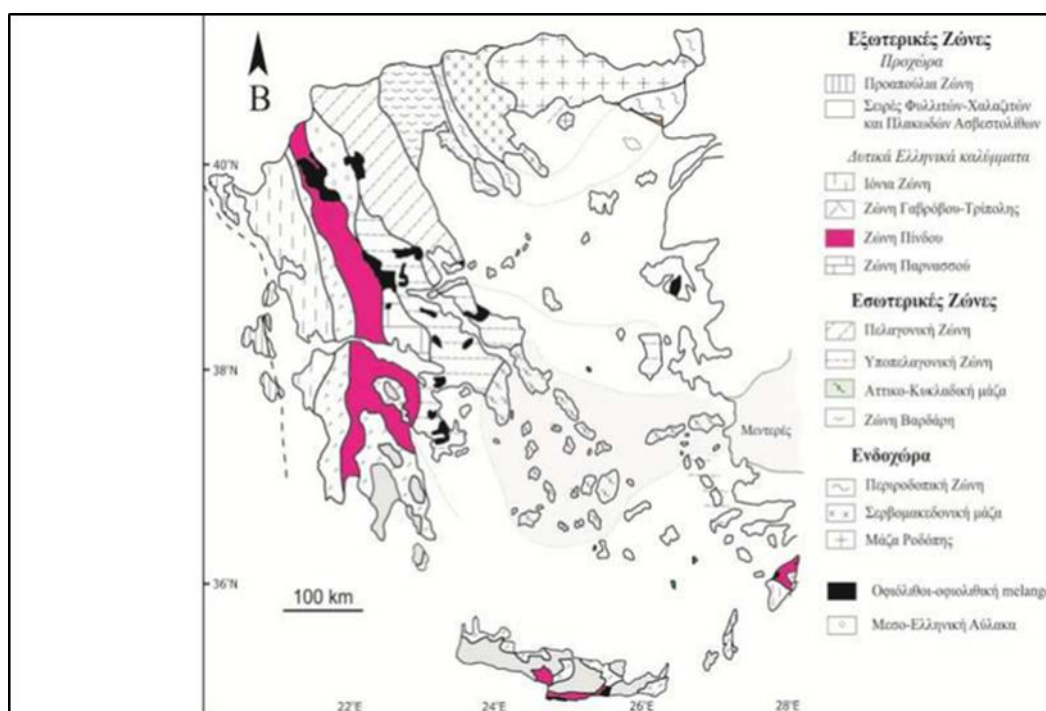
ΜΕΡΟΣ Β΄

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ – ΣΤΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ
– ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΑΥΤΟΨΙΑ – ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1. Γεωτεκτονική θέση

Η περιοχή του Ανήλιου γεωλογικά εντάσσεται στη ζώνη Ωλονού – Πίνδου, που πείρε το όνομα της κατά Philippon (1898) από το βουνό Ωλονός της Πελοποννήσου και την οροσειρά της Πίνδου. Η ζώνη αυτή εκτείνεται από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα ως την κύρια ηπειρωτική Ελλάδα και αποτελείται από την οροσειρά της Πίνδου και από τα επιμέρους βουνά Άγραφα, Αθαμανικά Όρη (Τζουμέρκα), Λάκμων (βόρεια Πίνδος), Αιτωλικό και Βαρδουσία της Στερεάς Ελλάδας και, συνεχίζει μέχρι την Πελοπόννησο με τα βουνά Παναχαϊκό και Ωλονός. Τέλος εμφανίσει της υπάρχουν στα νησιά Κρήτη και Ρόδο.

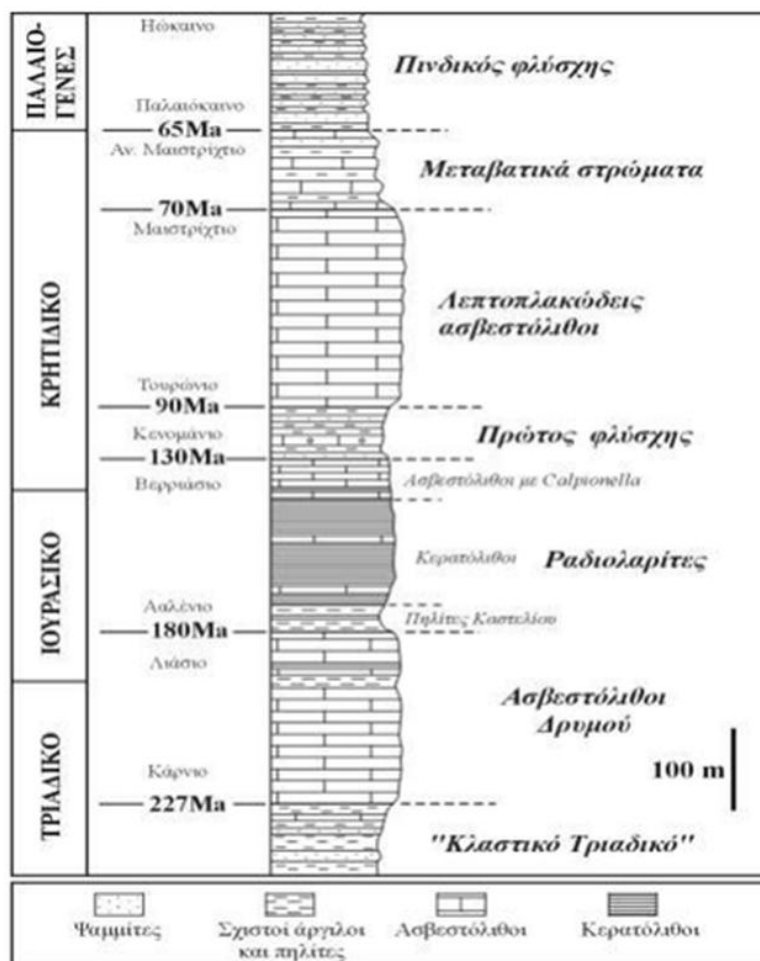


Εικόνα 4. 1 Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας, με ροζ χρώμα η ζώνη της Πίνδου (Μουντράκης, 2010).

Η ζώνη Ωλονού – Πίνδου θεωρήθηκε ως την πιο βαθιά Ελληνική αύλακα ανάμεσα στο ύψωμα της Πελαγονικής ζώνης προς τα ανατολικά και στο ύψωμα της ζώνης Γαβρόβου προς τα δυτικά. 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 (Μουντράκης, 2010).

4.2. Λιθοστρωματογραφία.

Σύμφωνα με τον Μουντράκη, 2010 οι σχηματισμοί της ζώνης Ωλονού – Πίνδου λιθοστρωματογραφικά εντάσσονται σε 4 μεγαενότητες, στους σχηματισμούς του Τριαδικού, του Ιουρασικού, του Κρητιδικού και του Παλαιογενούς αντίστοιχα.



Εικόνα 4. 2 Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη της ζώνης Ωλονού – Πίνδου αποτελούμενη από 4 μεγαενότητες (Μουντράκης, 2010).

Πιο αναλυτικά (από κάτω προς τα πάνω):

Σχηματισμοί Τριαδικού: οι σχηματισμοί του Τριαδικού χωρίζονται σε δύο υποενότητες αυτή του Μέσου Τριαδικού και αυτή του άνω Τριαδικού. Στο μέσο τριαδικό απαντώνται οι σχηματισμοί μιας κλαστικής ιζηματογενούς σειρά αποτελούμενη από αλπικά ιζήματα όπως ψαμμίτες, πυριτόλιθοι, μάργες και ασβεστόλιθοι, ενώ στο άνω Τριαδικό απαντώνται κυρίως ασβεστολιθικοί σχηματισμοί, με παρεμβολές πολλές φορές κερατολίθων, καθώς επίσης και ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά με τόφφους, ανδεσίτες και βασάλτες.

Σχηματισμοί Ιουρασικού: Η μεγαenότητα του Ιουρασικού χαρακτηρίζεται από μια συνεχή ιζηματογενή σειρά που στην ελληνική βιβλιογραφία αναφέρεται με τον όρο "σχιστοκερατολιθική διάπλαση". Αυτή η ιζηματογενής σειρά αποτελείται κυρίως από ιζήματα βαθιάς θάλασσας με ραδιολαριτικούς κερατόλιθους, ψαμμίτες, αργίλους αλλά και από πελαγικούς πυριτικούς ασβεστόλιθους, με έντονο χαρακτηριστικό της σειράς, το κοκκινοπράσινο χρώμα.

Σχηματισμοί Κρητιδικού: οι σχηματισμοί του Κρητιδικού χωρίζονται και αυτοί σε δύο υποενότητες, αυτή του κάτω Κρητιδικού και αυτή του μέσου - άνω Κρητιδικού.

Στο κάτω Κρητιδικό εμφανίζεται μια σειρά ρυθμικών εναλλαγών αποτελούμενη από ψαμμίτες, μάργες, πελίτες, ραδιολαρίτες και πελαγικούς λατυποπαγείς ασβεστόλιθους, συχνά αναφερόμενη με τον όρο "πρώτος φλύσχος"⁷. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται επειδή η σειρά αυτή, παρόλο που δεν αποτελεί έναν κλασσικό σχηματισμό φλύσχη, θυμίζει την συμπεριφορά του.

Τέλος, η υποενότητα του μέσου – κάτω Κρητιδικού αποτελείται από πλακώδεις ασβεστόλιθους με ενστρώσεις πυριτικών και αργιλικών ορυκτών, ασβεστιτικών τουρβιδιτών και μαργών, σε πλήρη συμφωνία μεταξύ τους.

Σχηματισμός Παλαιογενούς: ο σχηματισμός του Παλαιογενούς ονομάζεται "δεύτερος φλύσχος" ή "Πινδικός φλύσχος" και παρουσιάζει όλα τα χαρακτηριστικά ενός κλασσικού τύπου φλύσχη. Αποτελείται από ρυθμικές εναλλαγές ψαμμιτών και μαργών και πιο σπάνια από κροκαλοπαγή και ασβεστολίθους.

Τα ιζήματα του συγκεκριμένου φλύσχη είναι αργιλοψαμμιτικά ενώ μέσα σε αυτά εμφανίζονται συχνά όγκοι ολισθόλιθων με ποικίλες διαστάσεις. Εξαιτίας της διαδικασίας της ανάδυσης και της τεκτονικής καταπόνησης, ο Πινδικός φλύσχος εμφανίζεται ως ένα χαοτικό μίγμα με περίπλοκη και διαταραγμένη δομή, που χαρακτηρίζεται με τον όρο "άγριος" φλύσχος.

4.3. Τεκτονική

Κατά Μουντράκη, 2010 στη ζώνη Ωλονού – Πίνδου το προαλπικό υπόβαθρο δεν έχει ακόμη αποκαλυφθεί. Τα αλπικά ιζήματα χαρακτηρίζονται από έντονη τεκτονική των επωθήσεων και επιπτεύσεων, που προσδίδουν στο ανάγλυφο κατά κανόνα ορεινό χαρακτήρα. Το αλπικό υπόβαθρο συνθέτουν δολομίτες, ασβεστόλιθοι, κερατόλιθοι, σε εναλλαγές με αργιλικούς σχιστολίθους του Τριαδικού - Ιουρασικού, μάργες, ψαμμίτες, λατυποπαγή και λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι του Κρητιδικού και τέλος ο φλύσχος. Οι επάλληλες εσωτερικές επιπτεύσεις (λέπια) έχουν ως αποτέλεσμα την επανάληψη πολλές φορές της Μεσοζωικής σειράς, καθώς και τις γενικότερες επωθήσεις της ζώνης αυτής στη ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλεως. Οι σχηματισμοί της ζώνης αναδύθηκαν μεταξύ Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου με μία φάση πτυχώσεων που είχε ως αποτέλεσμα την έντονη λεπίωση και την επώθηση των στρωμάτων της ζώνης επί των δυτικότερων ζωνών ως τεκτονικά καλύμματα. Τα τεκτονικά λέπια της ζώνης

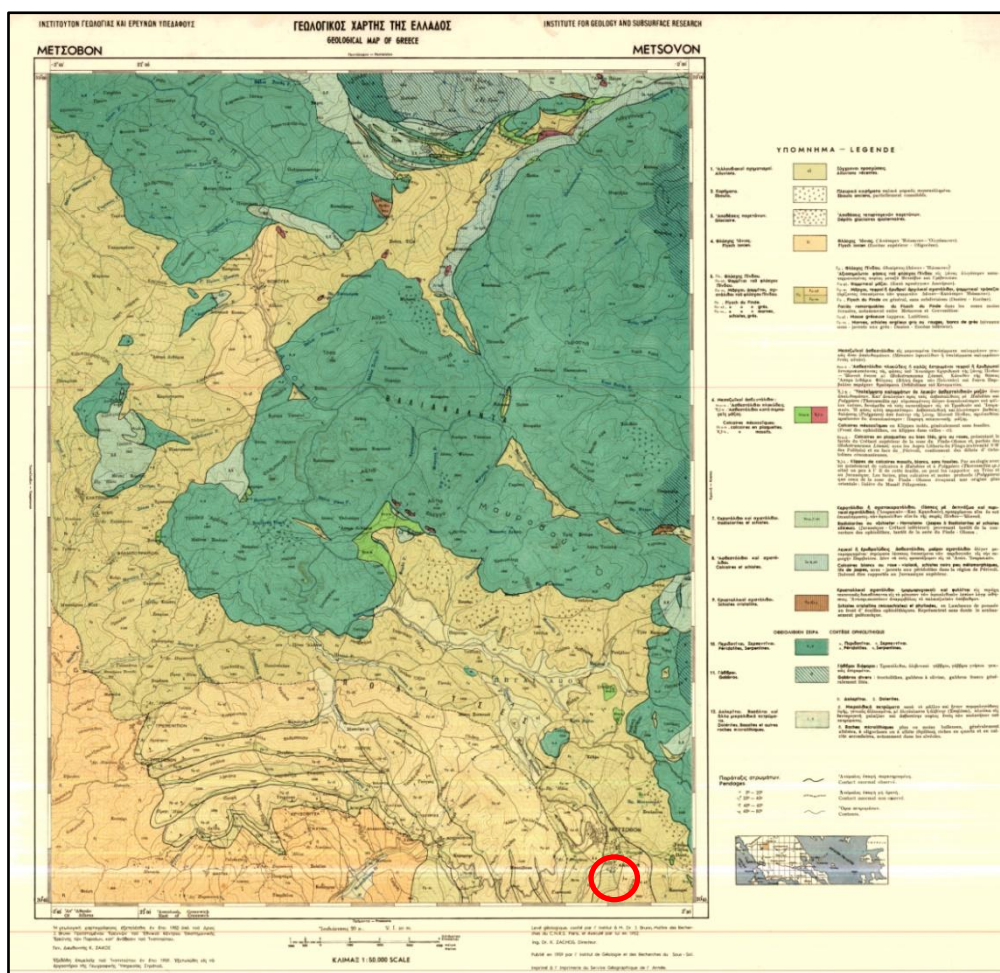
⁷ Πρώτος φλύσχος: διαφέρει από τον κλασσικό σχηματισμό φλύσχη επειδή δεν ακολούθησε η διαδικασία της ανάδυσης.

επωθούνται το ένα πάνω στο άλλο από ανατολικά προς δυτικά δημιουργώντας πολλαπλές επαναλήψεις των στρωμάτων της ζώνης και αυξάνοντας το φαινομενικό τους πάχος. Επίσης, στη ζώνη Πίνδου εμφανίζονται οφειολιθικές μάζες τεκτονικά τοποθετημένες πάνω στον "δεύτερο φλύσχη" που αποτελούνται από περιδοτίτες, δουνίτες και χαρτσβουργίτες, κατά θέσεις σερπεντινωμένους, με παρεμβολές ιζηματογενών πετρωμάτων όπως σχιστοκερατόλιθοι.

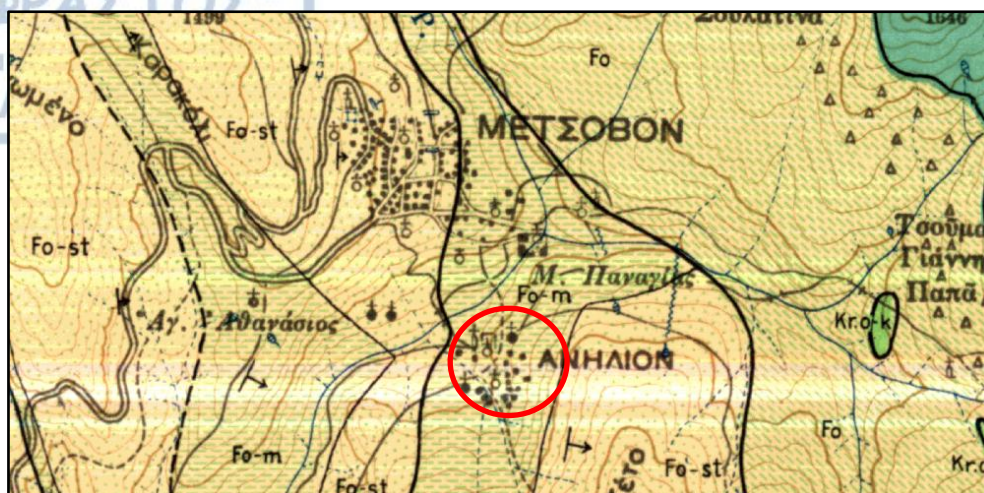
Τέλος, η ζώνη της Πίνδου χαρακτηρίζεται από μεγάλη αστάθεια των σχηματισμών της και ιδιαίτερα στις περιοχές που αποτελούνται από κορήματα κλιτύων, από αργιλομιγή ιζήματα, από έντονα τεκτονισμένους ασβεστολίθους – κερατολίθους και από νεογενή ιζήματα.

4.4. Γεωλογία ευρύτερης περιοχής μελέτης

Η ευρύτερη περιοχή εντάσσεται στην περιοχή του Μετσόβου, με κυρίαρχους σχηματισμούς τον φλύσχη και τα ασβεστολιθικά κορήματα.



Εικόνα 4. 3 Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής 1:50.000, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η περιοχή έρευνας (από ΙΓΜΕ φύλλο ΜΕΤΣΟΒΟ).

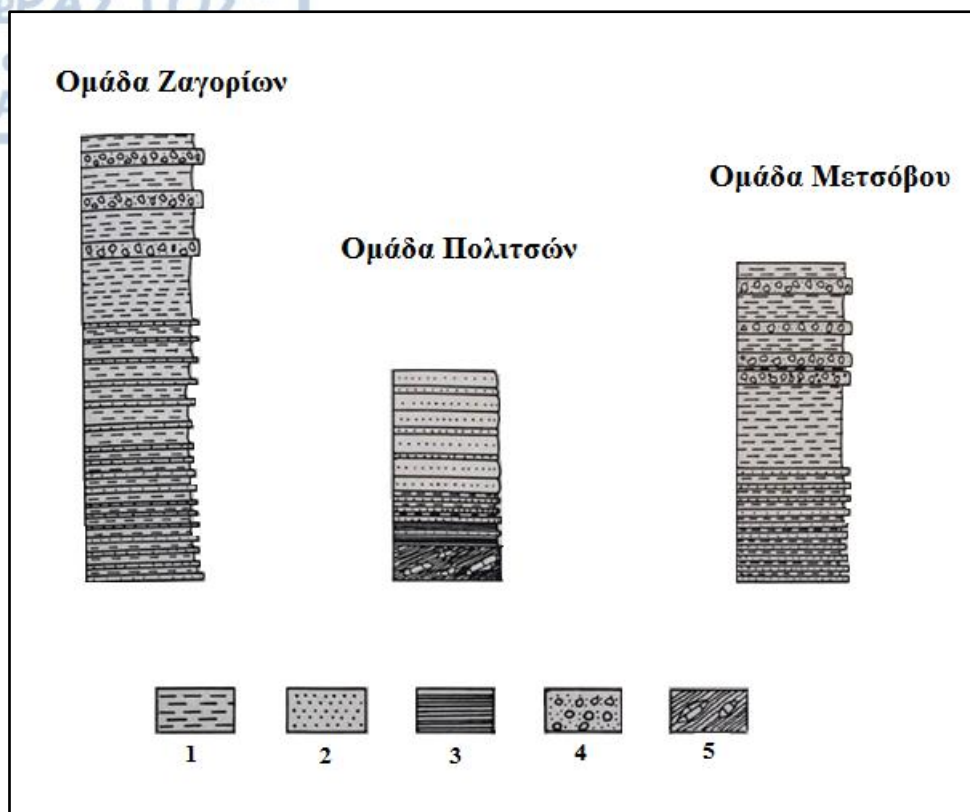


Εικόνα 4. 4 Μεγέθυνση της ευρύτερης περιοχής μελέτης στο γεωλογικό χάρτη, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η περιοχή έρευνας. Κλίμακα: 1:5000 (από ΥΓΜΕ φύλλο ΜΕΤΣΟΒΟ).

Πίνακας 4. 1 Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη της εικόνας 4.4 (στοιχεία από ΥΓΜΕ τροποποιημένου)

1. Αλλουβιακοί σχηματισμοί	al	Σύγχρονες προσχώσεις.
2. Κορήματα		Παλαιά πλευρικά κορήματα μερικώς συγκολλημένα.
3. Φλύσχης Πίνδου		Fo φλύσχης Πίνδου (Ηλ. Δάνιο - Ηώκαινο) Fo-st ψαμμιτική μάζα. Fo-m Μάργα, ερυθροί αργιλικοί σχιστόλιθοι, ορίζοντες υποκείμενοι της ψαμμιτικής μάζας.
4. Μεσοζωϊκοί Ασβεστόλιθοι		Kr.o-k πλακώδεις ασβεστόλιθοι ή τεφροί ερυθρωποί ασβεστόλιθοι με καλή στρώση. Tr,J-k συμπαγείς μάζες ασβεστολίθων (υπολείμματα καλυμμάτων λευκών ασβεστολίθων).
5. Οφειολιθική σειρά		Περιδοτίτες, Σερπεντινίτες

Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής σύμφωνα με τον παραπάνω χάρτη συγκροτείται κυρίως από σχηματισμούς φλύσχη, που διακρίνονται σε 3 διαφορετικές λιθοστρωματογραφικές ομάδες, την ομάδα των Ζαγορίων, των Πολιτσών και την ομάδα Μετσόβου.



Εικόνα 4. 5 Σχηματικές λιθοστρωματογραφικές στήλες των φλυσχικών σχηματισμών.

1:Ιλυολίθος,2:Ψαμμίτης,3:Κόκκινος πηλίτης,4:Κροκαλοπαγές,5:Τεκτονικός ορίζοντας

(Μουντράκης, 2010).

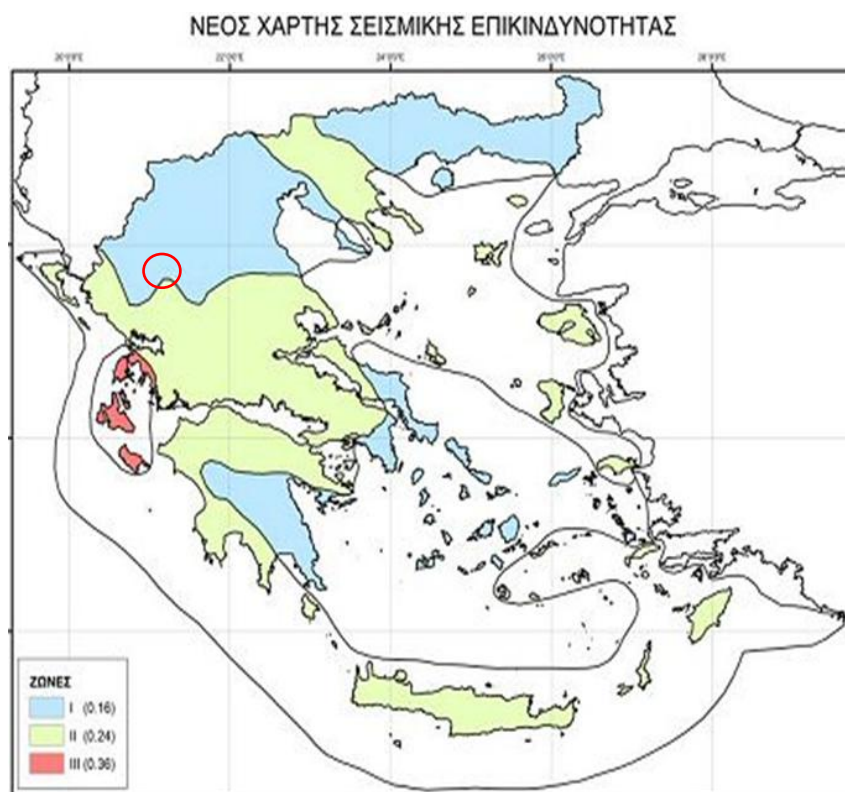
Η ομάδα Πολιτσών στη βάση της αποτελείται από έναν κόκκινο φλύσχη με εναλλαγές πηλίων και λεπτόκοκκων ψαμμιτών, ο οποίος μεταβαίνει ομαλά στον σχηματισμό του ψαμμιτοπηλιτικού φλύσχη, ο οποίος αποτελείται από εναλλαγές οριζόντων λεπτόκοκκων ψαμμιτών και ιλυολίθων. Η ομάδα Μετσόβου συγκροτείται από δύο σχηματισμούς. Ο κατώτερος σχηματισμός αποτελείται από εναλλαγές τεφρών ιλυολίθων και λεπτόκοκκων ψαμμιτών, με πάχος στρωμάτων περίπου 10 cm. Το συνολικό πάχος δε μπορεί να προσδιοριστεί καθώς η στήλη καλύπτεται από τους σχηματισμούς της ομάδας των Πολιτσών. Πάνω στον ιλυοψαμμιτικό φλύσχη αναπτύσσεται ένας ιλυολιθικός σχηματισμός αποτελούμενος από τεφρούς έως τεφροκύανους μαζώδεις ιλυολίθους. Τέλος, στη στενή περιοχή της μελέτης μας, εμφανίζεται και ο "άγριος" φλύσχη (wildflysch)⁸ ο οποίος εμφανίζει χαοτική δομή και έχει μεγάλη εξάπλωση.

⁸ Ο F.J. KAUFMANN (1886) ονόμασε τους σχηματισμούς φλύσχη οι οποίοι είναι πτυχωμένοι και ρηγματωμένοι σε πολύ μεγάλο βαθμό σχηματίζοντας σχεδόν χαοτική δομή, με τον όρο «άγριος φλύσχη» (wildflysch).

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 Ι χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας με επιτάχυνση σχεδιασμού 0,16g
- Ζώνη ΙΙ μέσης σεισμικής επικινδυνότητας με επιτάχυνση σχεδιασμού 0,24g
- Ζώνη ΙΙΙ υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας με επιτάχυνση σχεδιασμού 0,36g



Εικόνα 4. 6 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, εντός του κόκκινου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης (<http://www.oasp.gr>).

Η περιοχή μελέτης ανήκει στην πρώτη ζώνη χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (0,16 g) και δεν έχει εμφανίσει έντονη σεισμική δραστηριότητα κατά το παρελθόν.

Ο τελευταίος ισχυρός σεισμός έγινε στην περιοχή των Ιωαννίνων και είχε μέγεθος 5.3 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ, ενώ ο μεγαλύτερος σεισμός που σημειώθηκε στην ευρύτερη περιοχή ήταν στις 26 Ιουλίου του 1996 στην Κόνιτσα, μεγέθους 6.5 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ. Στην περιοχή μελέτης η σεισμικότητα λοιπόν είναι πολύ μικρού βαθμού.

Πίνακας 4. 2 Πίνακας σεισμικής επικινδυνότητας του νομού Ιωαννίνων με βάση τον παραπάνω χάρτη, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης (τμήμα του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2000)

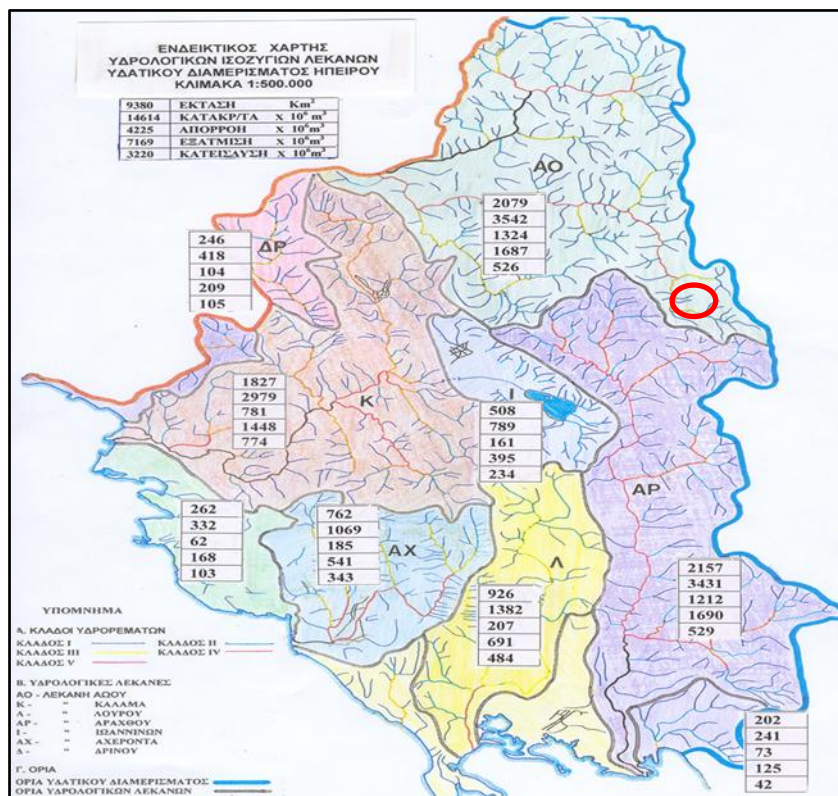
ΝΟΜΟΣ	ΔΗΜΟΙ	ΖΩΝΗ	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (g)
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ	Δ. ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	1	0.16
	Δ. ΑΝΑΤΟΛΗΣ	1	0.16
	Δ. ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΖΑΓΟΡΙΟΥ	1	0.16
	Δ. ΑΝΩ ΚΑΛΑΜΑ	1	0.16
	Δ. ΑΝΩ ΠΩΓΩΝΙΟΥ	1	0.16
	Δ. ΔΩΔΩΝΗΣ	1	0.16
	Δ. ΕΓΝΑΤΙΑΣ	1	0.16
	Δ. ΕΚΑΛΗΣ	1	0.16
	Δ. ΕΥΡΥΜΕΝΩΝ	1	0.16
	Δ. ΖΙΤΣΑΣ	1	0.16
	Δ. ΙΩΑΝΝΙΤΩΝ	1	0.16
	Δ. ΚΑΛΠΑΚΙΟΥ	1	0.16
	Δ. ΚΑΤΣΑΝΟΧΩΡΙΩΝ	1	0.16
	Δ. ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΖΑΓΟΡΙΟΥ	1	0.16
	Δ. ΚΟΝΙΤΣΑΣ	1	0.16
	Δ. ΜΑΣΤΟΡΟΧΩΡΙΩΝ	1	0.16
	Δ. ΜΕΤΣΟΒΟΥ	1	0.16
	Δ. ΜΠΙΖΑΝΙΟΥ	1	0.16
	Δ. ΠΑΜΒΩΤΙΔΟΣ	1	0.16
	Δ. ΠΑΣΑΡΩΝΟΣ	1	0.16
	Δ. ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ	1	0.16
	Δ. ΤΖΟΥΜΕΡΚΩΝ	1	0.16
	Δ. ΤΥΜΦΗΣ	1	0.16
	Κ. ΑΕΤΟΜΗΛΙΤΣΗΣ	1	0.16
	Κ. ΒΑΘΥΠΕΔΟΥ	1	0.16
	Κ. ΒΟΒΟΥΣΗΣ	1	0.16
	Κ. ΔΙΣΤΡΑΤΟΥ	1	0.16
	Κ. ΜΗΛΕΑΣ	1	0.16
	Κ. ΝΗΣΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ	1	0.16
	Κ. ΠΑΠΙΓΚΟΥ	1	0.16
	Κ. ΠΩΓΩΝΙΑΝΗΣ	1	0.16
	Κ. ΣΙΡΑΚΟΥ	1	0.16
	Κ. ΦΟΥΡΚΑΣ	1	0.16
	Δ. ΔΕΛΒΙΝΑΚΙΟΥ	2	0.24
	Δ. ΔΕΡΒΙΖΙΑΝΩΝ	2	0.24
	Δ. ΜΟΛΟΣΣΩΝ	2	0.24
	Δ. ΠΡΑΜΑΝΤΩΝ	2	0.24
	Δ. ΣΕΛΛΩΝ	2	0.24
	Κ. ΚΑΛΑΡΙΤΩΝ	2	0.24
	Κ. ΛΑΒΔΑΝΗΣ	2	0.24
	Κ. ΜΑΤΣΟΥΚΙΟΥ	2	0.24

Πίνακας 4. 3 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους: $A = a \cdot g$ (g : επιτάχυνση βαρύτητας)

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
a	0.16	0.24	0.36

4.6. Υδρολογικά στοιχεία

Η έντονη παρουσία νερού στην περιοχή του Ανηλίου, λόγω των πολύ υψηλών βροχοπτώσεων έως θεομηνίες αλλά και των συχνών χιονοπτώσεων, γίνεται έντονα αισθητή, τόσο ως επιφανειακή απορροή, όσο και ως προς τη διαθεσιμότητα του για κατείσδυση και διήθηση προς κορεσμό του εδάφους και υπεδάφους και συνεχή τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων. Από τα δεδομένα του σταθμού Μετσόβου, για το χρονικό διάστημα 1950 – 2004, προκύπτει ότι το μέσο ετήσιο ύψος βροχής της ευρύτερης περιοχής είναι 1500 mm. Η υπόγεια υδροφορία στην πόλη του Μετσόβου εκδηλώνεται με 7 πηγές στο φλύσχη εκ των οποίων 4 αναβλύζουν από παλαιότερα μετακινούμενες εδαφικές μάζες (Κυρούσης – Φυτρολάκης, 1998) καθώς και πηγάδια. Η δράση του νερού είναι καταλυτική για την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων.



Εικόνα 4. 7 Ενδεικτικός χάρτης υδρολογικών ισοζυγίων λεκανών υδατικού διαμερίσματος Ηπείρου, με κόκκινο σημειώνεται η περιοχή μελέτης (από ΙΓΜΕ περιφερειακή μονάδα Ηπείρου).

Παρακάτω ακολουθούν χάρτες του ελληνικού χώρου αναφερόμενοι σε στοιχεία κατακρημνίσεων, απορροής και εξατμισοδιαπνοής για την καταγραφή των στοιχείων του υδρογεωλογικού ισοζυγίου:

Εξίσωση του Υδρογεωλογικού ισοζυγίου: ονομάζεται το συνολικό φαινόμενο της κυκλοφορίας και κατανομής του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη σε μια λεκάνη, με αμελητέα μεταβολή των αποθεμάτων και ασήμαντη επίπτωση των ανθρώπινων επεμβάσεων (Βουδούρης, 2013).

Το Υδρογεωλογικό ισοζύγιο εκφράζεται από την σχέση:

$$P = E + I + R$$

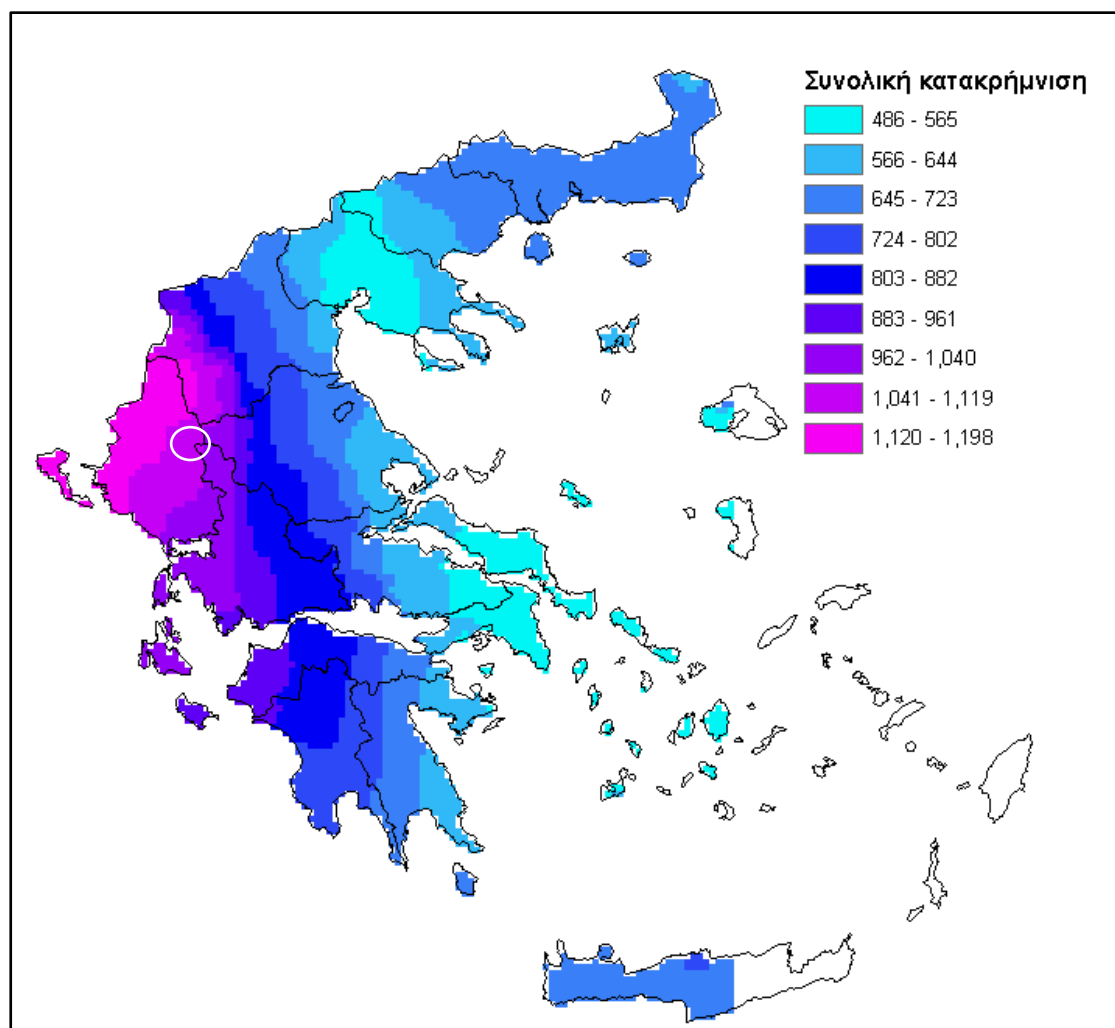
Όπου:

P = Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

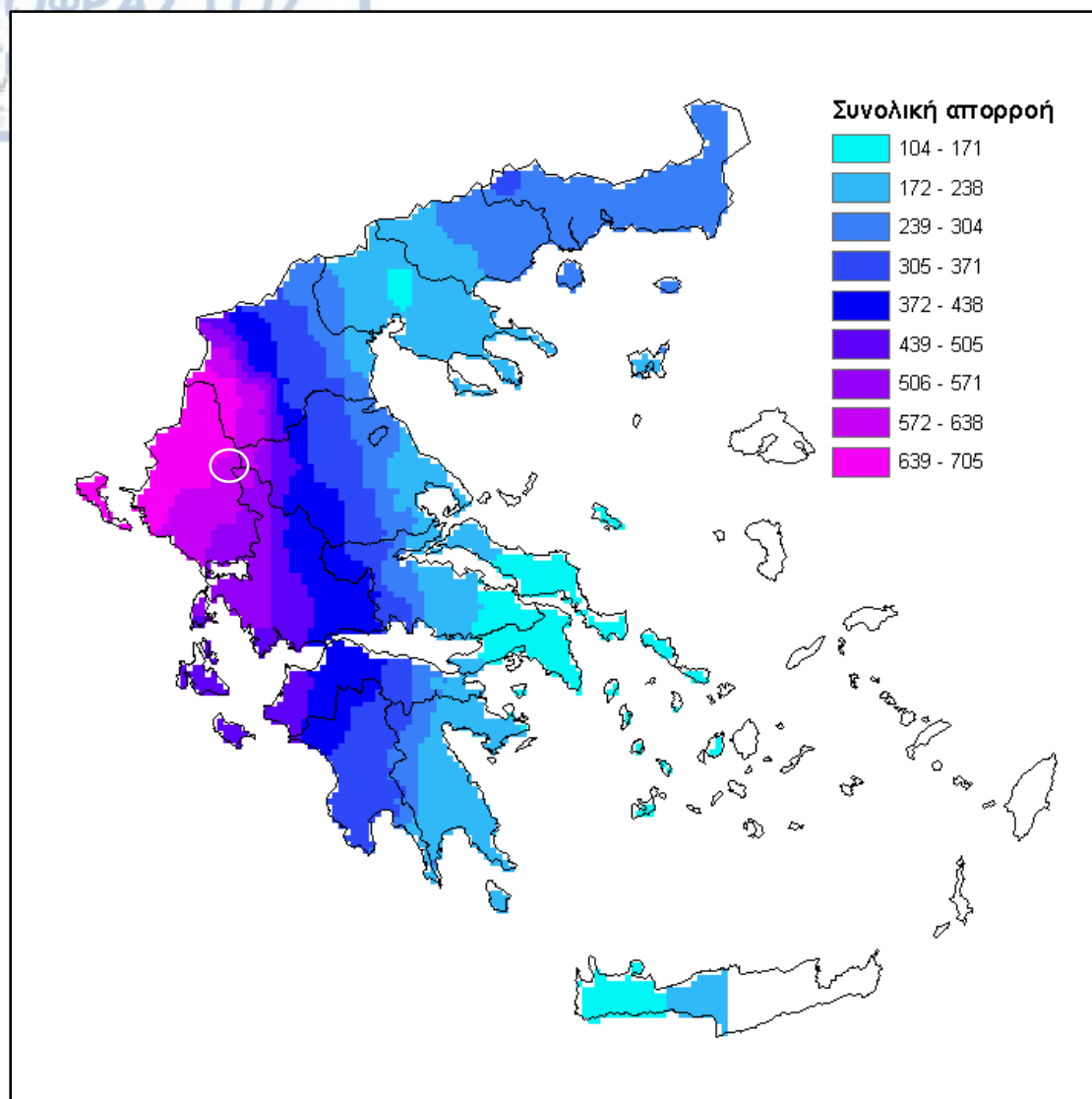
E = Εξατμισοδιαπνοή

I = Κατείσδυση

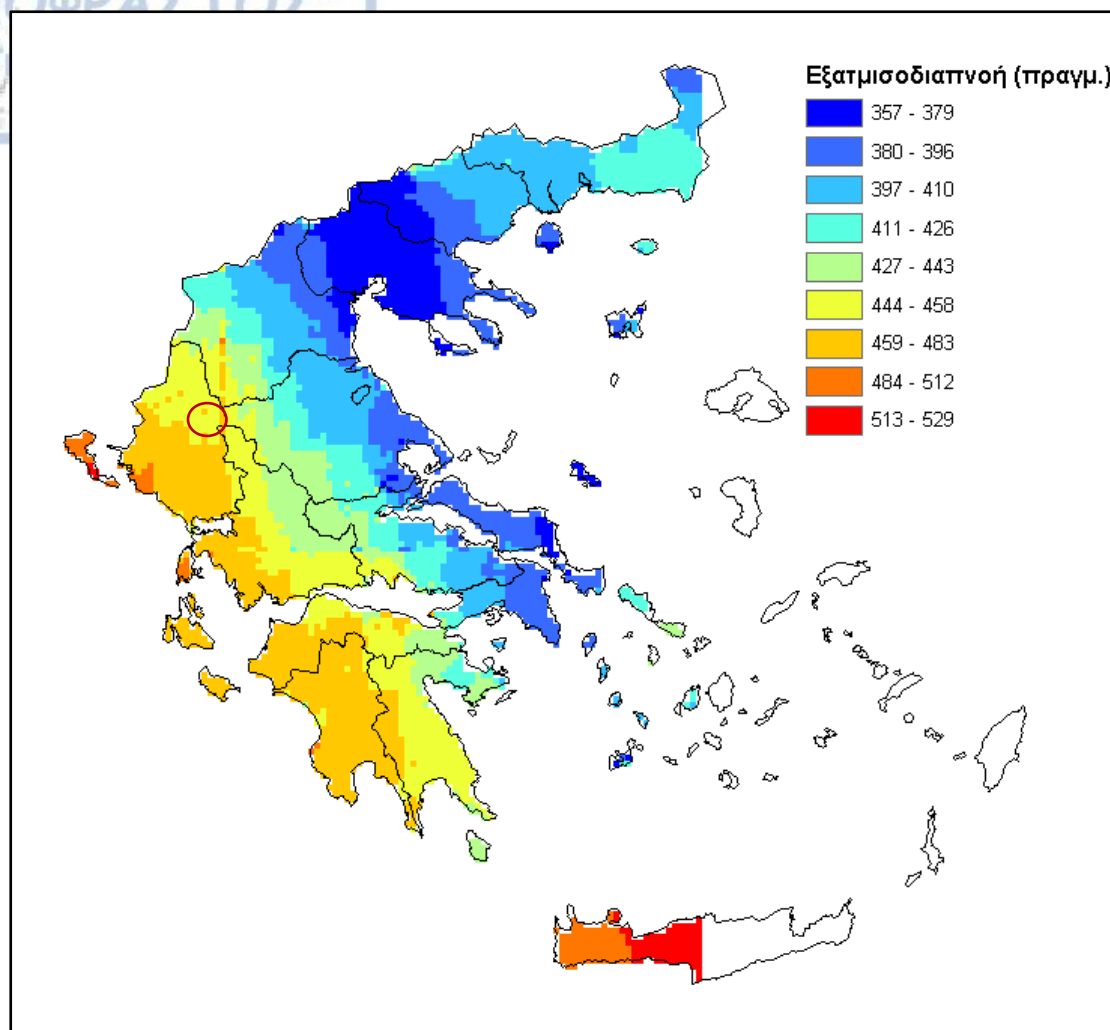
R = Απορροή



Εικόνα 4. 8 Χάρτης συνολικής κατακρημνισης στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm), εντός του άσπρου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης (<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr>).



Εικόνα 4. 9 Χάρτης συνολικής απορροής στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm), εντός του άσπρου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης (<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr>).



Εικόνα 4. 10 Χάρτης συνολικής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής στον ελλαδικό χώρο εκφρασμένος σε ύψος βροχής (mm), εντός του κόκκινου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης (<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr>).

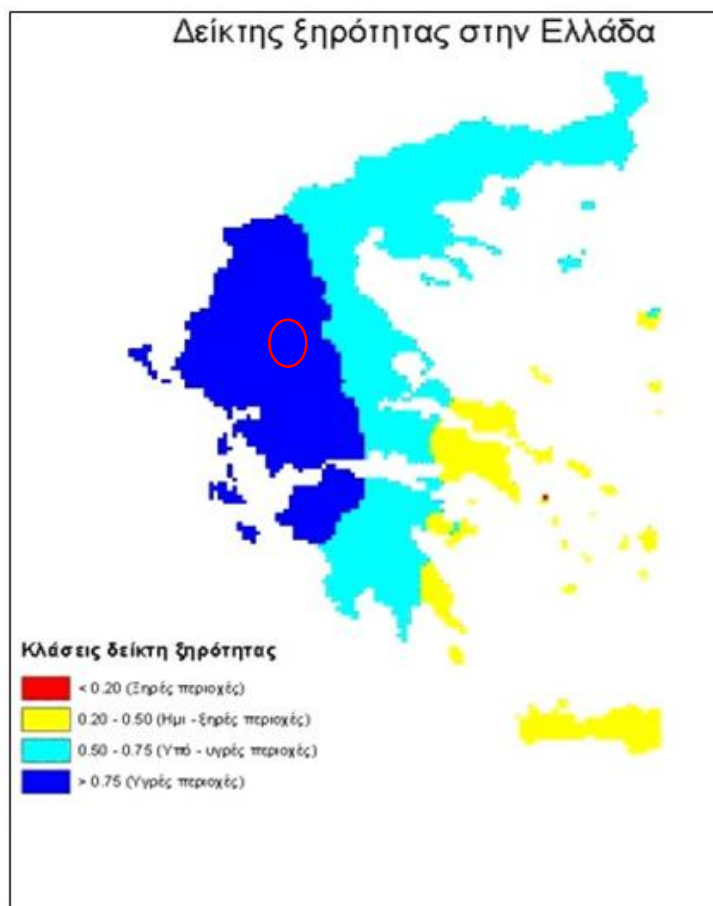
Πίνακας 4. 4 Υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης των Ιωαννίνων (στοιχεία από ΙΓΜΕ)

Υδρολογική Λεκάνη	Έκταση km ²	Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα	Κατακρημνίσματα (Ρ) ·10 ⁶ m ³	Επιφανειακή Απορροή (R) ·10 ⁶ m ³	Εξατμισοδιαπνοή (Ε) ·10 ⁶ m ³	Κατείσδυση (Ι) ·10 ⁶ m ³
Ιωαννίνων	508	1300 - 1600	789	161	395	234

Συμπερασματικά, με βάση τους παραπάνω χάρτες και το Υδρογεωλογικό ισοζυγίο, η περιοχή μελέτης δέχεται μεγάλα ποσά νερού με το μεγαλύτερο μέρος του να ρέει επιφανειακά, ένα μέρος του να εξατμίζεται και το υπόλοιπο να κατεισδύει.

Για τον χαρακτηρισμό του κλίματος μια περιοχής χρησιμοποιείται ένας δείκτης, ονομαζόμενος ως δείκτης ξηρότητας (Βουδούρης, 2013). Ο δείκτης ξηρότητας προκύπτει από τον λόγο της συνολικής κατακρίμνησης προς την δυνιτική εξατμισοδιαπνοή, και χαρακτηρίζει μια περιοχή ως:

- Ξηρή (δείκτης ξηρότητας $< 0,20$)
- Ημι – ξερή ($0,20 \leq$ δείκτης ξηρότητας $\leq 0,50$)
- Υπο – υγρή ($0,50 \leq$ δείκτης ξηρότητας $\leq 0,75$)
- Υγρή (δείκτης ξηρότητας $> 0,75$)



Εικόνα 4. 11 Χάρτης του δείκτη ξηρότητας στον ελλαδικό χώρο, εντός του κόκκινου κύκλου βρίσκεται η περιοχή μελέτης (<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr>).

Το Ανήλιο με βάση το δείκτη ξηρότητας πρόκειται για μια υγρή περιοχή συνεπώς η δράση του νερού αποτελεί τον κύριο και καθοριστικό παράγοντα για την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων.

4.7. Υδρολιθολογικά στοιχεία σχηματισμών

Από υδρολιθολογική άποψη και κυρίως σε ότι αφορά την υδροπερατότητα (K) οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συμμετέχουν στην ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζονται:

- **Κοκκώδεις σχηματισμοί:** με τον όρο "κοκκώδεις σχηματισμοί" αναφέρονται οι σχηματισμοί του Νεογενούς ή του Τερταγενούς, ήτοι δηλαδή, αλλουβιακές αποθέσεις, κορήματα, άμμοι, αμμοχάλικα και κροκάλες με ποικίλες συστάσεις και διαβαθμίσεις. Οι αποθέσεις αυτές αποτελούν, διαπερατούς σχηματισμούς στους οποίους αναπτύσσονται εκτεταμένοι ή και ασυνεχείς υπόγειοι υδροφορείς υψηλής δυναμικότητας. Η κυκλοφορία του νερού στις αποθέσεις αυτές γίνεται μέσω του πρωτογενούς πορώδους.
- **Αλπικοί σχηματισμοί μικρής διαπερατότητας:**
 - **Σχηματισμός φλύσχη:** Ο σχηματισμός του φλύσχη χαρακτηρίζεται πρακτικά αδιαπέρατος και δεν επιτρέπει την διέλευση και ροή του νερού. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού παρουσίας της αργίλου μέσα του, που συμπεριφέρεται σαν ένα αδιαπέρατο υλικό. Παρ' όλα αυτά, κατά θέσεις εντός του σχηματισμού, όπως σε ζώνες έντονης αποσάθρωσης, έντονης τεκτονικής καταπόνησης ή ακόμα και σε ζώνες με κυρίως ψαμμιτικά μέλη ή παρουσία κροκαλοπαγών, μπορούν να αναπτύσσονται τοπικού χαρακτήρα υδροφορείς μικρού ή μέσου δυναμικού.
Πιο συγκεκριμένα, οι ψαμμίτες λόγω διαρρήξεων και διακλάσεων, με απουσία υλικού πλήρωσης, παρουσιάζουν ποικίλες διαπερατότητες και παρουσιάζουν πηγές ανάλογα με τις γραμμές διήθησης. Αντίθετα, οι ιλύολιθοι και αργιλικοί σχιστόλιθοι παρουσιάζουν χαμηλή εν γένει διαπερατότητα (συντελεστής K της τάξης του 10^{-4} έως 10^{-6} cm / sec) εξαιτίας των κλειστών συνήθως μικροδιαρρήξεων.

5. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.1. Θέση – Μορφολογία

Το δημοτικό διαμέρισμα του Ανήλιου ανήκει στο δήμο Μετσόβου του νομού Ιωαννίνων και βρίσκεται νοτιοανατολικά των ορεινών όγκων της βόρειας Πίνδου, σε υψόμετρο 1050m, στη σκιά της βουνοκορφής "Φατζέτου", απέναντι από το Μέτσοβο. Η περιοχή απέχει από το Μέτσοβο 4,5 km.

Όσον αφορά την προσπελασιμότητα, αυτή επιτυγχάνεται από την κατασκευή της Εγνατίας Οδού που διέρχεται μέσα από τον ορεινό όγκο με δίδυμη σήραγγα μήκους 2,2 km. Η Εγνατία οδός είναι ένα από τα θαυματότερα έργα κυκλοφορίας στην Ευρώπη. Η χάραξη της ακολουθεί την αρχαία ρωμαϊκή οδό Εγνατία μέσα από την ορεινή περιοχή της βόρειας Ελλάδας. Ένα από τα βασικά τμήματα του αυτοκινητόδρομου είναι η σήραγγα του Ανήλιου που παρακάμπτει την πόλη του Μετσόβου.



Εικόνα 5. 1 Η περιοχή έρευνας όπως φαίνεται από το Google Maps Pro

Αρχικά, η παράκαμψη είχε σχεδιαστεί ως ανοιχτό τμήμα κάτω από το χωριό Ανήλιο που βρίσκεται στη βορειοδυτική εκτεθειμένη αριστερή πλαγιά του Μετσοβίτικου ποταμού. Όμως, εξαιτίας της ενεργής βαθιά καθισμένης κλίσης της μορφολογίας, που προκαλεί μέχρι και σήμερα ερπυσμούς και ολισθήσεις μαζών, καθώς και για λόγους διακινδύνευσης του έργου, η χάραξη του δρόμου άλλαξε και σχεδιάστηκε μια εναλλακτική σήραγγα έτσι ώστε ο αυτοκινητόδρομος να προσπεράσει τις μετακινούμενες αυτές ασταθείς μάζες μέσα από τον ορεινό όγκο ανάντη του χωριού.



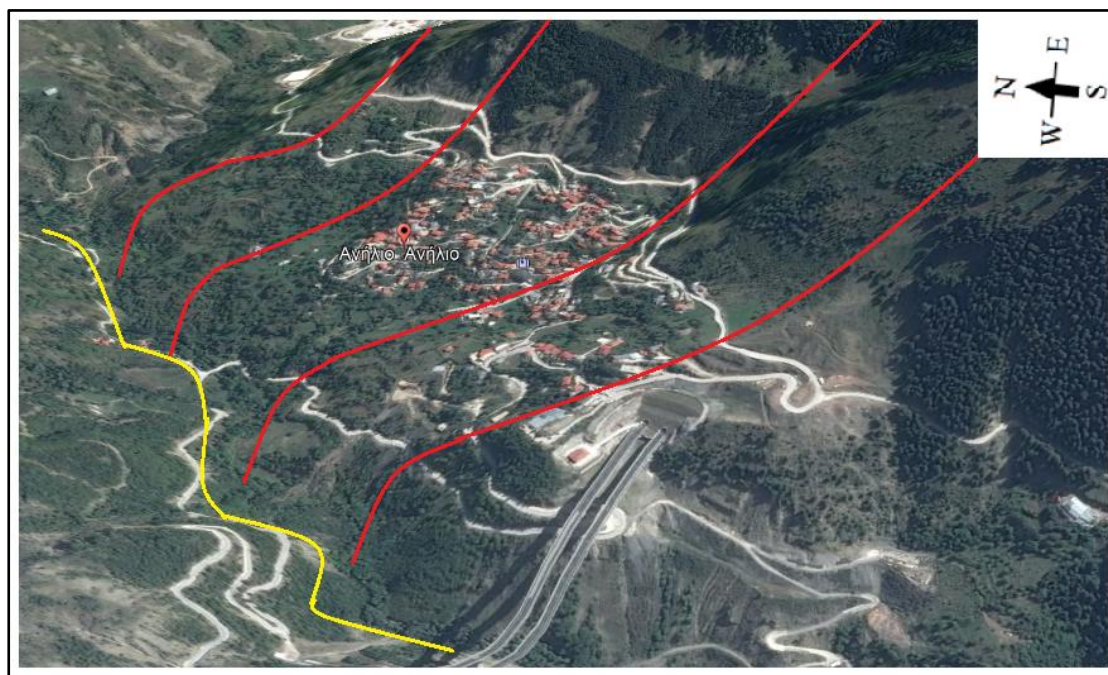
Εικόνα 5. 2 Με κόκκινο η αρχική χάραξη της Εγνατίας Οδού, με κίτρινο η τελική (εικόνα από <http://anilio-metsovou.weebly.com>).



Εικόνα 5. 3 Δίδυμη σήραγγα Εγνατίας Οδού στο Ανήλιο (εικόνα από την επίσημη σελίδα της Εγνατίας Οδού Α.Ε)

Γενικά, η μορφολογία του ανάγλυφου της περιοχής, χαρακτηρίζεται από μια σύνθετη πλαγιά τοξοειδούς σχήματος με γενική διεύθυνση προς τον βορρά. Ο κύριος οικισμός αναπτύσσεται περίπου στο μέσο της πλαγιάς πάνω σε μια επιφάνεια με μικρή κλίση. Ανάντη αυτής της θέσης τα πρανή εμφανίζονται πιο απότομα με μεγαλύτερες κλίσεις και με έντονα φαινόμενα διάβρωσης. Τέλος, κατάντη της θέσης του οικισμού η πλαγιά γίνεται και πάλι απότομη με μεγάλες κλίσεις δημιουργώντας έτσι ένα γεωμετρικό σχήμα τύπου παγγίνας (αναβαθμίδας).

Η βλάστηση περιμετρικά, και εσωτερικά του οικισμού είναι πυκνή με δέντρα και θάμνους ενώ σε κάποια σημεία του εμφανίζεται πιο αραιή (σημάδι πιθανής κατολίσθησης).



Εικόνα 5. 4 Μορφολογία Ανηλίου, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η γεωμετρία της πλαγιάς, με κίτρινο χρώμα το ρέμα ανάμεσα στο Ανήλιο και το Μέτσοβο (Εικόνα από Google Maps Pro Τροποποιημένη)

5.2. Γενική Γεωλογική περιγραφή περιοχής

Όπως άλλωστε σημειώνεται στον γεωλογικό χάρτη της περιοχής (**εικόνα 5.5**) ο βασικός σχηματισμός που επικρατεί είναι ο φλύσχος. Ο σχηματισμός περιλαμβάνει στρώματα ιλυολίθων, αργιλόλιθων, και αργιλικών σχιστολίθων εναλλασσόμενων με στρώματα ψαμμιτών.

Διακρίνονται κυρίως οι ακόλουθοι τύποι φλύσχη:

F: Ψαμμιτο – κροκαλοπαγής φλύσχος με άρρυθμη απόθεση και ακανόνιστη κοκκομετρική διαβάθμιση των συστατικών του (άγριος φλύσχος).

E, D, C: Φλύσχος με ρυθμικότητα, όπου E: ψαμμιτικός φλύσχος (υπερφλύσχος), D: ψαμμιτοπηλιτικός φλύσχος (ορθοφλύσχος), C: πηλιτο – ψαμμιτικός φλύσχος (μεταφλύσχος).



Εικόνα 5. 5 Απόσπασμα Γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ φύλλο ΜΕΤΣΟΒΟ 1:50.000 (με το κόκκινο χρώμα σημειώνεται η περιοχή μελέτης)

Ο φλύσχος 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 όπου διακρίνουμε από την Δύση προς την Ανατολή την Ιόνιο ζώνη (I), την ζώνη Γαβρόβου (G), την ζώνη Πίνδου (Pi) και την ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας (Pa). Από αυτές, η ζώνη Πίνδου (Pi) είναι επωθημένη επί των δυτικότερων αυτής κείμενων ζωνών Ιονίου (I) και Γαβρόβου (G). Λόγω της επώθησης οι Πινδικοί σχηματισμοί είναι γενικά οι περισσότερο καταπονημένοι. Στη ζώνη της Πίνδου εμφανίζονται τρεις τύποι φλύσχη, που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές παροξυσμικές φάσεις ορογένεσης. Συγκεκριμένα, βρίσκονται οι τύποι E, D, C με τις αντίστοιχες ονομασίες όπως παραπάνω, ανάλογα με την επικρατούσα φάση.

Σύμφωνα με τον Κουμαντάκη (1975), η μηχανική συμπεριφορά του φλύσχη ως βραχώμαζα εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων όπως την ανομοιογένεια – ανισοτροπία που έχει υποστεί κατά τις διάφορες φάσεις καταπόνησης του (γένεση – απόθεση – διαγένεση ή μεταμόρφωση – τεκτονισμός), τις μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών που τον συνιστούν (παραμορφωσιμότητα – αντοχή στην καταπόνηση) και τέλος την κατάσταση και την γεωμετρία που παρουσιάζουν οι ασυνέχειες του σχηματισμού.

Όσον αφορά τα επιμέρους συστατικά, δηλαδή τις λιθολογικές φάσεις του φλύσχη, οι ψαμμίτες, σε υγιή 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 και αργιλικοί σχιστόλιθοι είναι υλικά ευπρόσβλητα σε διάβρωση – αποσάθρωση και σημαντικά λιγότερο ανθεκτικά σε μηχανικές καταπονήσεις. Στην περιοχή του Ανηλίου εμφανίζονται περισσότερο καταπονημένοι και πολυπτυχωμένοι. Επίσης, στους σχηματισμούς αυτούς παρατηρείται σχάση σε λεπτά φυλλάδια. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία που παρουσιάζουν οι ιλυόλιθοι και οι αργιλικοί σχιστόλιθοι στις μεταβολές της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του παγετού στα ελεύθερα μέτωπα πρανών με αποτέλεσμα την καταστροφή του ιστού τους από τους επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης – ύγρυνσης και διαστολής του πάγου μέσα στις ρωγμές.

Από άποψη υδροπερατότητας, οι ψαμμίτες λόγω διαρρήξεων και διακλάσεων, με απουσία υλικού πλήρωσης, παρουσιάζουν ποικίλες διαπερατότητες και παρουσιάζουν πηγές ανάλογα με τις γραμμές διήθησης.

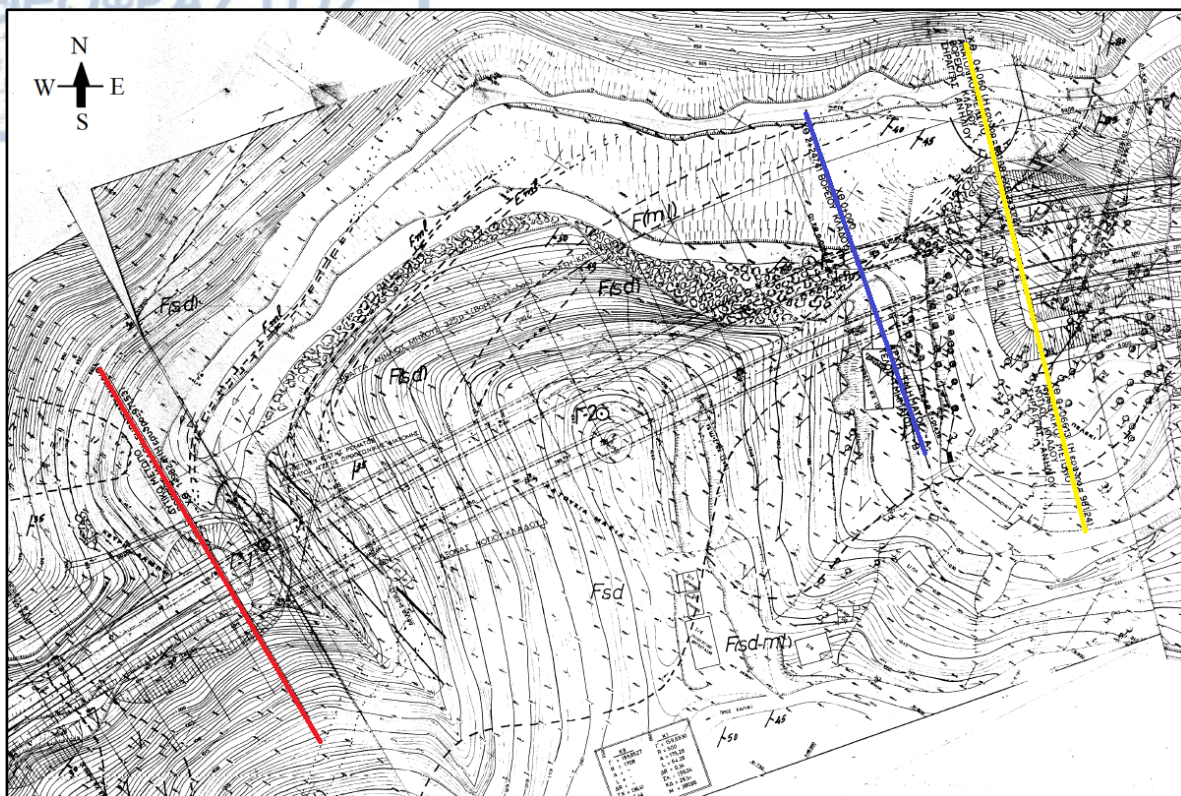
Τέλος, οι ιλυόλιθοι και αργιλικοί σχιστόλιθοι παρουσιάζουν χαμηλή εν γένει διαπερατότητα (συντελεστής K της τάξης του 10^{-4} έως 10^{-6} cm / sec) εξαιτίας των κλειστών συνήθως μικροδιαρρήξεων.

5.3. Γεωλογία στενής περιοχής

Το Μάρτιο – Απρίλιο του 1990 στα πλαίσια κατασκευής του αυτοκινητόδρομου της Εγνατίας Οδού με χάραξη κάτω από το χωριό του Ανηλίου, διεξήχθη Γεωτεχνική – Γεωλογική έρευνα στην περιοχή.

Η έρευνα περιλάμβανε την διεξαγωγή τεσσάρων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων καθώς και επιτόπου γεωλογική αναγνώριση. Σκοπός της ήταν η διερεύνηση των επιτόπου συνθηκών εδάφους προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα και προτάσεις που αφορούν τον τρόπο κατασκευής των έργων οδοποιίας του υπόψη τμήματος.

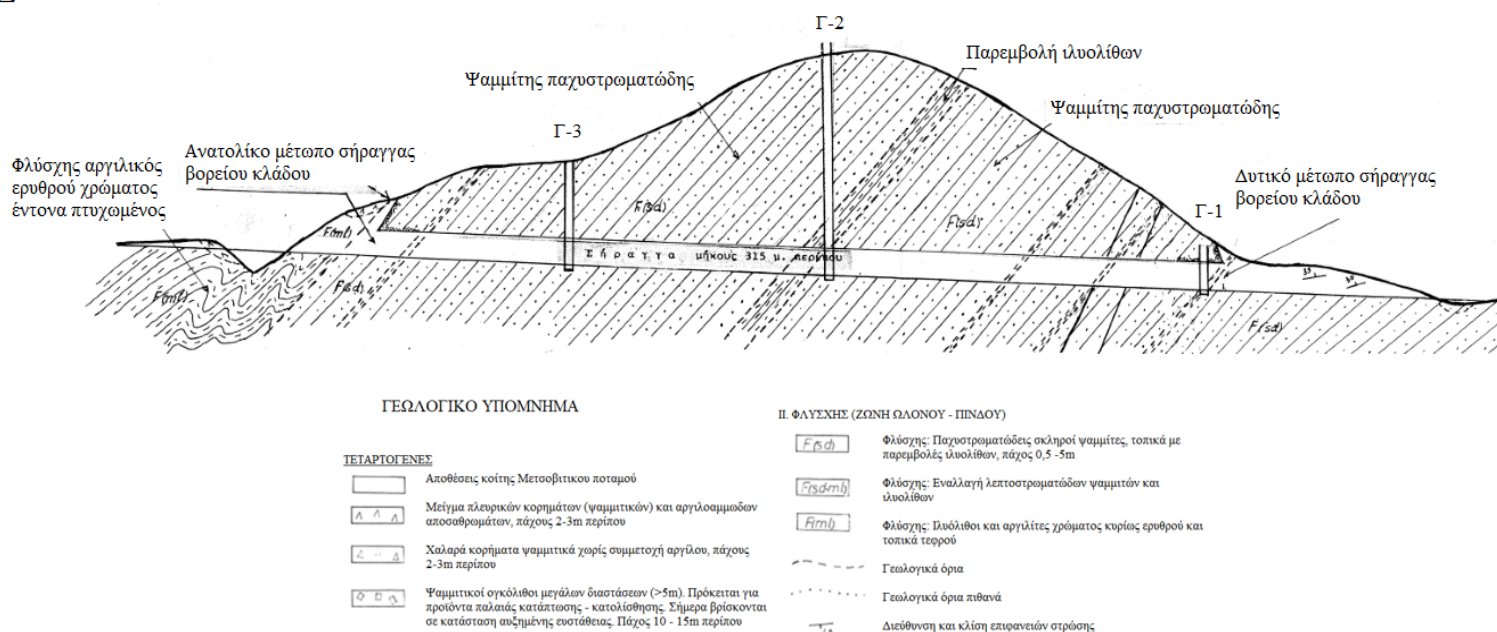
Το όλο έργο περιελάμβανε την κατασκευή των οδικών τμημάτων πρόσβασης στο Ανατολικό και Δυτικό αντίστοιχα μέτωπο της σήραγγας. Η χωροθέτηση του έργου φαίνεται στην **εικόνα 5.6**.



Εικόνα 5. 6 Απόσπασμα Γεωλογικής οριζοντιογραφίας 1:1000 σήραγγας Ανηλίου και εκατέρωθεν προσπελάσεων. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το Δυτικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας, με κίτρινο σημειώνεται το Ανατολικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας, ενώ με μπλε χρώμα σημειώνεται το τέλος του τμήματος Β και η αρχή του τμήματος Α. (ΥΠ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 1990).



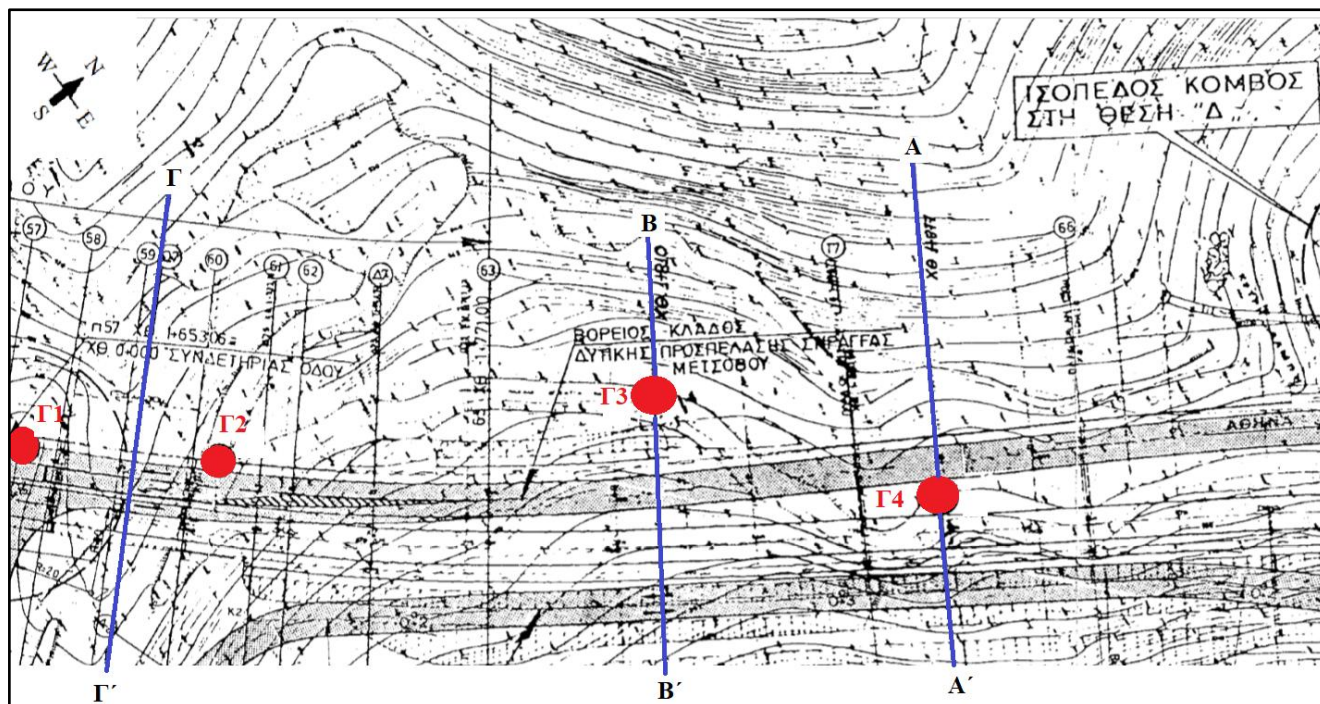
Εικόνα 5. 7 Η χάραξη της σήραγγας του 1990 (με μαύρο χρώμα). Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το Δυτικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας, με κίτρινο σημειώνεται το Ανατολικό μέτωπο του Βόρειου κλάδου της σήραγγας. Και η τελική χάραξη της δίδυμης σήραγγας μέσα στον ορεινό όγκο (από Google Maps Pro τροποποιημένο).



Εικόνα 5. 8 Απόσπασμα από γεωλογική τομή σήραγγας Αηγλίου 1: 1000 (από ΥΠ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, 1990)

5.3.1. Στρωματογραφία και χαρακτηριστικά εδάφους

Κατά την εκτέλεση της Γεωτεχνικής – Γεωλογικής έρευνας στην περιοχή εξετάστηκαν αναλυτικά οι παρακάτω θέσεις:



Εικόνα 5. 9 Απόσπασμα οριζοντιογραφίας 1:1000 της δυτικής πρόσβασης και του ισόπεδου κόμβου. Με κόκκινο σημειώνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4 (Από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

- **Δυτική πρόσβαση σήραγγας (Δυτικό μέτωπο):**

Στην υπόψη περιοχή διενεργήθηκαν οι γεωτρήσεις Γ3 και Γ4 (βλ. **εικόνα 5.10**). Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων, στο τμήμα αυτό, ο φλύσχος που δομεί το υπέδαφος αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από παχυστρωματώδεις ψαμμίτες (με ποσοστό εμφάνισης 90 - 100%) με μεμονωμένες παρεμβολές (ενστρώσεις) ιλυολιθικών στρωμάτων πάχους 0,50 – 1,00 m.

Ο ψαμμίτης εμφανίζεται κυρίως μεσόκοκκος, χρώματος ανοιχτού πράσινου – γκρί με χαλαζιακά φλεβίδια μικρού πάχους. Το μέσο φαινόμενο βάρος μετρήθηκε $\gamma = 2,65 \text{ ton/m}^3$ που για μέσο ειδικό βάρος της τάξης του $2,75 \text{ ton/m}^3$ αντιστοιχεί σε χαμηλό πορώδες ($n = 6 - 12\%$) και εξίσου χαμηλές τιμές φυσικής υγρασίας ($2 - 4\%$).

Από πλευράς αντοχής μετρήθηκαν σε αντιπροσωπευτικά δείγματα:

- Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη (σ_1): μέση τιμή $\sigma_1 = 961 \text{ km/cm}^2$
- Η αντοχή σε εφελκυσμό (σ_e): μέση τιμή $\sigma_e = 69 \text{ km/cm}^2$

Ο ψαμμίτης, εξαιρουμένων ίσως της πρώτης επιφανειακής ζώνης χαρακτηρίζεται γενικά υγιής (χωρίς ίχνη αποσάθρωσης).

Η ψαμμιτική βραχώμαζα περιλαμβάνει σποραδικά στρώματα αργιλικών σχιστολίθων πάχους $< 1\text{m}$, με εκτιμώμενη συχνότητα εμφάνισης, μια στρώση ανά 10 – 15m. Ενδέχεται επίσης να περιλαμβάνει σποραδικά ανοιχτές ρωγμές μεγάλου εύρους πληρωμένες με αργιλοαμμώδη προϊόντα.

Οι επιφάνειες στρώσης του ψαμμίτη στην υπόψη περιοχή έχουν διεύθυνση B – N και κλίνουν με γωνία $35^\circ - 40^\circ$. Αυτό σημαίνει ότι τα επίπεδα των στρώσεων είναι ευνοϊκά για την ευστάθεια των πρανών (αντίρροπες κλίσεις).

Εκτός από το κύριο σύστημα των επιπέδων στρώσης της βραχώμαζας, παρατηρούνται επίσης τρία συστήματα διακλάσεων με χαρακτηριστικά $265^\circ / 70^\circ$, $302^\circ / 62^\circ$ και $220^\circ / 68^\circ$.

Τέλος, σημειώνεται ότι στις υπόψη γεωτρήσεις Γ3 και Γ4, μέχρι το μέγιστο βάθος των 20 m που ερευνήθηκε δεν διαπιστώθηκε παρουσία υπόγειων υδάτων κατά την εποχή διεξαγωγής της έρευνας (ξηρές γεωτρήσεις).

- **Περιοχή ισόπεδου κόμβου:**

Η υπόψη περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο με ισχυρές κλίσεις που διαρρέεται από νερά και όμβρια προερχόμενα από υψηλότερες πηγές. Στην υπόψη περιοχή, διενεργήθηκαν οι γεωτρήσεις Γ1 και Γ2 (βλ. **εικόνα 5.11**) μέχρι τα βάθη των 20 m. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, η βραχώμαζα φαίνεται να είναι διαταραγμένη, σε ευαίσθητη κατάσταση ισορροπίας με ανοιχτές επιφανειακές ρηγματώσεις. Επίσης διαπιστώθηκε, ότι μέχρι το βάθος των 20 m που ερευνήθηκε, το υπέδαφος αποτελείται από Τετρογενείς αποθέσεις, δηλαδή από

φερτά υλικά που προήλθαν από παλαιότερες κατολισθήσεις καθώς και από την δράση των επιφανειακών υδάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή εντοπίστηκαν:

- Χαλαρά ψαμμιτικά κορήματα (σαθρά ψαμμιτικά θραύσματα) με αμμοϊλύ, συμπυκνωμένα σε προχωρημένο βαθμό, πάχους 5 – 6m. Για τα υλικά αυτά μετρήθηκε $N_{spt} > 63$ χτύπων για διείσδυση 30m.
- Ψαμμιτικά κροκαλοπαγή με προχωρημένο βαθμό διαγέννεσης σε πάχη της τάξης των δύο ή περισσότερων μέτρων.
- Ψαμμιτικοί ογκόλιθοι ιδιαίτερα μεγάλων διαστάσεων ($> 3m$), προϊόντα παλαιάς κατολίσθησης – κατάπτωσης του ανάντη ψαμμιτικού παχυστρωματώδους φλύσχη της περιοχής. Η υπόθεση ότι οι εν λόγω ψαμμίτες είναι μεμονωμένοι ογκόλιθοι και όχι μητρικό υπόβαθρο, επιβεβαιώθηκε από την γεωλογική παρατήρηση στα φυσικά πρηνή καθώς και από το γεγονός εύρεσης μεγάλων ανοιχτών ρωγμών, πληρωμένες με αργιλοαμμώδες υλικό, στην γεώτρηση Γ2.

Η στάθμη των υπογείων υδάτων βρέθηκε στις δύο γεωτρήσεις σε βάθη 11,5 – 17,5m, ήτοι σε απόλυτο υψόμετρο περίπου στο + 937m στην νοητή ευθεία των δύο γεωτρήσεων.

Η γωνία εσωτερικής τριβής των εδαφικών υλικών της κοίτης και των πρηνών της μισγάγγειας με την βοήθεια του αριθμού N_{spt} εκτιμήθηκε της τάξης του $\phi = 42^\circ$.

• Περιοχή Ανατολικού μετώπου σήραγγας:

Στην περιοχή αυτή, τα στοιχεία σχετικά με το υπέδαφος, βασίστηκαν αποκλειστικά στην γεωλογική επιτόπου παρατήρηση.

Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι επικρατούν οι κάτωθι σχηματισμοί:

- Ο ψαμμιτο – πηλιτικός φλύσχος (ορθοφλύσχος) D
- Ο πηλιτοψαμμιτικός φλύσχος C (μεταφλύσχος) με κύρια επικράτηση των ιλυολίθων και αργιλικών σχιστολίθων ερυθρού και γκρίζου χρώματος.

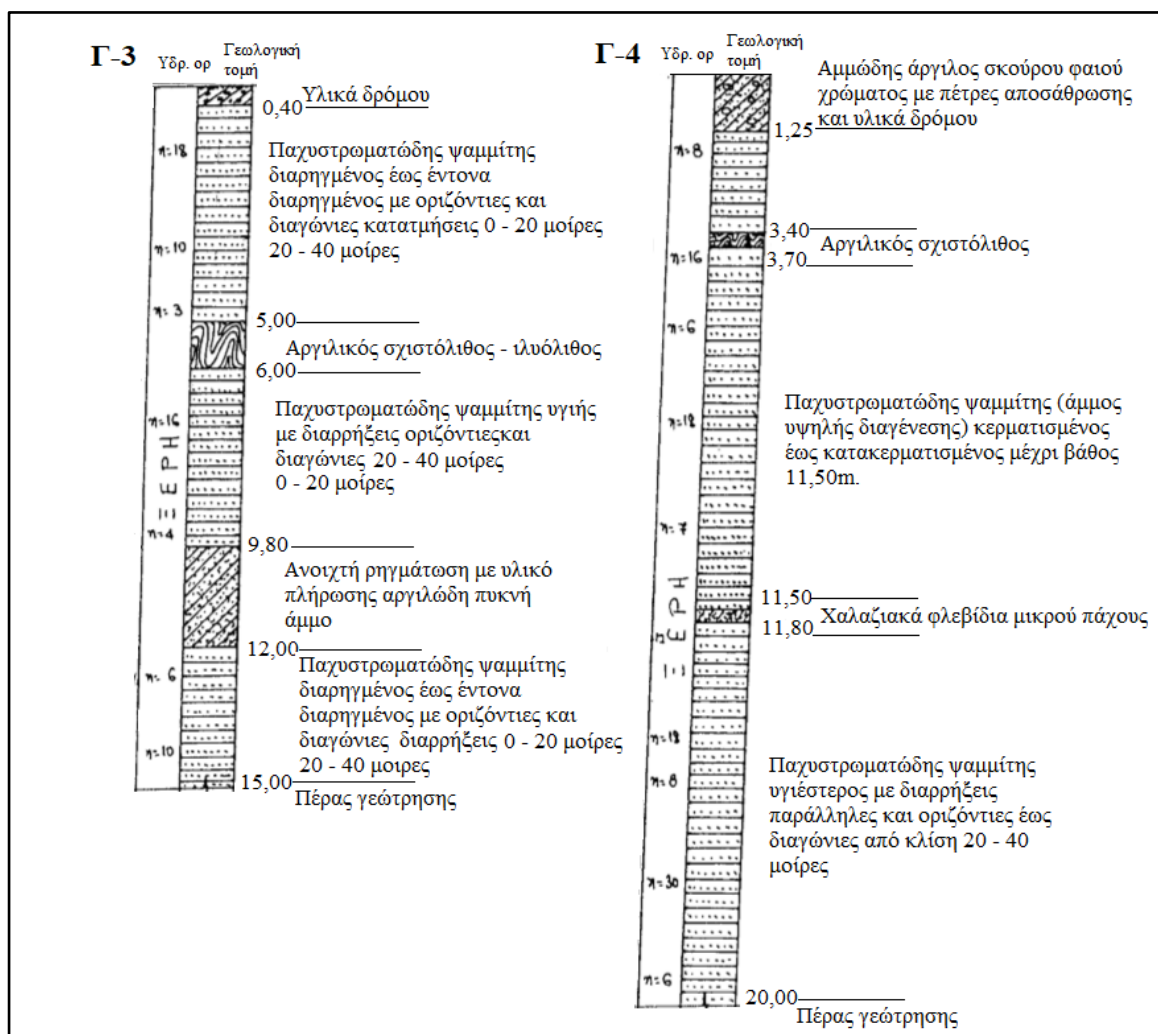
Τα στρώματα αυτά είναι έντονα τεκτονικά καταπονημένα (Πινδική ζώνη P_i) και πολυπτυχωμένα. Σε όλο το μήκος της εμφάνισής τους έχουν υποστεί σχάση σε πολύ μικρά φύλλα λόγω εξωγενών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή, καθώς και έντονη αποσάθρωση και εξαλλοίωση επιφανειακά, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται τοπικά ως άργιλοι – ιλείς.

Στις επαφές των ιλυολίθων – αργιλικών σχιστολίθων με τους λεπτοστρωματώδεις ψαμμίτες, αναπτύσσονται τοπικοί υδροφορείς, με αποτέλεσμα την έντονη αποσάθρωση και εξαλλοίωση από την δράση του νερού. Η διαφορά σκληρότητας

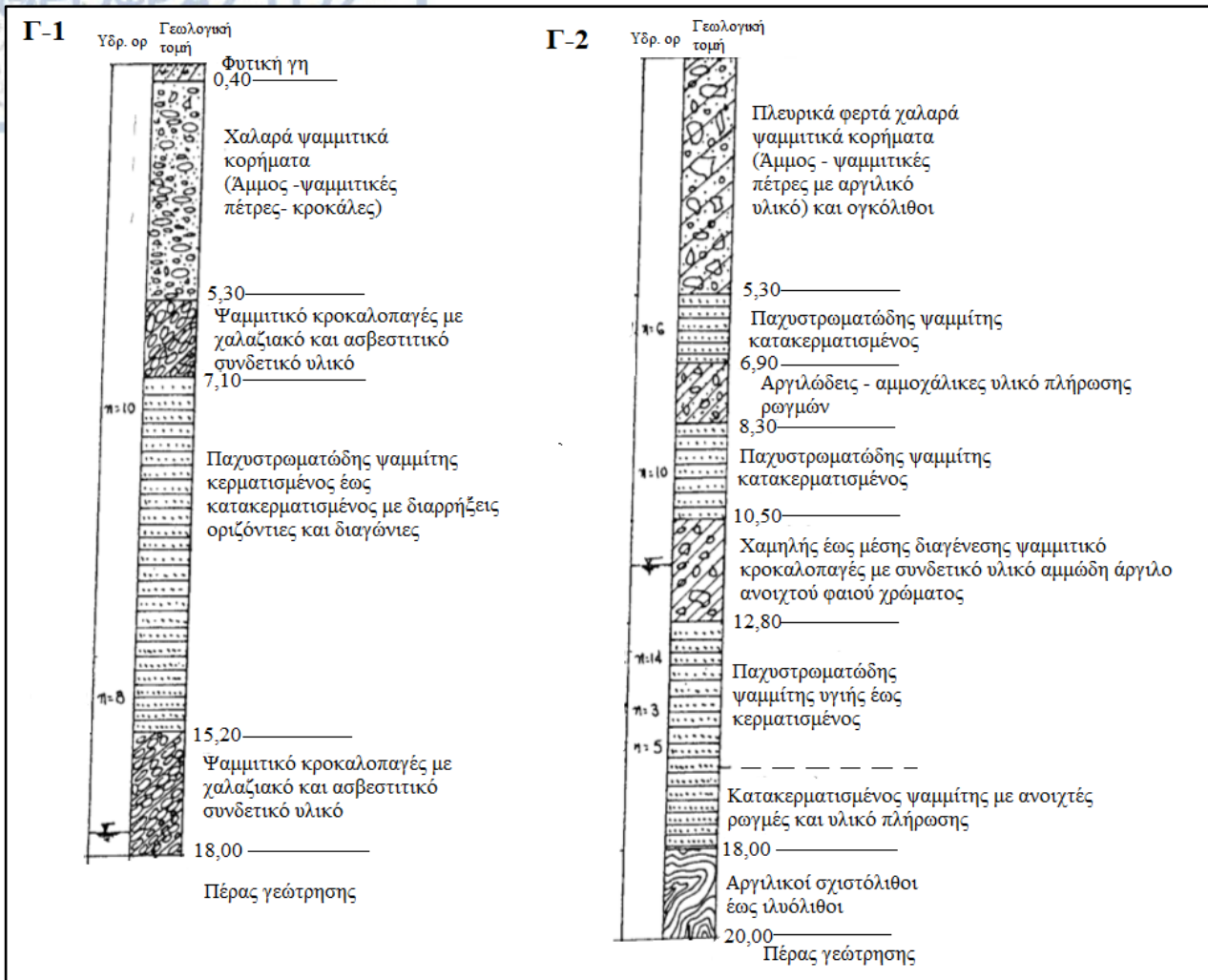
μεταξύ της ψαμμιτικής και ιλυολιθικής – αργιλικής φάσης του φλύσχη, δημιουργεί τοπικά έντονες εξάρσεις της ψαμμιτικής φάσης με αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με τις τοπικές κλίσεις – ρηγματώσεις να υφίστανται καταπτώσεις ψαμμιτικών βράχων σε διάφορα σημεία, λόγω απώλειας στήριξης.

Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (έντονες βροχοπτώσεις – παγετός), σε συνδυασμό με το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο και την μικρή διαπερατότητα των ιλυολίθων και των αργιλικών σχιστολίθων, ευνοούν την ανάπτυξη επιφανειακών απορροών και το κορεσμό του εδάφους, με αποτέλεσμα την έντονη αποσάθρωση – εξαλλοίωση των ιλυολίθων – σχιστολίθων και μεταφορά των προϊόντων αποσάθρωσης στα χαμηλότερα σημεία.

Η ανάπτυξη τοπικών υδροφορέων μέσα από δίκτυο μικροδιαρρήξεων και στις επαφές των διαφόρων φάσεων, δημιουργεί μεγεθύνσεις των υπάρχοντων ρηγματώσεων και εμφάνιση ζωνών αστάθειας στους ιλυολίθους αλλά και στους υπερκείμενους ψαμμίτες με αποτέλεσμα την εκδήλωση τοπικών κατολισθήσεων.

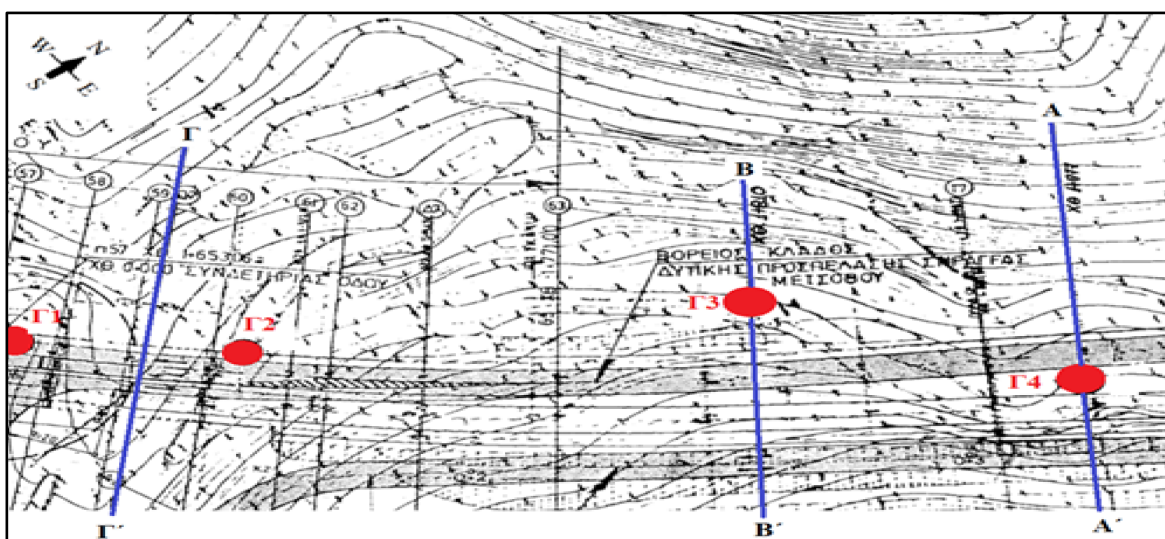


Εικόνα 5. 10 Γεωτρήσεις Γ3 και Γ4 (Στοιχεία γεωτρήσεων από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

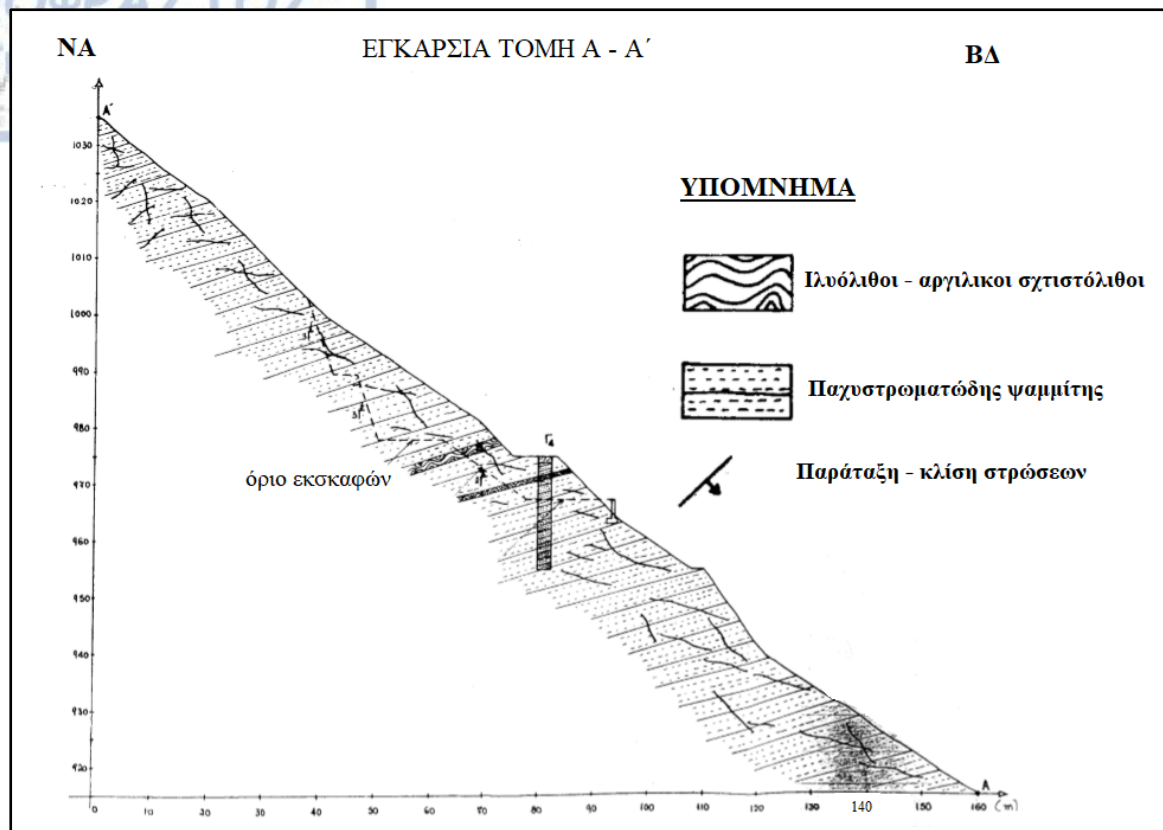


Εικόνα 5. 11 Γεωτρήσεις Γ1 και Γ2 γεωλογικής έρευνας Δυτικής πρόσβασης σήραγγας Ανηλίου (Στοιχεία γεωτρήσεων από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

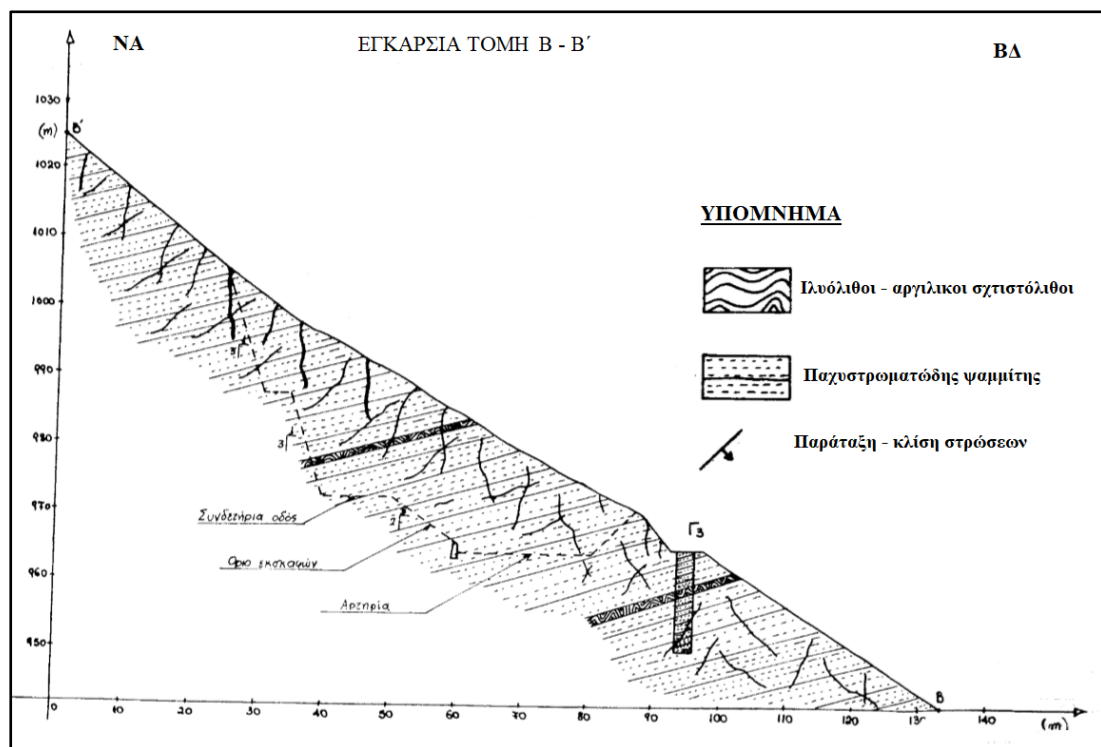
5.3.2. Τομές Γεωτεχνικής – Γεωλογικής έρευνας στην περιοχή



Εικόνα 5. 12 Εγκάρσιες τομές Α – Α', Β – Β', Γ – Γ' γεωλογικής έρευνας Δυτικής πρόσβασης σήραγγας Ανηλίου.



Εικόνα 5. 13 Τομή Α -Α' (από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).



Εικόνα 5. 14 Τομή Β -Β' (από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

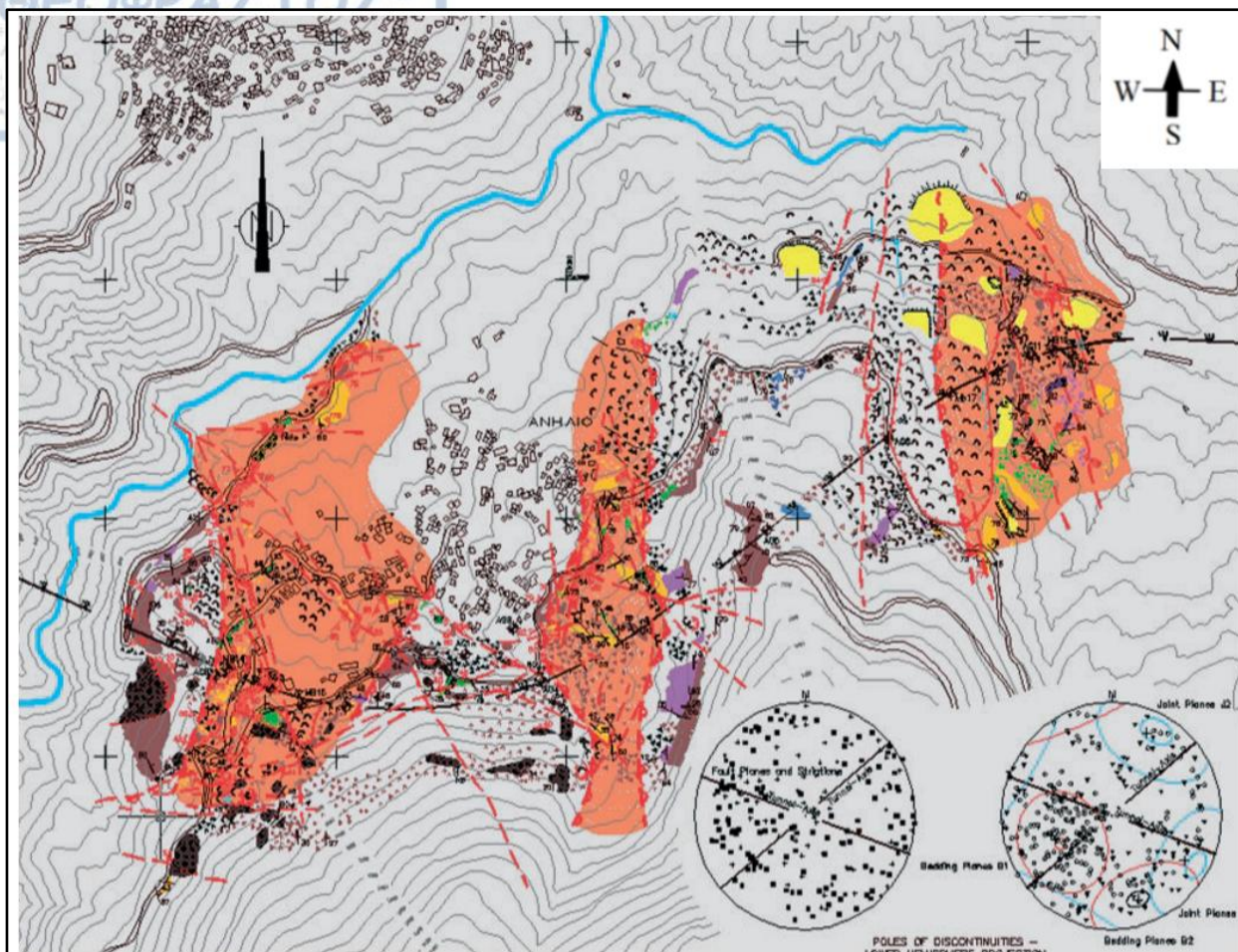
5.4. Γεωλογία περιοχής νέας χάραξης της Εγνατίας Οδού

Την χρονιά του 2002, στα πλαίσια κατασκευής του αυτοκινητόδρομου της Εγνατίας Οδού με νέα χάραξη μέσα από τον ορεινό όγκο του Ανηλίου, διεξήχθη Γεωτεχνική – Γεωλογική έρευνα στην περιοχή.

Η έρευνα περιλάμβανε λεπτομερή γεωλογική χαρτογράφηση πεδίου με ιδιαίτερη έμφαση στις γεωλογικές δομές, στον τύπο της βραχώμαζας και στις γεωφυσικές αναλύσεις. Τα αποτελέσματα από αυτές τις μελέτες πεδίου σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από εργαστηριακές αναλύσεις δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ακτινωτών μετατοπίσεων και το βάθος των ζωνών θραύσης (Riedmuller et al, 2002).



Εικόνα 5. 15 Περιοχή Έρευνας. Στην εικόνα φαίνεται η ασταθής μορφολογία της περιοχής (από Riedmuller et al, 2002).



Εικόνα 5. 16 Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής 1:5000 (από Riedmuller et al, 2002).

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Επιφάνεια διάβρωσης		Εφίππευση
	Ψαμμίτες		Ρήγμα
	Εναλλαγές ψαμμιτών - υνολίθων		Μέτωπο πρηνούς
	Υνολίθοι με αραιές παρεμβολές ψαμμιτών		Ερπυσμοί, κατολισθήσεις
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΜΙΓΜΑ (Επικρατούν οι υνολίθοι)		Διαβρωσιγενές πρηνές
	Ασβεστόλιθοι		Επίπεδο διάβρωσης
	Έντονα τεκτονισμένη βραχομάζα		Επίπεδο στρώσης
	Μυλωνίτες, τεκτονικά λατυποπαγή		Διακλάσεις
	Πλευρικά κορήματα		Γεώτρηση
	Ογκόλιθοι		
	Ζώνη εφίππευσης		

- **Τύποι βραχώμαζας:**

Σύμφωνα με Riedmuller et al, (2002) από τα αποτελέσματα των ερευνών της περιοχής προσδιορίστηκαν 6 τύποι βραχώμαζας και 1 τύπος εδάφους. Ο ορισμός του τύπου βραχώμαζας έγινε σύμφωνα με την κατάταξη RMT που λαμβάνει υπόψη τη φυσική κατάσταση της βραχώμαζας ακολουθώντας τη περιγραφή εδάφους και βράχου που προτείνει η ISRM.

RMT 1: Μεσόκοκκος έως λεπτόκοκκος, καφετής, κυρίως μεγάλου έως μεσαίου μεγέθους ψαμμίτης, περιστασιακά με ενδιάμεσα στρώματα ιλυολίθων. Η αντοχή των άθικτων ψαμμιτών κυμαίνεται από μεσαία έως πολύ ισχυρή (UCS 37 έως 116 MPa). Οι ασυνέχειες είναι πολλές με μεταξύ τους μέτριες αποστάσεις (από 200 έως 6000 mm). Η εμμονή των διακλάσεων κυμαίνεται από πολύ χαμηλή έως μέτρια (< 1m έως 10 m). Οι επιφάνειες των διακλάσεων είναι κυρίως τραχείες και επίπεδες (JRC 8 έως 14). Οι επιφάνειες των ασυνεχειών εμφανίζονται εν μέρει χρωματισμένες. Ο βράχος είναι γενικά υγιείς ως ελαφρά αποχρωματισμένος.

RMT 2: Ίδια βραχώμαζα με την RMT 1, αλλά πολύ πιο θραυσμένη και τοπικά πολύ πιο αποχρωματισμένη. Η αντοχή του ανέπαφου βράχου μειώνεται.

RMT 3: Ακολουθία ιλυολίθων – αργιλικών σχιστολίθων γκρίζου έως καστανόχρωμου ή κόκκινου χρώματος, με περιστασιακές παρεμβολές ψαμμίτη. Οι επιφάνειες της βραχώμαζας είναι κυρίως ομαλές και επίπεδες (JRC 2 έως 6) με περιστασιακές πηλινες επικαλύψεις. Οι διακλάσεις έχουν πολύ χαμηλή εμμονή (<1 m), ενώ η αντοχή του άθικτου βράχου ποικίλει σημαντικά (1 έως 77 MPa).

RMT 4: Ιλυόλιθος και αργιλικός σχιστόλιθος γκρίζου – καφέ ή κόκκινου χρώματος με εναλλαγές ψαμμίτη. Τα χαρακτηριστικά του ιλυόλιθου είναι όμοια με αυτά της βραχώμαζας RMT 3. Η ψαμμιτικές επιφάνειες είναι πιο λεπτές και πιο ανθεκτικές.

RMT 5: Τεκτονικό μίγμα που αποτελείται κυρίως από κόκκινους ιλυολίθους – αργιλικούς σχιστόλιθους και εναλλαγές ψαμμίτη ("Red Flysch"). Τα πετρώματα εμφανίζονται έντονα διατμημένα και πτυχωμένα. Τα μπλοκ του ψαμμίτη και των ιλυολίθων ποικίλλουν σε μέγεθος και σχήμα και εμφανίζονται ως ένα πυκνό αργιλοπυριτικό πλέγμα. Τα κύρια χαρακτηριστικά της βραχώμαζας είναι η μεγάλη ετερογένεια, η χαοτική δομή των σχηματισμών και η πολύ χαμηλή αντοχή.

RMT 6: Βραχώμαζα που κυριαρχείται από άργιλο με πτωχές ιδιότητες, περιστασιακά από βλάστηση και από βαριά κατακερματισμένα πετρώματα, που χαρακτηρίζονται από ιδιότητες εξαιρετικά χαμηλής αντοχής.

RMT S (Τεχνικό έδαφος): Τύπος εδάφους που περιλαμβάνει μη συμπιεσμένα Τεταρτογενή ιζήματα, κορήματα και υπολειμματικά εδάφη.



Εικόνα 5. 17 Τυπικές πτυχές σε σχηματισμό Κόκκινου φλύσχη (από Riedmuller et al, 2002).

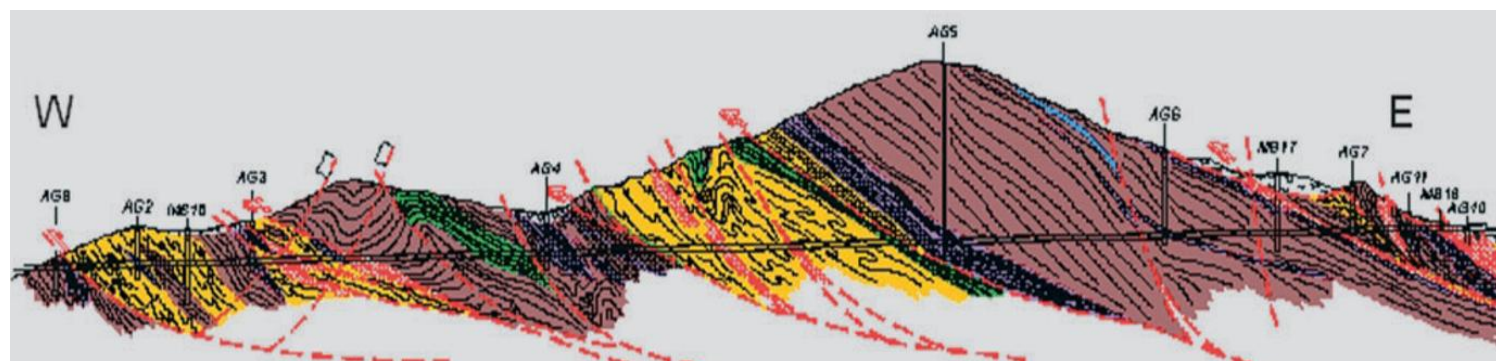


Εικόνα 5. 18 Τυπικές πτυχές ψαμμίτη σε σχηματισμό Κόκκινου φλύσχη (από Riedmuller et al, 2002).



Εικόνα 5. 19 Ψαμμιτικά μπλοκ διαφόρων μεγεθών και σχήματος περικυκλωμένα από εδαφικό υλικό αργίλου (από Riedmuller et al, 2002).

- Γεωλογική τομή νέας χάραξης της σήραγγας (από Riedmuller et al, 2002):



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Αργιλικόι σχιστόλιθοι - ιλυόλιθοι		Τεκτονικό μίγμα
	Ψαμμίτες		Ασβεστόλιθοι
	Εναλλαγές ψαμμιτών με ιλυολίθους, αργιλικούς σχιστόλιθους		Βαρία καταπονημένη, θραυσμένη βραχώμαζα
	Εναλλαγές ιλυολίθων με ψαμμίτες		Πλευρικά κορήματα
	Ανάστροφο ρήγμα		Μπλοκ κορημάτων
	Κανονικό ρήγμα		

5.5. Ιστορικό κατολισθήσεων

Ένα από τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων στην περιοχή του Ανηλίου είναι ότι δεν πρόκειται για μεμονωμένα γεγονότα, αλλά για μια ακολουθία κατολισθήσεων, η οποία συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Οι κατολισθήσεις που επηρέασαν έντονα και σε μεγάλο βαθμό την ζωή των ανθρώπων στην περιοχή και αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία είναι οι παρακάτω:

Έτος 1990

- 15/12/1990 (Εφημερίδα Ελεύθερος Τύπος σελ. 3)



- 23/12/1990 (Εφημερίδα Επικαιρότητα της Κυριακής σελ. 28 - 29)



Τμήμα άρθρου: "Ήδη έχουν καταρρεύσει δυο εργοστάσια ξυλείας, ένα σπίτι και μια σταβλοποθήκη. Οι άνθρωποι ζυπνούν και βλέπουν τα σπίτια τους με ρωγμές. Το πρόβλημα έχει δημιουργηθεί από τη σήραγγα που ανοίχτηκε για τον καινούργιο δρόμο, ο οποίος παρακάμπτει την Κατάρρα."

Το Ανήλιο Μετσόβου
θυσία στη σήραγγα
για το νέο δρόμο

Τα παραπάνω άρθρα αφορούν τα φαινόμενα κατολίσθησης που έλαβαν χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Ανατολικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου την περίοδο Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου 1990.



Εικόνα 5. 20 Κατολίσθηση του 1990 (Με κόκκινο τα όρια της κατολίσθησης, με μπλε η σήραγγα του ανατολικού μετώπου του Ανηλίου), (Google Maps Pro Τροποποιημένο).

- **Γεωλογικά – γεωμορφολογικά στοιχεία ανατολικού μετώπου**

Στην περιοχή του ανατολικού μετώπου επικρατεί ο φλύσχης (ψαμμιτικός ή αργιλικός). Το μέτωπο της σήραγγας διαμορφώνεται στην ζώνη επαφής των ιλυολίθων – αργιλικών σχιστολίθων και του ψαμμίτη. Στη ζώνη αυτή αναπτύσσονται τοπικοί υδροφορείς με αποτέλεσμα την έντονη αποσάθρωση και εξαλλοίωση κυρίως του αργιλικού σχιστόλιθου από την δράση του νερού. Επιπλέον, λόγω των έντονων κλιματολογικών διακυμάνσεων το παραπάνω φαινόμενο επιταχύνεται. Τα προϊόντα της αποσάθρωσης μεταφέρονται εύκολα προς τα κατόντη από τα επιφανειακά νερά

της βροχής λόγω των ισχυρών κλίσεων του ανάγλυφου της περιοχής. Δημιουργείται λοιπόν μια εκτεταμένη μισγάγγεια στην περιοχή του μετώπου της σήραγγας τα όρια της οποίας εκτείνονται πολύ ψηλότερα και η οποία καλύπτεται από υλικά αποσάθρωσης που μετακινήθηκαν από ανάντη. Από την μισγάγγεια αυτή, το βάθος της οποίας είναι σημαντικό, παροχετεύονται τα επιφανειακά νερά της λεκάνης απορροής τα οποία εμποτίζουν την στρώση των προϊόντων αποσάθρωσης. Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι εκείνοι που ευνοούν την εκδήλωση κατολισθήσεων στην εν λόγω περιοχή.

- **Αίτια φαινομένου:**

Το κύριο κινούν αίτιο στην περιοχή, εκτός από τις ισχυρές κλίσεις του ανάγλυφου, φαίνεται να είναι η παρουσία των υπόγειων νερών, οι παροχές και οι πιέσεις των οποίων αυξήθηκαν έντονα και απότομα από τις ισχυρές βροχοπτώσεις - χιονοπτώσεις την περίοδο Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου του 1990, μάλιστα μετά από μια περίοδο παρατεταμένης ξηρασίας.

Σε πολλά σημεία της περιοχής εμφανίστηκαν νέες πηγές, γεγονός αύξησης της πιεζομετρίας των υπογείων νερών, με αποτέλεσμα την χαλάρωση της εδαφικής μάζας και την ανάπτυξη ισχυρών ωθήσεων μέσα σ' αυτή.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση του ανατολικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου τα συμβατικά μέτρα προστασίας πρανών, για την εκτέλεση των έργων πρόσβασης και διαμόρφωσης του μετώπου, δεν ήταν σε θέση να παραλάβουν το φορτίο της ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας, με αποτέλεσμα να αστοχήσουν και να προκληθούν μεγάλες καταστροφές από την υπόψη κατολίσθηση.

Έτος 2010

Στην περιοχή του Ανηλίου μπορούν να παρατηρηθούν αρκετές παλιές κατολισθήσεις. Μια από αυτές μάλιστα κατέστρεψε το Παλαιοχώρι Ανηλίου και εξαιτίας αυτού κατασκευάστηκε νέος οικισμός στην θέση που βρίσκεται σήμερα το Ανήλιο νότια του Παλαιοχωρίου. Όμως και η νέα θέση, εξαιτίας του φλύσχη και των πλευρικών κορημάτων πάνω σε αυτόν, είναι επιρρεπής σε εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων (Κουμαντάκης, 2011).

Με τις έντονες βροχοπτώσεις του Νοεμβρίου 2010, ενεργοποιήθηκαν κατολισθήσεις που προκάλεσαν σημαντικές ζημιές σε οικίες. Πολλές από αυτές μάλιστα, εξαιτίας της έκτασης των ζημιών μπορούν να χαρακτηριστούν και ως μη κατοικήσιμες (Κουμαντάκης, 2011).

5.6. Αποτύπωση και αξιολόγηση κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή έρευνας

Όπως προαναφέρθηκε, στη περιοχή έρευνας ο βασικός σχηματισμός που επικρατεί είναι ο φλύσχος. Ο σχηματισμός αυτός, λόγω πολύ πτωχής ποιότητας και μηχανικών παραμέτρων και σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις που επικρατούν στη περιοχή, αποτελεί το κυριότερο αίτιο στη γένεση των αστοχιών.

Στην περιοχή έγινε μια λεπτομερής επιτόπου αυτοψία που είχε σαν στόχο την διερεύνηση της για κατολισθήσεις και τον εντοπισμό της γενικότερης αστάθειας. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή επιλέχθηκαν δύο θέσεις που εμφανίζουν την μεγαλύτερη αστάθεια και αξιολογήθηκαν βάση επιτόπου γεωλογικών - τεχνικογεωλογικών παρατηρήσεων. Επίσης, εκτός από την επιτόπου παρατήρηση στην ύπαιθρο, οι δύο περιοχές αποτυπώθηκαν και με την χρήση της μεθόδου UAV.

Τα συμπεράσματα από την επιτόπου αξιολόγηση των δυο περιοχών παρατίθενται παρακάτω.

5.6.1. Συμπεράσματα επιτόπου αυτοψίας

Περιοχή ανατολικής εισόδου

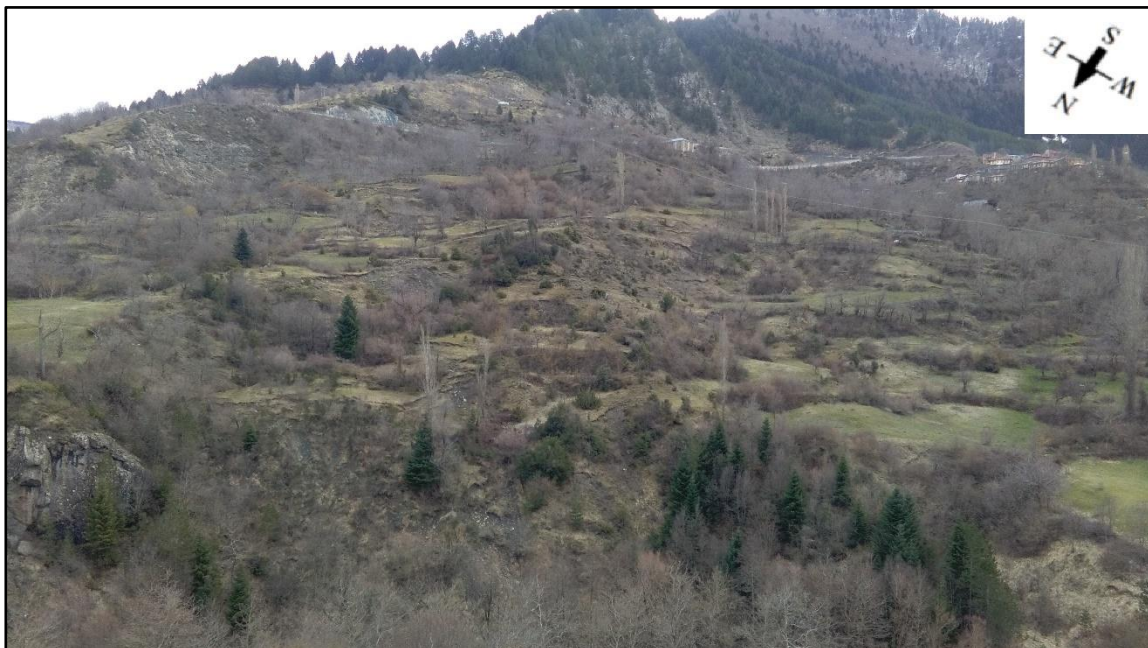
Στην ανατολική είσοδο του Ανηλίου εντοπίστηκε μια μεγάλη ενεργή κατολίσθηση μεγέθους τύπου Βουνού. Η συγκεκριμένη κατολίσθηση έχει προβληματίσει στο παρελθόν, καθώς εξαιτίας της ευρύτερης αστάθειας της, ανάγκασε για λόγους υψηλής διακινδύνευσης την αλλαγή χάραξης του αυτοκινητόδρομου της Εγνατίας Οδού.



Εικόνα 5. 21 Κατολίσθηση στην ανατολική είσοδο του Ανηλίου, με κόκκινο σημειώνονται τα όρια της κατολίσθησης (εικόνα από Google Maps Pro).

Στην περιοχή παρατηρήθηκαν διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν δείκτες κατολισθήσεων. Παραδείγματος χάρη, στην μορφολογία του εδάφους παρατηρήθηκαν διάφορες διαρρήξεις, εξάρσεις και βυθίσματα, στοιχεία που αποτελούν σημάδια ύπαρξης και ενεργότητας μιας κατολίσθησης. Επίσης μέσα στην κατολίσθηση εντοπίστηκαν φρύδια από μικρότερες κατολισθήσεις και θέσεις οι οποίες στο μέλλον θα μπορούσαν να αστοχήσουν και να δώσουν μικρές περιστροφικές ολισθήσεις.

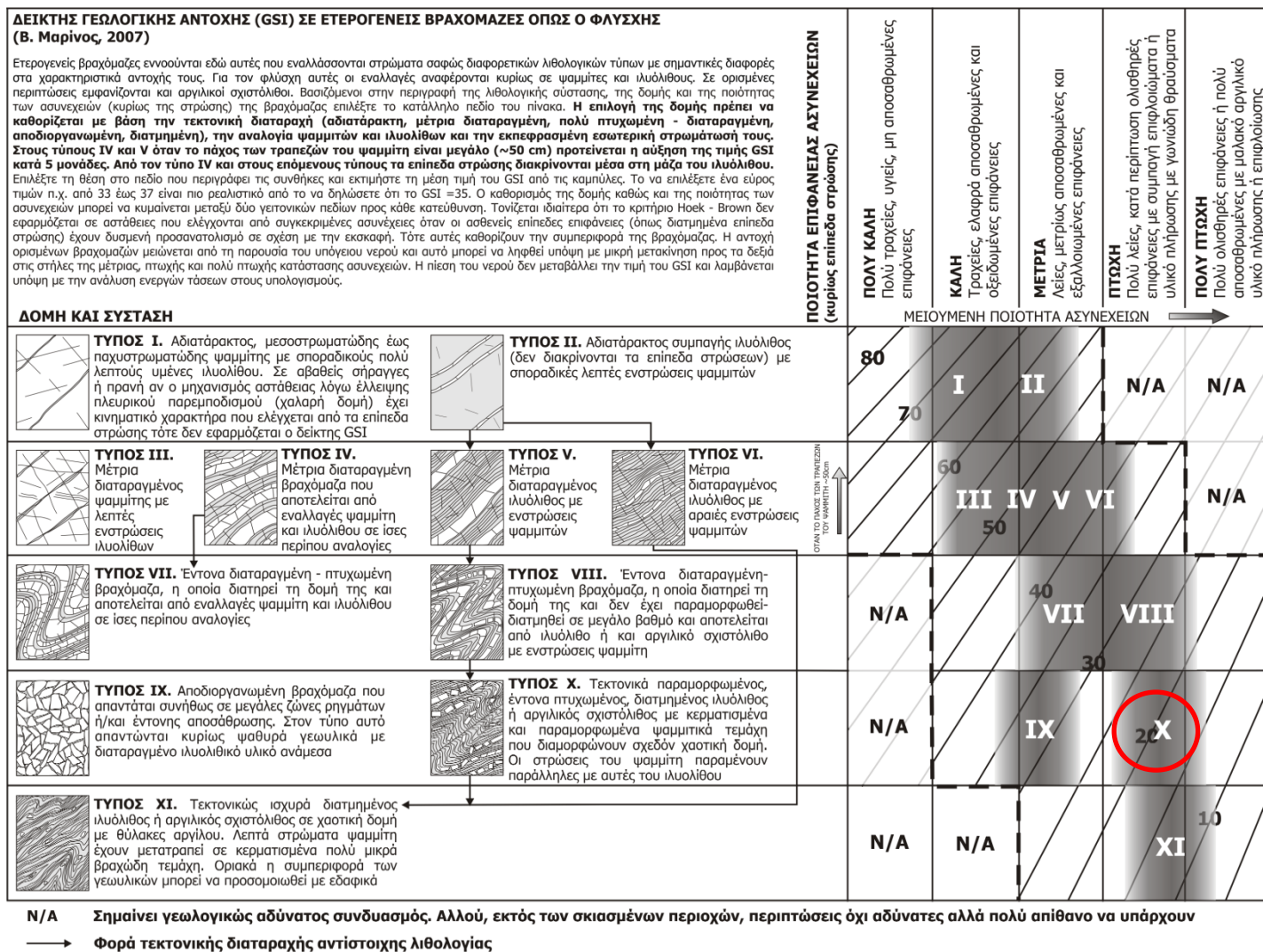
Ουσιαστικά η εν λόγω κατολίσθηση αποτελεί μια σύνθεση από μικρότερες κατολισθήσεις οι οποίες καταλαμβάνουν μια μεγάλη έκταση και εμφανίζουν έντονα σημάδια ενεργότητας.



Εικόνα 5. 22 Κατολίσθηση στην ανατολική είσοδο του Ανηλίου. Σημάδια αναγνώρισης: επιφανειακές διαρρήξεις, φρύδια από μικρότερες κατολισθήσεις, εξάρσεις και βυθίσματα του ανάγλυφου (φωτογραφία από τον συγγραφέα).

Ο φλύσχος που απαντάται στην περιοχή παρουσιάζεται τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα ρηγματωμένος και πτυχωμένος αποτελούμενος κυρίως από ιλυόλιθο ή αργιλικό σχιστόλιθο με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή.

Η δομή του σε συνδυασμό με την πτωχή ποιότητα των ασυνεχειών του, υποβαθμίζουν την ποιότητα και αντοχή της βραχώμαζας και της δίνουν μια τιμή GSI από τον πίνακα κατάταξης του φλύσχη της τάξης του 15 – 20.



Εικόνα 5. 23 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώδεις όπως ο φλύσχος, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσχη που απαντάται στην περιοχή έρευνας (Μαρίνος, 2010).



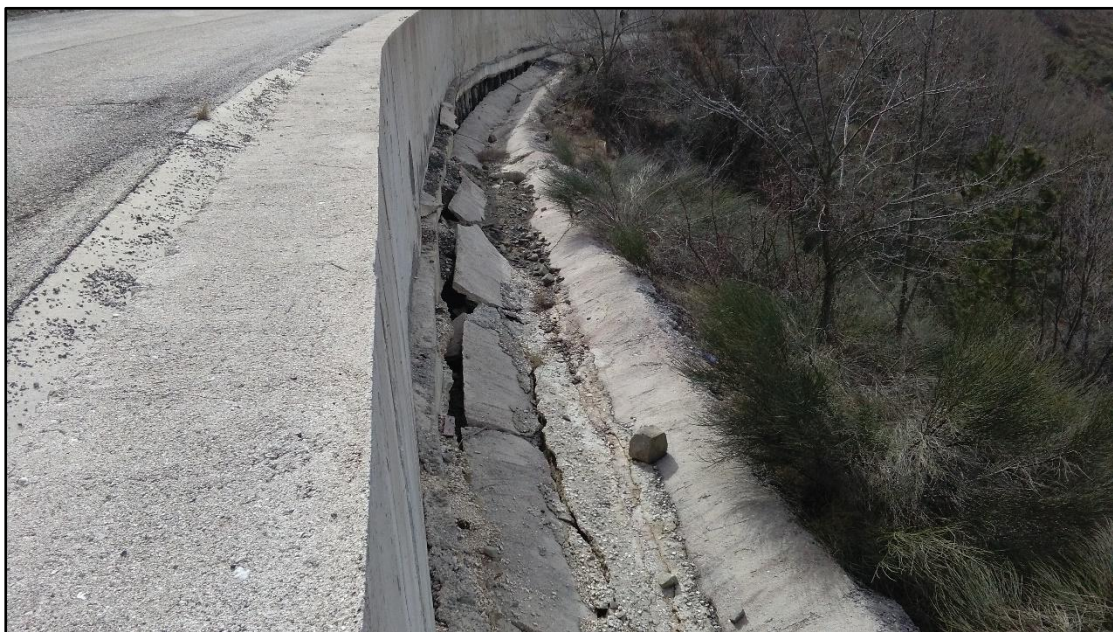
Εικόνα 5. 24 Εικόνα φλύσχη τύπου Χ που συναντάται στην περιοχή
(φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 25 Υλικά κατολίσθησης που συναντάται στην περιοχή (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 26 Φρύδι μικρότερης κατολίσθησης στην περιοχή (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



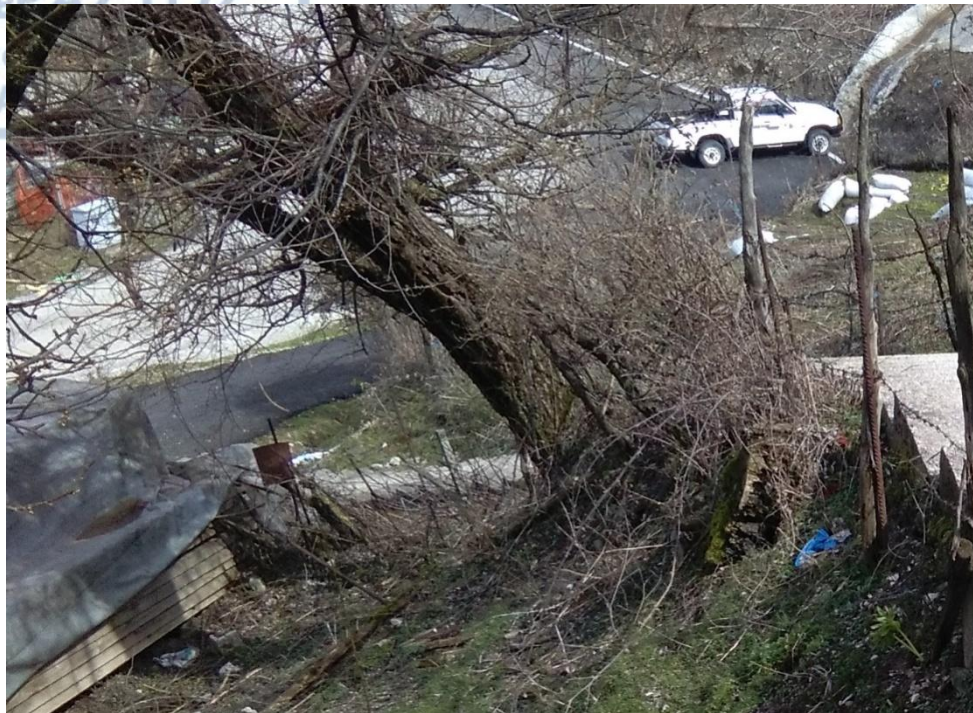
Εικόνα 5. 27 Ρωγμές και διαρρήξεις κατάντη του δρόμου σημάδι κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 28 Εξάρσεις του αναγλύφου, σημάδι ύπαρξης κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 29 Ρωγμές σε οικία σημάδι κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 30 Κάμψη του κορμού του δέντρου σημάδι κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).

Περιοχή δυτικής εισόδου

Στην δυτική είσοδο του Ανηλίου εντοπίστηκε μια δεύτερη πιο μικρή κατολίσθηση. Η κατολίσθηση αυτή έλαβε χώρα την περίοδο Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου 1990 και προκάλεσε καταστροφές σε οικίες και υποδομές.



Εικόνα 5. 31 Κατολίσθηση δυτικής εισόδου, με κόκκινο σημειώνονται τα όρια της κατολίσθησης, (Google Maps Pro Τροποποιημένο).



Εικόνα 5. 32 Περιοχή κοντά στο φρύδι της κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 33 Περιοχή στο μέσο της κατολίσθησης, παρατηρούνται τα υλικά της κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 34 Περιοχή κοντά στον πόδα της κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 35 Παρουσία πηγών στην περιοχή, σημαντική συνεισφορά του νερού στην εξέλιξη του φαινομένου (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 36 Δυτικό όριο κατολίσθησης, με κίτρινο η επαφή του φλύσχη τύπου X (κόκκινο) με παχυστρωματώδεις ψαμμίτες (μπλε) (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 37 Σήραγγα του ανατολικού μετώπου του Ανηλίου (φωτογραφία από τον συγγραφέα).

Η δομή αυτού του τύπου φλύσχη σε συνδυασμό με την πτωχή ποιότητα των ασυνεχειών του, υποβαθμίζουν την ποιότητα και αντοχή της βραχόμαζας και της δίνουν μια τιμή GSI από τον πίνακα κατάταξης του φλύσχη της τάξης του 10.

Εικόνα 5. 38 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχος, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσχη που απαντάται στην περιοχή έρευνας (Μαρίνος, 2010).



Εικόνα 5. 39 Εικόνα φλύσχη τύπου XI που συναντάται στην περιοχή
(φωτογραφία από τον συγγραφέα).

Στην περιοχή παρατηρήθηκαν διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν δείκτες κατολισθήσεων. Παραδείγματος χάρη, στην μορφολογία του εδάφους παρατηρήθηκαν διάφορες διαρρήξεις, εξάρσεις και βυθίσματα, στοιχεία που αποτελούν σημάδια ύπαρξης και ενεργότητας μιας κατολίσθησης.



Εικόνα 5. 40 Εξάρσεις του αναγλύφου, σημάδι ύπαρξης κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 41 Κάμψη του κορμού του δέντρου σημάδι κατολίσθησης (φωτογραφία από τον συγγραφέα).



Εικόνα 5. 42 Φρύδια μικρότερων κατολισθήσεων (φωτογραφία από τον συγγραφέα).

5.6.2. Αποτελέσματα χρήσης του UAV στις δύο υπό μελέτη περιοχές

Η χρήση της μεθόδου UAV στην παρούσα εργασία είχε σκοπό την καλύτερη αποτύπωση των δύο περιοχών έρευνας, για την διερεύνηση και αξιολόγηση των κατολισθητικών φαινομένων.

Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκε πλατφόρμα UAV μοντέλο DJI Phantom 3 Professional.



Εικόνα 5. 43 Πλατφόρμα UAV μοντέλο DJI Phantom 3 Professional

(Φωτογραφία από τον συγγραφέα).

Τα αποτελέσματα και οι λεπτομέρειες των πτήσεων που πραγματοποιήθηκαν πάνω από τις δύο παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Πρώτη πτήση**

Η πρώτη πτήση εκτελέστηκε στην περιοχή της ανατολικής εισόδου στην περιοχή του Αηγίου. Οι λεπτομέρειες της πτήσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5. 2 Λεπτομέρειες πτήσης.

Ημερομηνία λήψης	9 – 3 – 2018
Διακριτική ικανότητα	4 – 5 cm
Ύψος πτήσης	100 m
Εικόνες:	90

- Δεύτερη πτήση

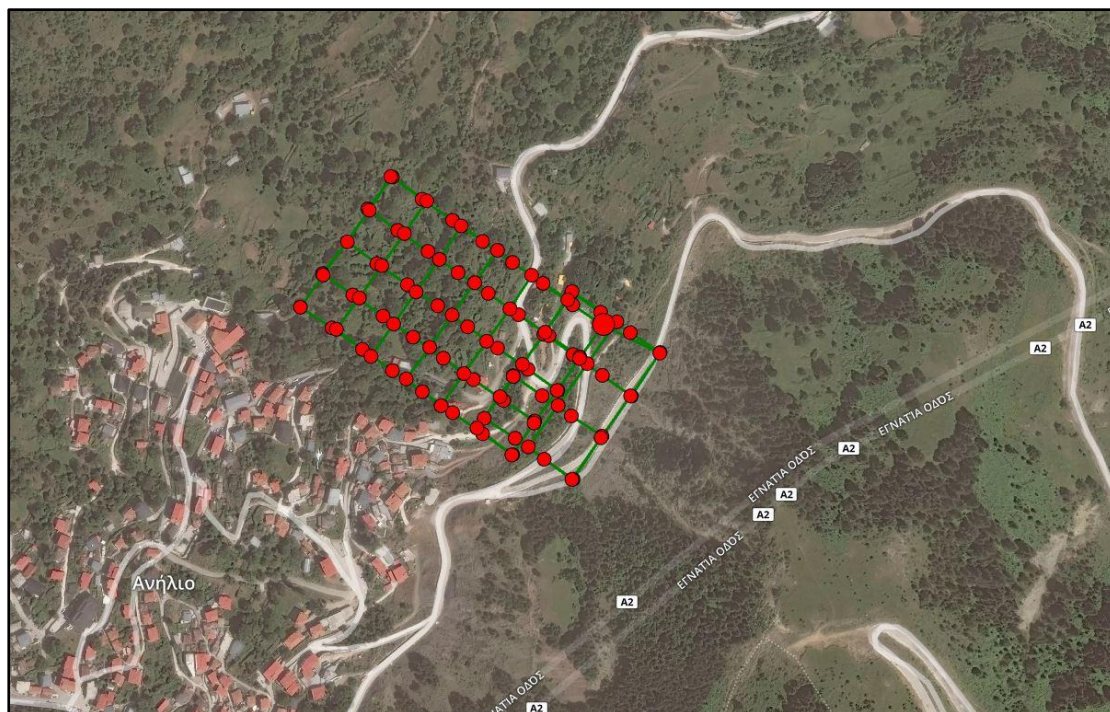
Η δεύτερη πτήση εκτελέστηκε στην περιοχή της δυτικής εισόδου στην περιοχή του Ανηλίου. Οι λεπτομέρειες της πτήσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5. 2 Λεπτομέρειες πτήσης.

Ημερομηνία λήψης	9 – 3 – 2018
Διακριτική ικανότητα	4 – 5 cm
Ύψος πτήσης	100 m
Εικόνες:	64

Στην συνέχεια, από την επεξεργασία των εικόνων μέσω του λογισμικού Pix4D mapper εξήχθησαν δύο εικόνες για την κάθε περιοχή. Η μια είναι το λεγόμενο ορθομωσαϊκό και αποτελεί την σύνθεση όλων των εικόνων δίνοντας μια συνολική εικόνα της περιοχής που καλύφθηκε, ενώ η δεύτερη είναι το λεγόμενο DSM (Digital Surface Model) το οποίο δίνει την μορφολογία της περιοχής αποτυπώνοντας το υψόμετρο. Τέλος, και για τις δύο περιοχές παράχθηκε το αντίστοιχο 3D μοντέλο.

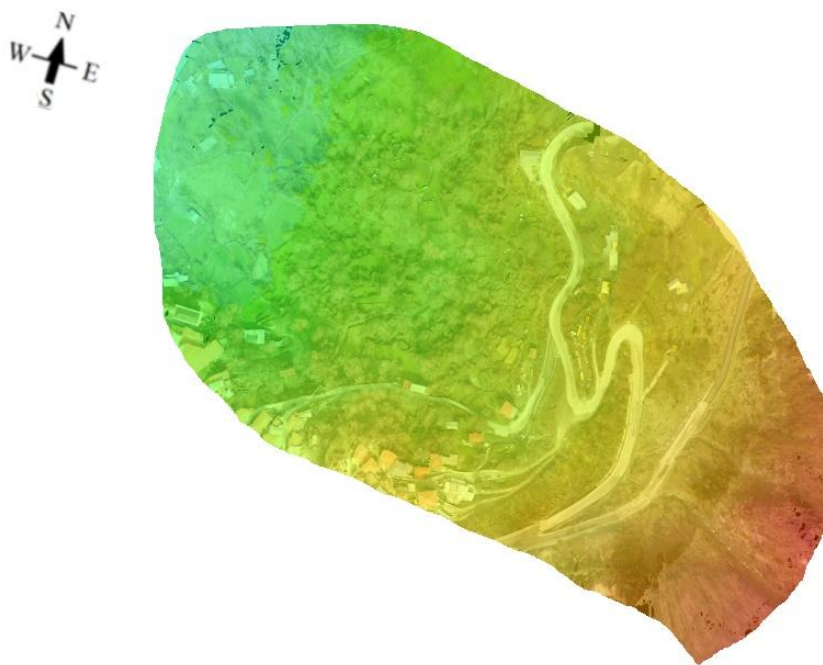
- Εικόνες πρώτης πτήσης στην ανατολική είσοδο:



Εικόνα 5. 44 Σχέδιο πτήσης, με κόκκινες κουκίδες παρουσιάζονται τα σημεία που ελήφθησαν οι εικόνες.



Εικόνα 5. 45 Ορθομωσαϊκό κατολίσθησης.



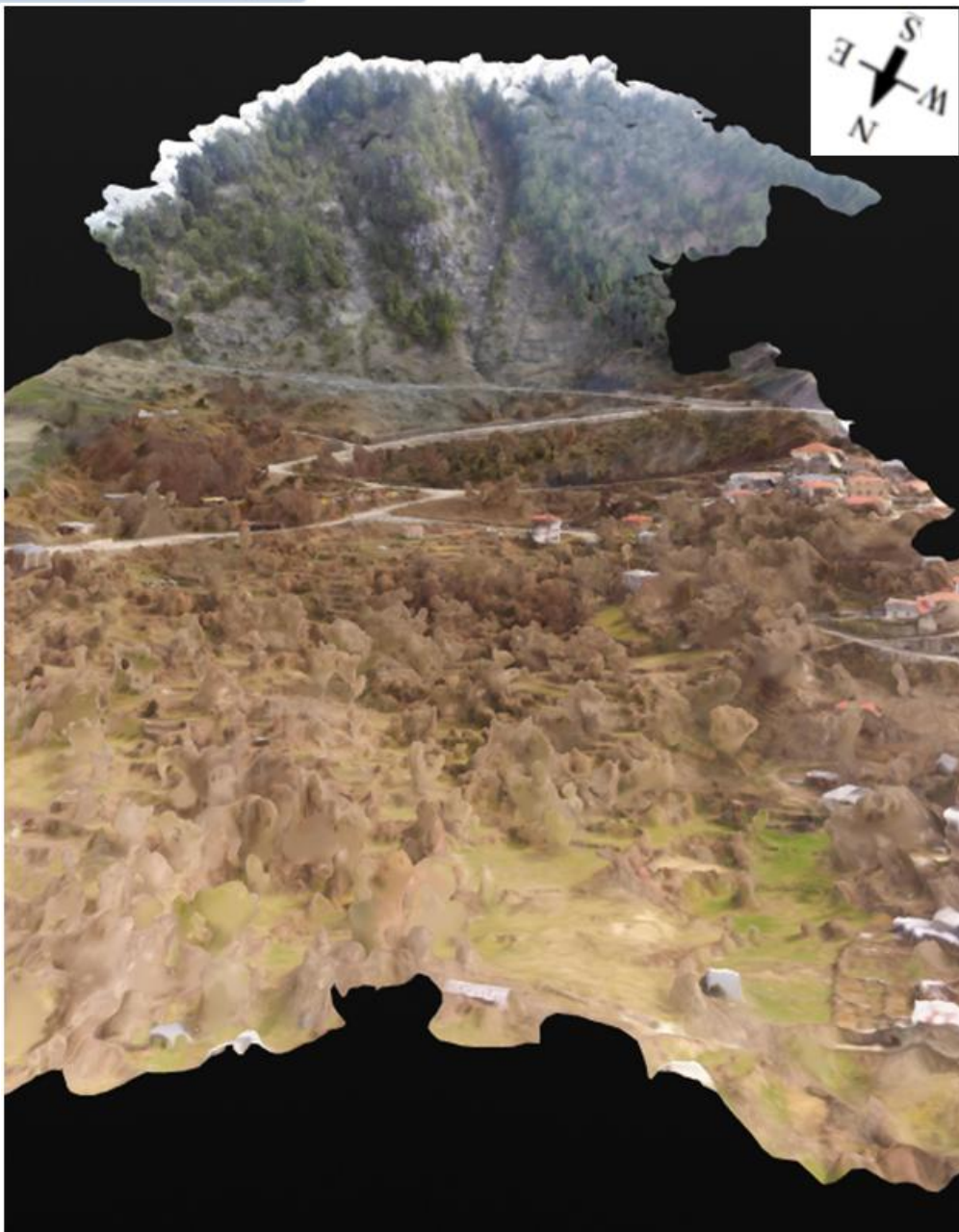
Εικόνα 5. 46 DSM κατολίσθησης. Με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα.



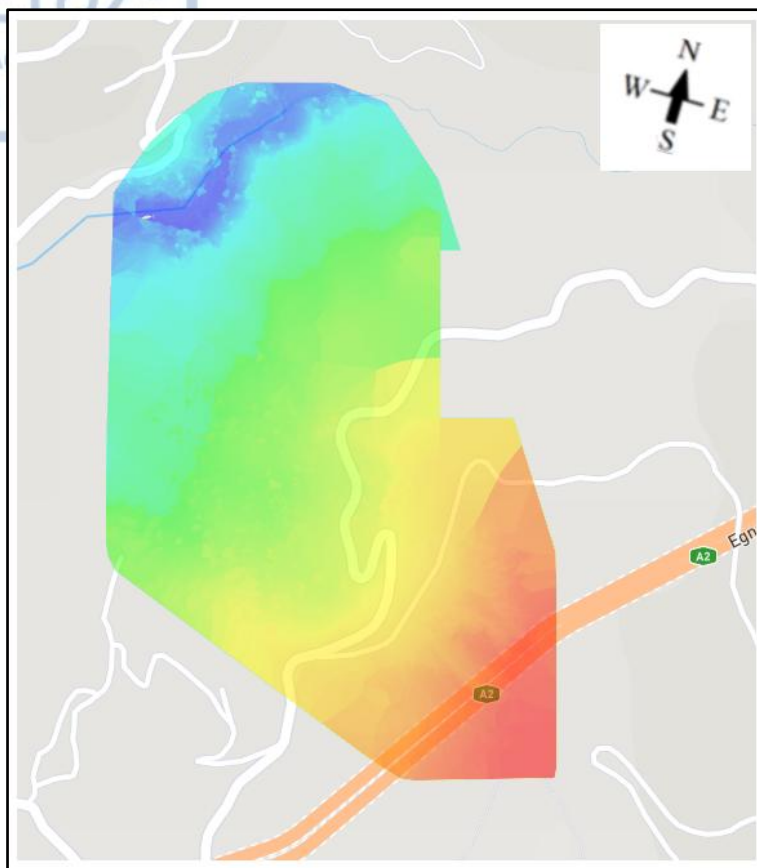
Εικόνα 5. 47 Ορθομωσαϊκό του πρανούς στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης όπου παρατηρούνται καταπτώσεις βράχων.



Εικόνα 5. 48 Ορθομωσαϊκό από άλλη γωνία, του πρανούς στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης όπου παρατηρούνται καταπτώσεις βράχων.

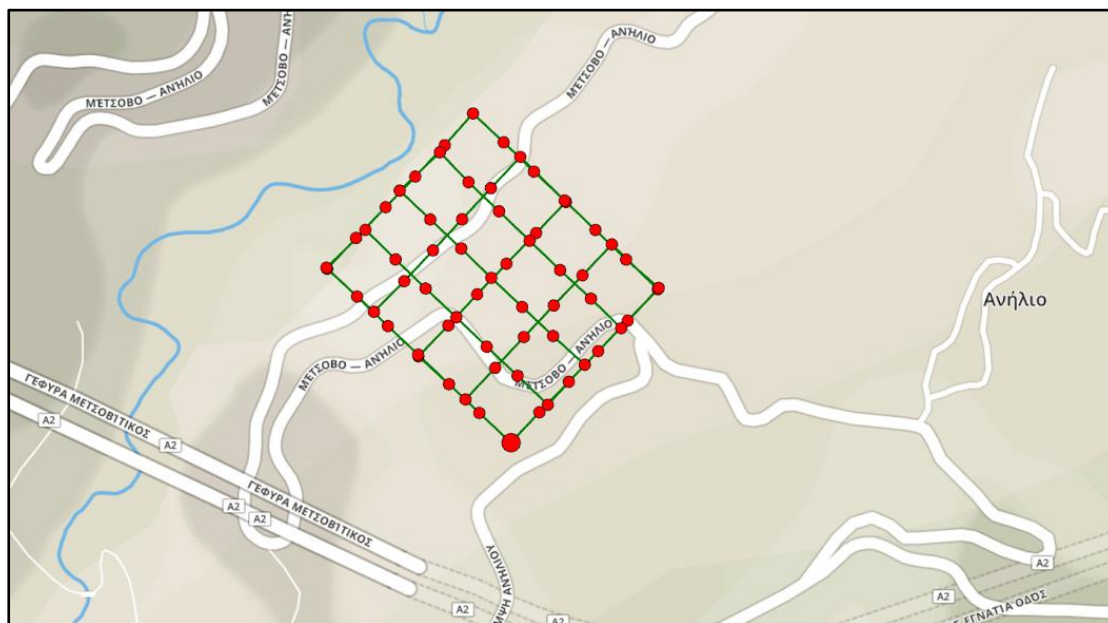


Εικόνα 5. 49 3D μοντέλο περιοχής ανατολικής εισόδου.



Εικόνα 5. 50 DSM περιοχής έρευνας. Με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα.

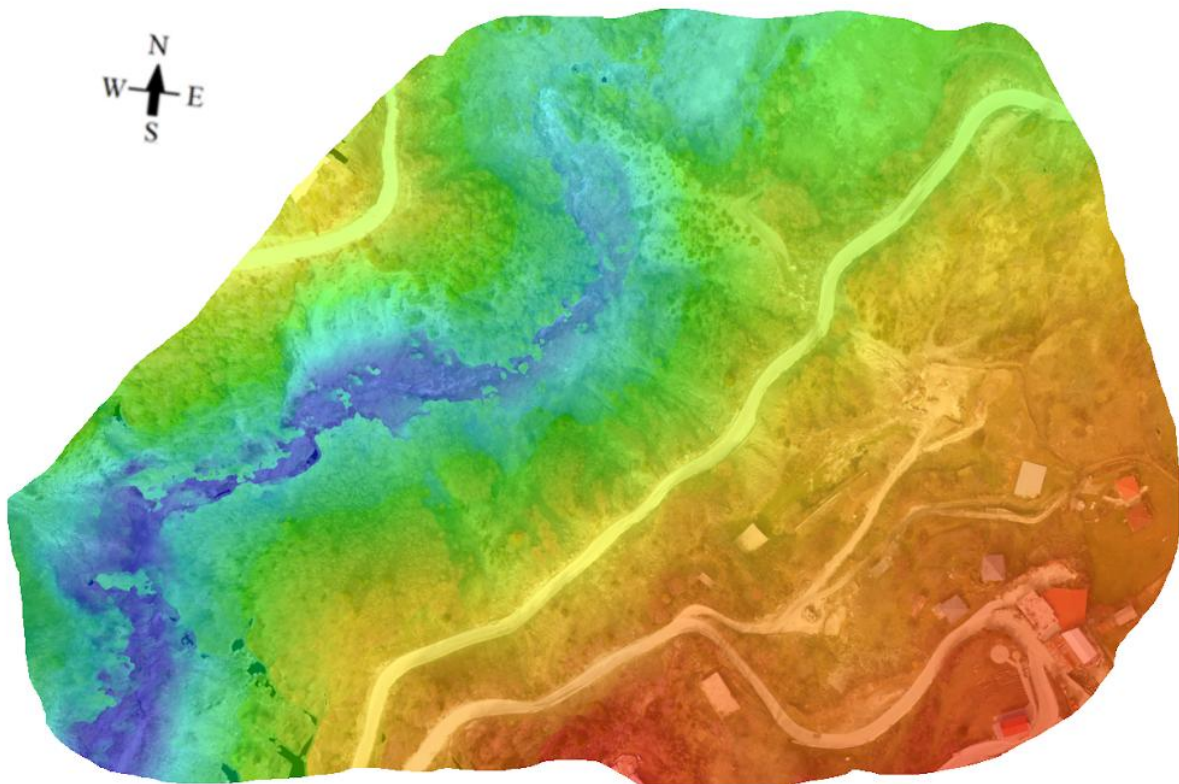
- **Εικόνες δεύτερης πτήσης στην δυτική είσοδο:**



Εικόνα 5. 51 Σχέδιο πτήσης, με κόκκινες κουκίδες παρουσιάζονται τα σημεία που ελήφθησαν οι εικόνες.



Εικόνα 5. 52 Ορθομοσαϊκό περιοχής έρευνας.



Εικόνα 5. 53 DSM περιοχής μελέτης. Με πιο θερμά χρώματα εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ με πιο ψυχρές αποχρώσεις τα χαμηλότερα.



Εικόνα 5. 54 3D μοντέλο περιοχής, με κόκκινο σημειώνονται τα όρια της κατολίσθησης.

5.7. Γεωτεχνική έρευνα κατολίσθησης Ανηλίου 1990 (Δυτικής εισόδου)

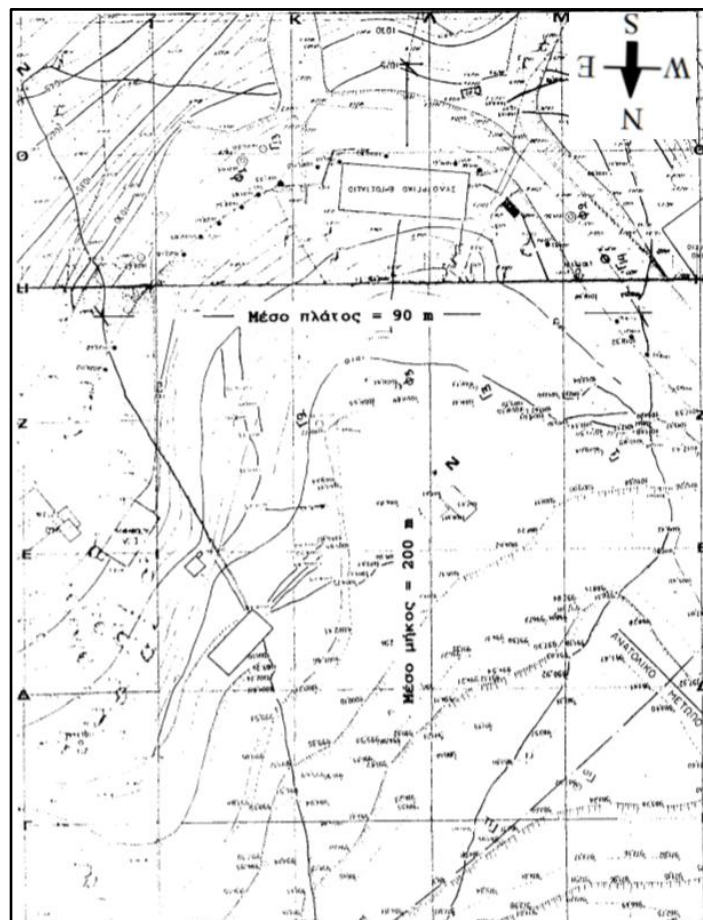
Η εν λόγω κατολίσθηση έλαβε χώρα στην ευρύτερη περιοχή της δυτικής εισόδου στο ανατολικό μέτωπο της σήραγγας του Ανηλίου την περίοδο Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου 1990 και για την μελέτη της εκτελέστηκε γεωερευνητικό πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρατίθενται παρακάτω:

5.7.1. Γεωμετρία κατολίσθησης

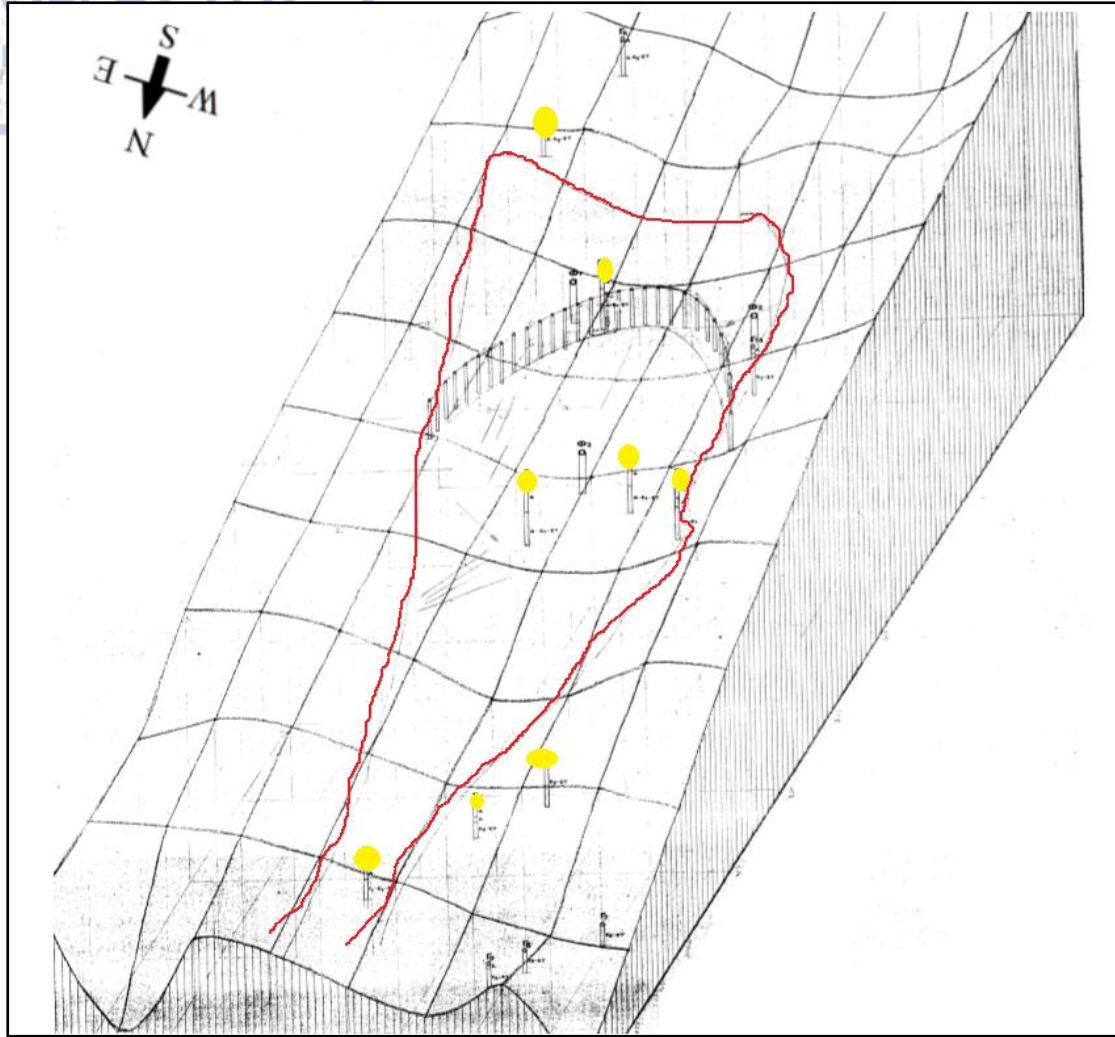
Το σχήμα της περιοχής κατολίσθησης, όπως αυτό οριοθετείται από το περίγραμμα των ιχνών των επιφανειακών ρωγμών, χαρακτηρίζεται από χαμηλή τιμή του λόγου του μέσου πλάτους προς το μήκος κατά την έννοια της μέγιστης κλίσης και της διεύθυνσης της κύριας συνιστώσας κίνησης. Ο λόγος αυτός όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.55 έχει τιμή ίση με $90\text{m} / 200\text{m} = 0,45$.

Η γεωμετρική μορφή του σταθερού υποβάθρου, η οποία κατά έναν τρόπο διακρίνεται από την παρατήρηση της μορφολογίας της ελεύθερης επιφάνειας, έχει την μορφή μισγάγγειας.

Οι δύο αυτές παρατηρήσεις δείχνουν ότι η κατολίσθηση έχει μια πολύ συνθήτη γεωμετρία.



Εικόνα 5. 55 Γενική άποψη της περιοχής της κατολίσθησης. Λόγος μέσου μήκους / μέσου πλάτους $200/90 = 2,22$ (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε)



Εικόνα 5. 56 Αξονομετρικό διάγραμμα περιοχής. Με κόκκινο σημειώνεται η κατολίσθηση, με κίτρινο οι γεωτρήσεις που έλαβαν χώρα για την μελέτη της (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

5.7.2. Γεωλογία κατολίσθησης

Μετά από την εκδήλωση της κατολίσθησης στην υπόψη περιοχή του Ανατολικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου έλαβε χώρα λεπτομερής γεωλογική έρευνα της κατολίσθησης.

Από την έρευνα με 14 γεωτρήσεις εντοπίστηκαν οι παρακάτω λιθολογικοί σχηματισμοί:

A: Υλικά παλαιών κατολισθήσεων

Γενικά εμφανίζεται ως ανοικτού καφέ – τεφρού πράσινου χρώματος άργιλος με χαλίκια και πέτρες και κατάσταση σχετικά στιφρή μέχρι κατά τόπους σκληρή.

B: Παχυστρωματώδης ψαμμίτης

Είναι ο κύριος βραχώδης σχηματισμός της ευρύτερης περιοχής. Συνήθως η συνέχεια του διακόπτεται από μικρού ή και ικανού πάχους φλέβες ιλυόλιθου. Εμφανίζεται γενικά αρκετά υγιής παρά το υπάρχον δίκτυο τεκτονικών ρωγμών. Αποτελεί τον βασικό σχηματισμό μέσα από τον οποίο έχει διέλθει η σήραγγα.

Γ1: Φυλλόμορφος και σχετικά ασθενής αργιλικός σχιστόλιθος

Τεκτονικά καταπονημένος.

Γ2: Συμπαγής ερυθρός αργιλικός σχιστόλιθος

Εμφανίζεται σχετικά υγιής και σχετικά σκληρός.

Δ1: Αργιλικός σχιστόλιθος, κατακερματισμένος, φυλλόμορφος

Κατεστραμμένος ο ιστός, αποσαθρωμένος.

Δ2: Αργιλικός σχιστόλιθος

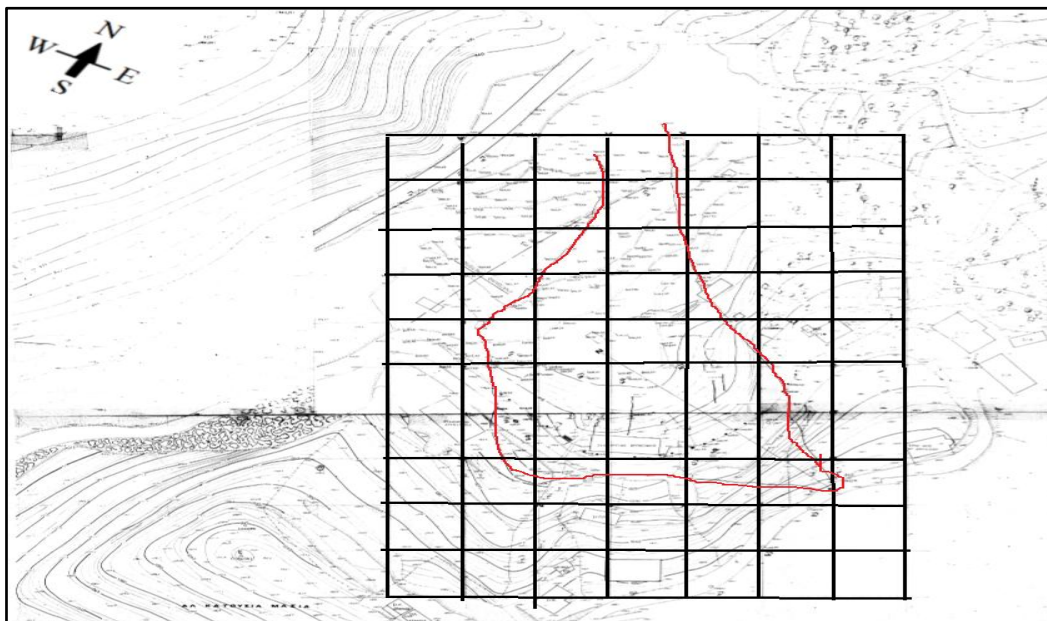
Ε1: Χαλαρός, περιορισμένου βαθμού διαγέννησης, κερματισμένος, αποσαθρωμένος ιλυόλιθος

Ε2: Συμπαγής Ιλυόλιθος

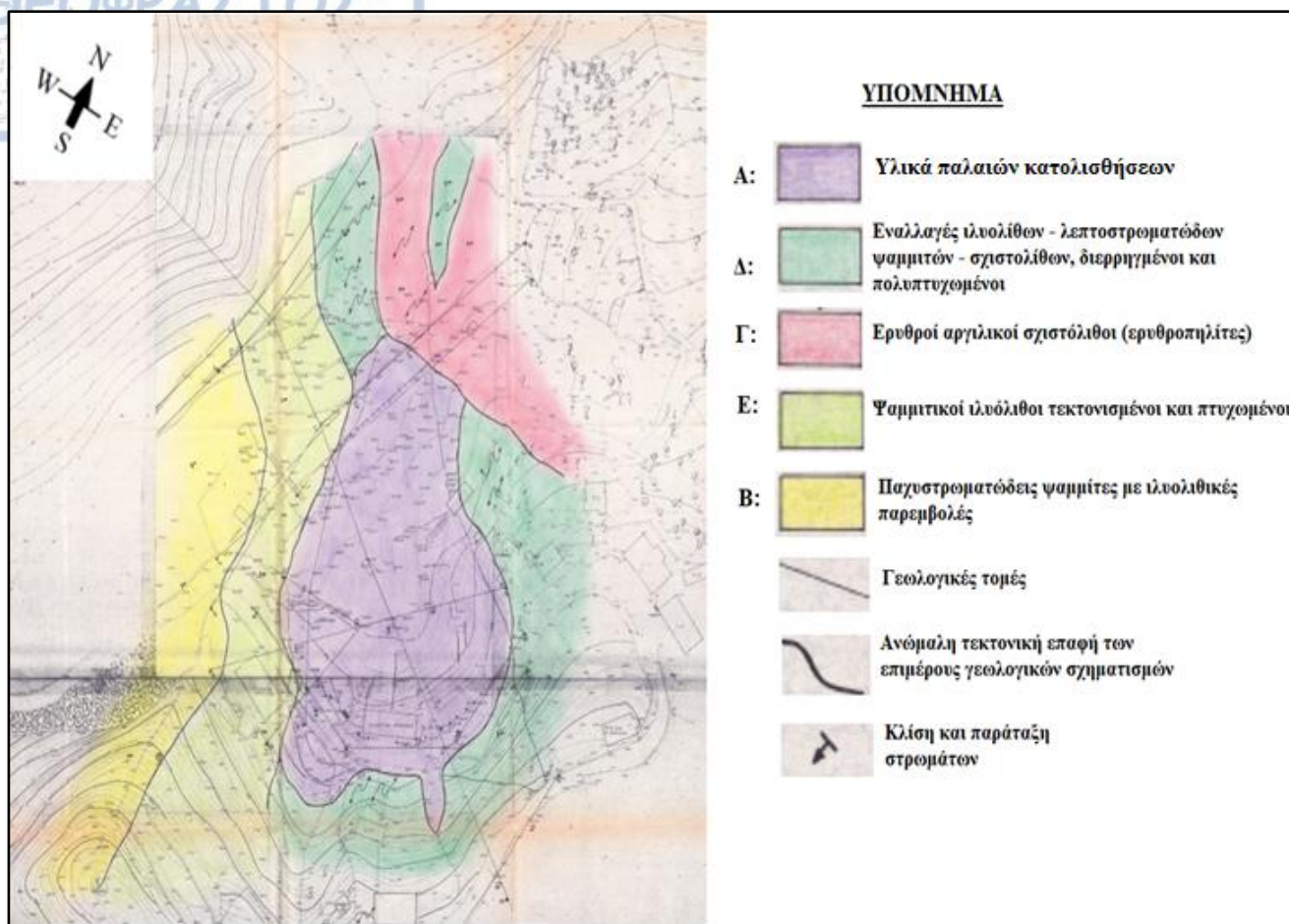
Λεπτόκοκκος με ικανό βαθμό διαγέννησης

ΣΤ: Λεπτοστρωματώδης ψαμμίτης

Ικανής σκληρότητας και αντοχής



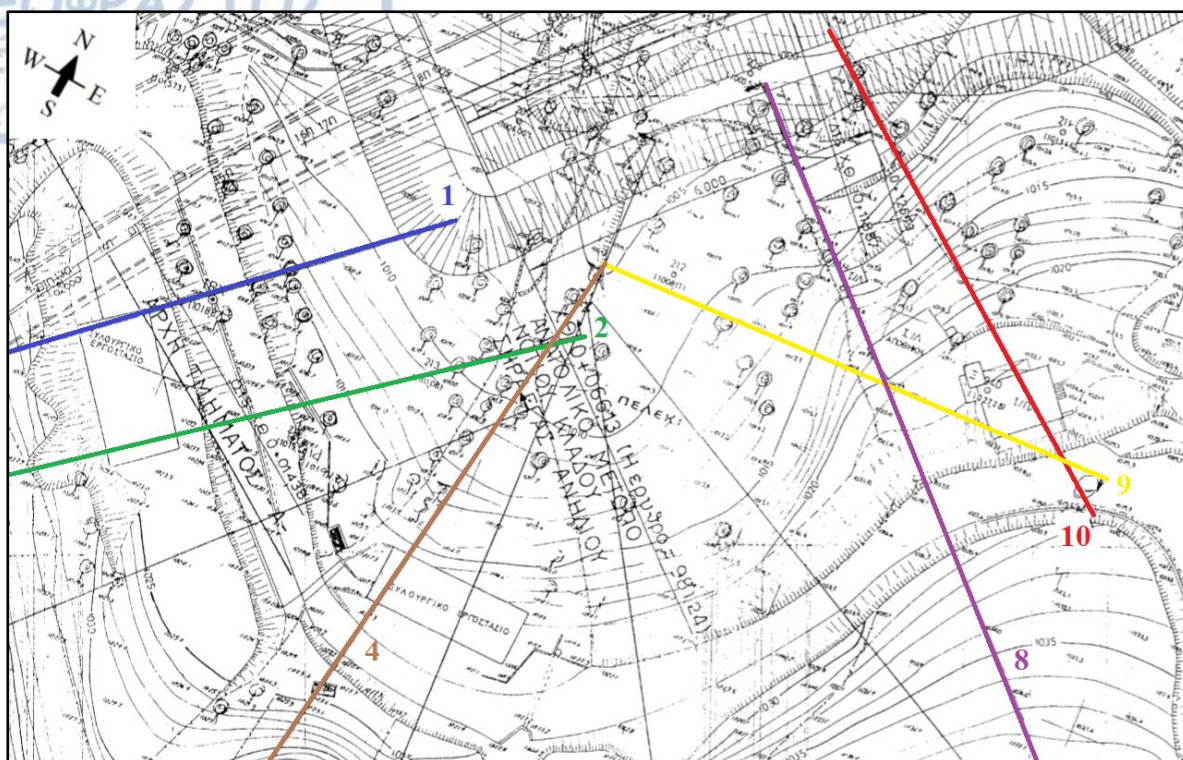
Εικόνα 5. 57 Απόσπασμα τοπογραφικού διαγράμματος περιοχής Ανατολικού μετώπου 1:500, μέσα στον κάναβο σημειώνεται η κατολίσθηση (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).



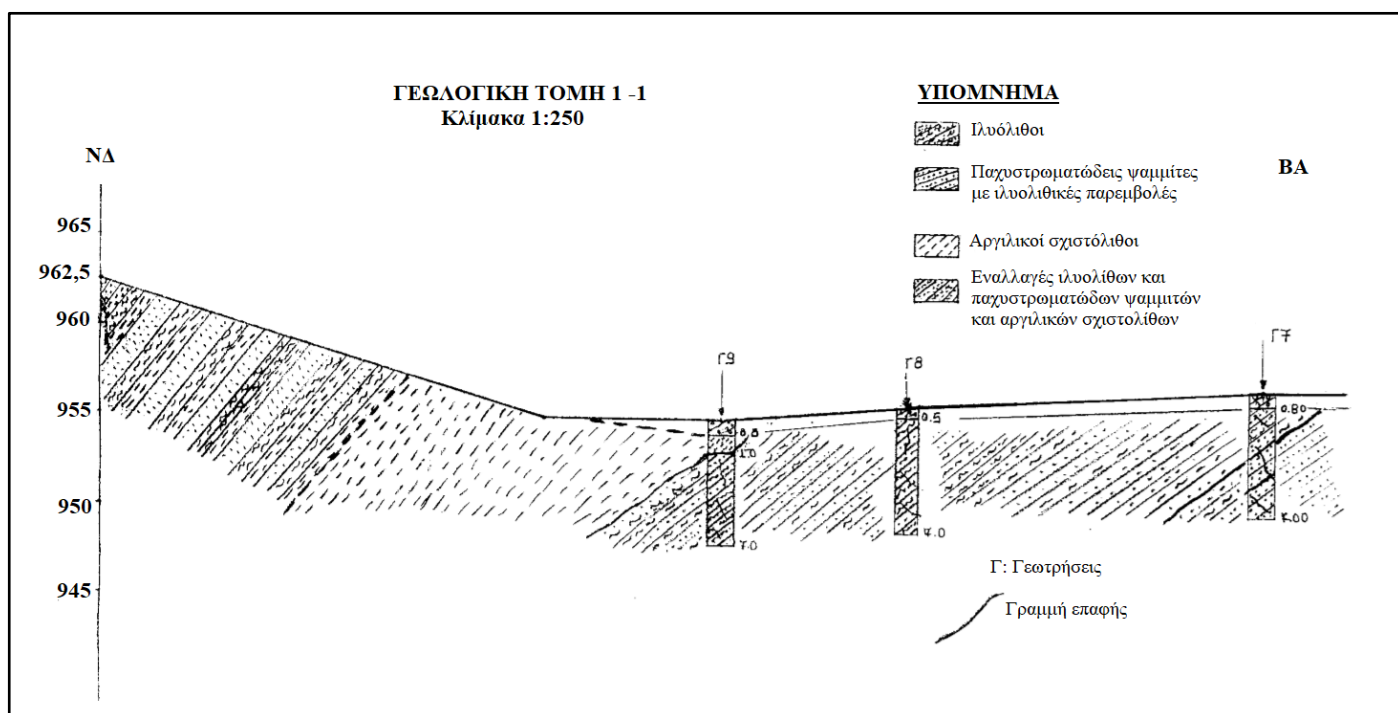
Εικόνα 5. 58 Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής της κατολισθήσης 1:500 (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

5.7.3. Τομές Γεωτεχνικής – Γεωλογικής έρευνας στην περιοχή

Παρακάτω παρατίθενται οι τομές 1 – 1, 2 – 2, 4 – 4, 8 – 8, 9 – 9, 10 – 10 που υλοποιήθηκαν με σκοπό την πιο ακριβή αναπαράσταση της γεωλογίας και των δομών της περιοχής.



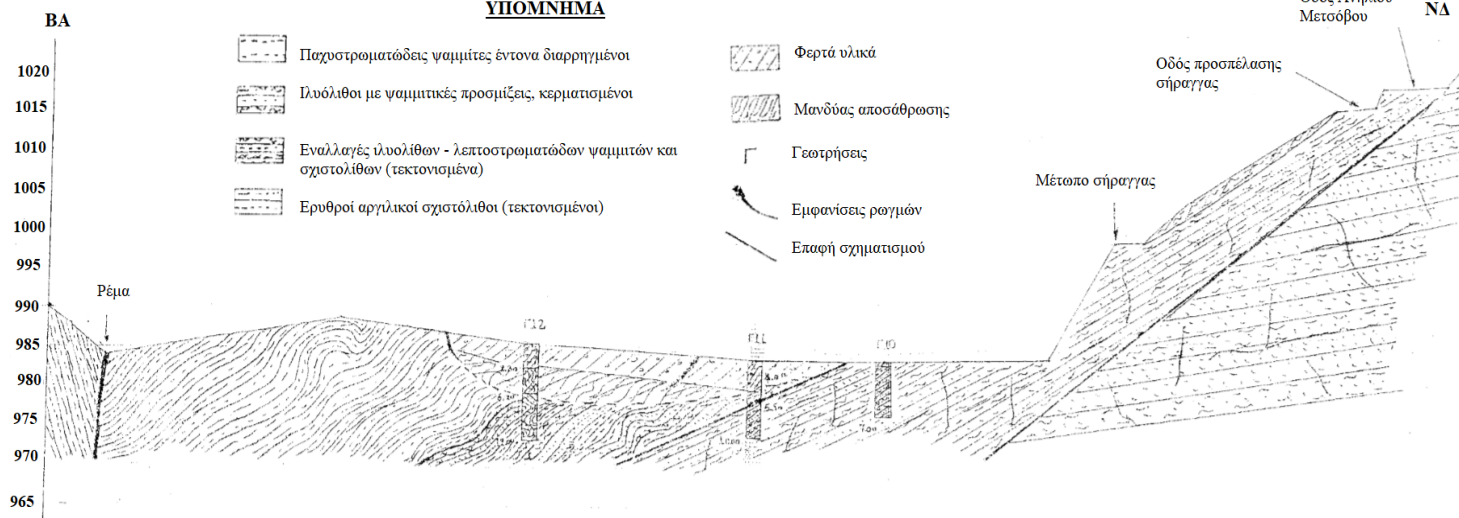
Εικόνα 5. 59 Απόσπασμα οριζοντιογραφίας θέσης των τομών (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).



Εικόνα 5. 60 Τομή 1 – 1 (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

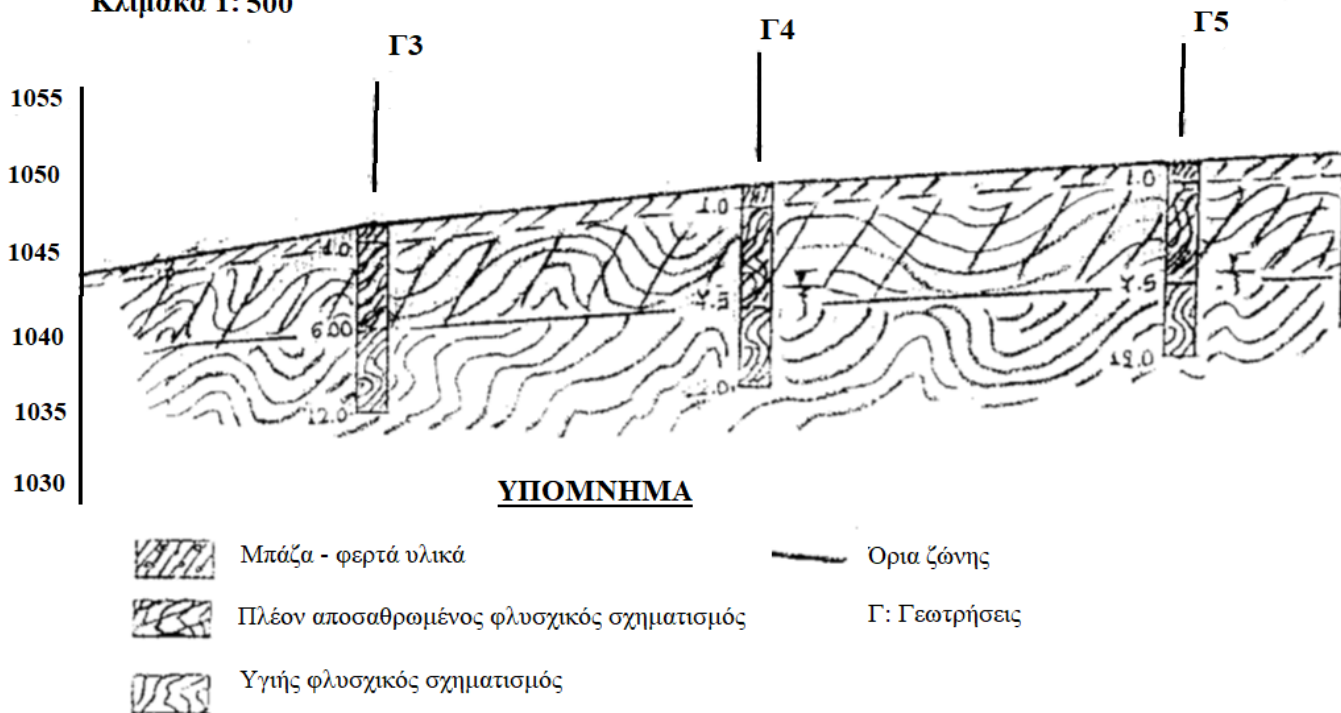
ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ 2 - 2
Κλίμακα 1:250

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

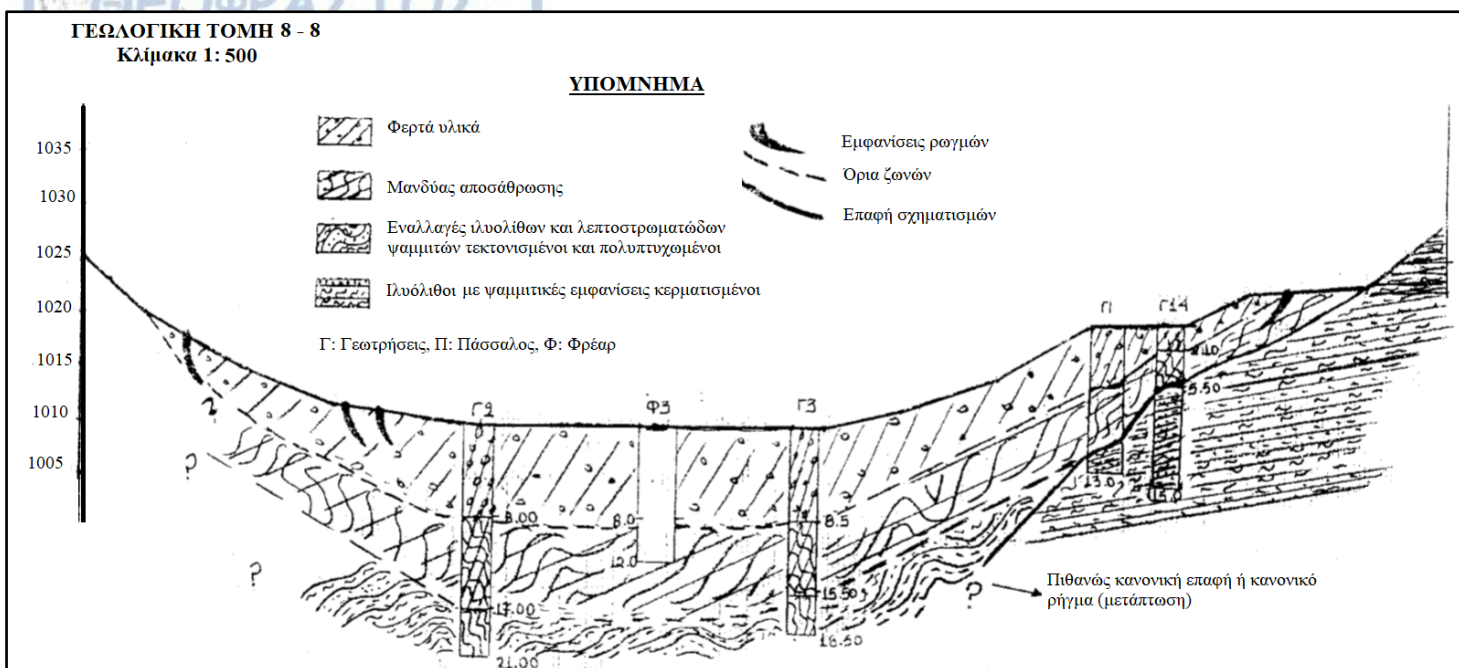


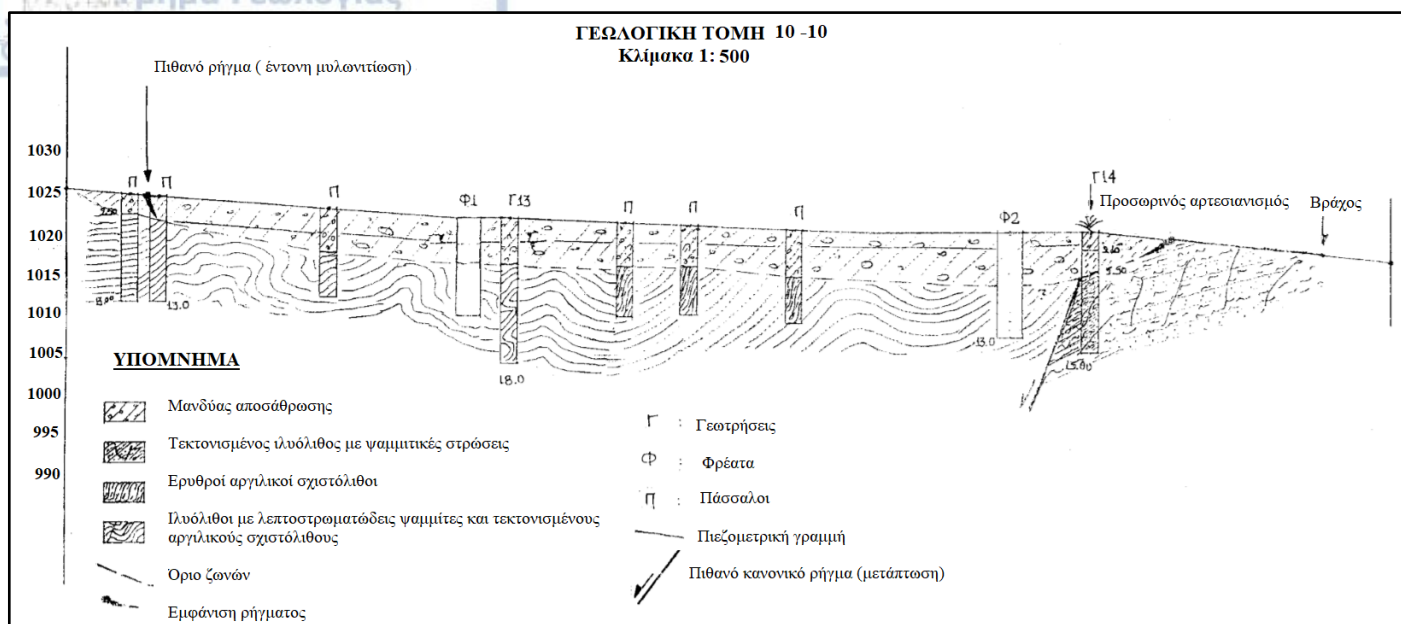
Εικόνα 5. 61 Τομή 2 - 2 (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ 4 - 4
Κλίμακα 1: 500



Εικόνα 5. 62 Τομή 4 - 4 (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε).





Εικόνα 5. 65 Τομή 10 – 10 (στοιχεία από ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.).



ΜΕΡΟΣ Γ΄

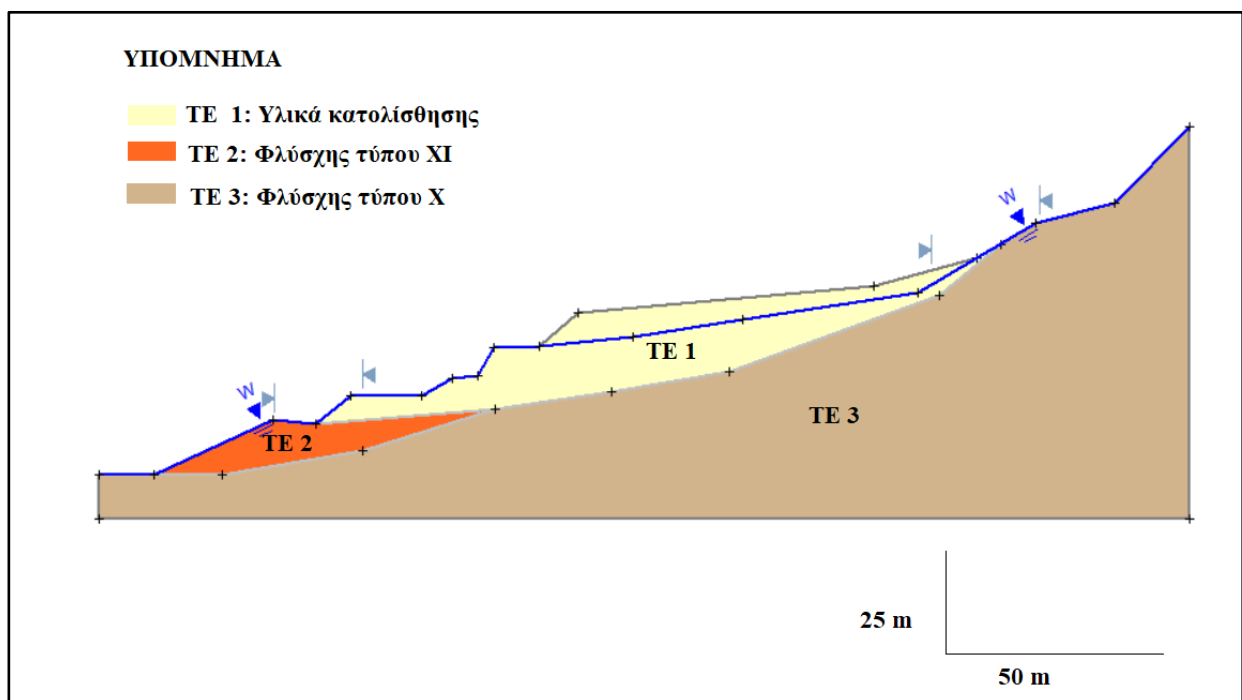
ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ –ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ – ΠΙΘΑΝΑ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Μετά από την επιτόπου αυτοψία και έρευνα στην περιοχή του Ανηλίου, και λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από την επιτόπου αυτοψία, καθώς και από παρατηρήσεις τομών και φύλλων γεωτρήσεων για την κατολίσθηση της δυτικής εισόδου, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο της κατολίσθησης με σκοπό την κατανόηση του φαινομένου και την εκτίμηση του μηχανισμού αστοχίας.

Στο μοντέλο που κατασκευάστηκε (βλ. Εικόνα 6. 1) αποτυπώνεται η επιφάνεια του εδάφους με βάση τη μορφολογία, τα γεωυλικά και ο υδροφόρος ορίζοντας.

Πιο αναλυτικά, με κίτρινο χρώμα σημειώνονται τα υλικά της κατολίσθησης, με κόκκινο χρώμα ο φλύσχης τύπου XI και με καφέ χρώμα ο φλύσχης τύπου X σύμφωνα με τον πίνακα κατάταξης του φλύσχη (Μαρίνος, 2010). Τέλος, με μπλε χρώμα σημειώνεται ο υδροφόρος ορίζοντας.



Εικόνα 6. 1 Μοντέλο κατολίσθησης.

6.1. Τεχνικογεωλογικές ενότητες

Το μοντέλο της κατολίσθησης αποτελείται από τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες:

- Τεχνικογεωλογική ενότητα 1: Υλικά κατολίσθησης



Εικόνα 6. 2 Υλικά κατολίσθησης, άργιλος με χαλίκια και πέτρες

Περιγραφή: Άργιλος ανοικτού καφέ – τεφρού πράσινου χρώματος με χαλίκια και πέτρες, και κατάσταση σχετικά στιφρή μέχρι κατά τόπους σκληρή.

Παράμετροι μηχανικής αντοχής: Για τα υλικά της κατολίσθησης η συνοχή λαμβάνεται ίση με το μηδέν διότι έχει ήδη εκδηλωθεί η αστοχία, ενώ η γωνία τριβής εκτιμήθηκε από παλαιότερες εργαστηριακές δοκιμές άμεσης διάτμησης ίση με 16 μοίρες.

Πίνακας 6. 1 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 1

Φαινόμενο βάρος	0.02 MPa
c	0 MPa
φ	16°

- Τεχνικογεωλογική ενότητα 2: Φλύσχης τύπου XI

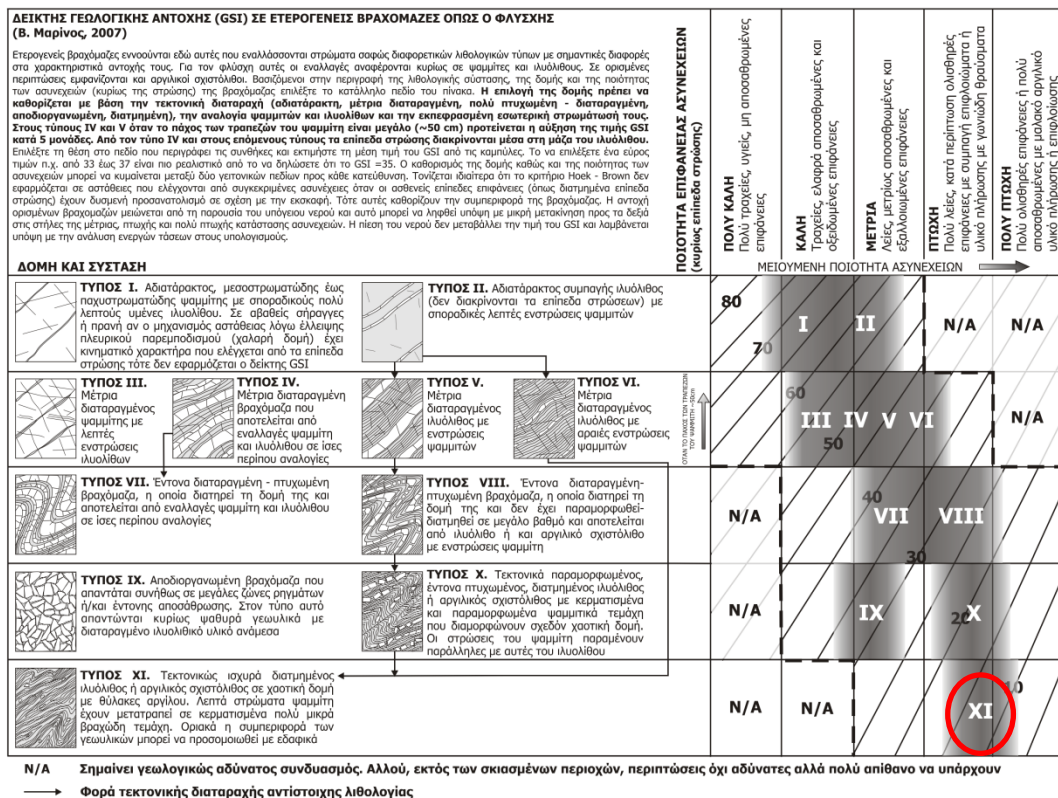


Εικόνα 6. 3 Φλύσχης τύπου XI

Περιγραφή: Ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος και αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική δομή με θύλακες αργίλου, μαζί με λεπτά στρώματα ψαμμίτη που έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Οριακά η συμπεριφορά των γεωυλικών μπορεί να προσομοιωθεί με εδαφικά.

Ποιότητα ασυνεχειών: Πτωχή με πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα.

GSI: Βραχώμαζα τύπου XI με τιμή GSI = 10



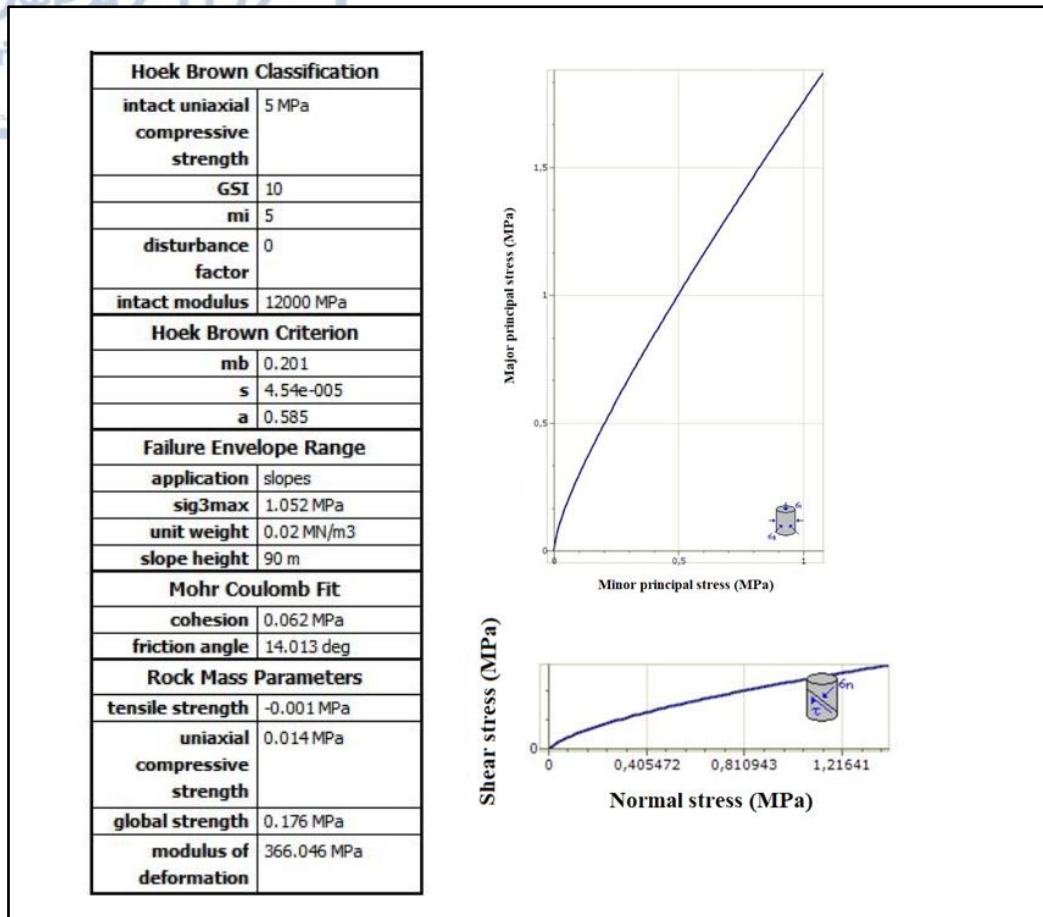
Εικόνα 6. 4 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώδεις όπως ο φλύσχος, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσχη που απαντάται στην περιοχή έρευνας (Μαρίνος, 2010).

Παράμετροι μηχανικής αντοχής: Οι τιμές που δόθηκαν για την συνοχή και την γωνία τριβής της τεχνικογεωλογικής ενότητας 2, εκτιμήθηκαν μέσω του προγράμματος RocData 5.0 (Rocscience Inc.) λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του υλικού όπως αυτές προέκυψαν από την επιτόπου αναγνώριση. Οι τιμές της μονοαξονικής αντοχής σ_{ci} και η σταθερά m_i εκτιμήθηκαν αρκετά χαμηλές λόγω της πολύ φτωχής αντοχής του φλύσχη μετά την έντονη διάτμηση που έχει δεχτεί στο παρελθόν.

Οι τιμές που δόθηκαν μαζί με τις τιμές της συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ που προέκυψαν από την ανάλυση δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6. 2 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 2

σ_{ci}	5 MPa
m_i	5
GSI	10
Φαινόμενο βάρος	0.02 MPa
c	0.062 MPa
ϕ	14°



Εικόνα 6. 5 Διαγράμματα τάσης από την ανάλυση RocData 5.0.

- Τεχνικογεωλογική ενότητα 3: Φλύσξης τύπου X



Εικόνα 6. 6 Φλύσξης τύπου X

Περιγραφή: Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατμημένος ιλυόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή. Οι στρώσεις του ψαμμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιλυόλιθου.

Ποιότητα ασυνεχειών: Πτωχή με πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα.

GSI: Βραχώμαζα τύπου X με τιμή GSI = 15

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (B. Μαρίνος, 2007)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ (κυρίως επίπεδα στρώσεις)		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγρές, μη αποσφραγισμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρώς αποσφραγισμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσφραγισμένες και ερμολογισμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα
ΤΥΠΟΣ I. Αδιατάρακτος, μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικούς πολύ λεπτούς υμένους ιλυόλιθου. Σε αβαθείς σήραγγες ή προνή αν ο μηχανισμός αστάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμποδισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσεις τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI	ΤΥΠΟΣ II. Αδιατάρακτος συμπαγής ιλυόλιθος (δεν διακρίνονται τα επίπεδα στρώσεων) με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών	80	I	II	N/A
ΤΥΠΟΣ III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυόλιθου	ΤΥΠΟΣ IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαζα που αποτελείται από εναλλασσείς ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες	70	III	IV	N/A
ΤΥΠΟΣ V. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμιτών	ΤΥΠΟΣ VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με σπαστές ενστρώσεις ψαμμιτών	60	V	VI	N/A
ΤΥΠΟΣ VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλασσείς ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες	ΤΥΠΟΣ VIII. Έντονα διαταραγμένη-πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί-διατμηθεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο ή και αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις ψαμμιτών	50	VII	VIII	N/A
ΤΥΠΟΣ IX. Αποδιοργανωμένη βραχώμαζα που απαντάται συνήθως σε μεγάλους ζώνες ρηγματών ή/και έντονης αποσάθρωσης. Στον τύπο αυτό απαντώνται κυρίως ψαθούρα γεωυλικά με διαταραγμένο ιλυόλιθικό υλικό ανώμεσο	ΤΥΠΟΣ X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή. Οι στρώσεις του ψαμμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιλυόλιθου	40	IX	X	N/A
ΤΥΠΟΣ XI. Τεκτονικά ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα ψαμμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Ορισικά ή συμπεριφορά των γεωυλικών μπορεί να προσεγγιστεί με εδοφικά		30	XI		N/A
N/A	Σημειώνει γεωλογικούς αδύνατους συνδυασμούς. Αλλού, εκτός των σκιασμένων περιοχών, περιπτώσεις όχι αδύνατες αλλά πολύ απίθανο να υπάρχουν	20			
→ Φορά τεκτονικής διαταραχής αντίστοιχης λιθολογίας		10			

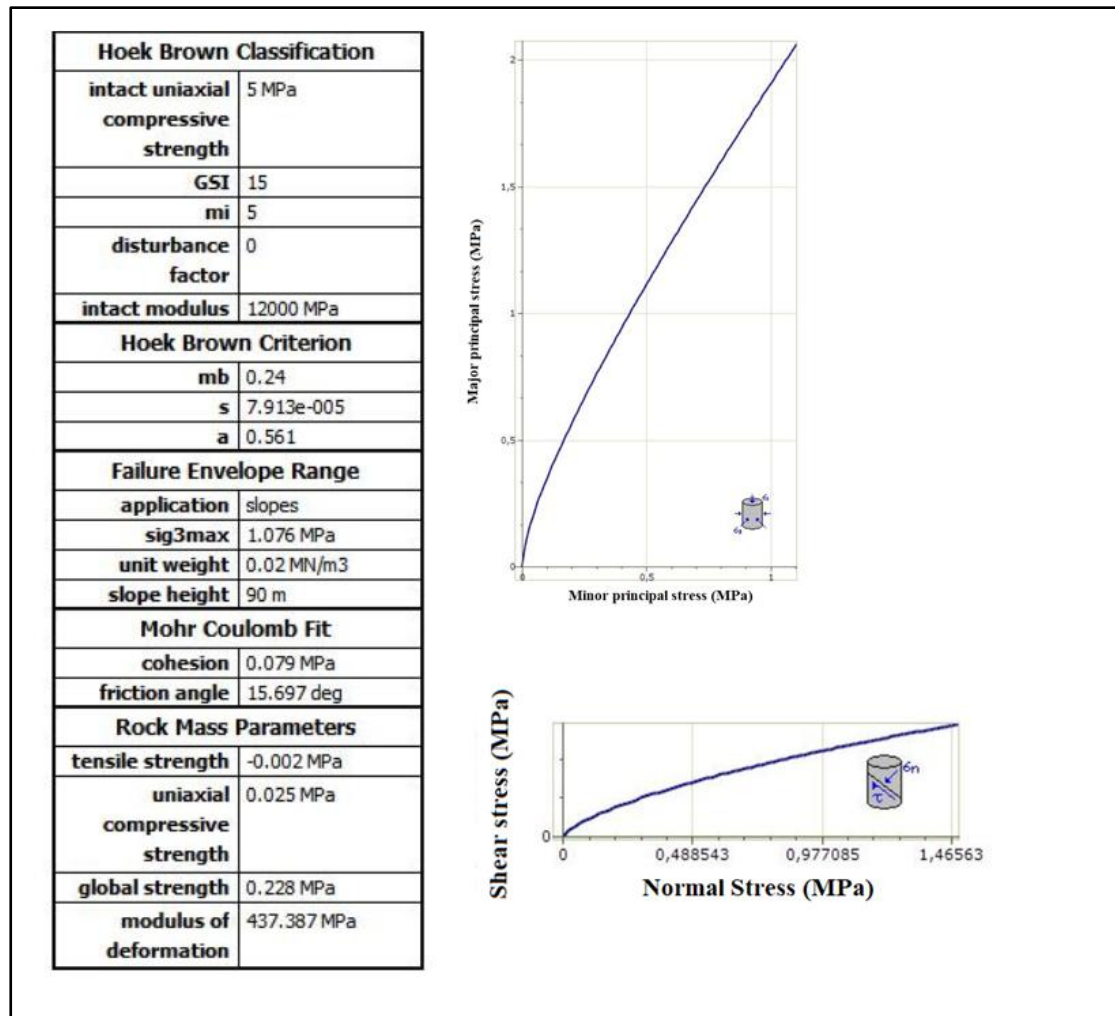
Εικόνα 6. 7 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσσης, με κόκκινο σημειώνεται η τιμή GSI του τύπου φλύσσης που απαντάται στην περιοχή έρευνας (Μαρίνος, 2010).

Παράμετροι μηχανικής αντοχής: Οι τιμές που δόθηκαν για την συνοχή και την γωνία τριβής της τεχνικογεωλογικής ενότητας 3, εκτιμήθηκαν και αυτές μέσω του προγράμματος RocData 5.0 (Rocscience Inc.) λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του υλικού όπως αυτές προέκυψαν από την επιτόπου αναγνώριση. Οι τιμές της μονοαξονικής αντοχής σ_{ci} και η σταθερά m_i εκτιμήθηκαν αρκετά χαμηλές λόγω της πολύ φτωχής αντοχής του φλύσσης μετά την έντονη διάτμηση που έχει δεχτεί στο παρελθόν.

Οι τιμές που δόθηκαν μαζί με τις τιμές της συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ που προέκυψαν από την ανάλυση δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6. 3 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 3

σ_{ci}	5 MPa
m_i	5
GSI	15
Φαινόμενο βάρος	0.02 MPa
c	0.079 MPa
φ	16°



Εικόνα 6. 8 Διαγράμματα τάσης από την ανάλυση RocData 5.0.

Πίνακας 6. 4 Συνοπτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.

Παράμετροι αντοχής	Τεχνικογεωλογική ενότητα 1	Τεχνικογεωλογική ενότητα 2	Τεχνικογεωλογική ενότητα 3
σ_{ci}	-	5 MPa	5 MPa
m_i	-	5	5
GSI	-	10	15
Φαινόμενο βάρος	0.02 MPa	0.02 MPa	0.02 MPa
c	0 MPa	0.062 MPa	0.079 MPa
φ	16°	14°	16°

6.2. Υπόγειος ορίζοντας

Η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρέθηκε πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και σε μερικά σημεία εμφανιζόταν στην επιφάνεια.

6.3. Μηχανισμός αστοχίας

Τα κύρια αίτια αστοχίας στην περιοχή έρευνας, που χαρακτηρίζεται ως ζώνη υψηλής κατολισθητικής επικινδυνότητας, είναι τα παρακάτω:

Η περιοχή της κατολίσθησης δομείται εξ ολοκλήρου από φλύσχη. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή έρευνας εμφανίζονται δύο τύποι φλύσχη. Ο πρώτος φλύσχη (φλύσχη τύπου X) εμφανίζεται τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος και αποτελείται από ισχυρά διατμημένους ιλυολίθους μαζί με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχη, που διαμορφώνουν μια σχεδόν χαοτική δομή. Ο δεύτερος φλύσχη (φλύσχη τύπου XI) εμφανίζεται ως ένας ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική μορφή, μαζί με λεπτά στρώματα ψαμμίτη που έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχη.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι ο φλύσχη της περιοχής αποτελεί έναν πολύ διατμημένο φλύσχη με πολύ πτωχή ποιότητα.

Επίσης, εξαιτίας της έντονης τεκτονικής καταπόνησης του, εμφανίζει ρωγμές και διακλάσεις μέσα από τις οποίες εισέρχεται νερό και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση της ποιότητας των υλικών και την αποσάθρωσή τους. Επιπλέον, τα αργιλικά-ιλυολιθικά μέλη του συγκρατούν το νερό στην δομή τους και αυτό δεν ρέει και δεν αποστραγγίζεται εύκολα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται πιέσεις πόρων που προστίθενται στις δυνάμεις αστάθειας και λειτουργούν ενάντια στην σταθερότητα.

Συμπερασματικά στην περιοχή έρευνας κατολισθαίνει φλύσχη. Ένας πολύ διατμημένος φλύσχη τύπου X και XI που λόγω πολύ πτωχής ποιότητας και μηχανικών παραμέτρων και σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις, έδωσε αυτές τις κατολισθήσεις.

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Μετά την κατασκευή του μοντέλου της κατολίσθησης, ακολούθησε η ανάλυση ευστάθειας έτσι ώστε να εκτιμηθεί ο συντελεστής ασφαλείας της.

Για την ανάλυση της κατολίσθησης χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Slide 5.0 και RocData 5.0 (Rocscience Inc.).

Οι τιμές που δόθηκαν στη συνοχή και στη γωνία τριβής για τους δύο τύπους φλύσχη εκτιμήθηκαν μέσω του προγράμματος RocData 5.0 (Rocscience Inc.) λαμβάνοντας υπόψη τη τεχνικογεωλογική αξιολόγηση, ενώ για τα υλικά της κατολίσθησης η συνοχή λήφθηκε ίση με μηδέν, διότι έχει ήδη εκδηλωθεί η αστοχία, ενώ η γωνία τριβής εκτιμήθηκε από εργαστηριακές δοκιμές άμεσης διάτμησης ίση με 16 μοίρες.

Στη συνέχεια και αφού εισήχθησαν τα όλα τα παραπάνω στο πρόγραμμα Slide, ακολούθησαν τρεις αναλύσεις στις οποίες η συνοχή (c) και η γωνία τριβής (φ) των γεωυλικών διατηρούνταν σταθερή και μεταβαλλόταν μόνο η πίεση πόρων (Ru) με τιμές 0.15, 0.20, 0.25 έτσι ώστε να εκτιμηθεί η πολύ σημαντική παρουσία και συμβολή του νερού στην εξέλιξη του φαινομένου.

Ο συντελεστής πίεσης Ru εκφράζει: Τον λόγο της πίεσης του νερού των πόρων $u = \gamma_w \cdot Z_w$ προς την κατακόρυφη ολική τάση του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων και δίνεται από την σχέση:

$$Ru = \Delta u / \Delta \sigma$$

7.1. Παράμετροι υλικών – αναλύσεις – συντελεστής ασφαλείας

- **Τεχνικογεωλογική ενότητα 1:** Υλικά κατολίσθησης

Πίνακας 7. 1 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 1

Φαινόμενο βάρος	0.02 MPa
c	0 MPa
φ	16°
Ru	0.15, 0.20, 0.25

- Τεχνικογεωλογική ενότητα 2: Φλύσξης τύπου XI

Πίνακας 7. 2 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 2

σ_{ci}	5 MPa
m_i	5
GSI	10
Φαινόμενο βάρος	0.02 MPa
c	0.062 MPa
ϕ	14°
Ru	0.12

- Τεχνικογεωλογική ενότητα 3: Φλύσξης τύπου X

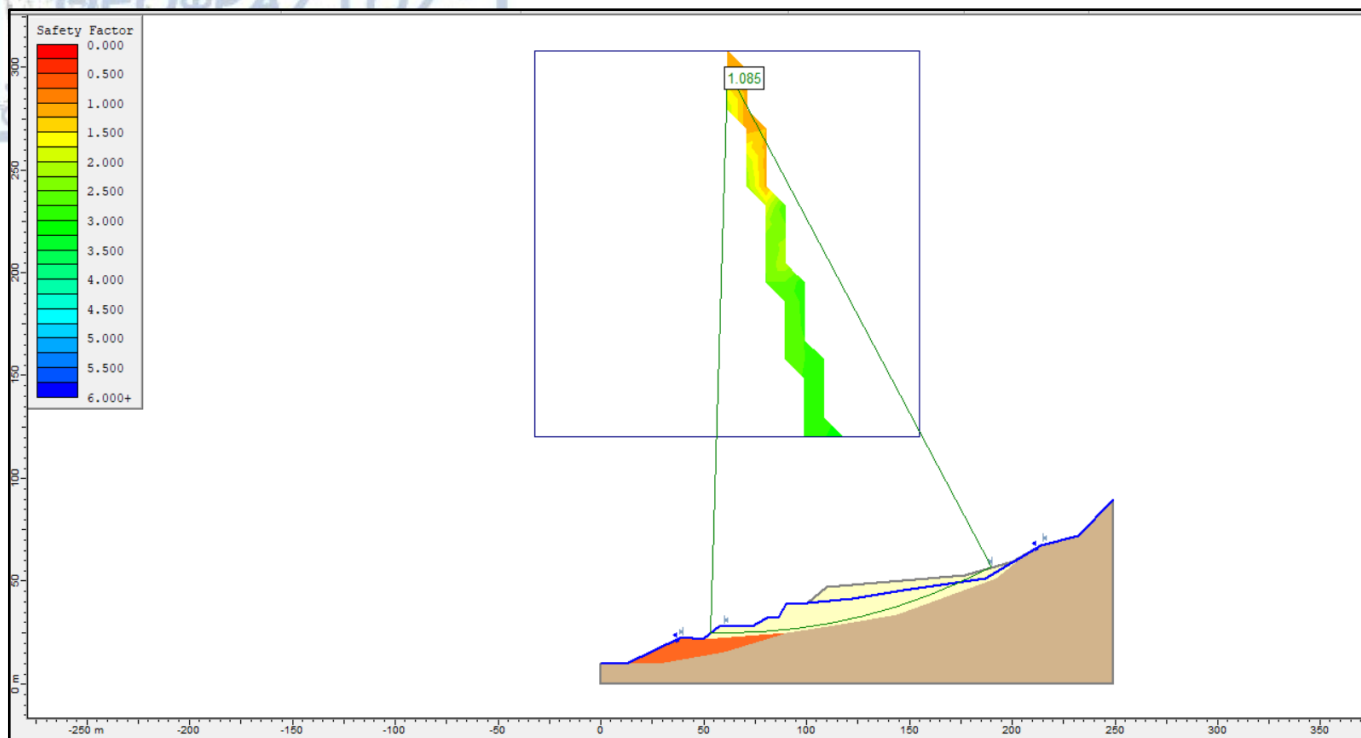
Πίνακας 7. 3 Παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικής ενότητας 3

σ_{ci}	5 MPa
m_i	5
GSI	15
Φαινόμενο βάρος	0.02 MPa
c	0.079 MPa
ϕ	16°
Ru	0.10

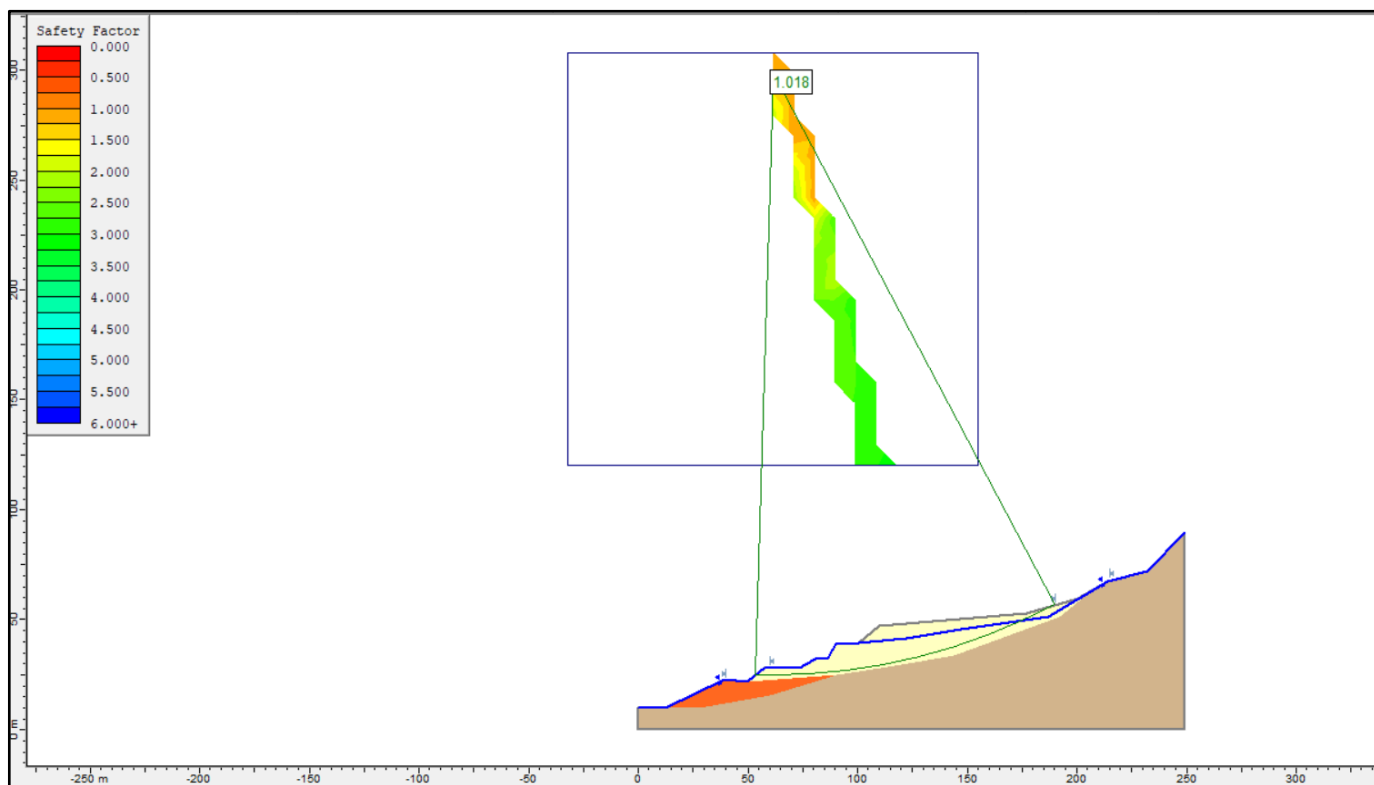
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7. 4 Αναλυτικά οι παράμετροι των γεωυλικών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα Slide 5.0 και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας ανά γεωτεχνική ανάλυση.

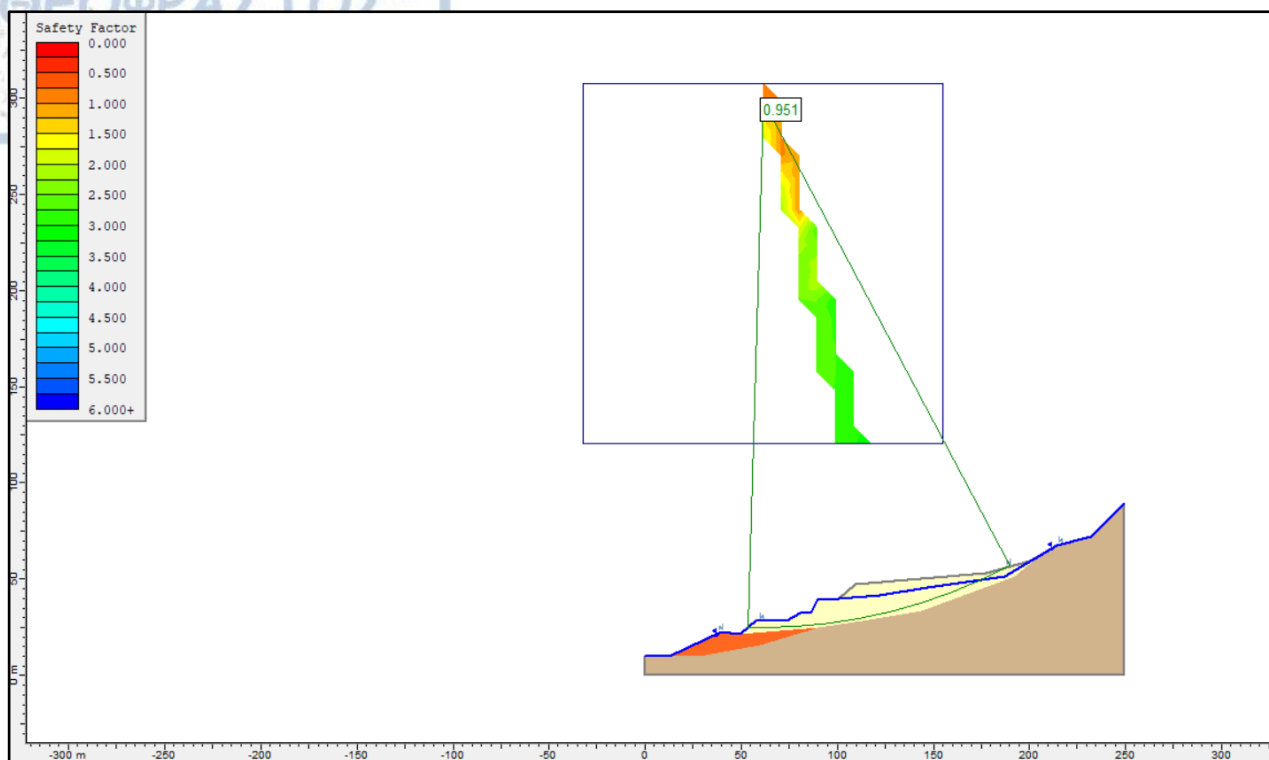
	Τεχνικογεωλογική ενότητα	Συνοχή (c) (Cohesion) σε kN /m ²	Γωνία τριβής (ϕ) (Phi) σε μοίρες (°)	Ru (πίεση πόρων)	Συντελεστής ασφαλείας F
Ανάλυση 1	1	0	16	0.15	1.085
	2	62	14	0.12	
	3	79	16	0.10	
Ανάλυση 2	1	0	16	0.20	1.018
	2	62	14	0.12	
	3	79	16	0.10	
Ανάλυση 3	1	0	16	0.25	0.951
	2	62	14	0.12	
	3	79	16	0.10	



Εικόνα 7. 1 Ανάλυση ευστάθειας όπου ο συντελεστής R_u της πίεσης πόρων ισούται με 0.15.



Εικόνα 7. 2 Ανάλυση ευστάθειας όπου ο συντελεστής R_u της πίεσης πόρων ισούται με 0.20.



Εικόνα 7.3 Ανάλυση ευστάθειας όπου ο συντελεστής R_u της πίεσης πόρων ισούται με 0.25.

Από τις παραπάνω αναλύσεις παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η πίεση πόρων ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται, διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.

Επίσης, παρατηρούμε ότι στην καλύτερη περίπτωση με συντελεστή ασφαλείας 1.018 προκύπτουν συνθήκες οριακής ευστάθειας, άρα κίνδυνος εκδήλωσης κατολίσθησης.

Ο κύκλος ολίσθησης που προέκυψε σημειώνεται με πράσινο χρώμα και εμφανίζεται να περνάει κοντά από το φρύδι και το πόδι της κατολίσθησης. Το βάθος ολίσθησης υπολογίστηκε της τάξης των 25 m.

Συνεπώς, ο λόγος που προκλήθηκε η αστοχία πρέπει να είναι η έντονη βροχόπτωση δηλαδή η αύξηση της πίεσης των πόρων στον έντονα διατμημένο φλύσχη.

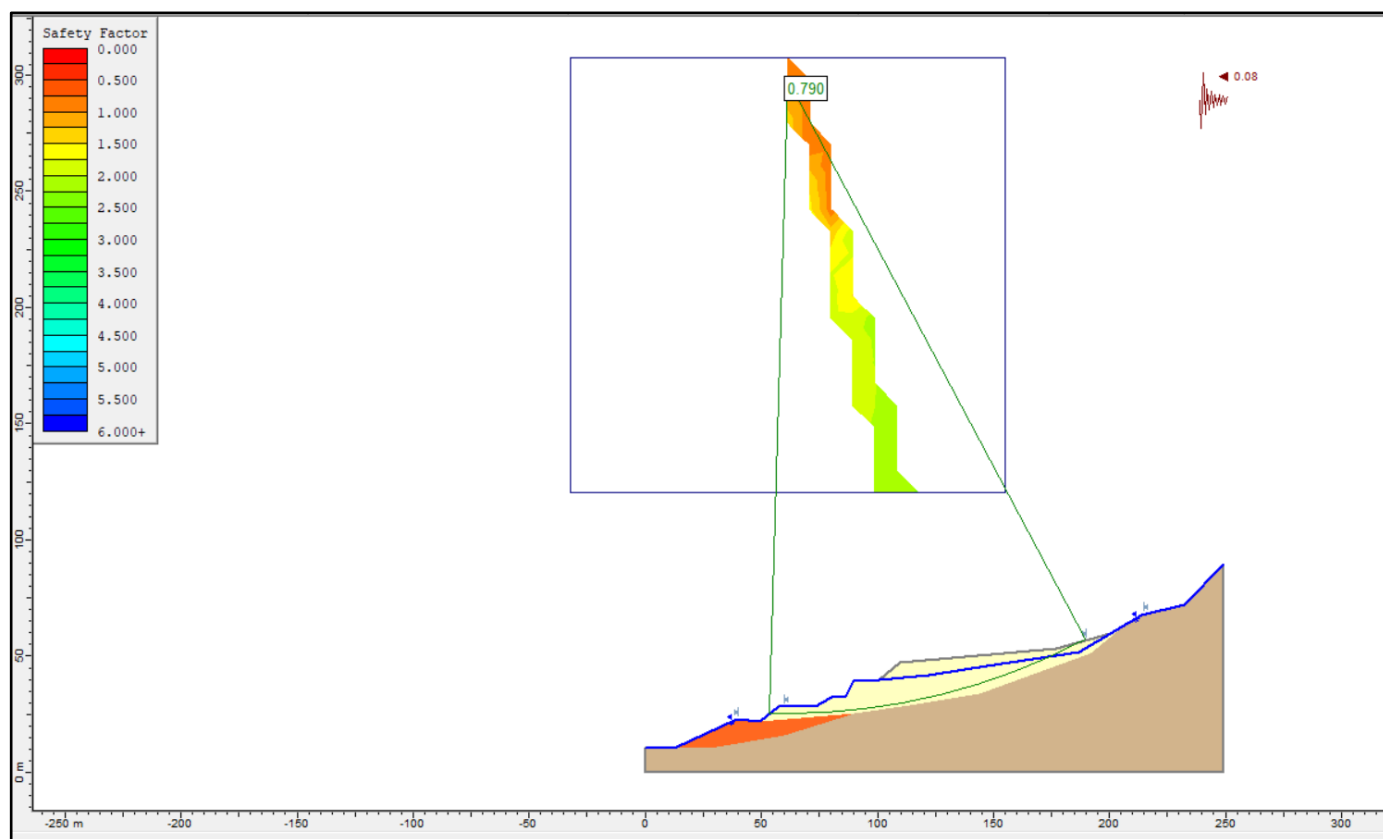
7.2. Μελέτη με πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση της τάξης 0.08

Στην συνέχεια, ακολούθησαν τρεις ακόμη αναλύσεις ευστάθειας με πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση ως προς το οριζόντιο επίπεδο της τάξης 0.08 για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας σε συνθήκες σεισμού.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7. 5 Αναλυτικά οι παράμετροι των γεωυλικών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα Slide 5.0 και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας ανά γεωτεχνική ανάλυση με πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση.

Σεισμική επιβάρυνση 0.08	Τεχνικογεωλογική ενότητα	Συνοχή (c) (Cohesion) σε kN /m ²	Γωνία τριβής (φ) (Phi) σε μοίρες (°)	Ru (πίεση πόρων)	Συντελεστής ασφαλείας F
Ανάλυση 1	1	0	16	0.15	0.790
	2	62	14	0.12	
	3	79	16	0.10	
Ανάλυση 2	1	0	16	0.20	0.740
	2	62	14	0.12	
	3	79	16	0.10	
Ανάλυση 3	1	0	16	0.25	0.689
	2	62	14	0.12	
	3	79	16	0.10	



Εικόνα 7. 4 Ανάλυση ευστάθειας με σεισμική επιβάρυνση 0.08 όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.15.



Από τις παραπάνω αναλύσεις παρατηρούμε ότι και για τις τρεις περιπτώσεις πίεσης πόρων ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρός (< 1) και μειώνεται ακόμα παραπάνω με την αύξηση της πίεσης.

Συνεπώς, με την εφαρμογή της σεισμικής επιβάρυνσης δεν υπάρχει ισορροπία και προκαλείται αστοχία και για τις τρεις τιμές της πίεσης πόρων.

7.3. Συμπεράσματα αναλύσεων

Εξαιτίας της πτωχής ποιότητας των σχηματισμών αλλά και της έντονης βροχόπτωσης στη περιοχή μελέτης, εκδηλώθηκε περιστροφική ολίσθηση.

Η επίδραση του νερού στην εκδήλωση της αστοχίας αυτής επιβεβαιώθηκε από την ανωτέρα ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Slide 5.0, όπου εκτελέστηκαν τρεις αναλύσεις και παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής ασφαλείας μειωνόταν όσο αυξανόταν ο συντελεστής R_u της πίεσης των πόρων διατηρώντας παράλληλα τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής (ϕ) των γεωυλικών σταθερή.

Ο κύκλος ολίσθησης που προέκυψε από την ανάλυση σημειώνεται με πράσινο χρώμα και περνάει κοντά από το φρύδι και το πόδι της κατολίσθησης, ενώ το βάθος ολίσθησης υπολογίστηκε της τάξης των 25 m.

Από την ανάλυση αυτή, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και ο κύκλος ολίσθησης που προέκυψε προσομοιάζουν πολύ καλά το μοντέλο της κατολίσθησης και τα όρια της, όπως χαρτογραφήθηκαν στην ύπαιθρο σε συνδυασμό με τα δεδομένα των γεωτρήσεων.

Τέλος, όσον αφορά την μετέπειτα ανάλυση με την πρόσθετη σεισμική επιβάρυνση του πρανούς, της τάξης 0.08 ως προς το οριζόντιο επίπεδο, και για τις τρεις περιπτώσεις πίεσης πόρων, το πρανές αστοχούσε και πάλι με την τιμή του συντελεστή ασφαλείας να είναι πολύ μικρότερη απ' ότι στην πρώτη ανάλυση που για τιμές $R_u = 0.15, 0.20$ ισορροπούσε οριακά.

8. ΠΙΘΑΝΑ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

Με βάση τις παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας της κατολίσθησης της δυτικής εισόδου του Ανηλίου, για την σταθεροποίηση της περιοχής θα πρέπει να επιχειρηθεί ένας συνδυασμός επεμβάσεων. Αυτό γιατί, η επικινδυνότητα εκδήλωσης αστοχίας είναι υψηλή (οριακή ισορροπία $F=1$) και οι συνέπειες από μια τυχόν κατολίσθηση θα ήταν εξαιρετικά σοβαρές.

Σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς για έργα σταθεροποίησης κατολισθήσεων, με την εφαρμογή των μέτρων αντιστήριξης ο συντελεστής ασφαλείας θα πρέπει να βελτιώνεται τουλάχιστον μέχρι την τιμή 1.2 (από 1.2 – 1.3).

Στην υπό μελέτη κατολίσθηση, η ισορροπία εμφανίζει μια έντονη ευαισθησία στην παρουσία του νερού και συγκεκριμένα στις βροχοπτώσεις. Ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται καθώς αυξάνεται η πίεση των πόρων (βλ. πίνακα 7.4).

Από τα παραπάνω κρίνεται αναγκαία η κατασκευή αποστραγγιστικών έργων, έτσι ώστε να εκτονωθούν οι πιέσεις στην στενή περιοχή της κατολίσθησης, και κατά συνέπεια να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας και να επέλθει η ισορροπία. Βέβαια, για την σωστή επιλογή των αποστραγγιστικών έργων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η γεωμορφολογία, η στρωματογραφία, οι διαπερατότητες των σχηματισμών, η έκταση της κατολίσθησης καθώς και ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου, έτσι ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα σε όσο πιο γρήγορο χρονικό διάστημα γίνεται.

Στην περίπτωση μας, για την ταπείνωση του υδροφόρου και την εκτόνωση των πιέσεων με βάση τα προαναφερθέντα στοιχεία της κατολίσθησης, θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα δίκτυο φρεάτων αποστράγγισης, μια σήραγγα αποστράγγισης, στοές και πολλές μικρές αποστραγγιστικές οπές, έτσι ώστε να επιτευχθεί ένα γρήγορο και τεχνικά ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Όμως, για να υπάρχει η δυνατότητα εντατικότερης άντλησης και να επιτευχθεί μια καλή και μακροχρόνια κυκλοφορία του νερού μέσα στα αποστραγγιστικά έργα, θα πρέπει να γίνει μια σωστή διαστασιολόγηση των προτεινόμενων έργων, καθώς επίσης, και έλεγχος της μέγιστης επιτρεπόμενης παροχής του νερού μέσα στο σύστημα αποστράγγισης.

Εκτός από έργα αποστράγγισης, για την επίτευξη της ισορροπίας συνήθως κρίνονται απαραίτητα και χωματουργικά έργα, δηλαδή έργα διαμόρφωσης της γεωμετρίας της κατολίσθησης, καθώς και κατασκευή αντίβαρου στον πόδα έτσι ώστε να ενισχυθεί και να επιτευχθεί η ισορροπία.

Στην υπό μελέτη κατολίσθηση, προτείνεται η κατασκευή αντίβαρου στο πόδι της κατολίσθησης, όμως επειδή το πόδι της βρίσκεται κοντά στο ρέμα του Μετσοβίτικου ποταμού, απαιτείται λεπτομερής ειδική περιβαλλοντική μελέτη. Επίσης, η σταθερότητα της περιοχής μπορεί να επιτευχθεί και με την εφαρμογή ενεργητικών μέτρων αντιστήριξης και τεχνητής ενίσχυσης του εδάφους όπως την κατασκευή κάποιων δικτύων από πασσάλους και αγκύρια και την επένδυση ορισμένων θέσεων αυξημένου κινδύνου, με εκτοξευμένο σκυρόδεμα.

Βέβαια, κατά τον σχεδιασμό των μέτρων αυτών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:

Αρχικά θα πρέπει να ελεγχτούν τα χαρακτηριστικά της κίνησης και κυρίως η έκταση και το βάθος της κατολίσθησης. Στη συνέχεια, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι θέσεις που έχουν ανάγκη αυξημένης προστασίας και τέλος, θα πρέπει να γίνει έλεγχος επάρκειας της συνολικής αντοχής που προσφέρουν τα συγκεκριμένα έργα, αλλά και η διάταξη με την οποία θα τοποθετούν στη περιοχή της κατολίσθησης.

Συμπερασματικά σε μία τέτοια κατολίσθηση αυτό που χρειάζεται είναι ο έλεγχος των νερών με την κατασκευή αποστραγγιστικών έργων, χωματουργικά έργα για την διαμόρφωση και εξομάλυνση της γεωμετρίας, τοποθέτηση αντίβαρου για την ενίσχυση του πόδα της κατολίσθησης και εφαρμογή ενεργητικών μέτρων αντιστήριξης και τεχνητής ενίσχυσης του εδάφους σε θέσεις με αυξημένο κίνδυνο. Βέβαια τα ενεργητικά μέτρα είναι δύσκολο να εφαρμοστούν, καθώς ο κύκλος ολίσθησης φαίνεται να είναι βαθύς και οι πάσσαλοι πιθανόν να μην είναι εφικτοί.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και ανάλυση ευστάθειας της περιοχής του Ανηλίου δίνοντας έμφαση κυρίως σε δύο περιοχές με την μεγαλύτερη ένδειξη αστάθειας, στην ανατολική και δυτική είσοδο του χωρίου. Η έρευνα έγινε λαμβάνοντας υπόψη μια μεγάλη ποικιλία πηγών, όπως επιστημονικά άρθρα, τεχνικές εκθέσεις, επιστημονικά έγγραφα από πανεπιστημιακές βιβλιοθήκες, το διαδίκτυο και εφημερίδες, αλλά και από την επιτόπου γεωλογική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της περιοχής.

Επίσης, για την κατανόηση και διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος UAV όπου εξήχθησαν δύο εικόνες για την κάθε περιοχή. Μια εικόνα που ονομάζεται ορθομωσαϊκό και αποτελεί την σύνθεση όλων των εικόνων που λήφθηκαν, δίνοντας την συνολική εικόνα της περιοχής που καλύφθηκε, και μια εικόνα DSM (Digital Surface Model) που δίνει την μορφολογία της περιοχής αποτυπώνοντας το υψόμετρο. Τέλος, και για τις δύο περιοχές παράχθηκε και το αντίστοιχο 3D μοντέλο. Για την έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε πλατφόρμα UAV μοντέλο DJI Phantom 3 Professional.

Στην συνέχεια, επιλέχθηκε η κατολίσθηση της δυτικής εισόδου του Ανηλίου, δεδομένου ότι υπήρχαν στοιχεία γεωτρήσεων αλλά και εργαστηριακές δοκιμές για τα υλικά της κατολίσθησης, όπου εξετάστηκε επιτόπου με σκοπό την εύρεση των γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών. Από την έρευνα προέκυψαν συμπεράσματα που αφορούν την γεωμορφολογία, την στρωματογραφία, το είδος και τον τύπο των σχηματισμών, την έκταση της κατολίσθησης καθώς και ο μηχανισμός της.

Μετά από την επιτόπου αυτοψία και έρευνα στην περιοχή, και λαμβάνοντας υπόψη παρατηρήσεις τομών και φύλλων γεωτρήσεων για την κατολίσθηση, δημιουργήθηκε το μοντέλο της κατολίσθησης με σκοπό την κατανόηση του φαινομένου.

Το υπόβαθρο του μοντέλου της κατολίσθησης απαντάται αποκλειστικά από φλύσχη. Όμως, βάσει τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης ο φλύσχης χωρίζεται σε δυο τεχνικογεωλογικούς τύπους. Ο πρώτος τεχνικογεωλογικός τύπος είναι ο φλύσχης τύπου XI, δηλαδή ένας ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος και αργιλικός σχιστόλιθος με χαοτική δομή και θύλακες αργίλου, μαζί με λεπτά στρώματα ψαμμίτη που έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια.

Η δομή του σε συνδυασμό με την πτωχή ποιότητα των ασυνεχειών του, υποβαθμίζουν την ποιότητα και αντοχή της βραχώμαζας και της δίνουν μια τιμή GSI από τον πίνακα κατάταξης του φλύσχη της τάξης του 10. Ο δεύτερος τεχνικογεωλογικός τύπος είναι ο φλύσχης τύπου X, δηλαδή ένας τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατμημένος ιλυόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαοτική δομή. Η δομή του σε συνδυασμό με την πτωχή ποιότητα των ασυνεχειών του, υποβαθμίζουν την ποιότητα και αντοχή της βραχώμαζας και της δίνουν μια τιμή GSI από τον πίνακα κατάταξης του φλύσχη της τάξης του 15 – 20. Τέλος, στο μοντέλο εισήχθησαν και τα υλικά κατολίσθησης, αποτελούμενα κυρίως από άργιλο με χαλίκια και πέτρες με πολύ πτωχές μηχανικές ιδιότητες.

Έπειτα, προσδιορίστηκε ο μηχανισμός αστοχίας της περιοχής που οφείλεται στον πολύ διατμημένο φλύσχη, τύπου X και XI στον πίνακα GSI, που λόγω πολύ πτωχής ποιότητας και μηχανικών παραμέτρων και σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις, έδωσε κατολισθήσεις.

Μετά από την κατασκευή του μοντέλου, με την χρήση του λογισμικού RocData 5.0 (Rocscience Inc.) και την εφαρμογή του τύπου Hoek – Brown εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών του υποβάθρου (φλύσχης τύπου XI και X), ενώ από στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης που έλαβαν χώρα στο παρελθόν εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των υλικών κατολίσθησης. Στην συνέχεια, με την χρήση του προγράμματος Slide 5.0 (Rocscience Inc.) έγινε ανάλυση ευστάθειας της περιοχής για διαφορετικές τιμές πίεσης πόρων, έτσι ώστε να προσομοιωθεί η πολύ σημαντική παρουσία και συμβολή του νερού στην εξέλιξη του φαινομένου, και εκτιμήθηκε ο συντελεστής ασφαλείας. Από τις τρεις αναλύσεις παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής ασφαλείας μειωνόταν όσο αυξανόταν ο συντελεστής Ru της πίεσης των πόρων διατηρώντας παράλληλα τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής (φ) των γεωυλικών σταθερή. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι στην καλύτερη περίπτωση με συντελεστή ασφαλείας 1.018 προκύπταν συνθήκες οριακής ευστάθειας, άρα κίνδυνος εκδήλωσης κατολίσθησης. Ο κύκλος ολίσθησης που προέκυψε από την ανάλυση περνάει κοντά από το φρύδι και το πόδι της κατολίσθησης, ενώ το βάθος ολίσθησης υπολογίστηκε της τάξης των 25 m. Από τις αναλύσεις παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και ο κύκλος ολίσθησης που προέκυψε προσομοιάζουν πολύ καλά το μοντέλο της κατολίσθησης και τα όρια της, όπως χαρτογραφήθηκαν στην ύπαιθρο σε συνδυασμό με τα δεδομένα των γεωτρήσεων.

Τέλος, η επικινδυνότητα εκδήλωσης της κατολίσθησης εκτιμήθηκε υψηλή (οριακή ισορροπία $F=1$) και για αυτό το λόγο, με βάση τις παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας, για την σταθεροποίηση της χρειάζεται έλεγχος των νερών με την κατασκευή αποστραγγιστικών έργων, χωματουργικά έργα για την διαμόρφωση και εξομάλυνση της γεωμετρίας της, τοποθέτηση αντίβαρου για την ενίσχυση του πόδα της και εφαρμογή ενεργητικών μέτρων αντιστήριξης και τεχνητής ενίσχυσης του εδάφους σε θέσεις με αυξημένο κίνδυνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Arbanas, (2006). Causes of debris flow formation in flysch area of North Istria, Croatia. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 90.

Christaras, Chatziangelou. (2005). Influence of rainwater on slope stability at the Asprovalta - Strymonas part of Egnatia highway. Freund Publishing House Ltd, 16.

Colomina. (2014, June). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 92, June 2014, Pages 79-97.

Cruden. (1991). A Simple Definition of Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, σ.σ. 27 - 29.

Dikau et al. (1996). Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. Chichester: Wiley & Sons.

Duncan et al. (1992). Soil strengths from back analysis of slope failures. Proc., Stability and Performance of Slopes and Embankments II, (σ.σ.. 890-904). New York.

Guzzetti. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Article in Earth-Science Reviews 112:42-66.

Highland L, Bobrowsky. (2008). The landslide handbook: a guide to understanding landslides. Reston: US Geological Survey.

Hutchinson, (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides., (σ.σ. 3-35). Rotterdam.

Lin et al. (2017). Landslide Identification and Information Extraction Based on Optical and Multispectral UAV Remote Sensing Imagery. International Symposium ON Earth Observation for One Belt and One Road (EOBAR). Earth and Environmental Science.

Marco Scaioni, (2014, October 14). Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. Remote Sensing.

Marinos, Hoek, (2011). Estimating the geotechnical properties of a heterogeneous rock mass such as flysch. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, σ.σ. 82 - 92.

Marinos, (2017). A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. Bulletin Eng Geol Environ DOI 10.1007/s10064-017-1151-z.



Remondino, (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.

Riedmuller et al. (2002, Φεβρουάριος 20). Prediction of Support for the Preliminary Design of the Anilio Tunnel (Egnatia Motorway).

Scaioni, (2014, October). Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China.

Terzaghi, (1950). Mechanisms of Landslides. Geotechnical Society of America, σσ. 83 - 125.

Varnes, (1978). Slope Movements and Types and Processes, Landslide Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report, σ.σ. 11 - 33.

Westoby, (2012, December). Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Article in Geomorphology 179:300-314.

Αστάρας, (2011). Τηλεπισκόπηση - Φωτοερμηνεία στις Γεωεπιστήμες. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αϊβάζη.

Βουδούρης, (2013). Τεχνική υδρογεωλογία - Υπόγεια νερά. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις: Τζιόλα.

Γεώγνωση Α.Ε, (1990). Χάρτες, φύλλα γεωτρήσεων και τεχνικές εκθέσεις. Γεωλογική μελέτη: Κατολίσθηση στο ανατολικό μέτωπο της σήραγγας του Ανηλίου.

Κίλιας, (2009). Εισαγωγή στην Τεκτονική Γεωλογία. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις: Όλυμπος.

Κούκης, Σαμπατακάκης, (2007). Γεωλογία Τεχνικών Έργων. Αθήνα: Εκδόσεις: Παπασωτηρίου.

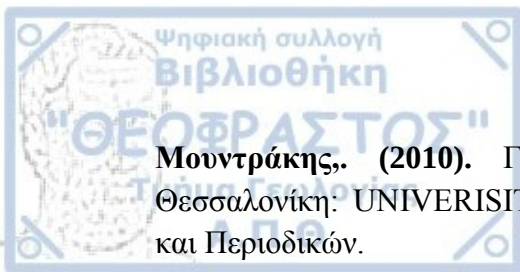
Κουμαντάκης, (1975). Συμπεριφορά φλύσχη σε έργα οδοποιίας. Αθήνα.

Κουμαντάκης, (2011, Μάιος). Τα κατολισθητικά φαινόμενα του Μετσόβου.

Μαρίνος, (2007). Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά την διάνοιξη σηράγγων. Διδακτορική διατριβή.

Μαρίνος, (2010). Νέο, αναθεωρημένο, σύστημα γεωτεχνικής ταξινόμησης GSI για ετερογενείς σχηματισμούς, όπως ο φλύσχος. Γεωτεχνικό συνέδριο.

Μαρίνος, (2011). Παρουσιάσεις μαθήματος «Γεωλογικές και Περιβαλλοντικές Μελέτες Τεχνικών Έργων».



Μουντράκης, (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη: UNIVERSITY STUDIO PRESS Εκδόσεις Επιστημονικών Βιβλίων και Περιοδικών.

Νικολάου, (2005, Ιούνιος). Ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπογείου υδατικού δυναμικού της Ηπείρου - διαχειριστικές προτάσεις. ΙΓΜΕ Περιφερειακή μονάδα Ηπείρου.

Παπαθανασίου, (2006). Φαινόμενα ρευστοποίησης εδαφών στον ελληνικό χώρο. Διδακτορική διατριβή.

ΥΠ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (1990). Χάρτες από την Ειδική Υπηρεσία Δημόσιων Έργων Οδικών Σηράγγων και Υπόγειων Έργων για το Έργο: Σήραγγα Ανηλίου και εκατέρωθεν προσπελάσεις.

Χρηστάρας, (2011). Απλά βήματα στην εδαφομηχανική. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

