



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΠΗΝΕΛΟΠΗ Σ. ΣΩΤΗΡΙΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΒΟΛΙ
ΓΡΕΒΕΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ',
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ'*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΠΗΝΕΛΟΠΗ Σ. ΣΩΤΗΡΙΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΒΟΛΙ ΓΡΕΒΕΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ

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

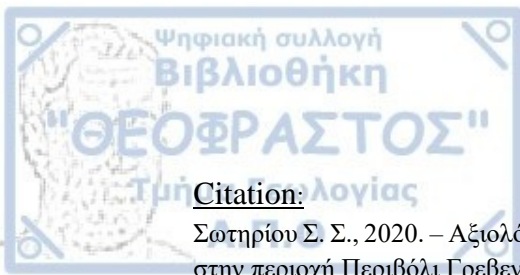
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 29/11/2021

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Βασίλης Μαρίνος, Επ. Καθηγητής ΕΜΠ, Επιβλέπων
Γιώργος Παπαθανασίου, Επ. Καθηγητής ΑΠΘ, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής
Τριαντάφυλλος Κακλής, Δρ. Γεωλόγος ΕΔΙΠ ΑΠΘ, Μέλος Τριμελούς
Συμβουλευτικής Επιτροπής

© Πηνελόπη Σ. Σωτηρίου, Γεωλόγος, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ
ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΒΟΛΙ ΓΡΕΒΕΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ– *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Pinelopi S. Sotiriou, 2020
All rights reserved.
– *Master Thesis*



Citation:

Σωτηρίου Σ. Σ., 2020. – Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών παραμέτρων εκδήλωσης εδαφικής ροής στην περιοχή Περιβόλι Γρεβενών και διερεύνηση του μηχανισμού της. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., σελ 121

Sotiriou S, S., 2020. - Evaluation of the geotechnical parameters of a mudflow and the investigation of its mechanism in the area Perivoli, Grevena area. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, pp. 121

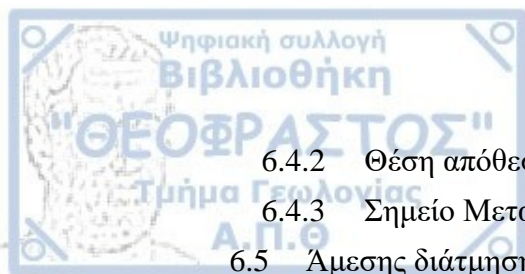
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται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

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



Περιεχόμενα

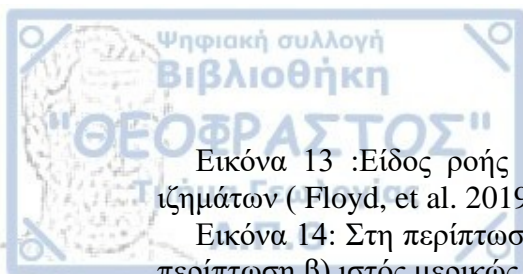
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	11
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	12
ABSTRACT.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Αντικείμενο Έρευνας	14
1.2 Μεθοδολογία	14
1.3 Περιοχή Έρευνας.....	15
1.4 Εκτελεσθείσες Εργασίες.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΡΟΕΣ.....	18
2.1 Κατηγορίες	18
2.2 Μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο της λασπορροής.....	24
2.3 Παράγοντες εκδήλωσης της λασπορροής	27
2.4 Παράμετροι που σχετίζονται με το φαινόμενο της λασπορροής.....	30
2.5 Υπολογισμοί ευστάθειας έναντι λασπορροής	34
2.6 Μέτρα αντιστήριξης	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΧΡΗΣΗ LiDAR ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	39
3.1 Βασικές αρχές για την λειτουργία των LiDAR.....	39
3.2 Δεδομένα	40
3.3 Μελέτη Κατολισθήσεων.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	42
4.1 Θέση- Γεωμορφολογία	42
4.2 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής.....	43
4.3 Τεκτονική εξέλιξη ευρύτερης περιοχής.....	46
4.4 Σεισμικότητα περιοχής	48
4.5 Κλίμα ευρύτερης περιοχής	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	55
5.1 Χαρακτηριστικά στενής περιοχής έρευνας,	55
5.2 Γεωλογία περιοχής	57
5.3 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής	59
5.4 Περιγραφή της λασπορροής.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	76
6.1 Φυσική και Περιεχόμενη υγρασία.....	77
6.2 Ειδικό βάρος.....	79
6.3 Κοκκομετρική ανάλυση	81
6.3.1 Θέση απόθεσης 1	85
6.3.2 Σημείο Μεταφοράς 2.....	86
6.4 Όρια Atterberg.....	88
6.4.1 Θέση απόθεσης 2	90



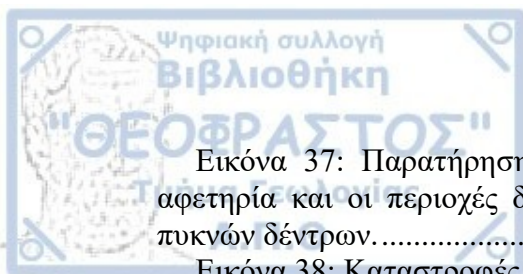
6.4.2	Θέση απόθεσης 1	91
6.4.3	Σημείο Μεταφοράς 2.....	92
6.5	Άμεσης διάτμησης.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Πρόγραμμα FLOW -R (UNIVERSITY OF LAUSANNE) (UNIVERSITY OF LAUSANNE)		99
7.1	Περιοχές Προέλευσης.....	101
7.2	Διάδοση	102
7.3	Αλγόριθμοι για την αξιολόγηση της διάδοσης.....	102
7.4	Εκτέλεση του προγράμματος.....	105
7.5	Περίπτωση λασπορροής το Περιβόλι.....	108
7.5.1	Εισαγωγή δεδομένων	108
7.5.2	Αποτελέσματα.....	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		119

Περιεχόμενα Εικόνων

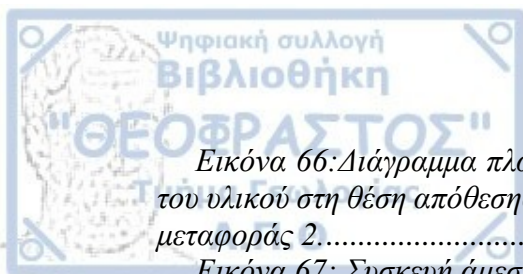
Εικόνα 1:	Γεωγραφική απεικόνιση του χωριού, Περιβόλι.	15
Εικόνα 2:	Στενή περιοχή έρευνας, Β-ΒΔ του χωριού περιβόλι.....	16
Εικόνα 3:	Σκαρίφημα που απεικονίζει τη ροή κορημάτων (Varnes, 1978).....	18
Εικόνα 4:	Ξηρή ροή Κορημάτων	19
Εικόνα 5 :	Γρήγορη Χιονοστιβάδα κορημάτων. (Highland & Bobrowsky,2018).20	
Εικόνα 6:	Χιονοστιβάδα κορημάτων σε χωριό στο Guinsaigon, στις Philippines το Φεβρουάριο, 2006 (Φωτογραφία από το University of Tokyo Geotechnical Team). (από Highland & Bobrowsky,2018).....	20
Εικόνα 7:	Σκαρίφημα της ροής λάσπης (mudflow) (Varnes, 1978).	22
Εικόνα 8:	Φωτογραφία λασπορροής στο Maokong στη Taiwan. (Widjaja, 2010).	22
Εικόνα 9:	. Η εικόνα δείχνει ρεογράμματα διαφόρων τύπων μη-Νευτώνων ρευστών (1 - διασταλτικό υγρό, 3 - ψευδοπλαστικό υγρό, 4 - βισκοπλαστικό υγρό) σε σύγκριση με ένα παρόμοιο χαρακτηριστικό του κλασικού Νεύτωνα υγρού (γραμμική εξάρτηση - 2). (Fontainhas, 2019).....	24
Εικόνα 10:	Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης- προς το ρυθμό της διάτμησης (du/dy) (από OBrien, FLO-2D Software Inc).....	25
Εικόνα 11:	Καμπύλη ροής: υλικό Coulomb (συμπαγής γραμμή) και Υγρό Bingham (διακεκομμένη γραμμή) όταν το υλικό υφίσταται απλή ροή διάτμησης. (Ancey, 2007)	27
Εικόνα 12:	Το σχήμα δείχνει τη μετατροπή από C _v σε C _s και από C _s στο φαινόμενικό ειδικό βάρος του μίγματος νερού-ιζήματος για μέση συγκέντρωση σε βάθος. (Brown, 1988)	32



Εικόνα 13 :Είδος ροής και ρεολογικό μοντέλο με βάση τη συγκέντρωση των ιζημάτων (Floyd, et al. 2019).....	34
Εικόνα 14: Στη περίπτωση α) απεικονίζεται ιστός πλήρως εξασθενημένος ενώ στη περίπτωση β) ιστός μερικώς εξασθενημένος.....	35
Εικόνα 15: Απεικόνιση της διαδρομής του σήματος από το LiDAR στον στόχο καθώς και του επιστρεφόμενου παλμού (Lato, 2011)	39
Εικόνα 16: Θέση σε σχέση με την Ελλάδα, Περιβόλι Γρεβενών. (από Google earth)	42
Εικόνα 17: Γεωτεκτονικές ενότητες ΕλλάδαςRh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιοδοπική ζώνη, (Pe: Ζώνη Παιανίας, Pa: Ζώνη Πάικου, Al: Ζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αξιού, ΡΙ: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού - Γκιόνας, Ρ: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης, Ι: Ιόνιος ζώνη, Ρx: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα “Ταλέα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθοι” πιθανόν της Ιονίου ζώνης.. (Κατά Mountrakis et al. 1983)	43
Εικόνα 18: Λιθοστρωματογραφική στήλη αντιπροσωπευτική της ζώνης Ωλονού – Πίνδου. 1: δολομίτες. 2: πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 3: αργιλοσαμμίτες, 4: ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά, 5: κερατόλιθοι, 6: ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7: λατυποπαγή, 8: ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, 9:σχηματισμός φλύσχη, Τριτογενούς. (Mountrakis, 2010)	45
Εικόνα 19: Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής (Τροποποιημένος χάρτης από φύλλο Μέτσοβο του ΙΓΜΕ).....	46
Εικόνα 20: Σκαριφηματική γεωλογική τομή της τοποθέτησης των οφειολιθικών μαζών επάνω στο δεύτερο φλύσχη της Πίνδου (Jones & Robertson, 1991).	47
Εικόνα 21: Χάρτης κατανομής οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης με πιθανότητα υπέρβασης τα επόμενα 50 χρόνια.	48
Εικόνα 22: Οι τρεις κατηγορίες (III,II,I) ζωνών επικινδυνότητας σύμφωνα με τον ΕΑΚ200 το 2003.....	49
Εικόνα 23: Επίκεντρα σεισμών (2000-2021), ακτίνας 50km. (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, 2021).....	50
Εικόνα 24: Μέση θερμοκρασία το μήνα Δεκέμβριο στη περιοχή έρευνας είναι <4°C (Εφαρμογή «Ατλαντας», Ε.Μ.Υ.)	51
Εικόνα 25: Μέση ποσότητα υετού το μήνα Δεκέμβριο στη περιοχή έρευνας είναι >260mm (Εφαρμογή «Ατλαντας», Ε.Μ.Υ.)	51
Εικόνα 26: Μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής	52
Εικόνα 27: Αυχένιας Τίζα- Αυγό	53
Εικόνα 28: Δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Βωβούσας για τον μήνα Δεκέμβριο.	53
Εικόνα 29: Μορφολογική απεικόνιση της περιοχής. Αρχείο tin που προέκυψε από το DEM της περιοχής σε περιβάλλον GIS.....	55
Εικόνα 30: Χάρτης κλίσεων.....	56
Εικόνα 31: Χάρτης προσανατολισμού κλιτύων.....	56
Εικόνα 32: Χαρακτηριστική μορφή του mélange της Αβδέλας νότια του ξενοδοχείου.....	57
Εικόνα 33: Melange της Αβδέλας δυτικά του ξενοδοχείου.....	58
Εικόνα 34: Εδαφοποιημένα υλικά λόγω αποσάθρωσης του υπεδάφους δυτικά του ξενοδοχείου. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 2m.	58
Εικόνα 35: Λιθότυποι βραχώμαζας των οφειολιθών με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά. (Μαρίνος, 2007).	60
Εικόνα 36: Δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI) σε οφιόλιθους. (Hoek et al, 2005) .61	



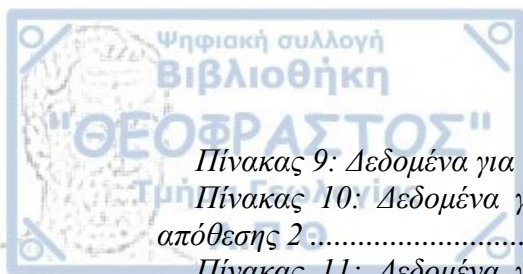
Εικόνα 37: Παρατήρηση του φαινομένου από τον απέναντι βόρειο δρόμο. Η αφετηρία και οι περιοχές διάδοσης δεν διακρίνονται εξαιτίας της παρουσίας πολύ πυκνών δέντρων.....	62
Εικόνα 38: Καταστροφές που αποτυπώθηκαν κατά τη χαρτογράφηση	63
Εικόνα 39: Καταστροφές που αποτυπώθηκαν κατά τη χαρτογράφηση	63
Εικόνα 40: Περιοχή έρευνα φωτογραφία από Google Earth.....	64
Εικόνα 41: Φωτογραφία 2 μέρες μετά την εκδήλωση της λασπορροής. (φωτογραφία από κάτοχο του ξενοδοχείου).	65
Εικόνα 42: Ρωγμή στο σημείο αφετηρίας. (φωτογραφία από κάτοχο του ξενοδοχείου).	65
Εικόνα 43: Σημείο αφετηρίας 8 μήνες μετά το συμβάν. Φαίνεται η αποκατάσταση της φυτοκάλυψης	66
Εικόνα 44: Σημείο αφετηρίας 4 μήνες μετά το συμβάν. Στη φωτογραφία φαίνονται οι επισκευές στην αυλή του ξενοδοχείου (επιχωμάτωση υλικών). (φωτογραφία από Γιώργο Παπαθανασίου)	66
Εικόνα 45: Περιοχή διάδοσης 1. Με μπλε γραμμή απεικονίζεται ο άξονας μεταφοράς	67
Εικόνα 46 : Περιοχή διάδοσης 2	68
Εικόνα 47 : Περιοχή διάδοσης 2. Διακρίνεται πόσο στενό είναι σε πλάτος.	69
Εικόνα 48: Περιοχή διάδοσης 3. Με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται ο " δρόμος" μεταφοράς.....	69
Εικόνα 49: Σημείο Απόθεσης 1.	70
Εικόνα 50: Σημείο Απόθεσης 1.	71
Εικόνα 51: Σημείο απόθεσης 2. Φωτογραφία από Γιώργο Παπαθανασίου 4 μήνες μετά το συμβάν.	72
Εικόνα 52: Σημείο Απόθεσης 2. Φωτογραφία από κάτοχο του Ξενοδοχείου 2-3 μέρες μετά το συμβάν.	72
Εικόνα 53: Σημείο Απόθεσης 2. Φωτογραφία 8 μήνες μετά την εκδήλωση της λασπορροής.	73
Εικόνα 54: Σημείο Απόθεσης 3. Φωτογραφία 8 μήνες μετά την εκδήλωση της λασπορροής.	74
Εικόνα 55: Θέσεις Αποθέσεων της λασπορροής (φωτογραφία απο Google Earth).	75
Εικόνα 56: Θέσεις δειγματοληψίας. Αριστερά σημείο μεταφοράς 2 και δεξιά θέση απόθεσης 2.	76
Εικόνα 57: Θέση δειγματοληψίας. Θέση απόθεσης 1.	77
Εικόνα 58: Ζύγισμα υλικού στη ζυγαριά ακριβείας. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ	78
Εικόνα 59: Προετοιμασία για κοκκομετρική ανάλυση. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ	81
Εικόνα 60: Προετοιμασία υλικού για κοκκομετρική ανάλυση. Διάλυση συσσωματωμάτων με το γουδί	82
Εικόνα 61: Κοκκομετρική καμπύλη για το σημείο απόθεσης 2	84
Εικόνα 62: Κοκκομετρική καμπύλη για τη θέση απόθεσης 1	85
Εικόνα 63: Κοκκομετρική καμπύλη για τη θέση απόθεσης 1	87
Εικόνα 64: Δοκιμή με τη Μέθοδος Casagrande. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ	88
Εικόνα 65: Δοκιμή του ορίου πλαστικότητας. Πρώτη δοκιμή όπου ο ραβδίσκος κυλινδρώθηκε σε διάμετρος 3mm. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ.....	89



Εικόνα 66: Διάγραμμα πλαστικότητας. Η μπλε γραμμή εκπροσωπεί τα αποτελέσματα του υλικού στη θέση απόθεσης 2, η μαύρη στη θέση απόθεσης 1 και η κόκκινη στο σημείο μεταφοράς 2.....	93
Εικόνα 67: Συσκευή άμεσης διάτμησης, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ.....	94
Εικόνα 68: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma = 25kPa$	95
Εικόνα 69: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma = 25kPa$	95
Εικόνα 70: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma = 50kPa$	96
Εικόνα 71: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma = 50kPa$	96
Εικόνα 72: Διάγραμμα διατμητικής -ορθής τάσης για την εύρεση συνοχής και γωνίας τριβής.....	97
Εικόνα 74: Περιβάλλον Flow-R.....	101
Εικόνα 75: Απεικόνιση του συνδυασμού διαφόρων συνόλων δεδομένων για το αξιολόγηση των περιοχών προέλευσης. (Horton et. Al, 2013).....	102
Εικόνα 76 :Απεικόνιση της γωνίας πορείας και ο περιορισμός ταχύτητας του το απλοποιημένο μοντέλο περιορισμένης τριβής (SFLM).....	104
Εικόνα 77: Απεικόνιση των 4 διαφορετικών επιπέδων επεξεργασίας του πολλαπλασιασμού και της σχετικής ροής δεδομένων τους.....	105
Εικόνα 78: Επίδραση της ανάλυσης DEM και η τροποποίηση του αλγορίθμου εξάπλωσης του Holmgren σε ανεμιστήρα ροής συντριμμιών στο Solalex της Ελβετίας (Geodata © swisstopo - DV084371).....	107
Εικόνα 79: Εισαγωγή DEM σε περιβάλλον GIS.....	108
Εικόνα 80: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος.....	109
Εικόνα 81: Επιλογή μεθόδου υπολογισμού.....	109
Εικόνα 82: Συγκλίνουσα και αποκλίνουσα ροή.....	110
Εικόνα 83: Επιλογή αλγορίθμου.....	111
Εικόνα 84: Χάρτης επιδεκτικότητας.....	112
Εικόνα 85: Αποτύπωση λασποροής σύμφωνα με την χαρτογράφηση επάνω σε hillshade.....	113
Εικόνα 85: Γεωλογικό και τεχνικογεωλογικό προσομοίωμα της περιοχής, για την κατανόηση του φαινομένου.....	117

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Διαχωρισμός των κατηγοριών των ροών (απο FLO-2D Software Inc)23	
Πίνακας 2: Freeboard και Συντελεστής Ασφαλείας (FEMA Manual, Chapter 4 (1994 draft) modified) (1m= 3,48 ft).....	37
Πίνακας 3: Ανασκόπηση καιρού από τι1 10/12- 16/12 (3 μέρες πριν και μετά το συμβάν). (Δεδομένα από κ. Χρόνη Δρούγια, υπεύθυνο Μετεωρολογικού σταθμού της Βοβούσας).....	54
Πίνακας 4: Συγκεντρωτικές μετρήσεις πλάτους, μήκους και κλίσεων στα σημεία απόθεσης.....	74
Πίνακας 5 : Φυσική υγρασία Σημείο μεταφοράς 2	78
Πίνακας 6: Φυσική υγρασία Θέση απόθεσης 2	78
Πίνακας 7: Φυσική υγρασία. Θέση απόθεσης 1.....	78
Πίνακας 8: Σχετική πυκνότητα νερού και συντελεστής αναγωγής k για διάφορες θερμοκρασίες.....	80



Πίνακας 9: Δεδομένα για το ειδικό βάρος από δείγμα στη θέση απόθεσης 2.....	80
Πίνακας 10: Δεδομένα για Κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος από τη θέση απόθεσης 2.....	83
Πίνακας 11: Δεδομένα για Κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος από τη θέση απόθεσης 1.....	85
Πίνακας 12: Δεδομένα για Κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος από το σημείο μεταφοράς 2.....	86
Πίνακας 13: Αποτελέσματα Όρια Atterberg για τη θέση απόθεσης 2.....	90
Πίνακας 14: Αποτελέσματα Όρια Atterberg για τη θέση απόθεσης 1.....	91
Πίνακας 15: Αποτελέσματα Όρια Atterberg για το Σημείο Μεταφοράς 2.....	92
Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός Πίνακας των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα 3 δείγματα. Όπου ΔΠΕΔ σημαίνει Δεν Πραγματοποιήθηκε Εργαστηριακή Δοκιμή.....	98



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ.) Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, αναλύοντας θέματα που εξειδικεύονται στον κλάδο Τεχνικής Γεωλογίας και Περιβάλλον (Engineering Geology and the Environment). Κατά τη διάρκεια της έρευνας αναλύθηκαν και μελετήθηκαν έννοιες κινηματικής ρευστών καθώς και η συμπεριφορά των λασπορροών ως φαινόμενο καθώς και ο τρόπος παρακολούθησης και αντιμετώπισης τους.

Σε αυτή μου τη προσπάθεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βασίλη Μαρίνο για εμπιστοσύνη, τη βοήθεια, και αμέριστη κατανόηση και συμπαράσταση καθώς και τις συμβουλές που μου παρείχε τόσο κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής όσο και κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μου σπουδών. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να τονίσω ότι ο κ. Μαρίνος αποτέλεσε την πηγή έμπνευσης στο σύνολο των μεταπτυχιακών και προπτυχιακών μου σπουδών και κινητήριος δύναμη για την επιλογή και την ολοκλήρωση τους.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Γιώργο Παπαθανασίου και κ. Τριαντάφυλλο Κακλή, μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής για την αμέριστη βοήθεια και κατανόηση τους τόσο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής, όσο και κατά την επιτόπου επίσκεψη στην περιοχή έρευνας.

Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον μετεωρολογικό σταθμό Βωβούσας και ιδιαίτερο τον κ. Χρόνη Δρούγια για την άμεση και γρήγορη παροχή δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού.

Ακόμη θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους και ιδιαίτερα στο συνάδελφο και πολύ καλό μου φίλο Μάκη Κωνσταντινίδη για την βοήθεια του κατά την έρευνα στο πεδίο καθώς και για την συμβουλευτική του δράση και υποστήριξη όπου χρειαζόταν.

Τέλος οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, τους γονείς μου Σωτήρη και Κατερίνα και την αδερφή μου Χριστίνα και τον φίλο μου Παναγιώτη για την ανιδιοτελή τους αγάπη και στήριξη σε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και ιδιαίτερα κατά την περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Χωρίς αυτούς η πορεία μου θα ήταν σίγουρα πιο δύσκολη και λιγότερο ευχάριστη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας έχει σκοπό την αποτύπωση και κατανόηση των ροών με επίκεντρο τις λασποροές. Ειδικότερα ασχολείται με ένα φαινόμενο λασποροής που εκδηλώθηκε στο Περιβόλι Γρεβενών στις 13/1/2019. Σκοπός είναι η κατανόηση του φαινομένου, η εύρεση των παραγόντων και παραμέτρων που συντέλεσαν στην εκδήλωση της λασποροής, η παραμετροποίηση των παραγόντων καθώς και η καλύτερη παρακολούθηση της και αποτύπωση της με ψηφιακά μέσα. Πιο συγκεκριμένα για την επίτευξη των στόχων της διπλωματικής, η εργασία χωρίστηκε ουσιαστικά σε τέσσερα (4) μέρη.

Στο πρώτο μέρος αναλύεται εκτενώς μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση η έννοια της λασποροής ως φαινόμενο, περιγράφοντας τις παραμέτρους αλλά και τους παράγοντες που παίζουν ρόλο στην εκδήλωση του φαινομένου, τα μέτρα προστασίας και τα αναλυτικά μοντέλα που αφορούν την ανάλυση των λασποροών.

Το δεύτερο μέρος της έρευνας σχετίζεται αποκλειστικά με τα αίτια και τον τρόπο εκδήλωσης μιας πραγματικής περίπτωσης λασποροής στο Περιβόλι Γρεβενών. Η έρευνα επικεντρώνεται α) στη προσωπική χαρτογράφηση και αποτύπωση της ροής από το σημείο αφετηρίας μέχρι και τα σημεία απόθεσης, μέσα από τις άξονες μεταφοράς β) στις συνθήκες που επικρατούσαν εκείνες τις μέρες και οδήγησαν στο έναυσμα της λασποροής γ) στις παρατηρήσεις και μαρτυρίες των κατοίκων που βίωσαν το φαινόμενο τη μέρα εκδήλωσής του

Το τρίτο μέρος της έρευνας αναφέρεται στις εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα που λήφθηκαν από την περιοχή. Οι αναλύσεις αυτές βοήθησαν στην κατάταξη του εδαφικού υλικού τόσο προς τη παραμετροποίησή του με την εκτίμηση της αντοχής του, ενώ συντέλεσαν στο να αξιολογηθεί η προέλευση και η φύση του υλικού.

Τέλος το τέταρτο μέρος ασχολείται με την ψηφιακή αποτύπωση της λασποροής με σάρωση της περιοχής με χρήση του LiDAR, καθώς και με την ανάλυση και τη δημιουργία ενός χάρτη επιδεκτικότητας της περιοχής έρευνας με τη βοήθεια του προγράμματος Flow -R (University of Lausanne) , χρησιμοποιώντας παραμέτρους που αξιολογήθηκαν σε άλλα μέρη.

ABSTRACT

The current master thesis was conducted for the engineering geological interpretation, surveying and analysis of flows, particularly mudflows. Main focus of it was a mudflow phenomenon that occurred in Perivoli, Grevena, on the 13th of January of 2019. The aim of this study was initially to determine the nature of the mudflow and afterwards to identify and quantify the factors and the parameters that related to its occurrence, with the implementation of high-end remote sensing technologies. In order for these goals to be achieved, this study was segmented in four (4) main sections.

In the first section, the main characteristic of mudflows was presented in a broader context, based mainly on a detailed literature review. In particular, the parameters and the factors that control their occurrence were specified and the methodology regarding the modeling of mudflow was established. Lastly, the most common mitigation measures for similar flow events were analyzed.

In the second section of this study, the main triggering factors and manifestations of the case study Perivoli's mudflow were presented. The three (3) main axes of data collection in the current study was: a) the field surveys that were performed from the source areas to the deposition areas through the spreading axes, b) the conditions in the area of interest which triggering the mudflow and c) the testimonies of the residents who witnessed the events.

In the third section, the methodology and the results of the laboratory tests of the soil samples that were collected from the area were discussed. These analyses led to the classification of the soil material in terms of; particle size distribution, characteristics and strength. Also, they led to the identification of the material's origin, type and its parameterization.

Lastly, the fourth section includes the detailed presentation of the methodology that was followed regarding the mudflow monitoring with the usage of a LiDAR scanner. Final result of this aforementioned analysis was the creation of a susceptibility map of the area via Flow -R (University of Lausanne) software, using parameters that have evaluate in other places.

1.1 Αντικείμενο Έρευνας

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής είναι η γεωλογική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των παραμέτρων εκδήλωσης εδαφικής ροής στην περιοχή Περιβόλι Γρεβενών και διερεύνηση του μηχανισμού της. Η λασπορροή εκδηλώθηκε την Παρασκευή 13 Δεκεμβρίου του 2019, ενώ η παρούσα έρευνα ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2020.

1.2 Μεθοδολογία

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής βασίζονται σε 4 μέρη. Το πρώτο μέρος της έρευνας σχετίζεται με την άμεση και εκτενή κατανόηση των λασπορροών. Βασική προϋπόθεση για τη επίτευξη αυτού του στόχου, ήταν η μελέτη βασικών αρχών κινηματικής ρευστών και των διάφορων μοντέλων ορισμένων ερευνητών που προσπάθησαν να αναλύσουν ακριβώς τέτοια φαινόμενα μέσα από μαθηματικές σχέσεις. Μια πληθώρα ερευνών και άρθρων με παρόμοια φαινόμενα αν το κόσμο μελετήθηκαν εκτενώς, καθώς πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τον τρόπο εκδήλωσης, τις παραμέτρους και τους παράγοντες που συμβάλλουν στην ενεργοποίηση του φαινομένου, καθώς και τα μέτρα αντιμετώπισης.

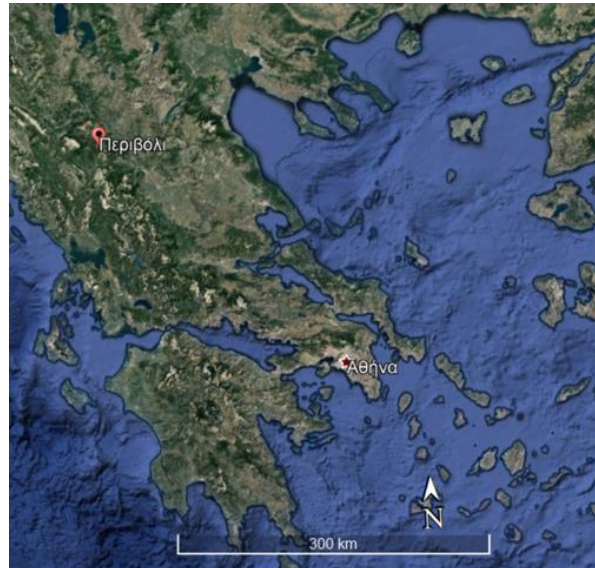
Το δεύτερο μέρος έρευνας σχετίζεται αποκλειστικά με τα αίτια και τον τρόπο εκδήλωσης της λασπορροής. Επικεντρώνεται:

1. στη προσωπική χαρτογράφηση και αποτύπωση της ροής από το σημείο αφετηρίας μέχρι και τα σημεία απόθεσης, μέσα από τις άξονες μεταφοράς
2. στις συνθήκες που επικρατούσαν εκείνες τις μέρες και οδήγησαν στο έναυσμα της λασπορροής
3. στις παρατηρήσεις και μαρτυρίες των κατοίκων που βίωσαν το φαινόμενο τη μέρα εκδήλωσής του.

Το τρίτο μέρος της έρευνας επικεντρώνεται στις εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα που λήφθηκαν από την περιοχή. Τα δείγματα λήφθηκαν από 3 διαφορετικά σημεία και εξετάστηκαν όλα ως προς τις βασικές εδαφικές τους ιδιότητες. Οι αναλύσεις αυτές βοήθησαν στην κατάταξη του εδαφικού υλικού τόσο προς την κοκκομετρία του όσο και προς τις ιδιότητες και την αντοχή του.

Τέλος το τέταρτο μέρος ασχολείται με τη σάρωση της περιοχής με LiDAR, καθώς και με την δημιουργία ενός χάρτη επιδεκτικότητας της περιοχής έρευνας με τη βοήθεια του προγράμματος Flow -R (University of Lausanne) (University of Lausanne). Η σάρωση αυτή οδήγησε στην δημιουργία ενός λεπτομερούς μοντέλου όπου αποτυπώνονται τα όρια της λασπορροής, η αφετηρία, οι περιοχές διάδοσης, τα σημεία απόθεσης καθώς και στοιχεία της προσωπικής χαρτογράφησης. Τα δεδομένα αυτά οδήγησαν στη χρήση του προγράμματος Flow-R για τη σύνθεση ενός χάρτη επιδεκτικότητας.

Το Περιβόλι βρίσκεται στο όριο δυτικής Μακεδονίας – Ηπείρου, 45 χλμ από τη πόλη των Γρεβενών. Το χωριό είναι χτισμένο στις πλαγιές της Βόρειας Πίνδου, ενώ γεωλογικά ανήκει στην ζώνη της Πίνδου, κατά τον Mountraki et al 1983.



Εικόνα 1: Γεωγραφική απεικόνιση του χωριού, Περιβόλι.

Συγκεκριμένα η περιοχή έρευνας βρίσκεται βόρεια του χωριού Περιβόλι. Η εκδήλωση της εδαφικής ροής έχει ως αφετηρία την αυλή του ξενοδοχείου Valia Calda και εκτείνεται βόρεια αυτού καταλήγοντας στον δρόμο βόρεια του ξενοδοχείου σε 3 σημεία απόθεσης όπως θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαια.



Εικόνα 2: Στενή περιοχή έρευνας, Β-ΒΔ του χωριού περιβάλλει

1.4 Εκτελεσθείσες Εργασίες

Στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα βήματα:

- Μελέτη αεροφωτογραφιών και γεωλογικών χαρτών της περιοχής.
- Λεπτομερής βιβλιογραφική επισκόπηση. Τα θέματα που αναλύθηκαν είναι η θεωρία των εδαφικών ροών και ιδιαιτέρως των λασπορροών, οι τρόποι εκδήλωσης, οι παράμετροι και οι παράγοντες που συμβάλλουν στην ενεργοποίηση του φαινομένου, καθώς και τα μέτρα αντιμετώπισης του φαινομένου. Μελετήθηκαν επιπλέον οι βασικές αρχές κινηματικής των ρευστών και αποτυπώθηκαν οι σχετικές έννοιες που αφορούν τις λασπορροές ως φαινόμενο.
- Περιεγράφηκε η μέθοδος χρήσης LiDAR για τη μελέτη τέτοιων φαινομένων.
- Πραγματοποιήθηκε εργασία υπαίθρου στη περιοχή έρευνας το Σεπτέμβριο του 2020, όπου χαρτογραφήθηκε αναλυτικά η λασπορροή (σημείο αφετηρίας, περιοχές διάδοσης και σημεία απόθεσης), αλλά και η ευρύτερη περιοχή.
- Λήφθηκαν εδαφικά δείγματα από 3 σημεία, από ένα άξονα μεταφοράς και δύο σημεία απόθεσης
- Τα δείγματα που λήφθηκαν από τη περιοχή τέθηκαν σε εργαστηριακές αναλύσεις στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του ΑΠΘ. Για τα 3 δείγματα πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες εργαστηριακές δοκιμές:
 - Προσδιορισμός φυσικής και περιεχόμενης υγρασίας
 - Κοκκομετρική Ανάλυση με Κόσκινα



- Όρια Atterberg

Για το δείγμα που λήφθηκε από το σημείο απόθεσης 2 πραγματοποιήθηκαν επιπλέον:

- Προσδιορισμός ειδικού βάρους
- Δοκιμές Άμεσης Διάτμησης
- Πραγματοποιήθηκε ξανά εργασία υπαίθρου στη περιοχή τον Ιούνιο του 2020, για την σάρωση της περιοχής με LiDAR.
- Κατασκευή ενός γεωλογικού- τεχνικογεωλογικού προσομοιώματος της περιοχής
- Κατασκευή χάρτη επιδεκτικότητας για την εύρεση πηγών προέλευσης με τη χρήση του λογισμικού Flow-R
- Τέλος πραγματοποιήθηκε η σύνταξη της μεταπτυχιακής διπλωματικής και η αποτύπωση των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

2.1 Κατηγορίες

Οι ροές ανεξάρτητα της ταχύτητας ή της υγρασίας τους (αργές ή γρήγορες, ξηρές ή υγρές) εκδηλώνονται σε χαλαρά υλικά.

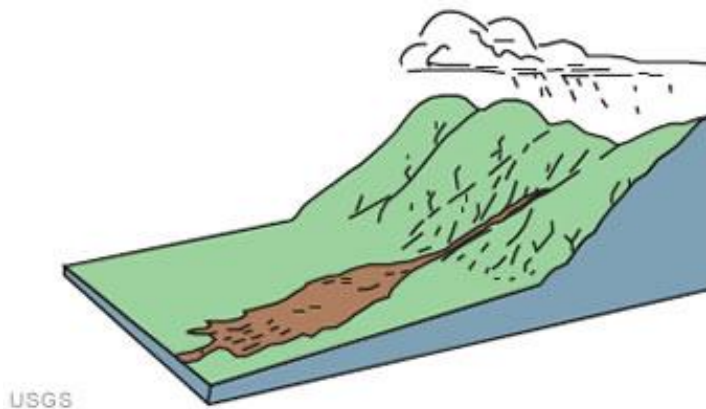
Ροές Κορημάτων (debris flow)

Οι ροές αυτές εντοπίζονται με ευκολία καθώς οι μετακινήσεις των χαλαρών υλικών είναι μεγάλες και ευκρινείς. Το όριο ανάμεσα στην ολισθαίνουσα μάζα και στο θεωρητικά ανέπαφο υλικό είναι σαφές, καθώς η διατμητική αντοχή των υλικών μεγαλώνει από το όριο και κάτω. Η δομή του ολισθαίνοντος υλικού είναι τελείως διαφορετική από την αρχική (χωρίς δομή), ενώ η εσωτερική παραμόρφωση του υλικού που ρέει, είναι πολύ μεγάλη. Ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον χαρακτηρισμό της ροής και την κίνηση του ρευστού υλικού, είναι η παρουσία του νερού, συμπεριλαμβανόμενες και οι ροές σε εντελώς ξηρά κοκκώδη υλικά (μικρή καταστροφικότητα).

Σε αυτού του τύπου ροές, υπάρχει μια μεγάλη ταξινόμηση από ολίσθηση μέχρι ροή ανάλογα με τη

- περιεκτικότητα των υλικών σε νερό,
- την κινητικότητά τους
- και τον χαρακτήρα της μετακίνησης.

Ο βασικός διαχωρισμός των ροών κορημάτων από τις άλλου τύπου ροές, είναι ότι περιέχουν υψηλό ποσοστό αδρομερών θραυσμάτων των πετρωμάτων ή και αδρόκοκκων κορημάτων. Οι ροές κορημάτων μπορούν να συναντηθούν στη πραγματικότητα με τις παρακάτω μορφές:



Εικόνα 3: Σκαρίφημα που απεικονίζει τη ροή κορημάτων (Varnes, 1978)

1. Ξηρή ροή κορημάτων.

Στις ροές ξηρών κορημάτων συμμετέχουν ποικίλης διαβάθμισης αδρόκοκκα βραχώδη θραύσματα, τα οποία υποβοηθούνται κατά τη ροή τους, από τη βαρύτητα και δεν βρίσκονται υπό τη παρουσία υγρασίας. Το έναυσμα οφείλεται σε διατάραξη της ευστάθειας από προστιθέμενο βάρος υλικών στη κορυφή, σε υποσκαφή στη βάση λόγω διάβρωσης, σεισμικής δόνησης ή/και ανθρώπινης παρέμβασης.

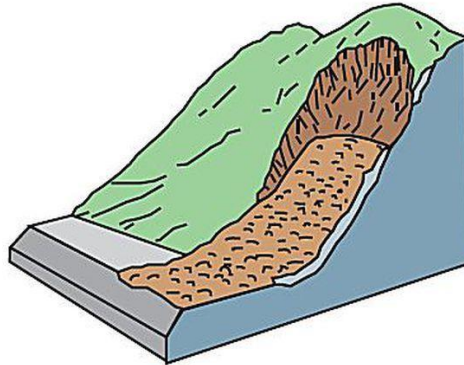


Εικόνα 4: Ξηρή ροή Κορημάτων

2. «Χιονοστιβάδα» κορημάτων

Στη περίπτωση αυτή παρατηρείται η παρουσία χαλαρών υλικών, η περιεκτικότητα των υλικών σε νερό και η μεγαλύτερη κλίση των πρανών τα οποία οδηγούν σε μεγαλύτερη και ταχύτερη ροή. Τα υλικά που συμπαρασύρονται βρίσκονται εξολοκλήρου σε ρευστή κατάσταση και ρέουν κατά μήκος μια μισγάγγειας προς τα κατάντη και μπορεί να αποθεθούν σε μεγαλύτερη απόσταση από τον πόδα του πρανούς. Η ροές αυτές έχουν χαρακτηριστική επιμήκη και στενή μορφή και συχνά η περιοχή της κεφαλής τους παρομοιάζεται με ένα πριονωτό σχήμα ή σχήμα V. Ακόμη είναι πιθανό στη κεφαλή των ροών να περιλαμβάνονται υλικά περιστροφικών ολισθήσεων, το οποία στη συνέχεια διαχωρίζονται σε μικρότερα τεμάχια. Τέλος ο όρος «χιανοστιβάδα» κορημάτων έχει υποστεί κριτική από αρκετούς ερευνητές, καθώς αναφέρουν πως για

τον σωστό και ακριβή χαρακτηρισμό του όρου, θα πρέπει να συμμετέχουν χιόνι και πάγος.



Εικόνα 5 : Γρήγορή Χιονοστιβάδα κορημάτων. (Highland & Bobrowsky,2018)



Εικόνα 6: Χιονοστιβάδα κορημάτων σε χωρίο στο Guinsaugon, στις Philippines το Φεβρουάριο, 2006 (Φωτογραφία από το University of Tokyo Geotechnical Team). (από Highland & Bobrowsky,2018)

3. Ρεύματα Τεμαχών

Πρόκειται για τις λεγόμενες γλώσσες κορημάτων, οι οποίες κινούνται εξαιρετικά αργά σε απότομα πρανή και λαμβάνουν μια συνεχή τροφοδοσία από πλευρικά κορήματα ή κώνους κορημάτων στη κεφαλή. Κατά τη ροή αυτή γίνεται συνεχή απόπλυση υλικού από τις βροχοπτώσεις, έχοντας ως αποτέλεσμα την εμφάνιση περισσότερων αδρόκοκκων υλικών στο εσωτερικό, παρά στην επιφάνεια.

Ροές Λάσπης (mudflows)

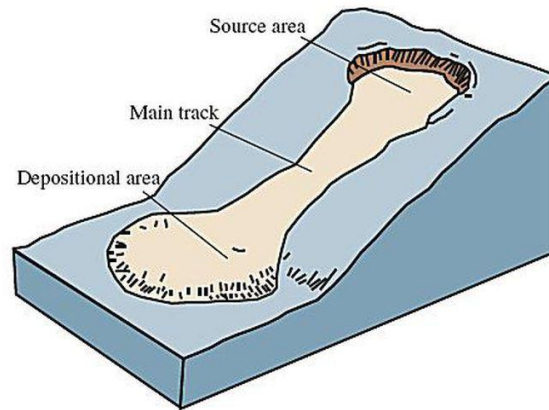
Πρόκειται για ροές από γεώδη υλικά, τα οποία περιέχουν περιεκτικότητα σε νερό και αποτελούνται κατά 50% από άμμο, ιλύ και άργιλο. Συνήθως ενεργοποιούνται από ισχυρές βροχοπτώσεις ή από λιώσιμο χιονιού, ενώ φαίνεται να ευνοούνται από απότομες κλίσεις κλιτύων ειδικά σε περιπτώσεις απουσίας της βλάστησης (ανθρώπινη παρέμβαση, πυρκαγιές κλπ). Η πρόβλεψη αυτών είναι δύσκολη καθώς οι παράγοντες ενεργοποίησης του φαινομένου είναι συνάρτηση του καιρού.

Οι μεγάλης ταχύτητας λασποροές πραγματοποιούνται σε λεπτόκοκκες ιλύες, αργιλικές άμμους και αργίλους, ενώ αντίθετα βραδύτερες και ξηρότερες ροές γαιών σημειώνονται σε περιοχές όπου επικρατούν άργιλοι ή αποσαθρώματα αργιλούχων πετρωμάτων, μεγάλη περιεκτικότητα νερού (μεγάλη υγρασία) και μέσες κλίσεις κλιτύων.

Στις ροές λεπτόκοκκων υλικών υπάρχει ποικιλία ανάλογα με τη περιεκτικότητα του νερού στην ολισθαίνουσα μάζα, διακρίνοντας έτσι υπερκορεσμένες έως και ξηρές καταστάσεις, ενώ από πλευράς ταχύτητας μετακίνησης από εξαιρετικά γρήγορες έως και αργές ροές. Έτσι λοιπόν καταλήγουμε στο συμπέρασμα του αρχικού διαχωρισμού των ροών γαιών, δηλαδή στο διαχωρισμό δύο ακραίων καταστάσεων, της ροής λάσπης (mudflow) που αποτελεί την υδαρή κατάσταση των ροών αυτής της κατηγορίας και τις ξηρές άμμους, ως το μέλος με μηδενική περιεκτικότητα νερού. Ο KURDIN (1973) προτείνει της ταξινόμηση των λασποροών με βάση:

- Την φύση της πηγής νερού και στερεού υλικού
- Τη φύση του μέσου μεταφοράς. Σε αυτή τη περίπτωση μας ενδιαφέρει το ελεύθερο νερό ή η ιζωδοπλαστική μάζα νερού καθώς και τα λεπτομερή στοιχεία.
- Τη σύνθεση της λάσπης. Αποτελείται από νερό και λεπτόκοκκο υλικό από 1mm ή από λάσπη σε συνδυασμό με αδρόκοκκο υλικό ποικίλης προέλευσης
- Τα ποσοτικοποιημένα δυναμικά χαρακτηριστικά της λάσπης. Στη περίπτωση αυτή σημαντικό ρόλο παίζει ο όγκος της ολισθαίνουσας μάζας, ο ρυθμός παροχής και τέλος η διαβρωτική και καταστροφική ικανότητα.

Ακόμη είναι δυνατόν κάποιες ροές που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία να παρομοιαστούν ως πλευρικές εξαπλώσεις όταν το υποκείμενο και ολισθαίνον υλικό έχει ρευστοποιηθεί. Τέλος πιο σπάνιες είναι οι περιπτώσεις ροών αιολικής γης, οι οποίες ενεργοποιούνται κυρίως από σεισμικές δονήσεις και αποτελούν τις πλέον καταστροφικές ροές, με μεγάλα παραδείγματα, όπως αυτό της Κίνας το 1920 με απώλεια 100.000 ανθρώπων.



Εικόνα 7: Σκαρίφημα της ροής λάσπης (mudflow) (Varnes, 1978).



Εικόνα 8: Φωτογραφία λασποροής στο Maokong στη Taiwan. (Widjaja, 2010).

Το ιξώδες των λασποροών είναι αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότερο από εκείνο του νερού και οι ταχύτητες της ροής είναι πολύ χαμηλότερες σε σύγκριση με τις πλημμύρες λάσπης. Τα μεγαλύτερα γεγονότα πλημμύρας διαθέτουν μεγάλη ποσότητα νερού που σε συνδυασμό με τα ιζήματα της λεκάνης απορροής δημιουργείται μια ροή λάσπης. Τα ακραία γεγονότα ροής λάσπης μπορεί να εξελιχθούν σε πλημμύρες λάσπης. Μέσα σε μια λεκάνη απορροής, ο συνολικός όγκος νερού και ιζημάτων σε μια λασποροή θα είναι γενικά μικρότερος από ό, τι σε μια πλημμύρα λάσπης. Στον παρακάτω πίνακα εξηγείται ο διαχωρισμός των κατηγοριών των ροών σε αντίθεση με τις κατολισθήσεις και οι παράμετροι που συμβάλλουν σε αυτό τον διαχωρισμό.

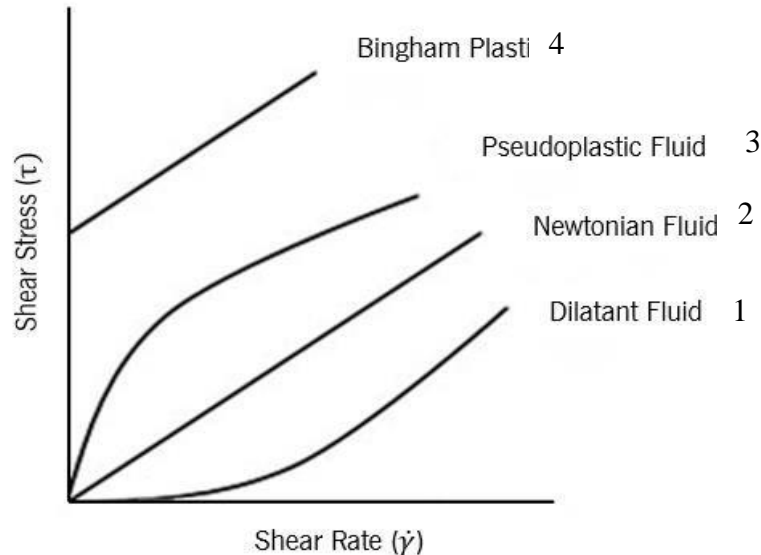
Πίνακας 1: Διαχωρισμός των κατηγοριών των ροών (απο FLO-2D Software Inc)

Συμπεριφορά λασπορροής ως συνάρτηση της συγκέντρωσης ιζημάτων			
	Συγκέντρωση ιζημάτων		Χαρακτηριστικά Ροών
	Όγκος	Βάρος	
Κατολισθήσεις (Landslides)	0,65-0,8	0,83-0,91	Δεν πραγματοποιείται ροή, η ολίσθηση γίνεται με μπλοκ
	0,55-0,65	0,76-0,89	
Λασπορροές (mudflow)	0,48-0,55	0,72-0,76	Προφανής ροή: πιο αργή σε σχέση με την πλημμύρα και μεγάλης διάρκειας ροή, πλαστική παραμόρφωση υπό το δικό της βάρος, δεν θα εξαπλωθεί σε επίπεδες επιφάνειες
	0,45-0,48	0,69-0,72	Ροή που εξαπλώνεται σε επίπεδη επιφάνεια, συνεκτική ροή
Πλημμύρα Λάσπης (Mud flood)	0,40-0,45	0,65-0,69	Η ροή αναμιγνύεται εύκολα, δείχνει ιδιότητες ρευστού σε παραμόρφωση, απλώνεται σε οριζόντια επιφάνεια αλλά διατηρεί κεκλιμένη επιφάνεια υγρού, συμμετοχή μεγάλων σωματιδίων, τα κύματα εμφανίζονται αλλά διαλύονται γρήγορα
	0,35-0,40	0,59-0,65	Αξιοσημείωτη καθίζησης χαλικιών και κροκάλων, απλώνεται σχεδόν πλήρως στην οριζόντια επιφάνεια, εμφανίζεται ρευστή επιφάνεια με δύο ρευστές φάσεις, κύματα ταξιδεύουν στην επιφάνεια
	0,30-0,35	0,54-0,59	Διαχωρισμός νερού στην επιφάνεια, τα κύματα ταξιδεύουν εύκολα, το μεγαλύτερο μέρος της άμμου και των χαλικιών έχει σταματήσει και κινούνται ως φερτά υλικά
	0,20-0,30	0,41-0,54	Σαφής δράση κύματος, ρευστή επιφάνεια, όλα τα σωματίδια αποτίθενται στη βάση στη φάση ηρεμίας της ροής
Πλημμύρα νερού (Water flood)	<0,20	<0,41	Πλημμύρα νερού με αιωρούμενο φορτίο και φερτά υλικά

2.2 Μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο της λασπορροής

Πολλοί ερευνητές ανά καιρούς προσπάθησαν να προσομοιώσουν με ακρίβεια το μοντέλο της λασπορροής. Προηγούμενες προσπάθειες προσομοίωσης της ροής πραγματοποιήθηκαν με μονοδιάστατο μοντέλα ροής. Οι Schamber και MacArthur (1985) σχεδίασαν ένα μονοδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για λασπορροές, χρησιμοποιώντας το ρεολογικό μοντέλο Bingham ώστε να αξιολογήσουν τις διατμητικές τάσεις μη Νευτώνιου υγρού. Ο O'Brien (1986) σχεδίασε ένα μονοδιάστατο μοντέλο λασπορροής για λεκάνες απορροής που χρησιμοποιήθηκε επίσης το μοντέλο Bingham. Το 1986, οι MacArthur και Schamber παρουσίασαν ένα μοντέλο δισδιάστατου πεπερασμένου στοιχείου.

Στη περίπτωση μελέτης του φαινομένου της λασπορροής πρέπει να εξηγηθούν περίπλοκοι όροι για τη ροή ενός βισκοπλαστικού υγρού. Οι ροές λάσπης είναι μη-Νεύτωνα ροές, καθώς περιγράφουν τόσο το όριο ελαστικότητας(τ_y) όσο και το ιξώδες (η). Η μελέτη των μη-Νευτώνων ρευστών είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα έρευνα καθώς πρέπει να κατανοηθούν όλες οι φυσικοχημικές διεργασίες που είναι αποτέλεσμα της ροής ενός τέτοιου υλικού αλλά και να περιγραφεί μαθηματικά το φαινόμενο αυτό. Όλα τα μη-Νεύτωνα υγρά διαφέρουν από το κλασικό Νεύτωνιο ρευστό με τη μορφή εξάρτησης από την κλίση πίεσης σχετικά με το μέγεθος της διατμητικής τάσης.

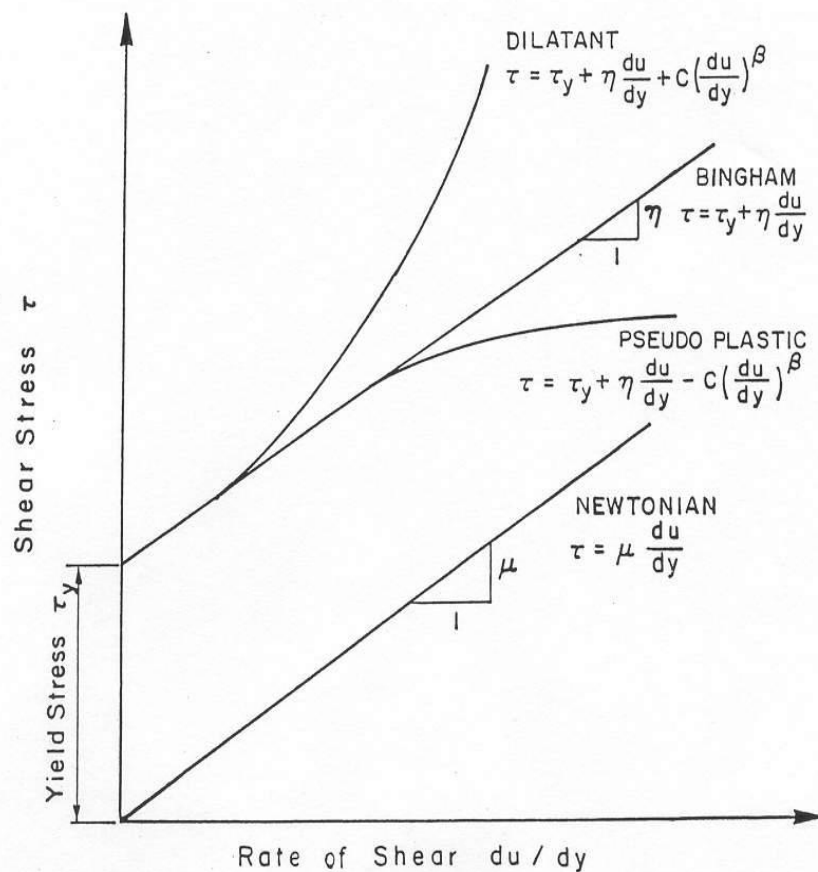


Εικόνα 9: . Η εικόνα δείχνει ρεογράμματα διαφόρων τύπων μη-Νευτώνων ρευστών (1 - διασταλτικό υγρό, 3 - ψευδοπλαστικό υγρό, 4 - βισκοπλαστικό υγρό) σε σύγκριση με ένα παρόμοιο χαρακτηριστικό του κλασικού Νεύτωνα υγρού (γραμμική εξάρτηση - 2). (Fontainhas, 2019)

Για να περιγράψουν οι τύποι των μη-Νευτώνιων ρευστών, χρησιμοποιείται ο όρος του φαινομένου ιξώδους του υγρού. Έτσι, για οποιοδήποτε μέγεθος της διατμητικής τάσης ενός μη Νευτώνιου ρευστού, το ιξώδες ενός Νεύτωνιου ρευστού μπορεί να ταιριάζει με το ίδιο μέγεθος των τάσεων διάτμησης. Όταν αυτό συμβαίνει, τότε το υγρό

διαθέτει τις ιδιότητες ενός στερεού σε τάσεις χαμηλότερες από τη στατική τάση διάτμησης, αλλά και τις ιδιότητες ενός ρευστού (σε διατμητικές τάσεις στο υγρό)

Στο παρακάτω διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης- προς το ρυθμό της διάτμησης (du/dy), στα Νευτώνια υγρά (όπως είναι το νερό) η τάση που ασκείται είναι μόνο το ιξώδες, το οποίο εκφράζεται ως η κλίση της ευθείας, της ευθύγραμμης σχέσης που περνά από την αρχή των αξόνων. Άμα σε αυτή την εξίσωση προσθέσουμε το όριο ελαστικότητας τότε καταλήγουμε στη σχέση του Bingham όπου δεν πραγματοποιείται η κίνηση του ρευστού ή ο ρυθμός της διάτμησης μέχρι να επιτευχθεί η τιμή του ορίου ελαστικότητας (τ_y). Στη περίπτωση που το ρευστό λειτουργεί με βάση την εξίσωση του Dilatant, συμμετέχει στην εξίσωση η συνοχή. Αυτή η σχέση που μας δίνει η καμπύλη του Dilatant είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο Flow- 2D software. Τέλος αν η ροή είναι τύπου Pseudo plastic τότε πρόκειται για ροή μεγάλης ταχύτητας με μεγάλο ρυθμό διάτμησης.



Εικόνα 10: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης- προς το ρυθμό της διάτμησης (du/dy) (από OBrien, FLO-2D Software Inc)

Μοντέλο του Bingham

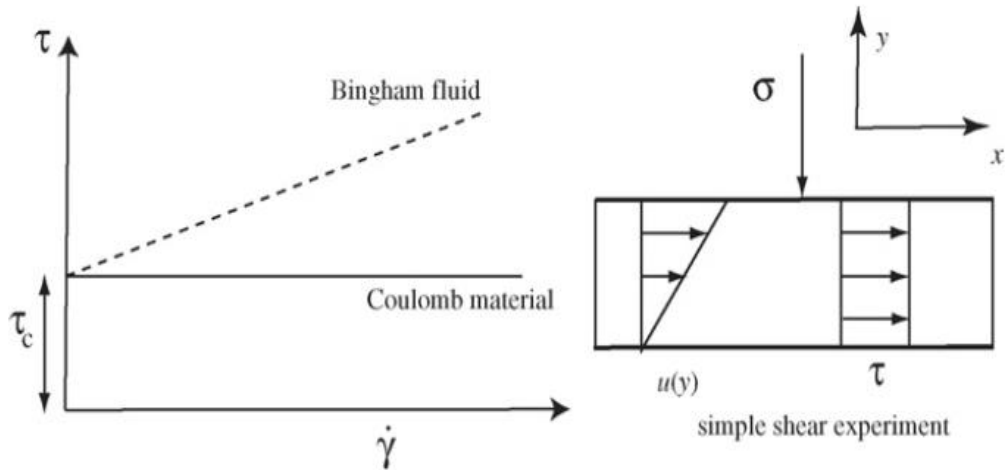
Η ρεολογία αναλύει τη συμπεριφορά της λασπορροής και μελετά τις ιδιότητες των ροών και την σχέση τάσης- παραμόρφωσης (Lorenzini and Mazza, 2004; Vyalov, 1986). Ως εκ τούτου, η ρεολογία ασχολείται με την παραμόρφωση πλαστικών

σωμάτων. Κατά τη μεταφορά της λασπορροής, η ταχύτητα ροής (u) θεωρείται ότι είναι σταθερή και στρωτή (Krizek, 2004; Kezdi, 1974). Αυτή η υπόθεση σημαίνει ότι οι ταχύτητες τόσο του στερεού όσο και των υδατικών τμημάτων του εδάφους είναι παρόμοιες. Με βάση την υπόθεση ότι μια ροή είναι στρωτή, ο συνολικός όγκος εναπόθεσης, είναι παρόμοιος με τον πραγματικό όγκο εναπόθεσης. Το ξ (η) καθορίζει την εσωτερική αντίσταση υγρού ως προς τη ροή. Κατά κάποιον τρόπο, είναι παρόμοια με την εξωτερική τριβή κατά τη κίνηση ενός στερεού υλικού. Σε μια εργαστηριακή δοκιμή, το ξ για ένα υγρό μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας ένα ιξωδόμετρο. Για παραμόρφωση που εξαρτάται από το χρόνο, το ξ ελέγχει την ταχύτητα της μετατόπισης (Bonzanigo et al., 2006). Ωστόσο το ξ του εδάφους είναι δύσκολο να προσαρμοστεί λόγω των περιορισμών των συμβατικών ιξωδομέτρων. Το ιξωδόμετρο είναι ένα μηχάνημα το οποίο λαμβάνει μετρήσεις ιξώδους όταν ο δείκτης υδαρότητας (LI) του υγρού είναι μεγαλύτερο του ένα (Blight, 1997). Η τιμή του ιξώδους του εδάφους είναι μια παράμετρος που δύσκολα μπορεί να εκφραστεί και ποικίλει ανάλογα με τη διατμητική τάση του εδάφους καθώς και από τον τύπο του ιξωδομέτρου. Μέχρι στιγμής δεν έχει βρεθεί στο εμπόριο κάποια συσκευή που να μπορεί να προσομοιώσει ακριβώς το ξ του υλικού υπό συνθήκες πολύ κοντά στη τιμή LL και για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του στη παρούσα διπλωματική.

Το μεγαλύτερο μέρος των υλικών σε μια λασπορροή είναι πλαστικά υλικά τα οποία αρχίζουν να ρέουν όταν η διατμητική τάση υπερβεί σημαντικά το όριο της ισορροπίας. Όπως αναφέρθηκε η λασπορροές περιγράφονται καλύτερα από το μοντέλο Bingham. Στη δυναμική των ρευστών, δύο είναι οι βασικές θεωρίες που περιγράφουν το φαινόμενο της ροής και αυτές είναι του Coulomb και του Bingham. Οι θεωρίες έχουν ελάχιστα κοινά, αφού τα υλικά Coulomb είναι υλικά δύο φάσεων για τα οποία η πίεση των πόρων και η τριβή παίζουν τον βασικό ρόλο, ενώ τα βισκοπλαστικά υλικά (π.χ. υγρά Bingham) συμπεριφέρονται συνήθως ως μονοφασικά υγρά στη μακροσκοπική κλίμακα και εμφανίζουν ιξώδη συμπεριφορά αφού ξεπεράσουν το όριο ελαστικότητας. Η πλαστικότητα και η βισκο-πλαστικότητα είναι δύο έννοιες στενά συνδεδεμένες με τη πρωτοποριακή δουλειά των Coulomb και Bingham. Στις πρώτες περιγραφές των πειραμάτων για απλές διατμητικές ροές σε συγκεκριμένο υλικό, εξηγήθηκαν οι εξής έννοιες:

- Εξάρτηση διάτμησης με ρυθμό διάτμησης. Στην περιγραφή που έδωσε ο Coulomb η διατμητική τάση (τ) είναι ανεξάρτητη από το ρυθμό διάτμησης ($\dot{\gamma}$), ενώ κατά την ερμηνεία του Bingham προκύπτει γραμμική συνάρτηση των δύο αυτών μεταβλητών.

- Εξάρτηση ορθής τάσης και διατμητικής τάσης. Η διατμητική τάση είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης (σ) για ένα υλικό σύμφωνα με τον Coulomb, ενώ για ένα υγρό Bingham οι δύο τάσεις είναι ανεξάρτητες.



Εικόνα 11: Καμπύλη ροής: υλικό Coulomb (συμπαγής γραμμή) και Υγρό Bingham (διακεκομμένη γραμμή) όταν το υλικό υφίσταται απλή ροή διάτμησης. (Ancey, 2007)

- Δύο φάσης ροής. Ένα υγρό Bingham συνήθως συμπεριφέρεται σαν ένα μονοφασικό ομογενές υλικό, δηλαδή ένα μόνο συστατικό μπορεί να περιγράψει τις ιδιότητές του. Αντίθετα ένα κορεσμένο υλικό Coulomb είναι ένα δυφασικό υλικό με διαφορετική αντίδραση στη μέση ρευστή και στερεή φάση. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο διαχωρισμό της τάσης ως αποτέλεσμα της ενεργούς τάσης και της πίεσης των πόρων $\sigma = \sigma' + p$, γνωστή ως αρχή του Terzaghi.
- Ελαστικότητα. Όταν η διατμητική τάση είναι κάτω από το όριο του τ_c τα υλικά Coulomb και Bingham συμπεριφέρονται σαν άκαμπτα ή ελαστικά σώματα. Για διατμητικές τάσεις άνω του τ_c το υλικό αρχίζει να ρέει.

$$\gamma > 0 \Rightarrow \tau = \tau_c + \mu \cdot \dot{\gamma}_n,$$

$$\gamma = 0 \Rightarrow \tau \leq \tau_c,$$

Πρόσφατες μελέτες επισημαίνουν πως για τη περιγραφή των διάφορων κατηγοριών των ροών, δεν αρκεί μονάχα οι πληροφορίες που αντλούνται από τη θεωρία της ρεολογίας.

2.3 Παράγοντες εκδήλωσης της λασπορροής

Η διαδικασία εκδήλωσης και εξάπλωσης της λασπορροής είναι περίπλοκη καθώς πολλοί παράγοντες αλλά και παράμετροι που συντελούν στην εκδήλωση του φαινομένου, πρέπει να διερευνηθούν και να αποτυπωθούν σύμφωνα με τα μοντέλα που επιλέγει ο κάθε ερευνητής. Η διαδικασία εκδήλωσης της λασπορροής ξεκινάει όταν

πραγματοποιηθεί σημαντική υπέρβαση του ορίου υδαρότητας από το ποσό της περιεκτικότητας σε νερό και ταυτόχρονη χαλάρωση του εδαφικού ιστού. Σε αυτή τη κατάσταση το έδαφος χάνει σταδιακά την αντοχή του και μετατρέπεται σε ένα μίγμα νερού και αργίλου, το οποίο ρέει ως παχύρρευστο υγρό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται λασπορροή (Mudflow). Συνεπώς τα δύο βασικά χαρακτηριστικά αυτού του φαινομένου είναι η μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό και η αποδιοργάνωση του εδαφικού ιστού σε μέγεθος λεπτών κόκκων ή μεγαλύτερων σβώλων. Η άργιλος σύμφωνα με τις υπάρχουσες θεωρίες είναι ένα υλικό με πολύ μικρή διαπερατότητα γεγονός που εμποδίζει το νερό να διεισδύει στο εσωτερικό της. Συνεπώς οι βασικές διεργασίες που επιτρέπουν το συγκεκριμένο φαινόμενο διείσδυσης του νερού στην άργιλο είναι ο παγετός και η ρηγματώση. Ο Terzaghi περιγράφει μία κατάσταση ρευστοποίησης σε υπερυδατοειδείς αργίλους, οι οποίες μείωσαν βαθμιαία τη διατμητική αντοχή τους, ως συνέπεια ελάττωσης του ποσοστού των αλάτων που περιέχονται στο νερό των πόρων (θαλάσσιες αποθέσεις με υλικά κυρίως από κατακερματισμένο χαλαζία και αδρανή αργιλικά ορυκτά).

Στις θιξοτροπικές αργίλους (θιξοτροπικά ονομάζουμε τα υλικά που το ιξώδες τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου όταν υφίστανται διάτμηση) το νερό υπάρχει ήδη μέσα στο έδαφος και ο ιστός σταθεροποιείται από ηλεκτροστατικές δυνάμεις που συγκρατούν τους κόκκους. Στη περίπτωση μείωσης αυτών των δυνάμεων, από μεταβολή των ηλεκτρολυτών του νερού των πόρων, προκαλείται διαταραχή που οδηγεί στην άμεση εκδήλωση τέτοιων φαινομένων.

Οι λασπροές έχουν τιμή ιξώδους πολλές τάξεις μεγέθους υψηλότερο από αυτό του νερού και σχετικά χαμηλές ταχύτητες σε σύγκριση με τις πλημμύρες λάσπης. Οι ροές λάσπης συνηθέστερα σχετίζονται με υψηλότερη συχνότητα, συμβάντα καταιγίδας μικρότερου μεγέθους συνήθως με περιόδους επιστροφής 10 έως 25 ετών. Τα μεγαλύτερα φαινόμενα πλημμύρας, έχουν συχνά περίσσια νερού για τα ιζήματα στην λεκάνη απορροής, ώστε να ενεργοποιήσουν μια λασπορροή. Τα ακραία γεγονότα λασπορροής μπορεί να εκδηλωθούν ως πλημμύρες λάσπης. Μέσα σε μια λεκάνη απορροής, ο συνολικός όγκος νερού και ιζημάτων από μια λασπορροή θα είναι γενικά μικρότερος από ότι σε μια πλημμύρα λάσπης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η λασπορροή εκδηλώνεται μετά από έντονες βροχοπτώσεις σε πλαγιές ή είναι αποτέλεσμα μιας επιταχυμένης μάζας κατολισθήσεων. Η διάβρωση των σχηματισμών και της πλαγιάς μπορεί επίσης να συμβάλλουν στη δημιουργία λασπορροής, ιδίως σε ποτάμια των οποίων τα υλικά είναι χαλαρά εδάφη. Κατά την ενεργοποίηση της λασπορροής τα υλικά μπορούν να ταξιδέψουν σε μεγάλες αποστάσεις (σε εύρος 1-100 km), γεγονός που αποδίδεται στην ιξώδη συμπεριφορά του υγρού. Υπάρχει μέχρι και σήμερα μια έντονη συζήτηση για την προέλευση της λασπορροής (Ancey, 2007) Μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι η λάσπη κατά το φαινόμενο της λασπορροής συμπεριφέρεται σαν βισκοπλαστικό υγρό. Στη περίπτωση αυτή το υγρό διαθέτει τις ιδιότητες ενός στερεού σε τάσεις χαμηλότερες από τη στατική τάση διάτμησης, αλλά και τις ιδιότητες ενός ρευστού (σε διατμητικές τάσεις στο υγρό) (Coussot and Meunier, 1996). Άλλοι ερευνητές θεωρούν τη λάσπη ως ένα ρευστοποιημένο έδαφος του οποίου η τιμή της πίεσης των πόρων είναι αρκετά υψηλή ώστε να απομειώνει την διατμητική αντοχή του υλικού (Iverson, 1997, 2005).

Ωστόσο και οι δύο θεωρίες έχουν εφαρμοστεί σε γενικευμένα υδραυλικά μοντέλα, σε ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν την εξέλιξη της ροής από την άποψη του βαθμού ροής και της ταχύτητας.

Συνεπώς, σύμφωνα με καταγραφές τέτοιων φαινομένων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι λασποροές δημιουργούνται:

1. Από ρωγμάτωση εδάφους λόγω αποξήρανσης.

Το φαινόμενο αυτό συναντάται κυρίως στα μεσογειακά κλίματα όπου η βροχερή περίοδος του χειμώνα ακολουθείται από περίοδο πλήρους ξηρασίας το καλοκαίρι και ενισχύεται σε περιοχές όπου η φυτοκάλυψη έχει απομακρυνθεί εξαιτίας πυρκαγιάς. Το νερό από τα επιφανειακά στρώματα του εδάφους εξατμίζεται, αναγκάζοντας το νερό βαθύτερων στρωμάτων να ανεβαίνει τριχοειδώς ώστε να αντικαταστήσει το προηγούμενο. Στις περιπτώσεις όμως που οι απώλειες νερού είναι σημαντικές, το νερό δεν προλαβαίνει να αντικατασταθεί και πραγματοποιείται ξήρανση του επιφανειακού στρώματος, με ταυτόχρονη μείωση της φυσικής υγρασίας κάτω από το όριο συρρίκνωσης και τελικά πραγματοποιείται ρωγμάτωση στην επιφάνεια του αργιλικού εδάφους. Έτσι κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων το νερό διεισδύει από τις ρωγμές και φθάνει σε μεγαλύτερα βάθη, εμποτίζοντας μεγάλους σβώλους και διαλύοντας μικρά θρύμματα σχηματίζοντας αιώρημα.

2. Λόγω κατολίστεσης

Η αρχή του φαινομένου πραγματοποιείται με μια μορφή μικρής κατολίστεσης πρηνούς ή όχθης. Η αποδιοργάνωση και χαλάρωση του υλικού δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την διόδου του νερού στο εσωτερικό του εδάφους. Όμως ο παράγοντας που προκαλεί τη διαταραχή του υλικού και κατά συνέπεια τη μετατροπή του σε παχύρευστο υλικό είναι η παραμόρφωση του. Η εκκίνηση της ροής του παχύρευστου υλικού αφαιρεί το στήριγμα στη βάση του δημιουργηθέντος πρηνούς δημιουργώντας έτσι οπισθοχωρούσα κατολίστεση, η οποία στη συνέχεια εξελίσσεται γρήγορα προς τα ανάντη σε όλη την έκταση της αργίλου.

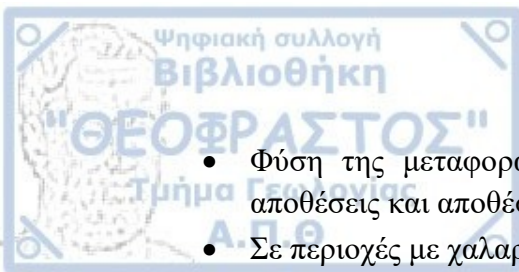
3. Σε τεχνητά πρηνή

Η διείσδυση του νερού στο εσωτερικό του εδάφους διευκολύνεται από τη χαλαρή διάστρωση του υλικού, όταν αυτό δεν έχει συμπτυκνωθεί σωστά.

Παρόλα αυτά οι φυσικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση λασποροής σε συνθήκες που επικρατούν μέσα σε λεκάνη απορροής είναι:

- Η αποστράγγιση (απότομες πλαγιές) και ανάπτυξη καναλιών
- Η μεγάλη διαθεσιμότητα ιζημάτων στις λεκάνες απορροής.
- Οι εκτεθειμένες πλαγιές (πυρκαγιές, κόψιμο ξύλων)
- Οι ανθρώπινες αποθέσεις (μπάζα) (κορμοί δέντρων, επιχώσεις για διάνοιξη δρόμων, σκουπίδια)
- Τραχύτητα και στένωση καναλιού

Όμως οι παράγοντες αυτοί δεν αρκούν ώστε να εκδηλωθεί το φαινόμενο της λασποροής. Επομένως θα πρέπει να γνωρίζουμε κάποιους βασικούς παράγοντες τόσο για τα υλικά όσο και για το περιβάλλον εκδήλωσης του φαινομένου. Επομένως ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στη:



- Φύση της μεταφοράς ιζημάτων (πλημμύρα ή λασπορροή) – ριποδοειδής αποθέσεις και αποθέσεις καναλιών
- Σε περιοχές με χαλαρές αποθέσεις και ογκόλιθους
- Σε πλαγιές κορημάτων (η λάσπη δημιουργεί απότομες κλίσεις)
- Σε περιοχές που επικρατούν λεπτόκοκκες αποθέσεις (ιλύς και άργιλοι)

Όπως αναφέρθηκε οι εδαφικές ροές και ειδικά οι λασπορροές προκαλούνται από διεργασίες που συνδέονται κυρίως με βροχοπτώσεις υψηλής έντασης και μικρής διάρκειας και συμβαίνουν έως και δύο έτη μετά από τις πυρκαγιές. Στη παγκόσμια βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί ροές που συνδέονται με βροχοπτώσεις μικρής έως και μεγάλης διάρκειας. Συγκεκριμένα έχουν καταγραφεί βροχοπτώσεις που οδήγησαν σε ροές από 18 λεπτά (Cannon et al., 2003a), έως και βροχοπτώσεις διάρκειας 10 ημερών με περίοδο επαναφοράς άνω των 100 ετών (Scott, 1971). Γενικά όμως στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται να εκδηλωθεί βροχόπτωση με διάρκεια μεταξύ των 30 λεπτών και 24 ωρών και μέσης έντασης συνήθως μεγαλύτερης των 4mm/hr. Στις εξαιρετικές περιπτώσεις που χρόνος εκδήλωσης του φαινομένου είναι γνωστός και έχει καταγραφεί, έχει βρεθεί ότι η εκδήλωσή του έγινε έπειτα από βροχόπτωση με διάρκεια από 6 λεπτά και ένταση 95mm/hm έως 5 ώρες με ένταση 6mm/hr (Cannon et al., 2003a). Επίσης έχει αποδειχθεί ότι σε πυρόπληκτες περιοχές, οι συνθήκες βροχής που προκαλούν ροές έχουν διάρκεια μικρότερη (τουλάχιστον μια τάξης μεγέθους) από την απαιτούμενη διάρκεια βροχόπτωσης σε μη-πυρόπληκτες περιοχές, καθώς και μικρότερη ελάχιστη απαιτούμενη ένταση (Cannon, 2005)

2.4 Παράμετροι που σχετίζονται με το φαινόμενο της λασπορροής

Με βάση τους κλασσικούς νόμους της εδαφομηχανικής, όταν οι διατμητικές τάσεις, δηλαδή οι δυνάμεις που προκαλούν τη μετακίνηση υπερβούν τη διατμητική αντοχή του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, τότε προκαλείται αστοχία. Η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι στην ουσία καθολική αντίσταση στην μετακίνηση, η οποία προκύπτει από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους και την επίδραση του ριζικού συστήματος. Οι διατμητικές τάσεις, σε αντίθεση, αποτελούν κυρίως δυνάμεις βαρύτητας από την εδαφική μάζα. Η κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των δυνάμεων αυτών εξαρτάται από:

- τις πιέσεις του νερού των πόρων,
- τη μορφολογία, το πάχος του εδαφικού μανδύα και
- τα φυσικά - μηχανικά χαρακτηριστικά τον εδάφους.

Η μελέτη του φαινομένου είναι εξαιρετικά σημαντική σε όλα τα στάδιά της, κατά την έναρξή, τη μεταφορά και την εναπόθεση του υλικού, δηλαδή από τη μεταμόρφωση του υλικού από τη στερεά έως και την πλαστική φάση. Όταν η περιεκτικότητα του νερού αυξάνει και φτάνει τη τιμή του ορίου υδαρότητας (LL) τότε η μάζα του εδάφους ξεκινάει να κινείται αρκετά γρήγορα. Σε αυτή τη κατάσταση το έδαφος ορίζεται ως ιζώδες υγρό και σταδιακά κινείται σαν ροή λάσπης (mudflow). Στη συνέχεια, το υλικό ρέει λόγω βαρύτητας. Η αυξημένη τιμή της υγρασίας μπορεί να μειώσει την αντοχή σε διάτμηση και κατά συνέπεια το ιζώδες (η), το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει τη

λασπορροή καθώς η τιμή του ιξώδους (η) ελέγχει τη λασπορροή κατά τη μεταφορά. Το φαινόμενο της λασπορροής σταματά όταν η δύναμη διάτμησης μειωθεί από τη δύναμη τριβής.

Η πίεση πόρων παίζει καθοριστικό ρόλο στις ροές των αργιλικών υλικών. Στην πραγματικότητα, η χαμηλή διαπερατότητα του εδάφους και η ανομοιόμορφη κατάσταση των τάσεων και των παραμορφώσεων που προκαλείται από την κίνηση, καθιστούν πολύ πιθανή την ανάπτυξη υπερβολικών πιέσεων πόρων, κάτι που ενισχύεται δραματικά από τη διείσδυση του νερού της βροχής (Comegna et.al, 2007). Αυτή η διαπίστωση προέκυψε από την έρευνα των Comegna et al έπειτα από μια αριθμητική ανάλυση πολλών δεδομένων που υποδηλώνουν ότι η κίνηση των λασπορροών αναπτύσσεται μέσω εναλλασσόμενων σταδίων, στραγγιζόμενων και μη σταγγιζόμενων (drained–undrained) σχηματισμών. Η έρευνα αυτή είναι πολύ σημαντική στη περίπτωση των λασπορροών με αργιλικά και ιλυώδη υλικά, εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας και της συμβατικής συμπεριφοράς που σχετίζεται σε υψηλό βαθμό με τη μειωμένη διατμητική αντοχή των εδαφών. Συγκεκριμένα, μέσω ορισμένων αναλύσεων, έχει αποδειχθεί ότι οποιαδήποτε ανακατανομή των τάσεων που σχετίζεται με την τοπική κινητοποίηση της λασπορροής, μπορεί να προκαλέσει υπερβολικές πιέσεις πόρων που θα ενεργοποιήσουν το φαινόμενο.

Η φαινόμενη πυκνότητα ή το φαινόμενο βάρος ενός μίγματος νερού – ιζήματος είναι το άθροισμα της πυκνότητας ή του ειδικού βάρους όλων των περιεχόμενων στερεών και των δομικών στοιχείων του νερού και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη τιμή της συγκέντρωσης. Οι πυκνότητες έχουν αναφερθεί από 87 pcf (Okuda et al. 1977) έως 158 pcf (Curry 1966). Αυτά είναι ισοδύναμα με συγκέντρωση όγκου του στερεού υλικού από περίπου 25 % έως 70 ή 80 %, αντίστοιχα. Έτσι, κατά τη διάρκεια μιας εξαιρετικά υψηλής συγκέντρωσης ροής, τα στερεά υλικά θα κινηθούν περισσότερο από το νερό και συγκεκριμένα το νερό μπορεί να μετακινηθεί σε ένα πολύ μικρό ποσοστό κατά τη συνολική ροή.

Μια παράμετρος που σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε νερό (w) είναι η στερεή συγκέντρωση κατ'όγκο C_v (O'Brien, 1986), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$C_v = \frac{V_{solid}}{V_{water} + V_{solid}}$$

όπου V_{solid} ο όγκος του στερεού μέρους και

V_{water} ο όγκος του νερού.

Σε άλλη μορφή, το C_v μπορεί να γραφτεί ως

$$C_v = \frac{1}{1 + (w * G_s)}$$

όπου w είναι η περιεκτικότητα σε νερό και G_s είναι το ειδικό βάρος.

Αυτό συνεπάγεται ότι εάν καθορίζονται G_s και w , τότε το C_v μπορεί να υπολογιστεί εκ νέου. Ως εκ τούτου, το C_v είναι ένα σημαντικό βασικό στοιχείο της ροής λάσπης και η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό (w) περιλαμβάνεται σε αυτήν.

Η συγκέντρωση του αιωρούμενου ιζήματος κατά βάρος C_s εκφράζεται σε όρους C_v ως

$$C_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w + \frac{\gamma_w}{C_v}}$$

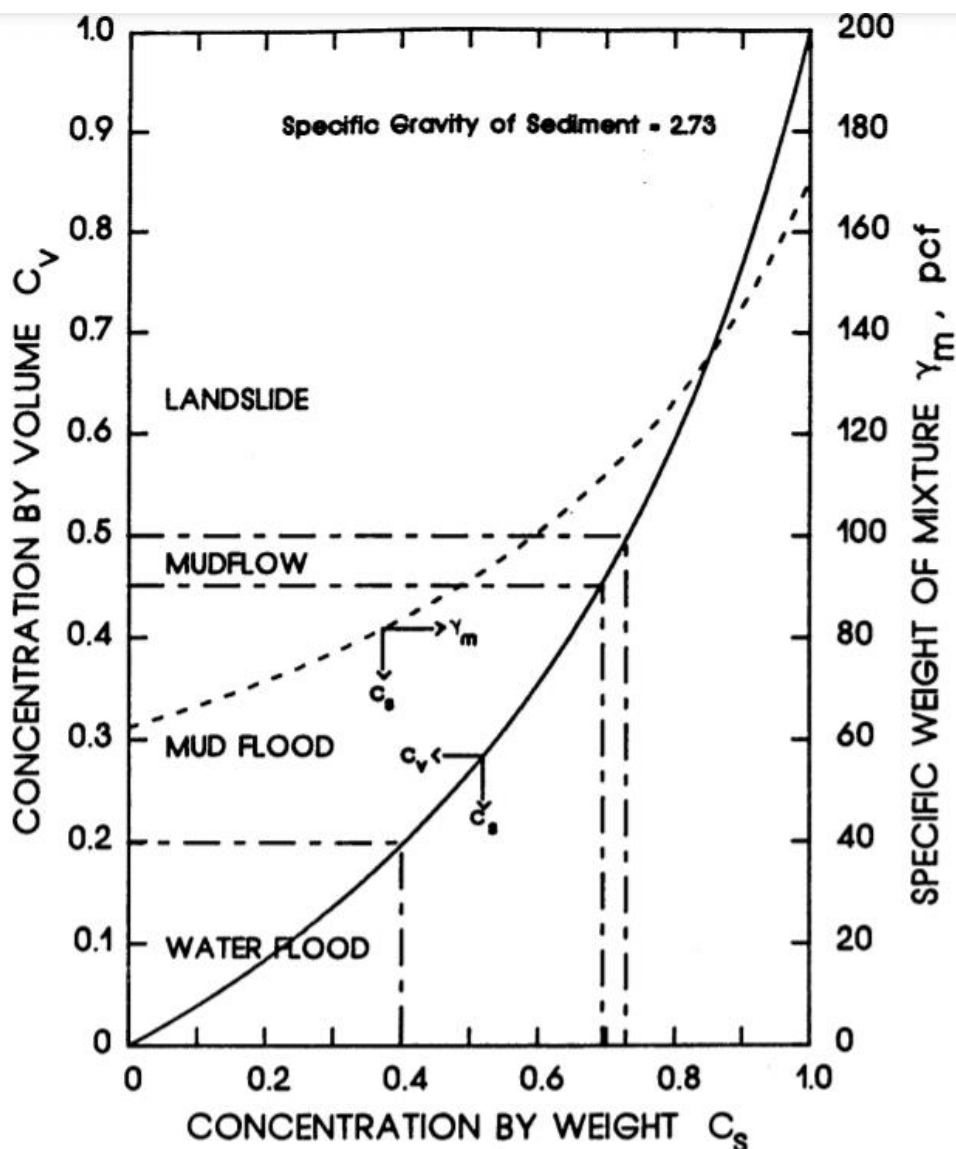
γ_s = ειδικό βάρος των αμμοδών σωματιδίων

γ_w = ειδικό βάρος του νερού

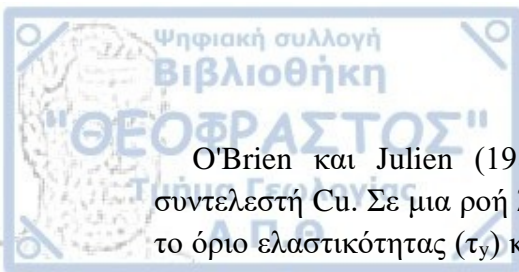
Ως εκ τούτου, το ειδικό βάρος του μείγματος νερού-ιζημάτων σχετίζεται με το C_s παρά το C_v εκφράζεται ως

$$\gamma_m = \frac{\gamma_s * \gamma_w}{\gamma_s - (\gamma_s - \gamma_w) * C_s}$$

Το ειδικό βάρος του μίγματος νερού-ιζημάτων όπως προσδιορίζεται στην παραπάνω εξίσωση είναι ένα φαινομενικό ειδικό βάρος όταν χρησιμοποιείται η μέση συγκέντρωση ιζημάτων σε βάθος από συγκεντρώσεις αιωρούμενων ιζημάτων.



Εικόνα 12: Το σχήμα δείχνει τη μετατροπή από C_v σε C_s και από C_s στο φαινόμενο ειδικό βάρος του μίγματος νερού-ιζήματος για μέση συγκέντρωση σε βάθος. (Brown, 1988)

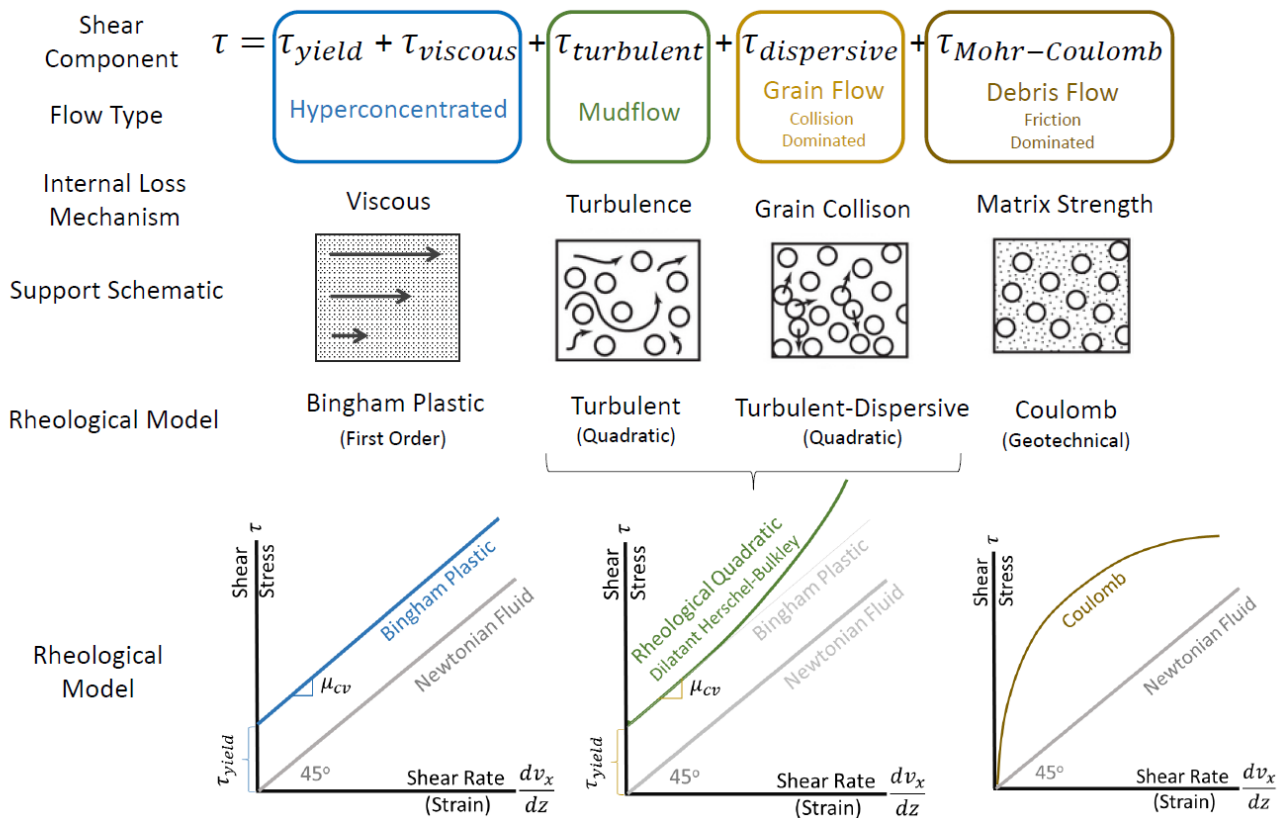


O'Brien και Julien (1988) ταξινομήσαν τη λασπορροή χρησιμοποιώντας το συντελεστή Cu. Σε μια ροή λάσπης, Cu είναι εντός 0,45-0,55. Καθώς ο Cu επηρεάζει το όριο ελαστικότητας (τ_y) και το ιξώδες (η), τα δύο τελευταία μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\tau_y = a e^{\beta C_u}$$
$$\eta = \gamma e^{\delta C_u}$$

όπου α , β , γ και δ είναι σταθερές πεδίου που καθορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές. Η άλλη παράμετρος είναι ο συντελεστής αντοχής ροής του Manning (n). Αυτή η τιμή είναι παρόμοια με το συντελεστή τριβής και εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας.

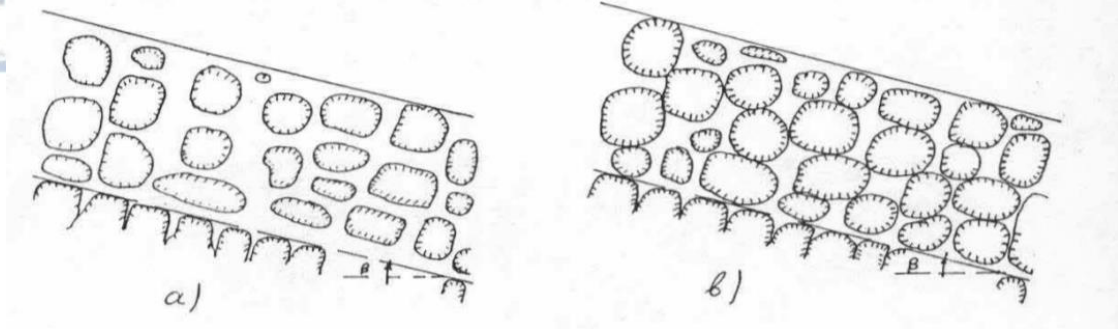
Στις αλλουβιακές εμφανίσεις σημαντικό ρόλο παίζει η συγκέντρωση και ο όγκος των ιζημάτων. Καθώς η συγκέντρωση των σωματιδίων αυξάνεται το είδος της ροής όταν επέλθει αστοχία αλλάζει. Συγκεκριμένα μικρή ποσότητα συγκέντρωσης ιζημάτων παραπέμπει σε περισσότερο ιξώδες ροή με μεγαλύτερη συγκέντρωση νερού έναντι ιζημάτων. Καθώς η συγκέντρωση των ιζημάτων αυξάνεται η ροή μετατρέπεται σε λασπορροή με μορφή τυρβώδη. Στη συνέχεια, με ακόμη περισσότερη αύξηση ιζημάτων οι ροή γίνεται πιο κοκκώδης, με σημαντική πλέον τη τριβή που εμφανίζεται ανάμεσα στα σωματίδια κατά την ενεργοποίηση μιας ροής. Τέλος, η ροή κορρημάτων είναι αυτή με τη περισσότερη συγκέντρωση ιζημάτων, όπου σημαντικό ρόλο παίζει τόσο η τριβή των σωματιδίων, όσο και αντοχή τους.



Εικόνα 13 :Είδος ροής και ρεολογικό μοντέλο με βάση τη συγκέντρωση των ιζημάτων (Floyd, et al. 2019)

2.5 Υπολογισμοί ευστάθειας έναντι λασποροής

Η συνθήκη ισορροπίας στο εσωτερικό του εδαφικού ιστού διαταράσσεται από τη στιγμή που το νερό εισέρχεται από τις ρωγμές και δημιουργεί το σύστημα των δύο φάσεων, κόκκοι και αιώρημα αργίλου. Με τη μείωση του ποσοστού των κόκκων στο εσωτερικό του εδάφους εξασθενεί σταδιακά ο εδαφικός ιστός και τη στιγμή που όλοι οι σβώλοι πλέον μέσα στο αιώρημα, τότε το υλικό συμπεριφέρεται ως ρευστό. Έτσι διακρίνονται δύο οριακές καταστάσεις, πλήρης και μερικής ρευστοποίησης οι οποίες απεικονίζονται στο παρακάτω σκαρίφημα.



Εικόνα 14: Στη περίπτωση α) απεικονίζεται ιστός πλήρως εξασθενημένος ενώ στη περίπτωση β) ιστός μερικώς εξασθενημένος

Συνεπώς για τις δύο περιπτώσεις που διαπιστώθηκαν ακολουθούν διαφορετικοί υπολογισμοί για την ανάλυση ευστάθεια των λασπορροών που προκύπτουν. Για την περίπτωση:

α) Πλήρους ρευστοποίησης

Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε επικράτηση του αιωρήματος της αργίλου ενώ οι αργιλικοί σβώλοι διασκορπίζονται μέσα στο κινούμενο ρευστό. Σύμφωνα με τον Bagnold οι κόκκοι δεν πρέπει να θεωρηθούν ότι παρασύρονται από τάσεις που εξασκεί το υγρό στη επιφάνεια τους, όταν σχηματίζεται ροή σε κινούμενο υγρό με στερεούς κόκκους, ενώ η μόνη δύναμη είναι η συνιστώσα του βάρους, που εφαρμόζεται στους κόκκους κατά τη διεύθυνση της ροής.

$$\tan \beta_{κρ} = \tan \varphi' * \left[\frac{(\gamma_u - \gamma_F) * C}{\gamma_F + (\gamma_u - \gamma_F) * C} \right]$$

Όπου γ_u = το φαινόμενο βάρος των σβώλων της αργίλου

γ_F = το φαινόμενο βάρος του αιωρήματος

C = το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνουν οι σβώλοι

φ' = η γωνία τριβής, που μπορεί να εξομοιωθεί με την γωνία εσωτερικής τριβής της αργίλου.

β) Μερική ρευστοποίηση

Οι σβώλοι εφάπτονται μεταξύ τους στη πλειοψηφία τους και σχηματίζουν εδαφικό ιστό, δημιουργώντας έτσι ένα θεωρητικά ενιαίο σύστημα. Η ισορροπία σε αυτή τη περίπτωση εκφράζεται ως

$$\tan \beta_{κρ} = \tan \varphi' * \frac{\gamma}{\gamma'}$$

Όπου γ = το φαινόμενο βάρος της ρευστής μάζας

γ' = το φαινόμενο βάρος υπό άνωση

2.6 Μέτρα αντιστήριξης

Ο σχεδιασμός συγκράτησης των πλημμυρών πρέπει να περιλαμβάνει την εξέταση μη εκδήλωσης της ροής, των κορημάτων και της λάσπης (debris flow and mudflow) των καναλιών και τον καθαρισμό / συντήρηση σε περίπτωση εκδήλωσης. Τα αποτελεσματικά μέτρα για τη ροή λάσπης περιλαμβάνουν αποθήκευση, εκτροπή, εξάπλωση και διασκορπισμό μετωπικών κυμάτων. Οι λεκάνες συγκράτησης λάσπης μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικές όταν ο όγκος της λασποροής είναι σχετικά μικρός και μπορεί να εκτιμηθεί πριν την εκδήλωση του φαινομένου. Όταν η χωρητικότητα αποθήκευσης είναι ανεπαρκής, μια προτιμώμενη εναλλακτική λύση είναι η εξάπλωση της ροής σε μη αστικές περιοχές, όπως περιοχές ανοιχτού χώρου, πεδινές περιοχές, πάρκα και περιοχές αναψυχής όπου οι ζημιές σε ακίνητα και το κόστος καθαρισμού είναι ελάχιστες. Η εκτροπή ροής για την ολοκλήρωση της ροής μπορεί να είναι περίπλοκη και θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις πιέσεις πρόσκρουσης, τη στατική φόρτιση και τη ροή σε σχέση με προηγούμενες εναποθέσεις λάσπης. Πιθανές απώλειες ροής κοντά στην είσοδο των εγκαταστάσεων αποθήκευσης πρέπει επίσης να θεωρηθούν ως συσσώρευση καταθέσεων. Η εκτροπή της ροής σε περιοχές που απαιτούν απόρριψη του εκσκαφόμενου υλικού μπορεί να είναι πολύ δαπανηρή για τη λειτουργία και συντήρηση.

Τα τοιχώματα εκτροπής μπορούν να κατασκευαστούν από σκυρόδεμα, τσιμέντο εδάφους ή να αποτελούνται από γαίες, που έχουν σχεδιαστεί για να περιορίζουν τη λάσπη. Οι γαίες αυτές θα πρέπει να έχουν πυρήνα ή πρόσωπο ανθεκτικό στη διάβρωση. Η εκτόξευση και η υπερβολική τοποθέτηση των αναχωμάτων και των τοιχωμάτων μπορούν να αποφευχθούν από τον σωστό προσανατολισμό της δομής εκτρέποντας έτσι τη διαδρομή ροής. Συνιστάται επίσης κάθετα πρόσωπα κρούσης για τον περιορισμό της εκτέλεσης. Η άφιξη ενός μετωπικού κύματος λάσπης μπορεί να είναι πολύ καταστροφική. Για το αποτελεσματικό μετριασμό των κινδύνων πλημμύρας, είναι απαραίτητο να απορροφηθεί η υψηλή πίεση που ασκείται από το μετωπικό κύμα. Το επικίνδυνο σε αυτή τη περίπτωση είναι ότι το κύμα θα μπορούσε να μεταφέρει μεγάλους ογκόλιθους και κορήματα ικανά για μεγάλες δυνάμεις πρόσκρουσης και συγκρούσεις με τις κατασκευές εκτροπής της ροής. Οι επιφάνειες πρόσκρουσης πρέπει να είναι σχεδιασμένες ώστε να αντέχουν στην πρόσκρουση των μεγάλων ογκόλιθων. Ο σχεδιασμός του ύψους της κατασκευής και ο συντελεστής τιμών ασφαλείας για δομές κρούσης δίδονται στον παρακάτω πίνακα.

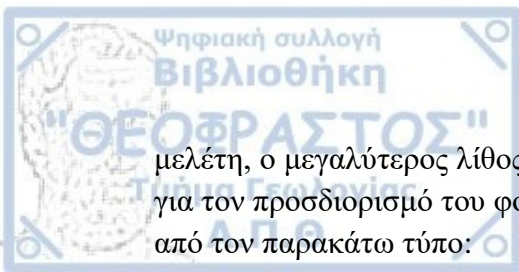
Πίνακας 2: Freeboard και Συντελεστής Ασφαλείας (FEMA Manual, Chapter 4 (1994 draft) modified) (1m= 3,48 ft)

*Το freeboard είναι ένας παράγοντας ασφάλειας που συνήθως εκφράζεται σε πόδια πάνω από το επίπεδο πλημμύρας. Το "Freeboard" τείνει να αντισταθμίσει τους πολλούς άγνωστους παράγοντες που θα μπορούσαν να συμβάλουν σε ύψη πλημμύρας μεγαλύτερα από το ύψος που υπολογίστηκε.

Είδη ροών	*Freeboard (ft)	Συντελεστής Ασφαλείας (F.S)
Ρηχή πλημμύρα <1 ft (0,287m)	1	1.1
Μέτρια πλημμύρα < 3 ft (0,862m)	1	1.2
Μέτρια πλημμύρα < 3 ft (0,862m), Κορήματα και ογκόλιθοι < 1 ft(0,287m)	1	1.2
Πλημμύρα λάσπης, ροη κορημάτων <3 ft (0,862m), Κορήματα, ογκόλιθοι και ιζηματογενής αποθέσεις < 1 ft(0,287m)	2	1.25
Λασποροές , ροές κορημάτων <3 ft (0,862m), Κορήματα, ογκόλιθοι, ιζηματογενής αποθέσεις και μικρά κύματα < 1 ft (0,287m), αναχώματα	3	1.4
Λασποροές , ροές κορημάτων >3 ft (0,862m), κύματα και ογκόλιθοι >3ft (0,862m)	3+	1.5

Στα αποτελεσματικά μέτρα περιλαμβάνονται τα αναχώματα που περιορίζουν τη λασποροή έξω από το κανάλι. Τα αναχώματα είναι επιμήκη τεχνητά (ή φυσικά) φράγματα που κατασκευάζονται από εδαφικά υλικά. Το ανάχωμα θα πρέπει να κατασκευάζεται παράλληλα με το κανάλι, επιτρέποντας την κατάλληλη απόσταση μεταξύ του καναλιού και του ερείσματος για την αποθήκευση των υλικών της λασποροής και της ροής κορημάτων. Συνήθως 15-30 m μπορούν να παραμεριστούν. Η χωρητικότητα του καναλιού μεταφοράς στη συνέχεια σχεδιάζεται ώστε να επιτρέπει την υπερχειλίση κατά τη διάρκεια της μέγιστης εκφόρτωσης. Ο σχεδιασμός του αναχώματος απαιτεί γενικά ύψος 0,9m έως 1,5 m, αρκεί να μην αναμένεται σημαντική αλλαγή στην κατεύθυνση ροής. Δέντρα και άλλα εμπόδια ενισχύουν τα μέτρα για την εκτροπή της λασποροής. Ωστόσο σημαντική κρίνεται η αξιολόγηση για την πιθανότητα διάβρωσης και αστοχίας. Θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να σχεδιαστεί ένα έργο συντήρησης για την πρόσβαση και την απομάκρυνση των εναποθέσεων της λασποροής μέσα στα αναχώματα μετά τη λήξη του φαινομένου.

Για το σχεδιασμό της κατασκευής σημαντική κρίνεται η εκτίμηση των φορτίων πρόσκρουσης που προκύπτουν από αντικείμενα που παρασύρονται στη ροή, προσκρούοντας σε μια δομή επιφάνειας με μια ταχύτητας κάθετη προς την κατεύθυνση ροής. Για τον υπολογισμό του φορτίου πρόσκρουσης, θα πρέπει να ληφθούν τα κορήματα και οι ογκόλιθοι που μεταφέρονται, Για να προκύψει μια συντηρητική



μελέτη, ο μεγαλύτερος λίθος που μεταφέρεται από μια ροή πρέπει να χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του φορτίου πρόσκρουσης. Η πρόσκρουση φόρτωσης P , δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P = \frac{w * V}{A * g * \Delta * t}$$

όπου w είναι το βάρος του αντικειμένου, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, V είναι η ταχύτητα ροής, το A είναι η περιοχή κρούσης που θεωρείται ότι είναι ένα ποσοστό της περιοχής διατομής του αντικειμένου και το t είναι η διάρκεια της κρούσης. Το Εγχειρίδιο FEMA (προσχέδιο, 1994) παρουσιάζει επίσης εξισώσεις για τον υπολογισμό των υδροστατικών και υδροδυναμικών φορτίων.

Ο σχεδιασμός των λεκανών κράτησης απαιτεί την εκτίμηση του όγκου των ιζημάτων για την εκδήλωση της λασποροής. Μια αποδεκτή μέθοδος είναι να συγκεντρωθεί ο όγκος υδρογράφου 100 ετών για την πιθανή μέση συγκέντρωση του γεγονότος της ροής. Συνήθως, η μέγιστη συγκέντρωση ιζημάτων κατ'όγκο για ένα συμβάν λασποροής κυμαίνεται από 45% έως 55%, και η μέση συγκέντρωση ιζημάτων για το συμβάν ροής είναι της τάξης του 25% έως 35%. Μια συντηρητική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί μια μέση συγκέντρωση 50% κατ'όγκο, η οποία οδηγεί σε έναν συντελεστή διόγκωσης BF 2 που δίνεται από τη σχέση:

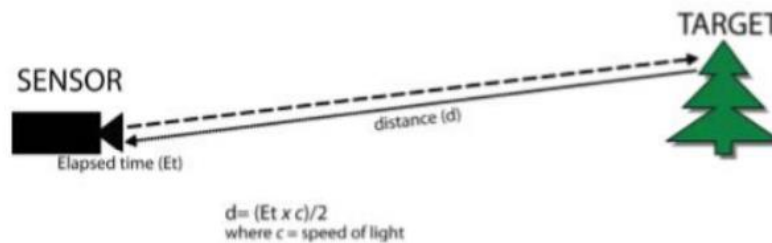
$$BF = \frac{1}{1 - C_v}$$

Συνοπτικά, τα πιο αποτελεσματικά μέτρα για το φαινόμενο της λαποροής είναι: 1) λεκάνες συγκράτησης και οι μέθοδοι αποθήκευσης. 2) αναχώματα εκτροπής με στόχο την εξάπλωση της λάσπης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΧΡΗΣΗ LiDAR ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

3.1 Βασικές αρχές για την λειτουργία των LiDAR

Η μέθοδος σάρωσης με χρήση LiDAR, αποσκοπεί στον προσδιορισμό της θέσης του στις 3 διαστάσεις, χρησιμοποιώντας ανάκλαση του φωτός από ένα στόχο. Ουσιαστικά η συσκευή LiDAR παράγει και εκπέμπει μια δέσμη ακτινών ή παλμική σειρά συγκεκριμένης και ευθυγραμμισμένης κατεύθυνσης και φάσης, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λέιζερ. Η μέθοδος αυτής βασίζεται στην σάρωση και εκπομπή ακτινοβολίας λέιζερ η οποία καταγράφει το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Είναι μία μέθοδος τηλεπισκόπησης, της οποίας ο όγκος των δεδομένων που συλλέγονται και επεξεργάζονται είναι πολύ μεγάλος, ενώ η αποτύπωση των αντικειμένων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε απόσταση μέχρι και 1.500m σύμφωνα με τις παροχές της κάθε



Εικόνα 15: Απεικόνιση της διαδρομής του σήματος από το LiDAR στον στόχο καθώς και του επιστρεφόμενου παλμού (Lato, 2011) συσκευής.

Ανάλογα με τη θέση του αισθητήρα διακρίνονται οι παρακάτω τύποι συστημάτων (Lato, 2010).

- Εναέριοι Σαρωτές - ALS (Airborne-based Laser Scanners)
- Επίγειοι Σαρωτές - TLS (Terrestrial Laser Scanners)
- Οι Σαρωτές LiDAR χωρίζονται σε Στατικούς και Κινητούς, ανάλογα με τη μέθοδο σάρωσης που ακολουθείται

Οι στατικοί επίγειοι σαρωτές παραμένουν σταθεροί μέχρι την ολοκλήρωση της σάρωσης επάνω σε έναν τρίποδα. Το βασικό πλεονέκτημα τους είναι η λήψη δεδομένων υψηλής ανάλυσης που οδηγούν στη δημιουργία αναλυτικών και ρεαλιστικών γεωαναφερμένων μοντέλων του ανάγλυφου, καθώς βασικός εξοπλισμός τέτοιων συσκευών είναι μια συσκευή GPS. Αυτό το αποτέλεσμα επιτυγχάνεται καθώς η συσκευή είναι δυνατόν να τοποθετηθεί σε διάφορες θέσεις με σκοπό τη σάρωση της ίδιας επιφάνειας από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αντίθετα οι κινητοί σαρωτές τοποθετούνται επάνω σε κινούμενο όχημα (επίγειο, ιπτάμενο ή πλωτό). Οι κινητοί σαρωτές περιλαμβάνουν σύστημα GPS και INS, προσδίδοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και άμεση γεωαναφορά δεδομένων.

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

- Point Data (XYZ)

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

- Point Data (XYZI).

Στον τύπο αυτών των δεδομένων, εκτός από τις συντεταγμένες X,Y,Z υπολογίζεται και η ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος (I). Η ένταση αυτή προκύπτει από την ανάκλασή του στα αντικείμενα που σαρώνονται και παίρνει τιμές 0-1. Η τιμή της έντασης εξαρτάται από την ανακλαστική ικανότητα των αντικειμένων τα οποία σαρώνονται με τη συσκευή LiDAR, πάνω στα οποία προσπίπτουν οι ακτίνες λέιζερ. Η ένταση I έχει την ιδιότητα να καθιστά τις δομές αρκετά διακριτές στο ανθρώπινο μάτι, γεγονός που οφείλεται στο ότι προσδίδει στην εικόνα που δημιουργείται την αίσθηση του βάθους.

- Point Data (XYZRGB).

Σε αυτή τη περίπτωση συνυπολογίζεται και η χρωματική πληροφορία και παίρνει τιμές από 0-255. Εδώ υπάρχει δυνατότητα προσθήκης ψευδοχρωματισμού RGB η οποία γίνεται με χρήση ενσωματωμένης στο LiDAR ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Η μηχανή συσχετίζει τα δεδομένα αυτόματα όταν είναι ενσωματωμένη, ενώ στη περίπτωση που είναι εξωτερική, ο συσχετισμός των εικονοστοιχείων με τα σημειακά δεδομένα γίνεται χειροκίνητα μέσω κατάλληλου λογισμικού. Τα δεδομένα XYZRGB παράγουν τέτοια πληροφορία ώστε οι δομές των αντικειμένων που σαρώνονται να είναι ευδιάκριτες και πιο κατανοητές.

3.3 Μελέτη Κατολισθήσεων

Η σάρωση με συσκευή LiDAR παρέχει μια πληθώρα εφαρμογή στις γεωεπιστήμες και γενικώς στις επιστήμες που χρησιμοποιούν δεδομένα τηλεπισκόπησης. Συγκεκριμένα στη εφαρμοσμένη γεωλογία παρέχει αρκετά μεγάλη βοήθεια στη μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων και συνιστάται σε (Scaioni et al., 2014):

- Ανίχνευση και μελέτη των κατολισθήσεων αλλά και βραχοκαταπτώσεων. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη σάρωση του LiDAR δίνουν πληροφορίες για τη μορφολογία περιοχής έρευνας. Έτσι εντοπίζονται οι χαρακτηριστικές δομές μια κατολίπησης όπως είναι οι ρωγμές πίσω από τη στέψη ενός πρανούς, τα κατολισθέντα υλικά στη βάση του πρανούς αλλά και το πόδι της κατολίπησης. Στη περίπτωση των ροών είναι πιθανός ο εντοπισμός της αφετηρίας της ροής, των δρόμων μεταφοράς καθώς και των σημείων απόθεσης. Επίσης είναι δυνατή η καταγραφή των όγκων των κατολισθέντων τεμαχών την περίπτωση των κατολισθήσεων, των υλικών απόθεσης στις ροές και φυσικά η χαρτογράφηση των ορίων.

- Χαρτογράφηση κατολισθήσεων και στην εκτίμηση επικινδυνότητας. Η χαρτογράφηση των ροών και των κατολισθήσεων γενικότερα με μεγάλη ακρίβεια, είναι δυνατή μέσω των Εναέριων Σαρωτών ALS ακόμη και σε μεγάλη και δυσπρόσιτη περιοχή. Η λεπτομερής ανάλυση της μεθόδου, βοηθάει στην εκτίμηση κινδύνου τέτοιων φαινομένου, σε σχέση με τη συχνότητα του και την έντασή του.
- Δημιουργία Μοντέλων παρατήρησης και επεξήγησης του φαινομένου. Τα δεδομένα LiDAR που προκύπτουν μετά την σάρωση, οδηγούν σε νέφη σημείων. Από την επεξεργασία αυτών των νεφών, είναι δυνατή η δημιουργία σχηματικών μοντέλων στις τρεις διαστάσεις. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μοντελοποίηση της αστοχίας που πραγματοποιείται στην περιοχή και για τον σωστό και λεπτομερή προσδιορισμό της απαιτούνται τουλάχιστον δύο διαφορετικής χρονικής περιόδου λήψεις, έτσι ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των δύο πληροφοριών. Έτσι είναι δυνατόν να υπολογιστεί και ο όγκος μετατόπισης, εφόσον τα δεδομένα είναι γεωαναφεραμένα, μέσω αυτής της διαφοράς που προκύπτει στα δύο μοντέλα εδάφους.
- Παρακολούθηση. Μέσω των διαφορετικών χρονικά επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σε μια περιοχή, είναι δυνατή η παρακολούθηση τέτοιων φαινομένων, με τη τεχνολογία LiDAR. Μέσα από τη σταθερή παρακολούθηση της συσκευής και της γρήγορης επεξεργασίας των δεδομένων (σε επίπεδο ημέρας και ώρας), είναι εφικτή η αποφυγή ατυχημάτων που μπορούν να οδηγήσουν σε τοπικές καταστροφές αλλά και σε απώλεια ανθρώπινων ζωών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 Θέση- Γεωμορφολογία

Το Περιβόλι ανήκει στη περιφερειακή ενότητα των Γρεβενών και συγκεκριμένα στο νοτιοδυτικό τμήμα της Μακεδονίας. Βρίσκεται 45 χλμ δυτικά της πόλης των Γρεβενών και είναι χτισμένο στις πλαγιές της οροσειράς της Βόρειας Πίνδου, στο όρος Λύγκος με υψηλότερη κορυφή το Αυγό, σε υψόμετρο 1.260-1.370 μέτρων.



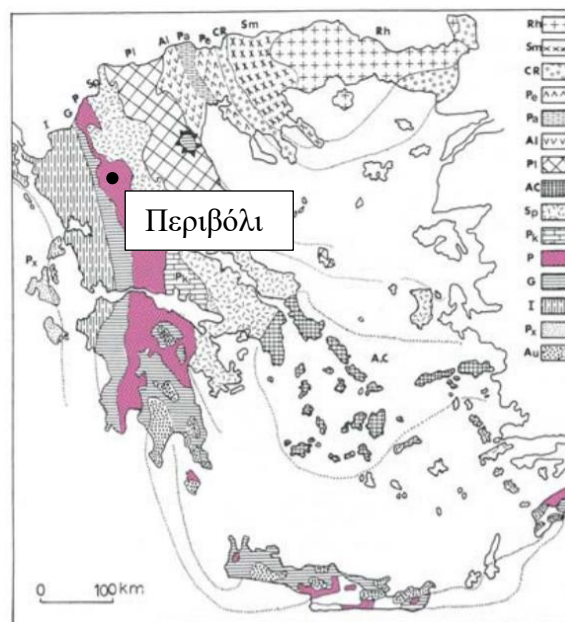
Εικόνα 16: Θέση σε σχέση με την Ελλάδα, Περιβόλι Γρεβενών.
(από Google earth)

Η περιοχή βρίσκεται σε υψόμετρο 1200m μέσα στο δάσος του Όρλιακα και χαρακτηρίζεται από πυκνή βλάστηση ως τις παρυφές του δρόμου. Το Περιβόλι ανήκει σε ένα από τους σπουδαιότερους και πιο παρθένους Δρυμούς της Ελλάδας, τη «Βάλια Κάλντα», η οποία βρίσκεται στην οροσειρά της Πίνδου στα όρια των νομών Γρεβενών και Ιωαννίνων και αποτελεί βιότοπο της καφέ αρκούδας αλλά και κάποιων σπάνιων ειδών αρπακτικών πουλιών. Ο δρυμός βρίσκεται σε υψόμετρο 1400m περίπου και περιλαμβάνει τα βουνά Λύγκος και Μαυροβούνι (Φλέγκα 2.159m) μέχρι και τις κορυφές του βουνού Αυγό, ενώ διασχίζεται από αρκετά ρέματα με σημαντικότερο το

Αρκουδόρεμα, το οποίο αποτελεί παραπόταμο του Αώου. Τα πυκνά δάση εναλλάσσονται από γυμνές υπαλπικές και βραχώδεις εκτάσεις και τεράστιους γκρεμούς.

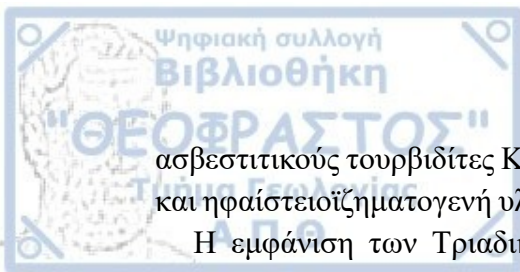
4.2 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής

Η περιοχή έρευνας εντάσσεται γεωλογικά στην γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου κατά Mountraki et al 1983. Η ζώνη της Πίνδου αντιπροσωπεύει τον παλιό ωκεανό της Νέο-Τηθύος που καταστράφηκε μαζί με την Υποπελαγονική ζώνη. Η αμφισβήτηση του ωκεάνιου χαρακτήρα της ζώνης Πίνδου επέρχεται από την απουσία των οφειολίθων από τη πλειοψηφία της ζώνης Πίνδου και συγκεκριμένα τη μη ύπαρξη συμπτυχωμένων δομών μεταξύ των ωκεάνιων ιζημάτων της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης και των οφειολίθων. Έτσι προτάθηκε ο χαρακτηρισμός της βαθιάς ηπειρωτικής λεκάνης με πελαγική ιζηματογένεση. Συνεπώς η ζώνη της Πίνδου αντιπροσωπεύει το δυτικό τμήμα του ωκεανού χωρίς να γίνει η επώθηση των οφειολίθων, με εξαίρεση την τεκτονική τοποθέτηση των οφειολιθικών μαζών Βόρεια της Πίνδου και του Κόζιακα, μόνο με την παρουσία των ιζημάτων της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης.



Εικόνα 17: Γεωτεκτονικές ενότητες Ελλάδας Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιοδοπική ζώνη, (Pe: Ζώνη Παιονίας, Pa: Ζώνη Πάικου, Al: Ζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αξιού, PI: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα "Ταλέα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθοι" πιθανόν της Ιονίου ζώνης.. (Κατά Mountrakis et al. 1983)

Η λιθοστρωματογραφία της ζώνης συναντά σε όλη την έκταση της τα πρώτα αλπικά ιζήματα τα οποία αποτελούνται από ψαμμίτες, πυριτόλιθους, μάργες και ασβεστόλιθους. Τα ιζήματα αυτά συγκροτούν μία κλαστική ιζηματογένεση, ηλικίας Μέσου- Άνω Τριαδικού η οποία στη συνέχεια αλλάζει προς το Άνω Τριαδικό σε



ασβεστιτικούς τουρβιδίτες Καρνίου, ασβεστόλιθος με παρεμβολές κερατόλιθων καθώς και ηφαίστειοϊζηματογενή υλικά με ανδεσίτες, τόφφους και κατά περίπτωση βασάλτες.

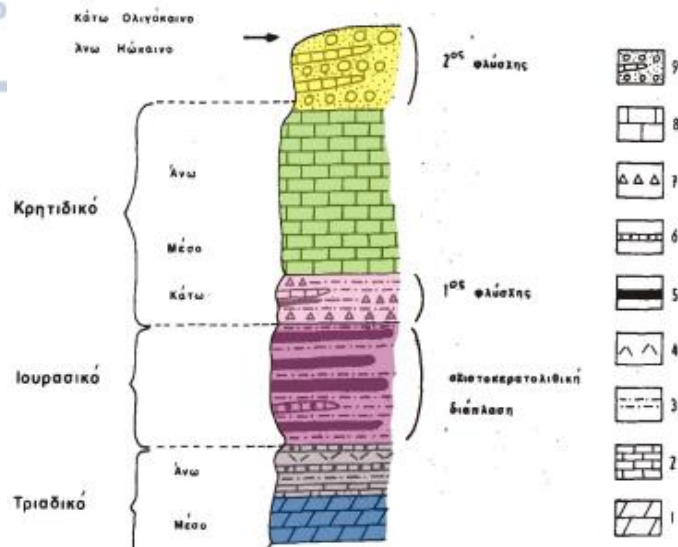
Η εμφάνιση των Τριαδικών ηφαιστειακών πετρωμάτων έχει εξηγηθεί με τους παρακάτω τρόπους

- 1) Η ηφαιστειότητα συνδέεται άμεσα με την αρχική ηπειρωτική διάρρηξη του Περιοτριάδικού, παρόμοια με αυτή στο Δυτικό Πελαγονικό περιθώριο. Η εξήγηση αυτή προτείνεται από την επιστημονική κοινότητα ως η πιο λογική εξαιτίας της ηλικιακής ταύτισης των ηφαιστειακών στα δύο περιθώρια αλλά και των κλαστικών ιζημάτων που συνοδεύουν.
- 2) Η ηφαιστειότητα οφείλεται αποκλειστικά στην ενδοωκεάνια υποβύθιση του Τριαδικού
- 3) Η ηφαιστειότητα πραγματοποιείται εντός του ωκεανού και ειδικότερα στη δυτική κατωφέρεια της Απουλίας ηπειρωτικής πλάκας προς τον ωκεανό της Τηθύος.

Κατά τη διάρκεια του Ιουρασικού πραγματοποιούνταν συνεχής απόθεση ιζημάτων βαθιάς θάλασσας και συγκεκριμένα ραδιολαριτικούς κερατόλιθους, αργίλους, ψαμμίτες, πελαγικούς πυριτικούς ασβεστόλιθους και ιασπίδες, που συνιστούν τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση (πάχος περίπου 150-200m). Η εξέλιξη της μεταβαίνει προς τα πάνω σε μία σειρά ρυθμιστικών εναλλαγών από πηλίτες, ψαμμίτες, μάργες, ραδιολαρίτες και πελαγικούς/ λατυποπαγείς ασβεστόλιθους, που θυμίζει τη συμπεριφορά του 1ου Φλύσχη του Κάτω Κρητιδικού.

Στην ίδια χρονική περίοδο συνεχίστηκε η ιζηματογένεση χωρίς διακοπή και καμία ασυμφωνία, με απόθεση πελαγικών πλακωδών ασβεστόλιθων, με ενστρώσεις πυριτικές και αργλικές ασβεστιτικών τουρβιδιτών και μαργών με πάχος 500 m.

Στα τέλη του Κρητικού η ιζηματογένεση γίνεται περισσότερο ασβέστομαργαϊκή και μεταβαίνει προς το φλύσχη (2ος Φλύσχη της Πίνδου) η απόθεση του οποίου πραγματοποιείται από το Δάνιο στο Τριτογενές μέχρι και το Άνω Ηώκαινο. Η απόθεση χαρακτηρίζεται από ρυθμικές εναλλαγές ψαμμιτών και μαργών και σπανιότερα κροκαλοπαγών και ασβεστόλιθων. Ενδιάμεσα στα ιζήματα του φλύσχη εντοπίζονται συχνά ολισιθόλιθοι ποικίλων διαστάσεων, που προέρχονται από στρώματα φλύσχη πρώιμης ανάδυσης, όπου κατά την υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας και κατ' επέκταση του χώρου ιζηματογένεσης υπέστησαν έντονο τεκτονισμό. Έτσι πρωταγωνιστεί η εμφάνιση ενός χαοτικού μίγματος που ονομάζεται διεθνώς «άγριος φλύσχη» και εμφανίζεται στις θέσεις υποβύθισης. Τέλος επικάθονται με ασυμφωνία πάνω από τον πτυχωμένο φλύσχη τα μολασικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας του Ολιγοκαίνου.

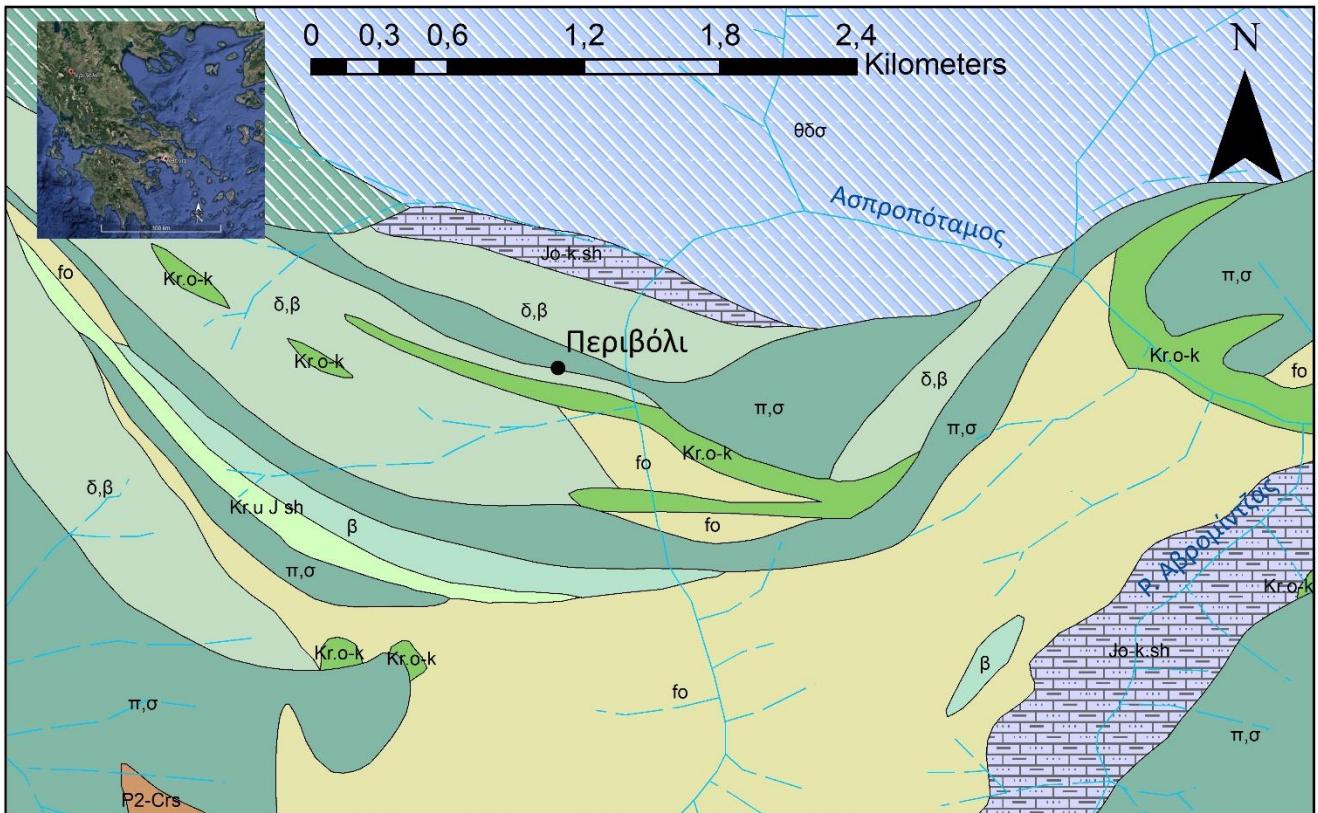


Εικόνα 18: Λιθοστρωματογραφική στήλη αντιπροσωπευτική της ζώνης Ωλονού – Πίνδου. 1: δολομίτες, 2: πλακάδες ασβεστόλιθοι, 3: αργιλοσαμμίτες, 4: ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά, 5: κερατόλιθοι, 6: ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7: λατυποπαγή, 8: ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, 9: σχηματισμός φλύσχη, Τριτογενούς. (Mountrakis, 2010)

Οι οφειόλιθοι καταλαμβάνουν μια μεγάλη έκταση της Βόρειας Πίνδου και βρίσκονται όπως αναφέρθηκε τεκτονικά τοποθετημένοι επάνω στο Τριτογενή φλύσχη. Οι μάζες των οφειολίθων διακρίνονται στις παρακάτω ομάδες πετρωμάτων:

- Ομάδα Δράμαλας. Υπερβασικά σερπεντινωμένα πετρώματα, δουνίτες, χαρστβουργίτες, πυροξενίτες του Μ. Ιουρασικού.
- Ομάδα Ασπροποτάμου. Ηφαιστειακά και πλουτωνικά πετρώματα (γάββροι, δουνίτες). Τα ηφαιστειακά πετρώματα αποτελούνται από pillow lavas και βασαλτικής σύστασης λάβες καθώς και υαλοκλαστίτες συμπτυχωμένα με ωκεάνια ιζήματα.
- Ομάδα Λουμνίτσας. Πετρώματα μεταμορφικής σόλας οφειολίθων και ωκεάνιων ιζημάτων (μάρμαρα, χαλαζίτες, μεταβασίτες, αμφιβολίτες, μαρμαρυγιακοί γρανιτούχοι σχιστόλιθοι). Η μεταμόρφωση αυτής της φάσης (αμφιβολιτική-πρασινοςχιστολιθική) πραγματοποιήθηκε στο Μ.-Α. Ιουρασικό.
- Mélange της Αβδέλας. Τεκτονικά μίγματα βασαλτών, μεταμορφωμένων πετρωμάτων της σόλας και ωκεάνια ιζήματα.
- Ομάδα του βουνού Όρλιακα. Οφειόλιθοι που υπόκεινται των ανθρακικών ιζημάτων Α. Κρητιδικού με ρουδιστές.
- Ομάδα «Δύο Δέντρα». Λέπια ιζηματογενών πελαγικών – ημιπελαγικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι με Calpionelles, βοιωτιτικός φλύσχη Κ. Κρητιδικού ή πρώτος φλύσχη της Πίνδου.

ΦΥΛΟ ΜΕΤΣΟΒΟ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Ασβεστόλιθοι και Σχιστόλιθοι		Μικρολιθικά Πετρώματα
	Ασβεστόλιθοι πλακώδεις ή καλώς ενστρωμένοι τεφροί ή ερυθρωπιό		Δολερίτες και Μικρολιθικά Πετρώματα
	Κερατόλιθοι και Σχιστόλιθοι		Δολερίτες Βασάλτες και άλλα Μικρολιθικά
	Κρυσταλλικοί Σχιστόλιθοι (μαρμαρυγιακοί) και φιλλίτες		Γάββροι
	Φλύσχη Πίνδου		Γάββροι
	Υπολείμματα καλυμμάτων των λευκών ασβεστολιθικών μαζών		π: Περιδοτίτες σ: Σερπεντινίτες

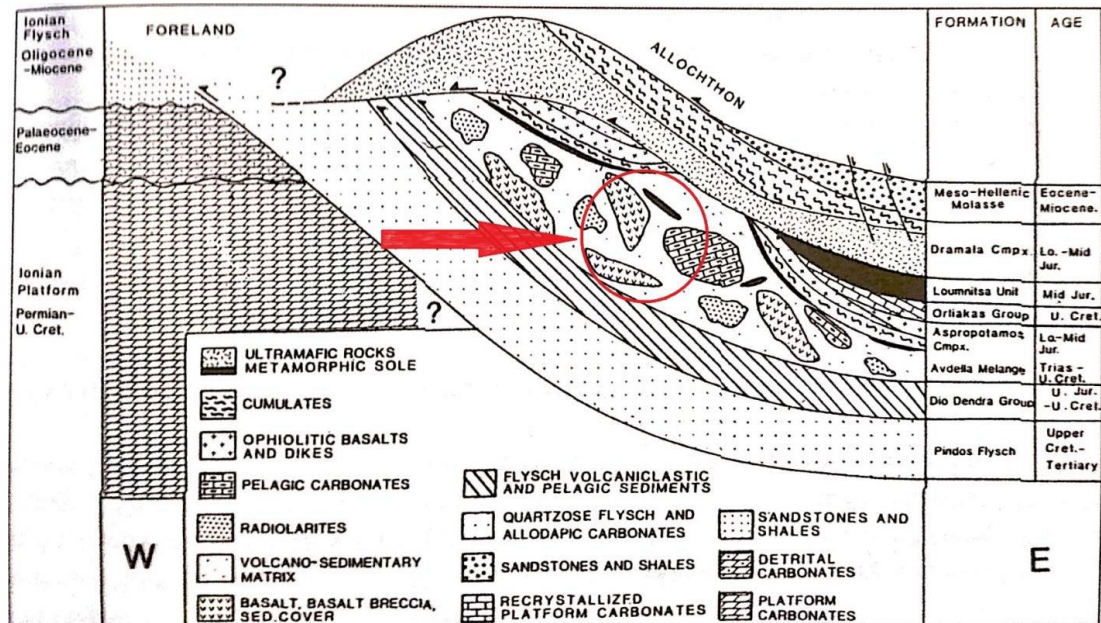
Εικόνα 19: Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής (Τροποποιημένος χάρτης από φύλλο Μέτσοβο του ΙΓΜΕ)

4.3 Τεκτονική εξέλιξη ευρύτερης περιοχής

Η τελική ορογένεση έφερε και την ανάδυση των στρωμάτων της Πίνδου, η οποία ολοκληρώθηκε με την πτύχωσή τους στο Α. Ηώκαινο-Κ. Ολιγόκαινο, προκύπτοντας ισχυρές συμπιεστικές τάσεις από την τελική σύγκρουση Ευρασίας και Απουλίας. Ουσιαστικά πραγματοποιήθηκε η επώθηση της ζώνης Πίνδου με τη μορφή τεκτονικού καλύμματος επάνω στη ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, με διεύθυνση Α-Δ.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της ζώνης της Πίνδου αποτελούν τα «Τεκτονικά Λέπια», τα οποία βρίσκονται το ένα επάνω στο άλλο με κατεύθυνση από τα Α-Δ δημιουργώντας συνεχείς επαναλήψεις και συσσώρευση του φλοιού.

Τέλος οφιολιθικές μάζες βρίσκονται τοποθετημένες επάνω στα στρώματα της Πίνδου, των οποίων η προέλευση αποτελεί ακόμη και σήμερα αναπάντητο ερώτημα. Η ερευνητική κοινότητα πιθανολογεί την προέλευση τους από τον Δυτικό ωκεάνιο χώρο της Υποπελαγονικής και τη μετέπειτα επώθηση τους επάνω στον δεύτερο φλύσχη της Πίνδου, μετά το τέλος της ιζηματογένεσής του, κατά τη Τριτογενή πύχωση.



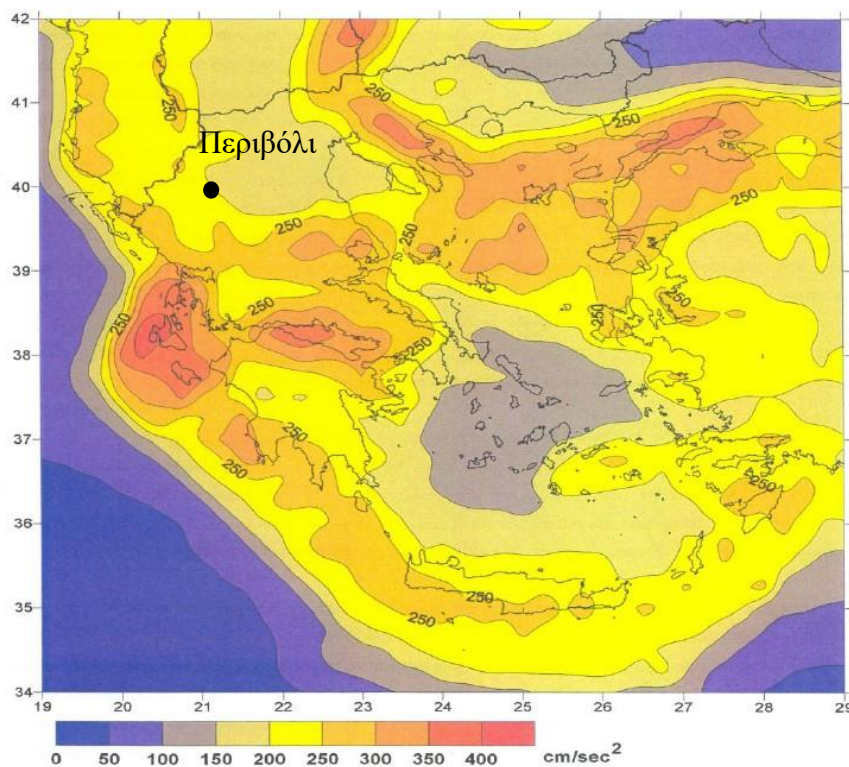
Εικόνα 20: Σκαριφηματική γεωλογική τομή της τοποθέτησης των οφιολιθικών μαζών επάνω στο δεύτερο φλύσχη της Πίνδου (Jones & Robertson, 1991).

Ως αναφορά την νεοτεκτονική παραμόρφωση, στη Δυτική Μακεδονίας δύο ήταν οι κύριες φάσεις (Παυλίδης 1985, Pavlides and Mountrakia, 1987).

- Η πρώτη φάση ηλικίας Ανώτερου Μειοκαίνου – Πλειοκαίνου είναι εφελκυστική με διεύθυνση μέγιστου εφελκυσμού BBA- NND. (κανονικά ρήγματα κατά BA- NA διεύθυνση).
- Η δεύτερη εφελκυστική φάση εκδηλώθηκε κατά το τεταρτογενές με κύρια διεύθυνση εφελκυσμού BBA-NNA (κανονικών ρηγμάτων BA- NΔ έως Α- Δ διεύθυνσης)

4.4 Σεισμικότητα περιοχής

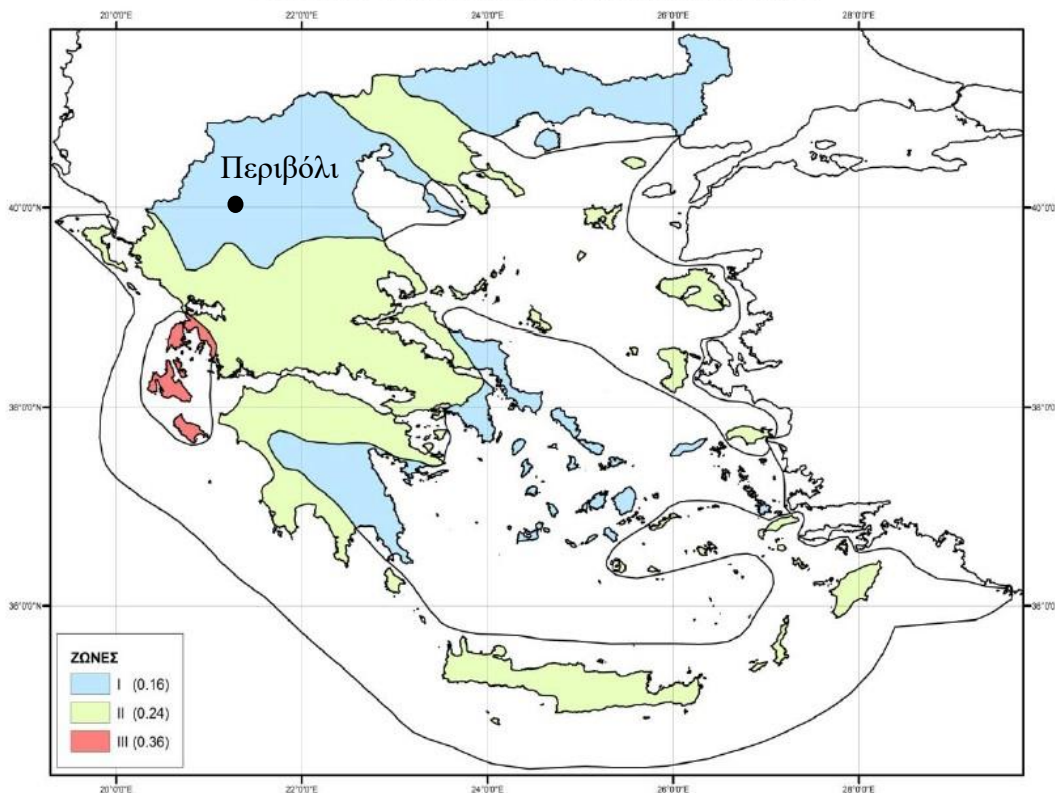
Από τη σύνταξη του Νέου Χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας συμβατού με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό και τον και τον Ευρωκώδικα 8 προκύπτει η παρακάτω Εικόνα, που απεικονίζει τη διακύμανση της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης με πιθανότητα μη υπέρβασης 90% στα επόμενα 50 χρόνια. Αυτή για την περιοχή έρευνας κυμαίνεται μεταξύ 200 και 250 cm/sec²



Εικόνα 21: Χάρτης κατανομής οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης με πιθανότητα υπέρβασης τα επόμενα 50 χρόνια.

Σύμφωνα με τον Νέο Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό και τις πρόσφατες τροποποιήσεις του Ε.Α.Κ. 2000 (ΦΕΚ 11546/12-8-03), αναφορικά με τις σεισμικές δράσεις σχεδιασμού η περιοχή μελέτης κατατάσσεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Ι με σεισμική επιτάχυνση εδάφους $\alpha=0,16$ ($A = \alpha \times g$)

ΝΕΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ



Εικόνα 22: Οι τρεις κατηγορίες (III,II,I) ζωνών επικινδυνότητας σύμφωνα με τον ΕΑΚ200 το 2003

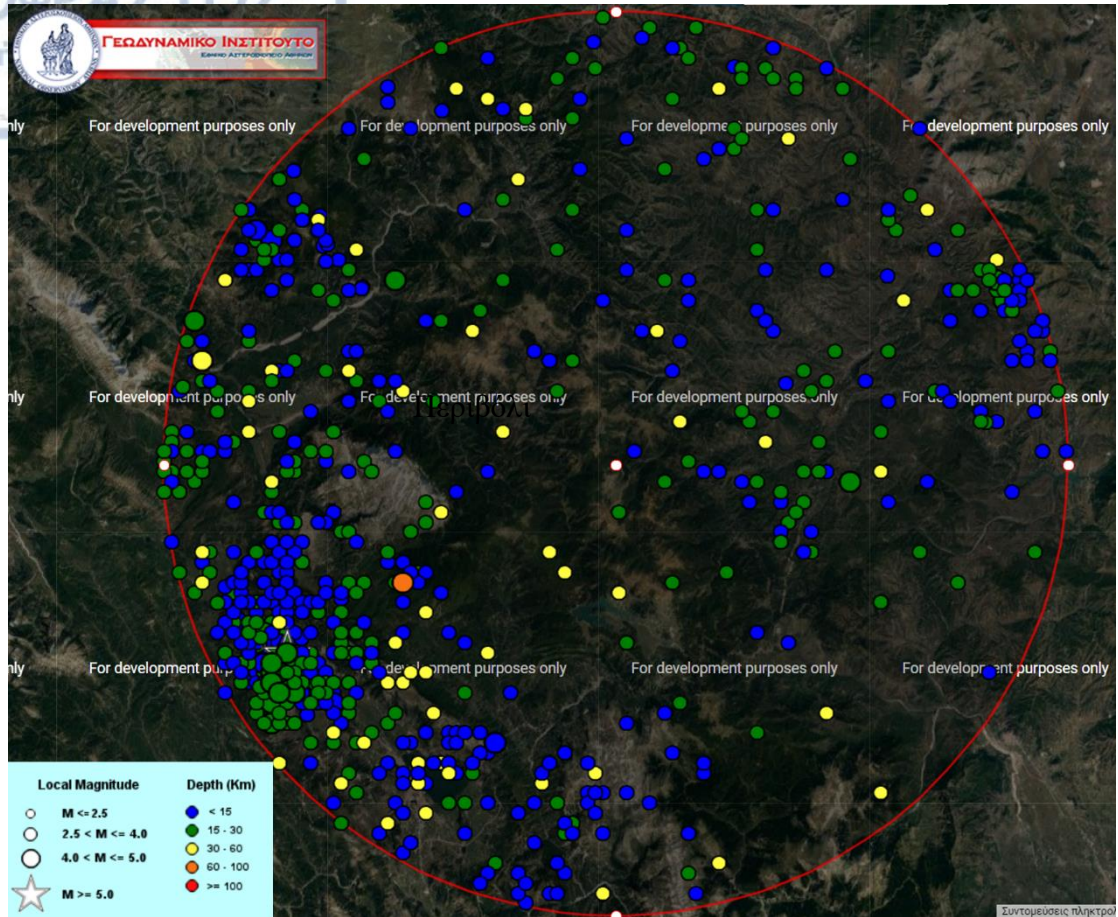
Σύμφωνα με τον ΕΑΚ η ευστάθεια φυσικών ή τεχνητών πρανών κατά τον σεισμό ελέγχεται με θεώρηση των ακολούθων πρόσθετων ενεργών επιταχύνσεων που δρουν στην εδαφική μάζα.

Οριζόντια: $\alpha_h = \alpha_\pi = 0,08$

Κατακόρυφη: $\alpha_v = \pm 0,5\alpha_\pi = \pm 0,04$

όπου α_π είναι η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού του πρανού, που λαμβάνεται ίση με 0.5α για φυσικά πρανή ή ίση με $\alpha_\pi (\alpha_B + \alpha_K)/2$ για πρανή αναχωμάτων.

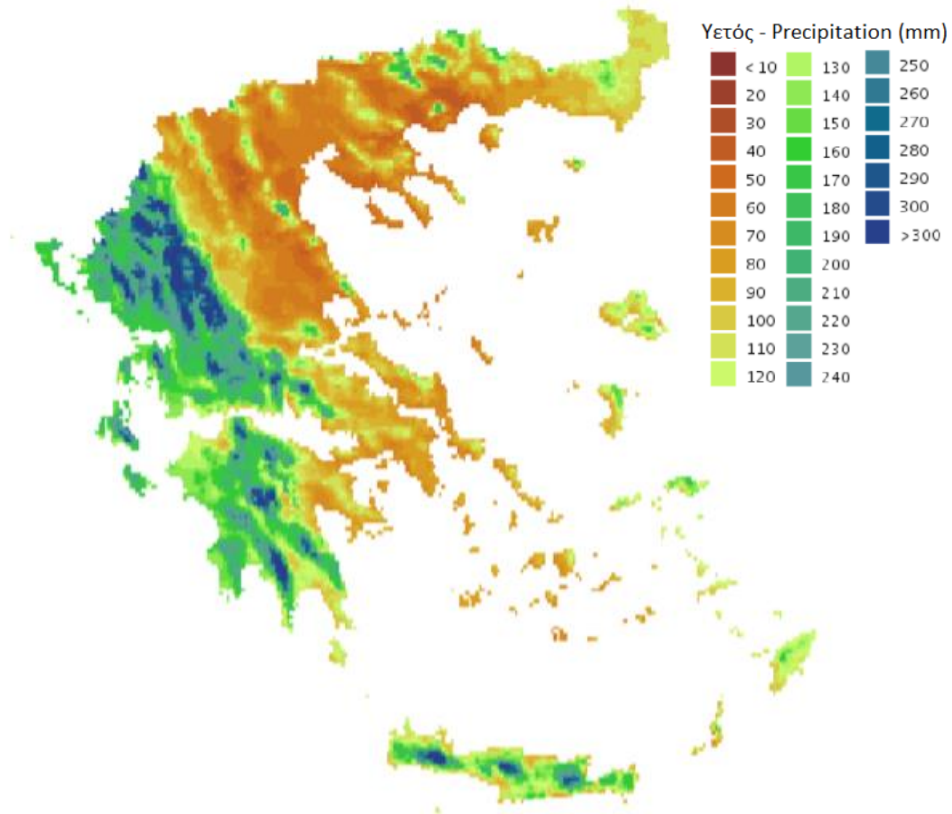
Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται τα επίκεντρα σεισμών (2000-2021), ακτίνας 50km. Ο μεγαλύτερος σεισμός που έχει καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας ήταν 19.4 km ΒΔ των Ιωαννίνων στις 15/10/2016 20:14:49, με μέγεθος $M_w = 5.3$ και εστιακό βάθος 17km .



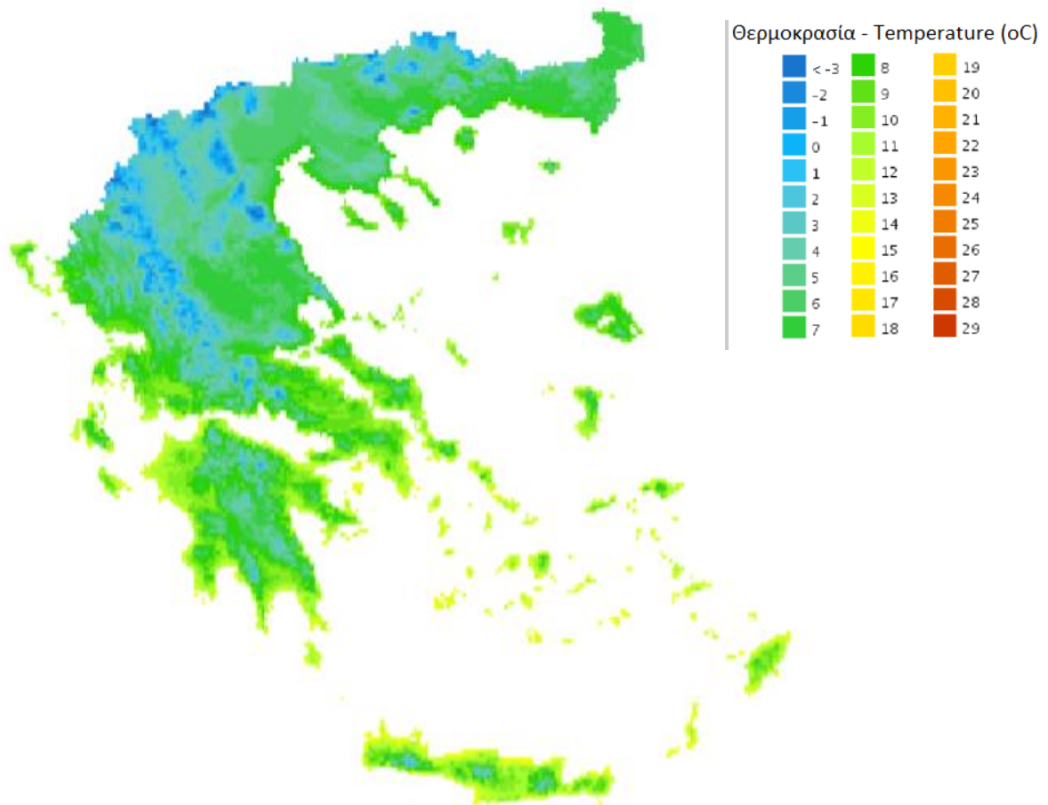
Εικόνα 23: Επίκεντρα σεισμών (2000-2021), ακτίνας 50km. (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, 2021)

4.5 Κλίμα ευρύτερης περιοχής

Το κλίμα είναι ορεινό-μεσογειακό και εξαιτίας του υψομέτρου με αμέτρητα κατακρημνίσματα (1.500mm/έτος) και χιονοπτώσεις, ενώ ακόμη και τα καλοκαίρια είναι δροσερά με αρκετές τοπικές βροχοπτώσεις με την θερμοκρασία ακόμη και τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο να μην ξεπερνάει τους 26-27 °C. Η νέφωση είναι υψηλή και οι παγετοί συνήθως ξεκινούν από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάιο (από www.meteoblue.gr)



Εικόνα 25: Μέση ποσότητα υετού το μήνα Δεκέμβριο στη περιοχή έρευνας είναι >260mm (Εφαρμογή «Άτλαντας», Ε.Μ.Υ.)



Εικόνα 24: Μέση θερμοκρασία το μήνα Δεκέμβριο στη περιοχή έρευνας είναι <math>< 4^{\circ}\text{C}</math> (Εφαρμογή «Άτλαντας», Ε.Μ.Υ.)

Η λασπορροή που απασχολεί τη συγκεκριμένη διπλωματική πραγματοποιήθηκε την Παρασκευή 13 Δεκεμβρίου του 2019, όπως ενημερωθήκαμε από τη κάτοχο του ξενοδοχείου «Βάλια Κάλντα». Έπειτα πραγματοποιήθηκε έρευνα δεδομένων από μετεωρολογικούς σταθμούς κοντά στη περιοχή έτσι ώστε να εντοπιστεί το μέγιστο ύψος κατακρημνισμάτων εκείνων των ημερών. Ο πιο κοντινός μετεωρολογικός σταθμός που εντοπίστηκε ήταν αυτός στη Βοβούσα των Ιωαννίνων με απόσταση 14,6χλμ από το Περιβόλι των Γρεβενών.



Εικόνα 26: Μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής

Ο συγκεκριμένος σταθμός ξεκίνησε να παρέχει δεδομένα τον Απρίλιο του 2008 και βρίσκεται σε υψόμετρο 1024 m εντός του οικισμού, δηλαδή σε παρόμοιο υψόμετρο με το χωριό Περιβόλι. Το ύψος αισθητήρων θερμοκρασίας/ υγρασίας είναι 2 m και παρόμοια το ύψος ανεμομέτρου είναι 2 m. Ύστερα από επικοινωνία με το μετεωρολογικό σταθμό της Βοβούσας και συγκεκριμένα με τον κύριο Χρόνη Δρούγια, διαπιστώθηκε πως ακόμη και ο συγκεκριμένος σταθμός δεν μπορεί να παρέχει δεδομένα με ασφάλεια για τη περιοχή του Περιβολίου, καθώς το όριο των διαφορετικών τύπων καιρού που εμφανίζονται στην περιοχή είναι ο αυχέννας Τίζα, στο όριο των δύο χωριών. Συγκεκριμένα σε καιρό N- ρεύματος δεν φτάνει νετός στο Περιβόλι παρά μόνο με ψιχάλες, ενώ καιρός ΒΑ- ρεύματος φτάνει ελάχιστα στην Βοβούσα.



Εικόνα 27: Αυχένιας Τίζα- Αυγό

Συνεπώς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ακρίβεια τα δεδομένα του συγκεκριμένου μετεωρολογικού σταθμού και αυτό επιβεβαιώνεται με τον παρακάτω πίνακα. Στις 13/12/2019 με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, έπληξαν την περιοχή ισχυρές βροχοπτώσεις, ενώ από τις 10/11/2019 τα κατακρημνίσματα στη περιοχή ήταν αδιάκοπα. Η συνθήκη αυτή δεν συμπίπτει με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Βοβούσας καθώς στις 13/12/2019 παρατηρείται το ελάχιστο ύψος βροχής από τις 10-14 Δεκεμβρίου, ενώ στις 12 Δεκέμβρη δεν παρατηρείται βροχόπτωση. Παρόλα αυτά δεν μπορεί να αμφισβητηθεί ότι στη περιοχή μελέτης εκείνο το διάστημα επικρατούσαν ισχυρές και συνεχόμενες βροχοπτώσεις, χωρίς όμως να μπορεί να βρεθεί με ακρίβεια το ύψος βροχής στη περιοχή έρευνας.

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	1.2	6.3	13:10	-1.8	22:00	17.1	0.0	0.2	0.3	4.8	10:50	S
2	1.6	9.4	14:00	-3.6	7:10	16.7	0.0	0.2	0.3	11.3	14:00	SSW
3	8.1	10.3	14:30	4.3	0:10	10.3	0.0	15.6	1.6	16.1	3:30	S
4	2.9	9.1	0:40	-2.6	00:00	15.4	0.0	7.2	0.6	14.5	11:50	NNW
5	0.0	5.5	13:10	-4.2	7:50	18.3	0.0	0.2	0.2	4.8	12:50	WSW
6	5.6	13.3	13:10	0.5	2:30	12.7	0.0	0.6	0.5	22.5	13:20	SE
7	8.1	11.2	11:10	6.0	00:00	10.2	0.0	19.8	0.6	20.9	4:50	NNE
8	3.9	9.4	12:50	-0.9	00:00	14.4	0.0	0.0	0.3	6.4	2:40	WSW
9	1.7	10.5	13:40	-1.8	8:40	16.7	0.0	0.0	0.5	17.7	13:20	SSE
10	3.6	6.3	14:00	-0.2	0:10	14.7	0.0	7.0	0.3	14.5	20:00	SW
11	2.7	4.1	15:00	1.1	4:50	15.6	0.0	14.0	0.5	20.9	10:40	NNW
12	2.4	7.0	13:10	-0.9	7:10	15.9	0.0	0.0	0.2	4.8	12:10	SSE
13	4.0	6.1	14:00	1.4	4:20	14.3	0.0	6.8	1.1	22.5	23:40	S
14	3.6	6.3	20:30	0.5	7:30	14.7	0.0	32.4	0.8	19.3	3:00	NNW
15	3.0	9.1	13:20	-1.3	23:40	15.3	0.0	0.0	0.3	6.4	11:00	S
16	2.8	13.6	13:40	-1.6	4:10	15.5	0.0	0.0	0.5	20.9	14:10	S
17	1.8	10.1	13:50	-2.2	7:30	16.5	0.0	0.0	0.3	4.8	15:00	WSW
18	1.3	10.7	14:10	-3.0	7:50	17.0	0.0	0.0	0.0	3.2	11:30	WSW
19	3.4	11.2	13:20	-2.6	4:40	14.9	0.0	0.0	0.3	14.5	13:10	SSW
20	8.5	10.1	11:00	6.1	1:40	9.8	0.0	15.0	3.7	45.1	11:20	SE
21	9.4	10.4	11:20	8.2	0:20	8.9	0.0	28.4	6.3	45.1	17:40	SSE
22	9.0	11.3	12:20	4.8	23:10	9.3	0.0	88.8	6.1	53.1	13:00	SSE
23	4.9	8.2	11:10	2.3	23:00	13.3	0.0	14.4	1.6	22.5	0:10	SSE
24	3.1	7.9	12:40	-1.6	00:00	15.2	0.0	0.0	0.6	17.7	13:00	W
25	1.1	7.7	14:20	-2.2	22:20	17.2	0.0	0.0	0.5	14.5	14:10	WSW
26	-0.4	6.1	12:40	-4.2	7:30	18.7	0.0	0.8	0.2	11.3	15:10	SSE
27	-0.9	6.3	13:20	-4.3	6:10	19.2	0.0	0.0	0.2	8.0	13:30	S
28	-1.2	1.4	14:10	-2.7	0:30	19.5	0.0	0.0	1.8	29.0	12:20	W
29	-2.5	0.9	13:20	-4.4	22:50	20.8	0.0	0.0	2.7	35.4	12:40	W
30	-3.4	-1.6	18:40	-6.6	00:00	21.7	0.0	0.2	2.3	30.6	12:10	W
31	-4.5	6.2	13:20	-9.6	6:10	22.8	0.0	0.0	0.3	20.9	13:10	NW
2.7	13.6	16	-9.6	31	482.6	0.0	251.6	1.1	53.1	22	S	

Εικόνα 28: Δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Βοβούσας για τον μήνα Δεκέμβριο.



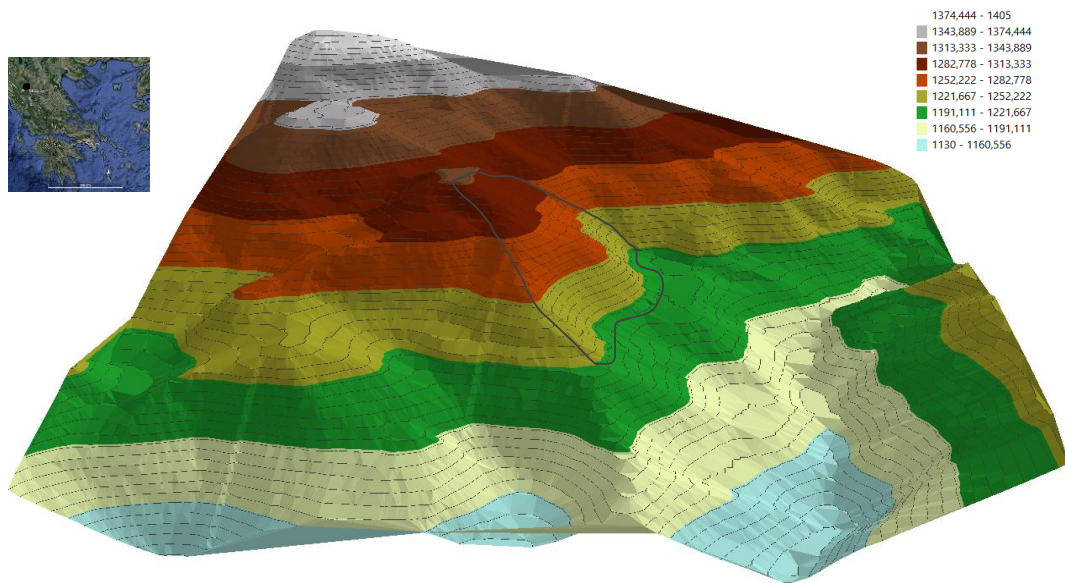
Πίνακας 3: Ανασκόπηση καιρού από τι1 10/12- 16/12 (3 μέρες πριν και μετά το συμβάν).
(Δεδομένα από κ. Χρόνη Δρούγια, υπεύθυνο Μετεωρολογικού σταθμού της Βοβούσας)

Ημ/νια	Περιγραφή	Tmin	Tmax	Υετός mm	Άνεμος	Δ/νση Ανέμου
10/12	Συννεφίες με περιόδους ασθενής βροχής	-0,2	6,3	7,0	14,5	NΔ
11/12	Βροχές έως τα ξημερώματα, συννεφίες 8/8	1,1	4,1	14,0	20,9	BΒΔ
12/12	Συννεφίες με περιόδους ηλιοφάνειας	-0,9	7	0,2	4,8	NNA
13/12	Συννεφίες με περιόδους βροχής	1,4	6,1	6,8	22,5	N
14/12	Χιονόπτωση τα Ξημερώματα, χιονόστρωση 2-3cm, συννεφίες	0,5	5,6	32,4	19,3	NNA
15/12	Ομίχλη το πρωί, ηλιοφάνεια	-1,3	9,1		6,4	N
16/12	Ηλιοφάνεια	-1,6	13,6		20,9	N

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

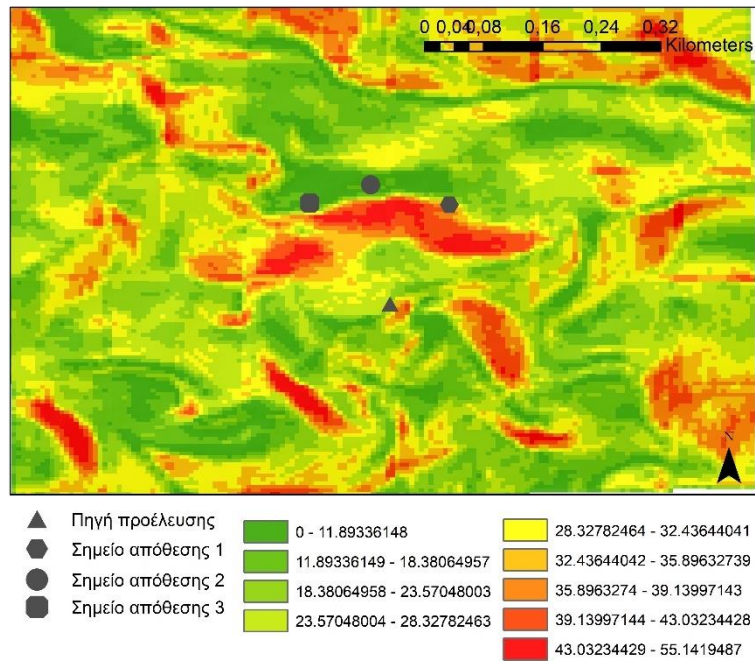
5.1 Χαρακτηριστικά στενής περιοχής έρευνας,

Η αφετηρία της λασπορροής βρίσκεται στην αυλή του ξενοδοχείου Βάλια Κάλντα Βόρεια του χωριού Περιβόλι, σε υψόμετρο στα 1300m. Η λασπορροή μεταφέρει τα υλικά διάδοσης μέχρι να τα αποθέσει σε 3 σημεία απόθεσης, σε υψόμετρα 1237m, 1233m και 1245m αντίστοιχα. Ανατολικά της λασπορροής βρίσκεται ο Ασπροπόταμος και Βόρεια αυτής βρίσκονται ορισμένα ρυάκια και παραπόταμοι του.



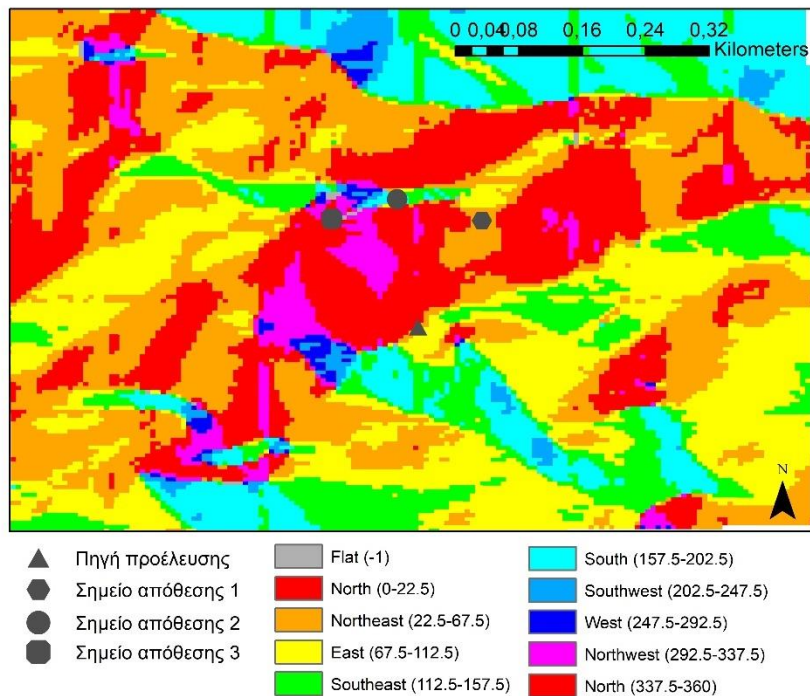
Εικόνα 29: Μορφολογική απεικόνιση της περιοχής. Αρχείο tin που προέκυψε από το DEM της περιοχής σε περιβάλλον GIS

Οι κλίσεις στις κλιτύες της περιοχής δεν υπερβαίνουν τις 55° κλίση σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα κλίσεων προέκυψε από το DEM ανάλυσης 5m.



Εικόνα 30: Χάρτης κλίσεων

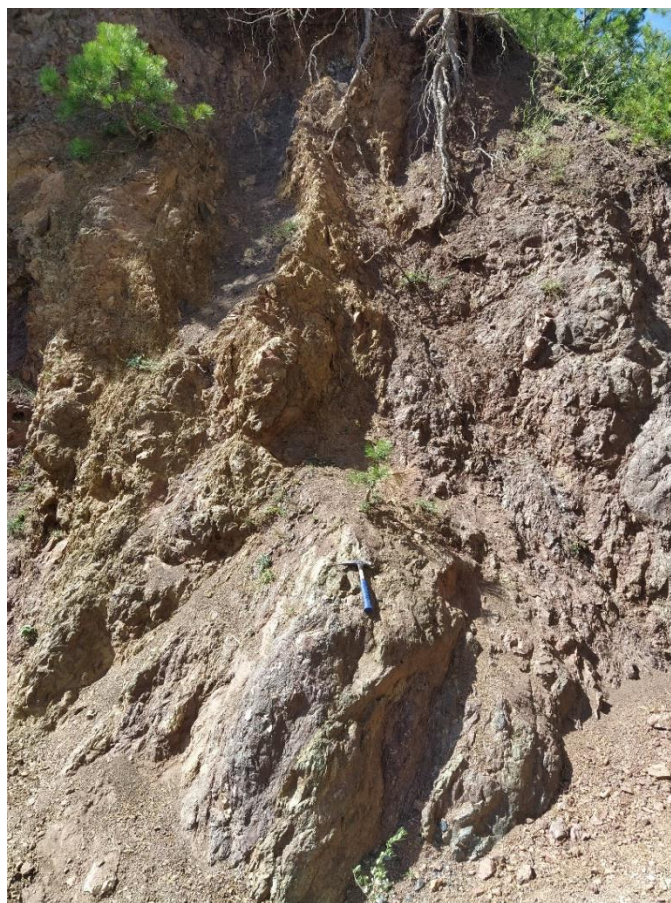
Τέλος, ο προσανατολισμός των κλιτύων απεικονίζεται στον παρακάτω χάρτη, που προέκυψε μέσω επεξεργασίας του DEM ανάλυσης 5m σε περιβάλλον GIS.



Εικόνα 31: Χάρτης προσανατολισμού κλιτύων

Η περιοχή μελέτης ανήκει όπως προαναφέρθηκε στην γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου κατά τον Mountraki et al 1983. Συγκεκριμένα η περιοχή του ξενοδοχείου αποτελείται από οφιόλιθους με τη τυπική μορφή του *mélange* της Αβδέλας. Τα χαρακτηριστικά πετρώματα του *mélange* είναι οφιόλιθοι, ιζήματα και μεταμορφωμένα πετρώματα. Τα οφιολιθικά πετρώματα είναι αναμειγμένα με πετρώματα τα οποία υπήρχαν στην περιοχή κατά την τοποθέτηση των οφιολίθων πάνω στο ηπειρωτικό τέμαχος, η οποία έλαβε χώρα ταυτόχρονα με την υποβύθιση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Τα πετρώματα αυτά βρίσκονται στο μέτωπο ή στη βάση της επώθησης. Στη μάζα αυτή διακρίνεται εξαιτίας αυτής της επώθησης, ένα διαβρωμένο και κατακερματισμένο σύμπλεγμα πετρωμάτων με ποικιλία λιθολογίας και σύστασης. Τα τεμάχια αυτού του συμπλέγματος, φαίνεται να είναι ποικίλου μεγέθους (από εκατοστά έως μερικά μέτρα).

Εξαιτίας της επώθησης των οφιολίθων, στη περιοχή διακρίνονται εδαφοποιημένα μέλη αλλά και πιο υγιή και μεγαλύτερης αντοχής πετρώματα τα οποία συνυπάρχουν, προσδίδοντας την μορφή ενός χαώδους μίγματος. Τα πετρώματα αυτά μπορεί να είναι ιζήματα της εποχής τα οποία συμπαρασύρθηκαν κατά την απόθεση των οφιολίθων είτε να είναι περιδοτίτες, γάββροι, δολερίτες, βασάλτες, σερπεντινίτες.



Εικόνα 32: Χαρακτηριστική μορφή του *mélange* της Αβδέλας νότια του ξενοδοχείου

Σε όλη τη περιοχή και στον δασικό δρόμο δυτικά του ξενοδοχείου διακρίνονται η χαοτική μορφή του mélange με τον συνδυασμό του εδαφοποιημένου υλικού και πιο υγιών τεμάχων μέσα σε αυτή τη μάζα.



Εικόνα 34: Εδαφοποιημένα υλικά λόγω αποσάθρωσης του υπεδάφους δυτικά του ξενοδοχείου. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 2m.



Εικόνα 33: Melange της Αβδέλας δυτικά του ξενοδοχείου

5.3 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής

Τα οφιολιθικά συμπλέγματα συντελούνται από διάφορους πετρολογικούς τύπους και προέκυψαν από διάφορες και πολύπλοκες γεωλογικές διεργασίες. Τα οφιολιθικά πετρώματα της περιοχής είναι αποτέλεσμα διαφόρων τεκτονικών κινήσεων. Οι τεκτονικές αυτές κινήσεις συντέλεσαν στην αποδιοργάνωση και στον κερματισμό των σκληρών πετρωμάτων της περιοχής. Έτσι λοιπόν με βάση τη τεκτονική καταπόνηση που υφίσταται ο εκάστοτε πετρολογικός τύπος και κατά συνέπεια την έκταση της σερπεντινίωσης στο σώμα της βραχομάζας διακρίνονται οι διαφορετικές ιδιότητες των οφιόλιθων. Με βάση λοιπόν τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά, οι οφιόλιθοι χωρίζονται σε επιμέρους λιθότυπους βραχομάζας (B. Μαρίνος, 2007).

Τύπος I Μη σερπεντινωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης-γάββρος).

Ο τύπος αυτός περιγράφει μια αρκετά συμπαγή βραχομάζα, σχεδόν άρρηκτου βράχου, αποτελούμενη από ελάχιστες ασυνέχειες ακόμα και στην επιφανειακή της εμφάνιση. Το GSI είναι αρκετά υψηλό, με τιμές >65.

Τύπος II Σερπεντινωμένος οφιόλιθος- ελαφρά αποσαθρωμένος γάββρος.

Η βραχομάζα σε αυτή τη περίπτωση αποτελείται από πληθώρα διακλάσεων και χαρακτηρίζεται ως κερματισμένη. Η εμφάνιση της σερπεντινίωσης στις ασυνέχειες τις βραχομάζας έχει ως συνέπεια να εμφανίζονται συχνά λείες και ολισθηρές. Έτσι οι τιμές του δείκτη GSI μπορούν να πέσουν στο 35.

Τύπος III Σερπεντινωμένος περιδοτίτης

Στη περίπτωση αυτή η προχωρημένη σερπεντινίωση επηρεάζει το σύνολο της βραχομάζας, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής και κατά συνέπεια τον έντονο κερματισμό του πετρώματος. Επιπλέον κατά τον αυτομεταμορφισμό ή εξαιτίας έντονων τεκτονικών κινήσεων παρατηρείται έντονη σχιστότητα η οποία επηρεάζει άμεσα τις τιμές του GSI. Επομένως η τιμή του GSI μειώνεται στο 30.

Τύπος IV Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης

Ο τύπος αυτός αναφέρεται στη μορφή ενός φυλλοποιημένου πετρώματος, το οποίο τεμαχίζεται/θρυμματίζεται εξαιτίας του τεκτονισμού σε πολύ μικρά τεμάχια μεγέθους από λίγων εκατοστών- ελάχιστων χιλιοστών. Οι τιμές του GSI έχουν πλέον πέσει αρκετά φτάνοντας να είναι μικρότερες από το 20.

Τύπος V Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους

Ο τελευταίος τύπος περιλαμβάνει μια μορφή βραχομάζας, η οποία προσδίδει μια σχιστοποιημένη δομή εξαιτίας της παρουσίας σχιστοκερατόλιθων και των ηφαιστειακών πετρωμάτων. Στο σύνολο της μάζας συχνά παρεμβάλλονται τεμάχια προερχόμενα από το οφιολιθικό σύμπλεγμα. Σύμφωνα με το ποσοστό της σχιστοποιημένης μάζας η τιμή του GSI μπορεί να κυμαίνεται από <20 έως και 40 όταν στη πλειοψηφία υπερτερούν τα μπλοκ των οφιόλιθων.

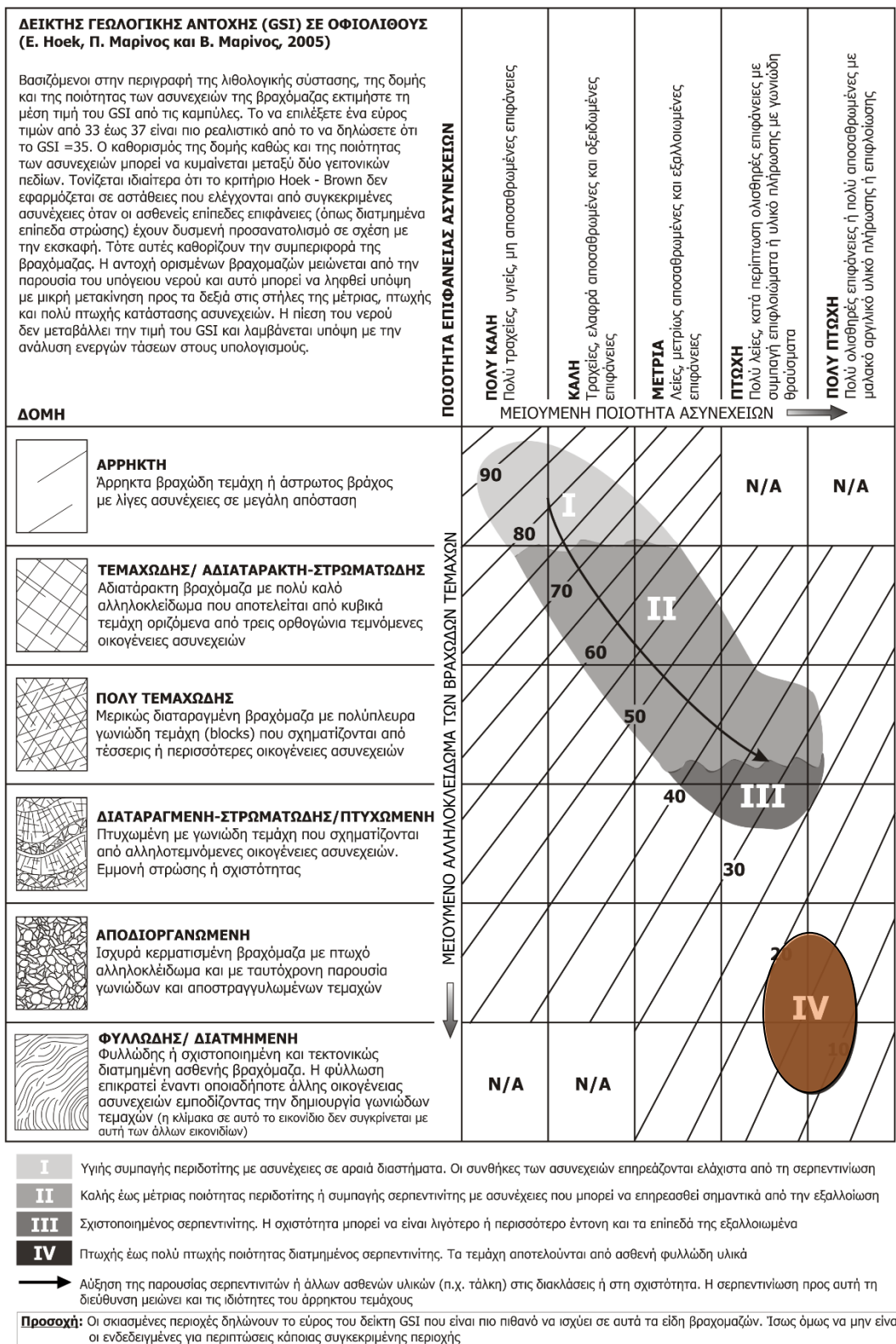


Εικόνα 35: Λιθότυποι βραχώμαζας των οφειολίθων με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά. (Μαρίνος, 2007).

Σε γενικές γραμμές όμως οι γάββροι και οι περιδοτίτες είναι από φύση τους συμπαγή πετρώματα, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά τους να ελέγχεται από το βαθμό ρωγμάτωσης τους. Οι επιφάνειες των ασυνεχειών των γάββρων, έχουν καλύτερη ποιότητα σε σχέση με αυτή των περιδοτιτών καθώς εμφανίζουν λιγότερες αλλοιώσεις. Τελικώς όμως βασικό πρόβλημα των δυο πετρωμάτων είναι η αποσάθρωση. Κατά την διάρκεια αυτής της διεργασίας παράγεται αργιλικό υλικό το οποίο όταν εισχωρήσει στο εσωτερικό των ασυνεχειών προκαλεί την πτωχή ποιότητα τους, δημιουργώντας λείες ασυνέχειες.

Όπως προαναφέρθηκε τα τεκτονικά μίγματα αποτελούνται από οφιολιθικά πετρώματα αναμειγμένα με άλλα πετρώματα τα οποία ελάμβαναν χώρα στην περιοχή κατά την τοποθέτηση των οφειολίθων πάνω στο ηπειρωτικό τέμαχος με την ταυτόχρονη υποβύθιση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Η τεκτονική καταπόνηση φέρνει ως αποτέλεσμα την συνύπαρξη εδαφοποιημένων μελών και πετρωμάτων με πολύ καλές αντοχές δημιουργώντας τη μορφή ενός χαοτικού μίγματος. Η μορφή αυτή είναι η χαρακτηριστική μορφή του *mélange* της Αβδέλας. Έτσι λοιπόν εξαιτίας αυτής της αυτής της τεκτονικής καταπόνησης των πετρωμάτων στη περιοχή εμφανίζονται κυρίως φυλλοποιημένοι σχηματισμοί. Η μετάβαση λόγω της ανάμειξης είναι απότομη και απρόβλεπτη, επηρεάζοντας έτσι τον δείκτη GSI για το σύνολο της βραχώμαζας, η τιμή του οποίου δεν ξεπερνά το 15-20.

Ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας, προβάλλει το δείκτη τιμών GSI για τους διάφορους λιθότυπους των οφειολίθων και την συγκεκριμένα για τον τύπο που εμφανίζεται στη περιοχή σε συνάρτηση με την ποιότητα των ασυνεχειών τους (E. Hoek et al, 2005).



Εικόνα 36: Δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI) σε οφιόλιθους. (Hoek et al, 2005)

5.4 Περιγραφή της λασπορροής

Όπως προαναφέρθηκε τα εδαφοποιημένα υλικά της περιοχής έχουν πολύ κακές μηχανικές ιδιότητες, δημιουργώντας έτσι σχετικά γεωτεχνικά προβλήματα, κυρίως όσον αφορά τη σταθερότητα τόσο των φυσικών όσο και των πιθανώς τεχνητών πλαγιών της περιοχής (πιθανές ανθρώπινες αποθέσεις- από τη διάνοιξη δασικού δρόμου).

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται βόρεια του χωριού Περιβόλι στο ξενοδοχείο Βάλια Κάλντα. Η περιοχή είναι αρκετά δασοκατοικημένη γεγονός που δυσκόλεψε αρκετά την δίοδο στο εσωτερικό της εδαφικής ροής αλλά και στην παρατήρηση και σάρωσης της περιοχής με το LiDAR όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια.



Εικόνα 37: Παρατήρηση του φαινομένου από τον απέναντι βόρειο δρόμο. Η αφετηρία και οι περιοχές διάδοσης δεν διακρίνονται εξαιτίας της παρουσίας πολύ πυκνών δέντρων.

Παρά την εμφάνιση αυτή, κατά τη χαρτογράφηση στο εσωτερικό της ροής παρατηρούνται αρκετά δέντρα τα οποία παρασύρθηκαν από αυτή τη ροή, γεγονός που μαρτυρά την ένταση του φαινομένου, καθώς επρόκειτο για φαινόμενο που εκδηλώνεται ακαριαία και με μεγάλες ταχύτητες.



Εικόνα 39: Καταστροφές που αποτυπώθηκαν κατά τη χαρτογράφηση



Εικόνα 38: Καταστροφές που αποτυπώθηκαν κατά τη χαρτογράφηση

Το σημείο αφετηρίας ή η περιοχή της πηγής της λασπορροή βρίσκεται στην πίσω αυλή του ξενοδοχείου και εξελίσσεται σε τρεις περιοχές διάδοσης (άξονες μεταφοράς) βόρεια του ξενοδοχείου. Οι τρεις άξονες μεταφοράς της λασπορροής διακλαδίζονται μέχρις ότου να αποτεθούν βόρεια στον επαρχιακό δρόμο σε 3 σημεία απόθεσης.



Εικόνα 40: Περιοχή έρευνα φωτογραφία από Google Earth

Σύμφωνα με τις αναφορές του κάτοχου του ξενοδοχείου στις 13/12/2019 εκδηλώθηκε λασπορροή, η οποία όπως αναφέρθηκε είχε σημείο αφετηρίας την αυλή του ξενοδοχείου, όπου και προκάλεσε σοβαρές ζημιές. Το έδαφος στην αυλή του ξενοδοχείου υποχώρησε παρασύροντας μαζί του αρκετά δέντρα. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες από το σημείο έναρξης σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές.



Εικόνα 42: Ρωγμή στο σημείο αφετηρίας. (φωτογραφία από κάτοχο του ξενοδοχείου).



Εικόνα 41: Φωτογραφία 2 μέρες μετά την εκδήλωση της λασπορροής. (φωτογραφία από κάτοχο του ξενοδοχείου).



Εικόνα 44: Σημείο αφετηρίας 4 μήνες μετά το συμβάν. Στη φωτογραφία φαίνονται οι επισκευές στην αυλή του ξενοδοχείου (επιχωμάτωση υλικών). (φωτογραφία από Γιώργο Παπαθανασίου)



Εικόνα 43: Σημείο αφετηρίας 8 μήνες μετά το συμβάν. Φαίνεται η αποκατάσταση της φυτοκάλυψης

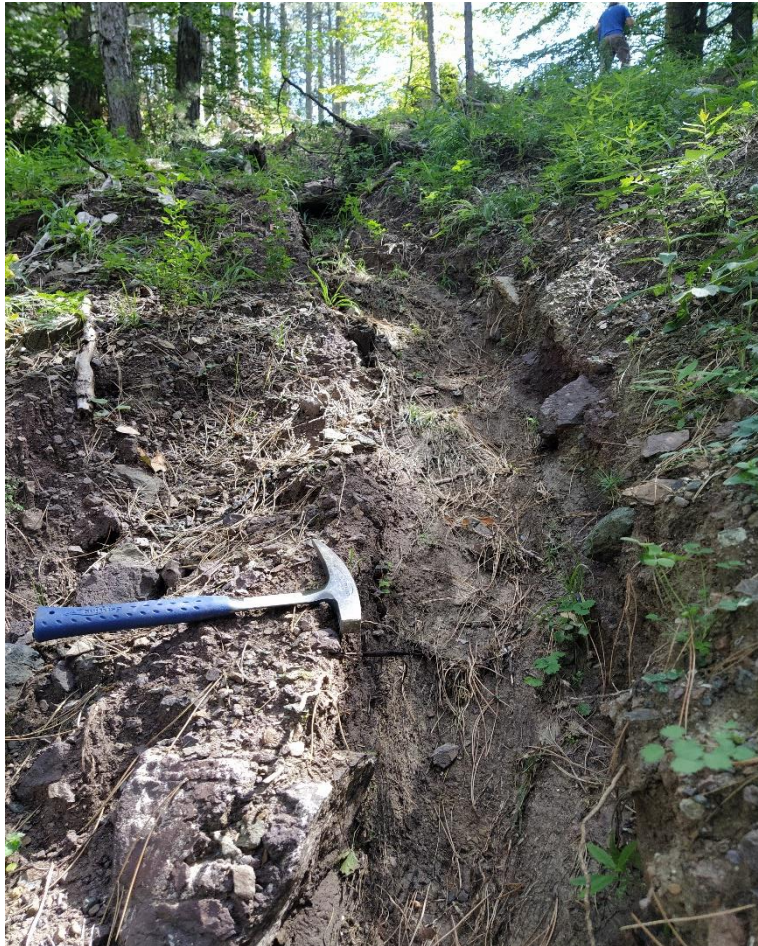
Το φαινόμενο πιθανολογείται ότι ενεργοποιήθηκε με μια μορφή μικρής κατολίσθησης στην αρχή του πρσανούς. Η αποδιοργάνωση και χαλάρωση του υλικού δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την δίοδο του νερού στο εσωτερικό του εδάφους. Πιθανολογείται πως το έδαφος τροφοδοτούνταν συνεχόμενα με νερό από ενδεχόμενες βλάβες σωληνώσεων. Έπειτα από συνεχόμενη βροχόπτωση στις 10, 11 και 12 Δεκεμβρίου και την ισχυρή βροχόπτωση στις 13 Δεκέμβρη η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους ξεπέρασε το όριο υδαρότητας (LL), προκαλώντας την εκδήλωση της λασποροής.

Η λασποροή διακλαδίζεται σε 3 περιοχές διάδοσης (άξονες μεταφοράς), οι οποίοι είναι πολύ στενοί και μεταφέρουν το υλικό με μεγάλες ταχύτητες προς τα Βόρεια, μέχρις ότου να αποτεθούν.



Εικόνα 45: Περιοχή διάδοσης 1. Με μπλε γραμμή απεικονίζεται ο άξονας μεταφοράς

Η περιοχή διάδοσης 2, είχε τη μεγαλύτερη τροφοδοσία υλικού αφού το σημείο απόθεσης είχε το μεγαλύτερο όγκο κατολισθαίντος υλικού. Ο άξονας μεταφοράς ήταν ξεκάθαρα αναγνωρίσιμος και πιο βαθύς και πλατύς από τους άλλους 2.



Εικόνα 46 : Περιοχή διάδοσης 2



Εικόνα 47 : Περιοχή διάδοσης 2. Διακρίνεται πόσο στενό είναι σε πλάτος.



Εικόνα 48: Περιοχή διάδοσης 3. Με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται ο "δρόμος" μεταφοράς.

Τέλος τα υλικά αποτέθηκαν και έκλεισαν το δρόμο βόρεια του ξενοδοχείου, σε 3 σημεία απόθεσης. Το Σεπτέμβριο του 2020, όπου πραγματοποιήθηκε η επίσκεψη στη περιοχή έρευνας μετρήθηκαν το μήκος και το πλάτος του με μέτρο καθώς και η κλίση με κλισίμετρο του αποτεθέντος υλικού. Τα νούμερα αυτά έχουν απόκλιση από το πραγματικό μήκος, πλάτος και κλίση του υλικού στις 13 Δεκεμβρίου του 2019 όπου πραγματοποιήθηκε το φαινόμενο. Αυτό συμβαίνει γιατί τις επόμενες μέρες από το συμβάν ο Δήμος καθάρισε το δρόμο από τα υλικά απόθεσης. Το σημείο με το μεγαλύτερο όγκο κατολισθημαίων υλικών ήταν το σημείο απόθεσης 2.



Εικόνα 49: Σημείο Απόθεσης 1.



Εικόνα 50: Σημείο Απόθεσης 1.

Στο σημείο απόθεσης ένα μετρήθηκε ότι το μήκος του αποτεθέντος υλικού είναι 13m. Το σημείο αυτό είναι αυτό με τη μικρότερη ποσότητα υλικού που αποτέθηκε, καθιστώντας το 3^ο σε σειρά.



Εικόνα 52: Σημείο Απόθεσης 2. Φωτογραφία από κάτοχο του Ξενοδοχείου 2-3 μέρες μετά το συμβάν.



Εικόνα 51: Σημείο απόθεσης 2. Φωτογραφία από Γιώργο Παπαθανασίου 4 μήνες μετά το συμβάν.



Εικόνα 53: Σημείο Απόθεσης 2. Φωτογραφία 8 μήνες μετά την εκδήλωση της λασπορροής.

Το σημείο απόθεσης 2 είχε μήκος 30m και πλάτος 8m. Η κλίση του μετρήθηκε με κλισιόμετρο στο κέντρο 16° ενώ προς τα αριστερά 9° . Όπως προαναφέρθηκε το σημείο αυτό ήταν το σημείο με τη μεγαλύτερη τροφοδοσία υλικού και με το μεγαλύτερο όγκο κατολισθαίντος υλικού.



Εικόνα 54: Σημείο Απόθεσης 3. Φωτογραφία 8 μήνες μετά την εκδήλωση της λασποροής.

Το σημείο απόθεσης 3 είχε μήκος 14m και πλάτος 6.5m. Η κλίση του μετρήθηκε με κλισιόμετρο στο κέντρο 5°. Το σημείο αυτό ήταν το δεύτερο σε σειρά σε σχέση με τον όγκο κατολισθαίντος υλικού.

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικές μετρήσεις πλάτους, μήκους και κλίσεων στα σημεία απόθεσης

	Σημείο Απόθεσης 1	Σημείο Απόθεσης 2	Σημείο Απόθεσης 3
Πλάτος (m)		8	6,5
Μήκος (m)	13	30	14
Κλίση (°)		Κέντρο 16° Αριστερά 9°	5



Εικόνα 55: Θέσεις Αποθέσεων της λασπορροής (φωτογραφία από Google Earth).

Για την ορθή κατανόηση του μηχανισμού της λασπορροής θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο ένα μοντέλο προσομοίωσης της περιοχής (conceptual model), το οποίο κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του AutoCAD και απεικονίζει τη περιοχή έρευνας μετά την ενεργοποίηση της λασπορροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Από τη περιοχή μελέτης συλλέχθηκαν δείγματα από 3 σημεία τα οποία τέθηκαν μετέπειτα σε εργαστηριακές δοκιμές στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του ΑΠΘ. Τα δείγματα συλλέχθηκαν και στις 3 περιπτώσεις σε βάθος 0-1m σκάβοντας και αφαιρώντας το επιφανειακό στρώμα. Τα δείγματα συλλέχθηκαν από το 2^ο σημείο μεταφοράς, από το 1^ο σημείο απόθεσης και από το 2^ο σημείο απόθεσης. Σκοπός συλλογής των 3^{ων} δειγμάτων ήταν η σύγκριση των ιδιοτήτων τους στο σημείο μεταφοράς και στα σημεία απόθεσης. Οι θέσεις επιλογής των δειγμάτων συμβάδιζαν με την πιο εύκολη πρόσβαση στα σημεία αλλά και με την περίσσια υλικού, καθώς όπως αναφέρθηκε, το σημείο 2 (μεταφοράς και απόθεσης) ήταν αυτό με την μεγαλύτερη ποσότητα υλικού.



Εικόνα 56: Θέσεις δειγματοληψίας. Αριστερά σημείο μεταφοράς 2 και δεξιά θέση απόθεσης 2.

Για τα 3 σημεία δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες εργαστηριακές δοκιμές:

- Φυσική και Περιεχόμενη υγρασία
- Κοκκομετρική Ανάλυση με Κόσκινα
- Όρια Atterberg

Για το σημείο απόθεσης 2 πραγματοποιήθηκαν επιπλέον:

- Ειδικό βάρος
- Άμεσης Διάτμησης

Μετά τη συλλογή των δειγμάτων, τα δείγματα καλύφθηκαν αεροστεγώς με ειδικά σακουλάκια με σκοπό να μη χαθεί η φυσική τους υγρασία. Μετά από 48 ώρες από τη συλλογή τους πραγματοποιήθηκαν άμεσα οι δοκιμές που αφορούσαν τη φυσική υγρασία.

6.1 Φυσική και Περιεχόμενη υγρασία

Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι η μέτρηση της μάζας του νερού που περιέχεται στο δείγμα. Φυσική υγρασία είναι ο λόγος του βάρους του νερού που υπάρχει μέσα στους πόρους (W_w) προς το βάρος των ξηρών κόκκων του εδάφους (W_s), δηλαδή:



Εικόνα 57: Θέση δειγματοληψίας. Θέση απόθεσης 1.

$$m = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \%$$

Δοκιμή (ASTM D-2216/80):

Για τον υπολογισμό της φυσικής υγρασίας τα δείγματα ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν για ξήρανση στο φούρνο σε θερμοκρασία 105 °C - 110°C για 24 ώρες (W). Μετά την απομάκρυνση των δειγμάτων από το φούρνο, τα δείγματα ψύχθηκαν σε ειδικά διαμορφωμένο δοχείο, ώστε να μην εισέρχεται υγρασία και ζυγίστηκαν εκ νέου (W_s). Έτσι υπολογίστηκε η περιεκτικότητα

σε νερό υπολογίζεται ως $m = (W - W_s) / W_s \cdot 100 (\%)$. Συγκεκριμένα οι μετρήσεις για τα 3 σημεία δειγματοληψίας αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες.



Εικόνα 58: Ζύγισμα υλικού στη ζυγαριά ακριβείας. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ

Πίνακας 5 : Φυσική υγρασία Σημείο μεταφοράς 2

Σημείο Μεταφοράς 2	
κάψα (gr)	104,38
κάψα + υγρό δείγμα (gr)	1160,72
υγρό δείγμα (gr)	1056,34
κάψα + ξηρό δείγμα (gr)	1011,18
ξηρό δείγμα (gr)	906,8
βάρος νερού	149,54
φυσική υγρασία (%)	16,49

Πίνακας 6: Φυσική υγρασία Θέση απόθεσης 2

Θέση απόθεσης 2	
κάψα (gr)	92,75
κάψα + υγρό δείγμα (gr)	1207,84
υγρό δείγμα (gr)	1115,09
κάψα + ξηρό δείγμα (gr)	1120,87
ξηρό δείγμα (gr)	1028,12
βάρος νερού	86,97
φυσική υγρασία (%)	8,46

Πίνακας 7: Φυσική υγρασία. Θέση απόθεσης 1

Θέση απόθεσης 1	
κάψα (gr)	107,69
κάψα + υγρό δείγμα (gr)	1329,01
υγρό δείγμα (gr)	1221,32
κάψα + ξηρό δείγμα (gr)	1175,6
ξηρό δείγμα (gr)	1067,91
βάρος νερού	153,41
φυσική υγρασία (%)	14,37

Η φυσική υγρασία στο σημείο μεταφοράς 2 είναι 16,49%, στη θέση απόθεσης 2 είναι 8,46% και στη θέση απόθεσης 1 είναι 14,37%,

6.2 Ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος ενός εδάφους είναι ο λόγος του βάρους ορισμένου όγκου κόκκων εδάφους προς το βάρος ίσου όγκου απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας 4°C. Το ειδικό βάρος του νερού σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας, ισούται με $\gamma_w = 1$. Έτσι το ειδικό βάρος των στερεών συστατικών γ_s ενός εδάφους ισούται αριθμητικά με το λόγο του βάρους των κόκκων προς τον αντίστοιχο όγκο.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$$

Δοκιμή (ASTM D-854/83)

Για την αρχή της δοκιμής επιλέχθηκε ένας ογκομετρικός κύλινδρος ο οποίος ζυγίστηκε στεγνός. Έπειτα προστέθηκε σε αυτόν απεσταγμένο νερό θερμοκρασίας δωματίου μέχρι τα 100 ml και αναγράφηκε το συνολικό βάρος του ογκομετρικού κυλίνδρου με το νερό W_a (άδειασμα ογκομετρικού κυλίνδρου). Κατόπιν τοποθετήθηκε στον ογκομετρικό κύλινδρο 25gr ξηρού δείγματος και στη συνέχεια προστέθηκε απεσταγμένο νερό μέχρι τα 100 ml. Έτσι αναγράφηκε εκ νέου το βάρος W_b του κυλίνδρου (κύλινδρος+ δείγμα+ απεσταγμένο νερό) και η θερμοκρασία T_x του σε °C.

Το ειδικό βάρος εδάφους ως προς νερό θερμοκρασίας T_x υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$T_x / T_y(^{\circ}C) = \frac{W_s}{W_s + (W_a - W_b)}$$

όπου

W_s : το βάρος του ξηρού δείγματος εδάφους

W_a : το βάρος του δοχείου με απεσταγμένο νερό

W_b : το βάρος του δοχείου με το απεσταγμένο νερό και ξηρό δείγμα σε θερμοκρασία T_x

T_x : η θερμοκρασία του δείγματος και του νερού στο δοχείο κατά τη μέτρηση του βάρους W_b .

Όμως οι τιμές του ειδικού βάρους πρακτικά αναφέρονται ως προς νερό θερμοκρασίας 20 °C. Επομένως η τιμή ως προς νερό 20 °C υπολογίζεται από την τιμή για το νερό στην θερμοκρασία T_y που μετρήθηκε, με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\frac{T_x}{T_{20^\circ C}} = k \cdot \frac{T_x}{T_y} (^{\circ}C)$$

όπου $k = \frac{\text{σχετική πυκνότητα του νερού θερμοκρασίας } T_y}{\text{σχετική πυκνότητα του νερού στους } 20^{\circ}C}$ και οι τιμές του λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 8: Σχετική πυκνότητα νερού και συντελεστής αναγωγής k για διάφορες θερμοκρασίες

Θερμοκρασία	Σχετική πυκνότητα νερού	Συντελεστής διορθώσεως (αναγωγής) k
18	0.9986244	10.004
19	0.9984347	10.002
20	0.9982343	10.000
21	0.9980233	0.9998
22	0.9978019	0.9996
23	0.9975702	0.9993
24	0.9973286	0.9991
25	0.9970770	0.9989
26	0.9968156	0.9986
27	0.9965451	0.9983
28	0.9962652	0.9980
29	0.9959761	0.9977
30	0.9956780	0.9974

Πίνακας 9: Δεδομένα για το ειδικό βάρος από δείγμα στη θέση απόθεσης 2

Θέση απόθεσης 2	
Βάρος ογκομέτρου:	57,08 gr
Βάρος ογκομέτρου + νερού 100ml (W_a)	153,09 gr
Βάρος ξηρού δείγματος	25,77 gr
Βάρος ογκομέτρου+ νερού+ δείγματος (W_b)	168,08gr
Θερμοκρασία νερού	25°C

$$\text{Ισχύει ότι: } \frac{T_x}{T_y} = \frac{W_s}{W_s + (W_a - W_b)} = \frac{25,77}{25,77 + (153,09 - 168,08)} = 2,390$$

$$\text{Επομένως : } \gamma = 2,390 \times k = 2,323 \times 0,9989 \Rightarrow \gamma = \mathbf{2,388}$$

Συνεπώς το ειδικό βάρος του υλικού είναι 2.388.

6.3 Κοκκομετρική ανάλυση

Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι

- Προσδιορισμός του κυρίου τύπου εδάφους και των προσμίξεων
- Ο συντελεστής ομοιομορφίας $U = d_{60} / d_{10}$
- Βαθμός Διαβάθμισης
- Συντελεστή Διαπερατότητας (Hazen 1911)

Δοκιμή (ASTM C-136)

Το δείγμα που κοσκινίστηκε αποτελούνταν από χονδρόκοκκα υλικά, στεγνά, χωρίς συσσωματώματα (χρησιμοποιήθηκε γουδί) και χωρίς ξένα σώματα. Στην αρχή το δείγμα ξηράθηκε στους 105° C και ζυγίστηκε σε ζυγαριά ακριβείας. Έπειτα το υλικό τοποθετήθηκε μέσα σε μια σειρά κόσκινων με διαφορετική διάμετρο. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν με σειρά μεγέθους αυξανόμενη από κάτω προς τα πάνω: 0.075 (No. 200), 0.15 (No. 100), 0.425 (No. 40), 2.0 (No. 10), 4.75 (No. 4), 19.0 (3/4"). Έπειτα το υλικό κοσκινίστηκε για 15 λεπτά σε αυτόματη συσκευή κοσκνίσματος.

Τέλος το συγκρατούμενο υλικό σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και ανάγεται σε ποσοστό % του συνολικού βάρους του δείγματος. Το περιεχόμενο της πεπάλης που βρίσκεται κάτω από το τελευταίο κόσκινο περιέχει τα λεπτόκοκκα υλικά (ίλυσ και άργιλος).



Εικόνα 59: Προετοιμασία για κοκκομετρική ανάλυση.
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ



Εικόνα 60: Προετοιμασία υλικού για κοκκομετρική ανάλυση. Διάλυση συσσωματωμάτων με το γουδί

Συντελεστής ομοιομορφίας

Έπειτα υπολογίστηκε ο συντελεστής ομοιομορφίας $U = d_{60} / d_{10}$,

όπου d_{60} = διάμετρος στο 60% διερχόμενων

και d_{10} = διάμετρος στο 10% διερχόμενων

Για τις τιμές του συντελεστή ομοιομορφίας ισχύει ότι:

Συντελεστής ομοιομορφίας	Χαρακτηρισμός εδάφους	π.χ
$U < 5,$	ομοιόμορφο	αιολικές αποθέσεις
$U = 5-15$	ανομοιόμορφο	άμμος
$U > 15,$	πολύ ανομοιόμορφο	Χερσοποτάμιες και παγετώδεις αποθέσεις

Ο συντελεστής ομοιομορφίας δίνει πληροφορίες σχετικά με τη συμπύκνωση μη συνεκτικών ή ελαφρά συνεκτικών εδαφών ($U > 15 \Rightarrow$ τα εδάφη συμπυκνώνονται καλά).



$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

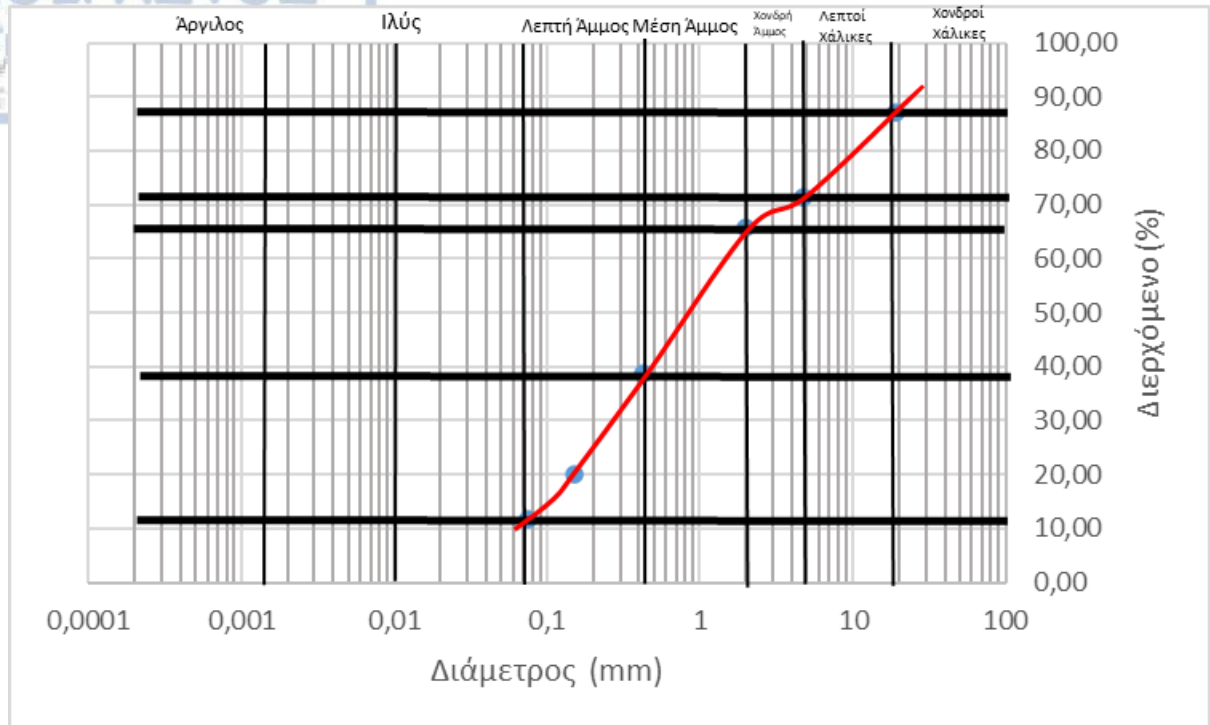
Ένα καλά διαβαθμισμένο έδαφος είναι ανομοιόμορφο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι μικρότεροι κόκκοι πληρώνουν τα κενά των μεγαλύτερων με συνέπεια την αύξηση της διατμητικής αντοχής του υλικού.

6.3.1 Θέση απόθεσης 2

Κοκκομετρική καμπύλη

Πίνακας 10: Δεδομένα για Κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος από τη θέση απόθεσης 2

Θέση απόθεσης 2				
Κόσκινο		Συγκρατούμενο βάρος	Διερχόμενος βάρος	
No, ASTM	(mm)	gr	gr	%
3/4 in	19	59,45	397,3	86,98
No 4	4,75	71,93	325,37	71,24
No 10	2	25,4	299,97	65,67
No 40	0,425	123,42	176,55	38,65
No 100	0,15	84,73	91,82	20,10
No 200	0,075	37,85	53,97	11,82
Παιπάλη		53,97		
Ολικό βάρος		456,75		100



Εικόνα 61: Κοκκομετρική καμπύλη για το σημείο απόθεσης 2

Ιλύς και άργιλος	11%
λεπτή άμμος	28%
μέση άμμος	27%
χονδρή άμμος	5%
λεπτοί Χάλικες	17%
Χονδροί Χάλικες	12%

Συνεπώς το υλικό χαρακτηρίζεται λεπτή έως και μέση άμμος.

Συντελεστής ομοιομορφίας

Για το δείγμα στη Θέση απόθεσης 2 ισχύει ότι $U = d_{60} / d_{10} = 1,7 / 0,065 = 26,154$
Συνεπώς το δείγμα είναι πολύ ανομοιόμορφο σύμφωνα με τον πίνακα.

Συντελεστής ομοιομορφίας	Χαρακτηρισμός εδάφους	π.χ
$U < 5,$ $U = 5-15$	ομοιόμορφο ανομοιόμορφο	αιολικές αποθέσεις άμμος
$U > 15,$	πολύ ανομοιόμορφο	Χερσοποτάμιες και παγετώδεις αποθέσεις

Βαθμός Διαβάθμισης

Για το δείγμα στη Θέση απόθεσης 2 ισχύει ότι $C_c = d_{30}^2 / d_{60} \cdot d_{10} = 0.7095$
Το συγκεκριμένο δείγμα είναι καλά διαβαθμισμένο.

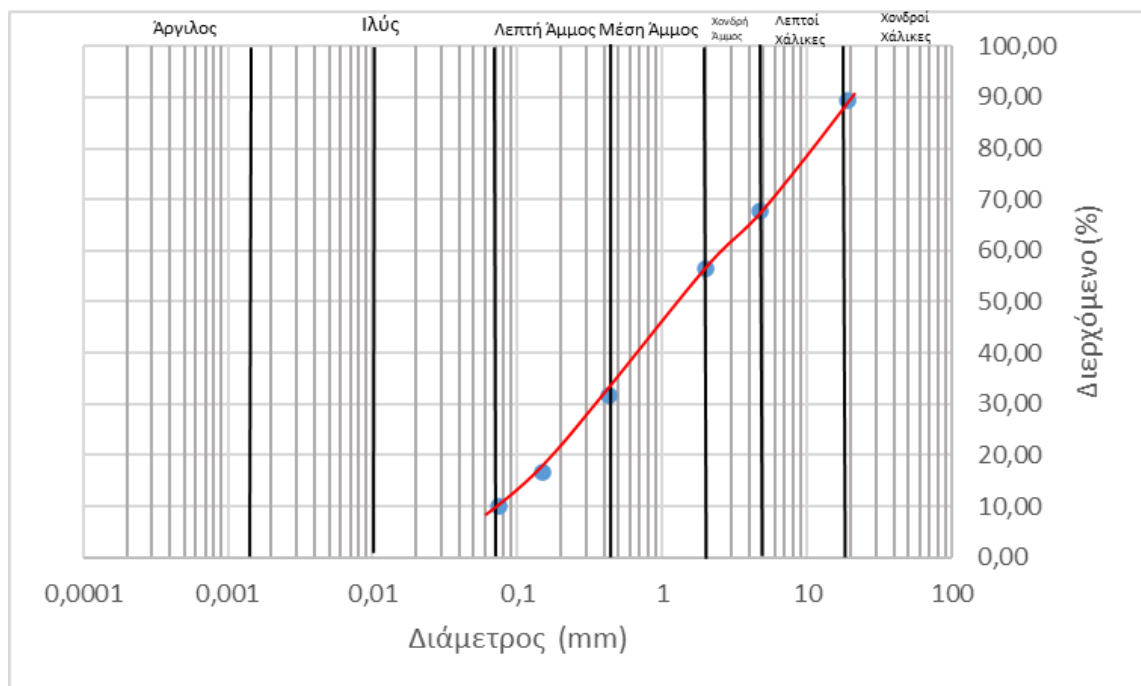
Τελικώς για το δείγμα που λήφθηκε από τη θέση απόθεσης 2 προέκυψε από την κοκκομετρική ανάλυση ότι πρόκειται για πολύ ανομοιόμορφη και καλά διαβαθμισμένη λεπτή έως και μέση Άμμο με χαλίκια.

6.3.1 Θέση απόθεσης 1

Κοκκομετρική καμπύλη

Πίνακας 11: Δεδομένα για Κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος από τη θέσης απόθεσης 1

Θέση Απόθεσης 1				
Κόσκινο		Συγκρατούμενο βάρος	Διερχόμενος βάρος	
No, ASTM	(mm)	gr	gr	%
3/4 in	19	80,23	672,21	89,34
No 4	4,75	162,57	509,64	67,73
No 10	2	83,66	425,98	56,61
No 40	0,425	187,25	238,73	31,73
No 100	0,15	113,23	125,5	16,68
No 200	0,075	50,37	75,13	9,98
Παιπάλη		75,13		
Ολικό βάρος		752,44		100



Εικόνα 62: Κοκκομετρική καμπύλη για τη θέση απόθεσης 1

Ιλύς	10%
λεπτή άμμος	24%
μέση άμμος	24%
χονδρή άμμος	10%
λεπτοί Χάλικιες	20%
Χονδροί Χάλικιες	12%

Συνεπώς το υλικό χαρακτηρίζεται λεπτή έως και μέση άμμος.

Συντελεστής ομοιομορφίας

Για το δείγμα στη Θέση απόθεσης 2 ισχύει ότι $U = d_{60} / d_{10} = 2.6 / 0,08 = 32,5$

Συνεπώς το δείγμα είναι πολύ ανομοιόμορφο σύμφωνα με τον πίνακα.

Συντελεστής ομοιομορφίας	Χαρακτηρισμός εδάφους	π.χ
$U < 5,$	ομοιόμορφο	αιολικές αποθέσεις
$U = 5-15$	ανομοιόμορφο	άμμος
$U > 15,$	πολύ ανομοιόμορφο	Χερσοποτάμιες και παγετώδεις αποθέσεις

Βαθμός Διαβάθμισης

Για το δείγμα στη Θέση απόθεσης 2 ισχύει ότι $C_c = d^2_{30} / d_{60} \cdot d_{10} = 0.589$

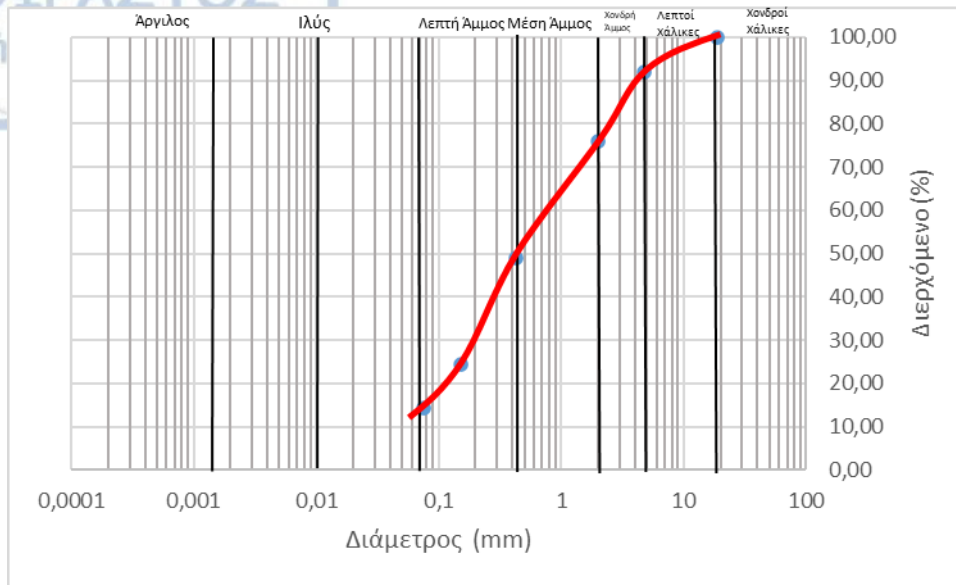
Το συγκεκριμένο δείγμα είναι καλά διαβαθμισμένο.

Τελικώς για το δείγμα που λήφθηκε από τη θέση απόθεσης 1 προέκυψε από την κοκκομετρική ανάλυση ότι πρόκειται για πολύ ανομοιόμορφη και καλά διαβαθμισμένη λεπτή έως και μέση Άμμο με χαλίκια.

6.3.2 Σημείο Μεταφοράς 2

Πίνακας 12: Δεδομένα για Κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος από το σημείο μεταφοράς 2

Σημείο Μεταφοράς 2				
Κόσκινο		Συγκρατούμενο βάρος	Διερχόμενος βάρος	
No, ASTM	(mm)	gr	gr	%
3/4 in	19		336,32	100,00
No 4	4,75	26,99	309,33	91,97
No 10	2	53,49	255,84	76,07
No 40	0,425	90,84	165	49,06
No 100	0,15	82,84	82,16	24,43
No 200	0,075	34,4	47,76	14,20
Παιπάλη		47,76		
Ολικό βάρος		336,32		100



Εικόνα 63: Κοκκομετρική καμπύλη για τη θέση απόθεσης 1

ιλύς	12%
λεπτή άμμος	38%
μέση άμμος	25%
χονδρή άμμος	18%
λεπτοί Χάλικες	7%

Συνεπώς το υλικό χαρακτηρίζεται μέση έως και λεπτή Άμμος.

Συντελεστής ομοιομορφίας

Για το δείγμα στη Θέση απόθεσης 2 ισχύει ότι $U = d_{60} / d_{10} = 0,8 / 0,05 = 16$
Συνεπώς το δείγμα είναι πολύ ανομοιόμορφο σύμφωνα με τον πίνακα.

Συντελεστής ομοιομορφίας	Χαρακτηρισμός εδάφους	π.χ
$U < 5$,	ομοιόμορφο	αιολικές αποθέσεις
$U = 5-15$	ανομοιόμορφο	άμμος
$U > 15$,	πολύ ανομοιόμορφο	Χερσοποτάμιες και παγετώδεις αποθέσεις

Βαθμός Διαβάθμισης

Για το δείγμα στη Θέση απόθεσης 2 ισχύει ότι $C_c = d_{30}^2 / d_{60} \cdot d_{10} = 0.90$
Το συγκεκριμένο δείγμα είναι καλά διαβαθμισμένο.

Τελικώς για το δείγμα που λήφθηκε από το σημείο μεταφοράς 2 προέκυψε από την κοκκομετρική ανάλυση ότι πρόκειται για πολύ ανομοιόμορφη και καλά διαβαθμισμένη λεπτή έως και μέση Άμμο με χαλίκια.

Συνεπώς και από τις 3 δοκιμές προέκυψε το ίδιο αποτέλεσμα (πολύ ανομοιόμορφη και καλά διαβαθμισμένη λεπτή έως και μέση Άμμο με χαλίκια). Το ίδιο υλικό βρέθηκε τόσο στα σημεία μεταφοράς όσο και στα σημεία απόθεσης, γεγονός που αποδεικνύει έμμεσα την ύπαρξη της λασπορροής στη περιοχή καθώς ίδιας ποιότητας υλικά από την αφετηρία της πλαγιάς βρέθηκαν στη βάση. Το χαρακτηριστικό της ανομοιομορφίας των υλικών μαρτυρά την προέλευση τους, από χερσοποτάμιες (ύπαρξη ρυακίων στην πλαγιά) ή παγετώδεις αποθέσεις, ενώ δεν αποκλείεται η προέλευση των υλικών από ανθρωπογενή παρέμβαση (επιχώσεις για διάνοιξη δασικού δρόμου).

6.4 Όρια Atterberg

Όριο υδαρότητας (LL) – Μέθοδος Casagrande

Όριο υδαρότητας ορίζεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό κατά την χρονική στιγμή που το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην υδαρή κατάσταση.

Δοκιμή (ASTM D-4318/83)

Για την δοκιμή επιλέγονται περίπου 100gr από το κλάσμα εδάφους που διέρχεται από το κόσκινο Νο 40. Στο υλικό αυτό προστίθεται νερό ώστε να σχηματιστεί μία μαλακή μάζα μέχρις ότου με το ανακάτεμα να κατανεμηθεί ομοιόμορφα. Στη συνέχεια το υλικό αυτό τοποθετείται στο κύπελλο της συσκευής και απλώνεται έτσι ώστε το μεγαλύτερο βάθος του δείγματος να είναι 1 cm. Έπειτα το υλικό διαιρείται με μια σταθερή διαδρομή του οργάνου χαράξεως ακριβώς στη μέση του κυπέλλου, με σκοπό να σχηματιστεί μια χαραγή καταλλήλων διαστάσεων. Τέλος γυρίζουμε το στρόφαλο με σταθερό ρυθμό περίπου 2 γύρους / sec, με συνέπεια το κύπελο να χτυπάει ρυθμικά πάνω στο βάθρο του οργάνου. Τη στιγμή που η χαραγή κλείσει σε μήκος 12.7 mm,



Εικόνα 64: Δοκιμή με τη Μέθοδο Casagrande. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ

σταματάμε να γυρίζουμε το στρόφαλο και αναγράφουμε τον αριθμό των κτύπων και υπολογίζουμε την υγρασία του δείγματος. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για κάθε δείγμα τρεις τουλάχιστον φορές για διαφορετικές περιεκτικότητες νερού και για κτυπήματα >10 και <40.

Όριο Πλαστικότητας (PL)

Το όριο πλαστικότητας αντιστοιχεί στο χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεή κατάσταση και μπορεί να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο διαμέτρου 3 mm χωρίς να θραύεται

Δοκιμή (ASTM D-4318/83).

Για τη δοκιμή επιλέγονται περίπου 20 gr από υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο. 40, το οποίο αναμιγνύεται με αποταγμένο νερό μέχρι το υλικό να σχηματίσει σβόλο. Έπειτα επιλέγονται περίπου 8 gr αυτού και κυλινδρώνονται μεταξύ των δακτύλων και της σφυριδωμένης γυάλινης πλάκας (στη συγκεκριμένη περίπτωση πορώλιθου). Η πίεση που ασκείται από το χέρι θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να κυλινδρωθεί η μάζα σε ραβδίσκο ομοιόμορφου διαμέτρου σε όλο το μήκος του. Όταν κατά τη κυλίνδρωση, η διάμετρος του ραβδίσκου φτάσει τα 3 mm, ο ραβδίσκος τεμαχίζεται σε έξι ή οκτώ τεμάχια τα οποία συμπιέζονται δημιουργώντας ομοιόμορφη μάζα, η οποία τίθεται ξανά υπό κυλίνδρωση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το αναζημωμένο υλικό δεν μπορεί να κυλινδρωθεί φτάνοντας τη αρχική διάμετρο 3 mm, και θραύεται σε μεγαλύτερη διάμετρο. Αυτό θεωρείται και το ικανοποιητικό σημείο περατώσεως, Έτσι υπολογίζεται το όριο πλαστικότητας, ως η περιεχόμενη υγρασία που περιέχεται στους ραβδίσκους των 3 mm και προκύπτει η τελική του τιμή ως ο μέσος όρος τριών δοκιμών.

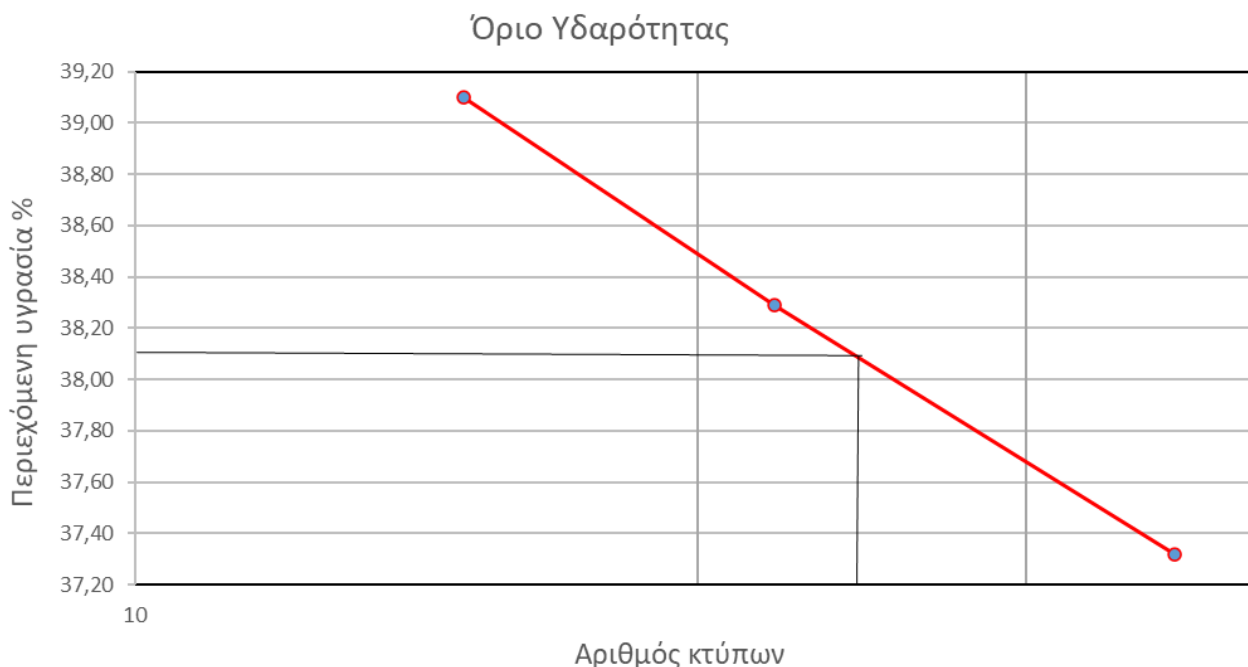


Εικόνα 65: Δοκιμή του ορίου πλαστικότητας. Πρώτη δοκιμή όπου ο ραβδίσκος κυλινδρώθηκε σε διάμετρος 3mm. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ.

6.4.1 Θέση απόθεσης 2

Πίνακας 13: Αποτελέσματα Όρια Atterberg για τη θέση απόθεσης 2

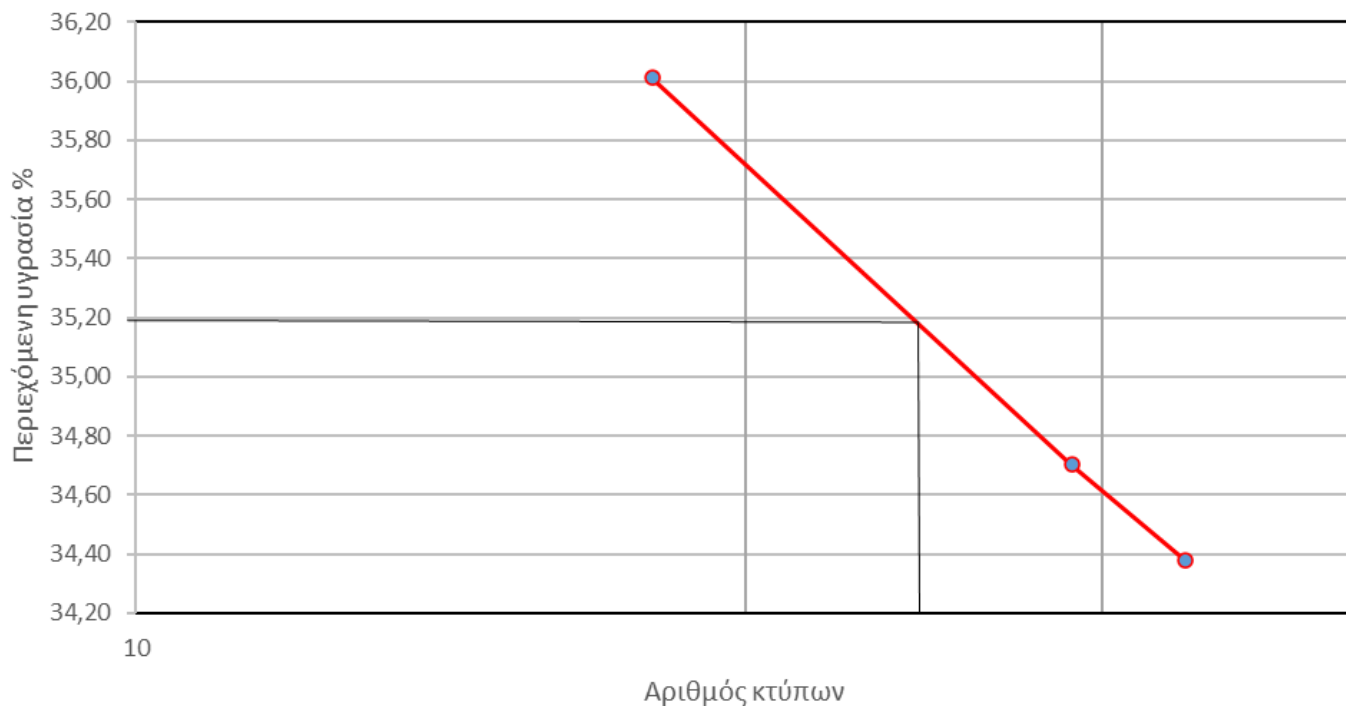
Θέση απόθεσης 2						
Δοκιμή προσδιορισμού ορίων Atterberg						
Αριθμός δοκιμής	Όριο υδαρότητας			Όριο πλαστικότητας		
	1	2	3	1	2	3
Αριθμός κτύπων	36	22	15			
Υγρό δείγμα + υποδοχέας (gr)	118,42	114,86	130,65	29,085	28,88	35,20
Ξηρό δείγμα + υποδοχέας (gr)	114,27	109,58	124,57	28,552	28,37	34,42
Βάρος υποδοχέα (gr)	103,15	95,79	109,02	26,435	26,422	31,212
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	11,12	13,79	15,55	2,12	1,95	3,21
Βάρος υγρού δείγματος (gr)	15,27	19,07	21,63	2,65	2,46	3,98
Απώλεια υγρασίας (gr)	4,15	5,28	6,08	0,53	0,51	0,77
Περιεχόμενη υγρασία %	37,32	38,29	39,10	25,18	26,12	24,12
Αποτελέσματα						
LL	38,10					
PL	25,14					
PI	12,96					



Πίνακας 14: Αποτελέσματα Όρια Atterberg για τη θέση απόθεσης 1

Θέση απόθεσης 1						
Δοκιμή προσδιορισμού ορίων Attenberg						
Αριθμός δοκιμής	Όριο υδαρότητας			Όριο πλαστικότητας		
	1	2	3	1	2	3
Αριθμός κτύπων	33	29	18			
Υγρό δείγμα + υποδοχέας (gr)	122,58	106,25	103,92	29,36	30,22	33,61
Ξηρό δείγμα + υποδοχέας (gr)	117,42	101,69	100,11	28,75	29,46	33,02
Βάρος υποδοχέα (gr)	102,41	88,55	89,53	26,24	26,20	30,43
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	15,01	13,14	10,58	2,51	3,26	2,59
Βάρος υγρού δείγματος (gr)	20,17	17,70	14,39	3,12	4,02	3,18
Απώλεια υγρασίας (gr)	5,16	4,56	3,81	0,61	0,76	0,59
Περιεχόμενη υγρασία %	34,38	34,70	36,01	24,30	23,46	22,73
Αποτελέσματα						
LL	35,20					
PL	23,50					
PI	11,70					

Όριο Υδαρότητας

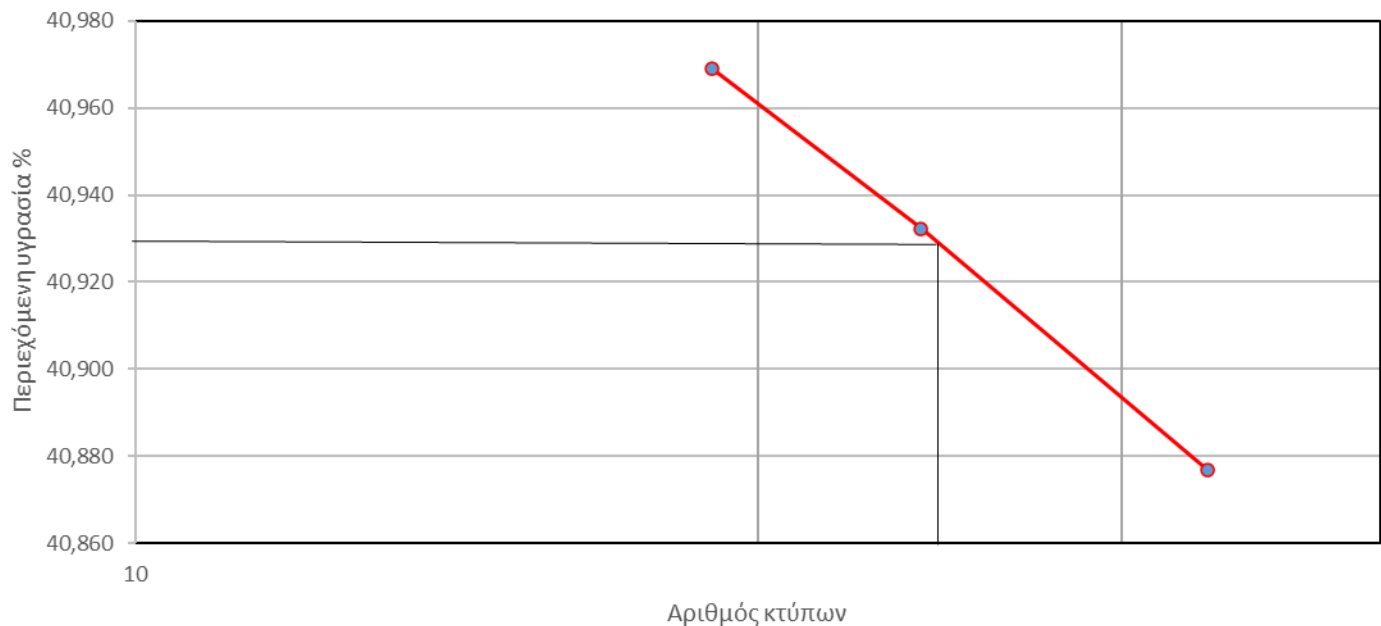


6.4.3 Σημείο Μεταφοράς 2

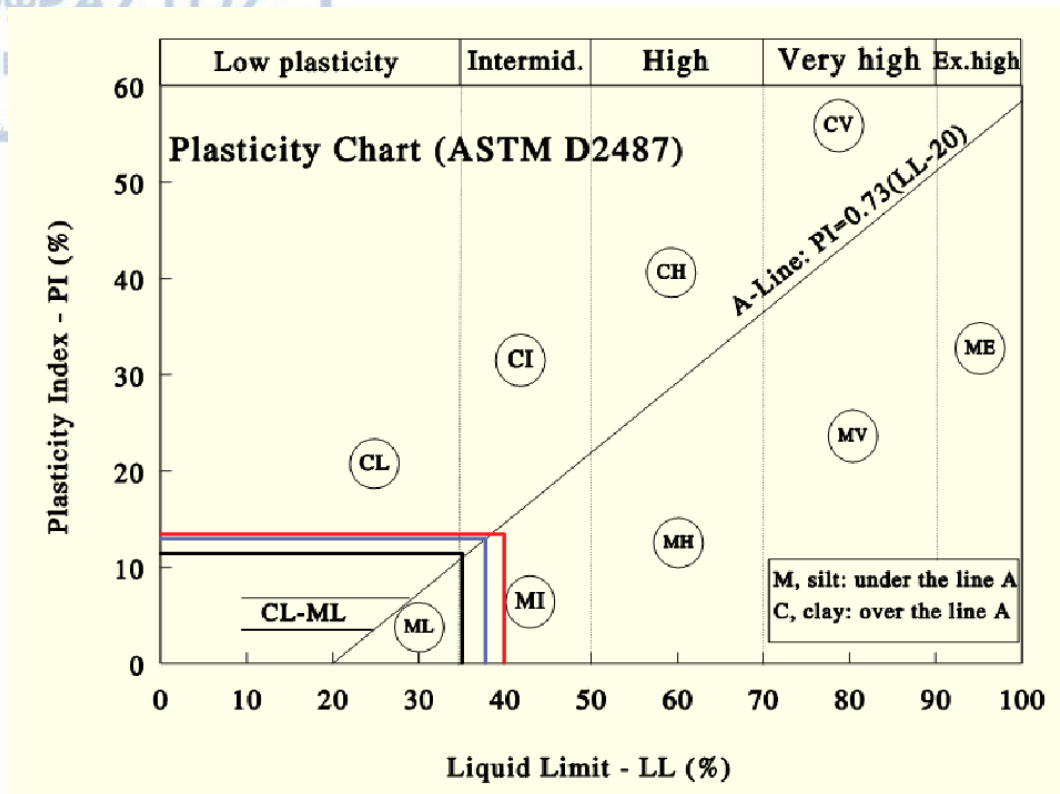
Πίνακας 15: Αποτελέσματα Όρια Atterberg για το Σημείο Μεταφοράς 2

Σημείο Μεταφοράς 2						
Δοκιμή προσδιορισμού ορίων Atterberg						
	Όριο υδαρότητας			Όριο πλαστικότητας		
Αριθμός δοκιμής	1	2	3	1	2	3
Αριθμός κτύπων	33	24	19			
Υγρό δείγμα + υποδοχέας (gr)	120,620	105,260	109,750	113,990	31,425	33,23
Ξηρό δείγμα + υποδοχέας (gr)	114,280	100,764	104,170	112,800	30,800	32,44
Βάρος υποδοχέα (gr)	98,770	89,780	90,550	108,240	28,539	29,51
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	15,510	10,984	13,620	4,560	2,261	2,932
Βάρος υγρού δείγματος (gr)	21,850	15,480	19,200	5,750	2,886	3,720
Απώλεια υγρασίας (gr)	6,340	4,496	5,580	1,190	0,625	0,788
Περιεχόμενη υγρασία %	40,877	40,932	40,969	26,096	27,643	26,876
Αποτελέσματα						
LL	40,30					
PL	26,87					
PI	13,43					

Όριο Υδαρότητας



Συνεπώς, προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα για τα δείγματα και των 3^{ων} θέσεων (θέση απόθεσης 2, θέση απόθεσης 1 και σημείο μεταφοράς 2), ότι το υλικό είναι μέσης πλαστικότητας ιλύς έως μέσης πλαστικότητας άργιλος.



Εικόνα 66: Διάγραμμα πλαστικότητας. Η μπλε γραμμή εκπροσωπεί τα αποτελέσματα του υλικού στη θέση απόθεσης 2, η μαύρη στη θέση απόθεσης 1 και η κόκκινη στο σημείο μεταφοράς 2.

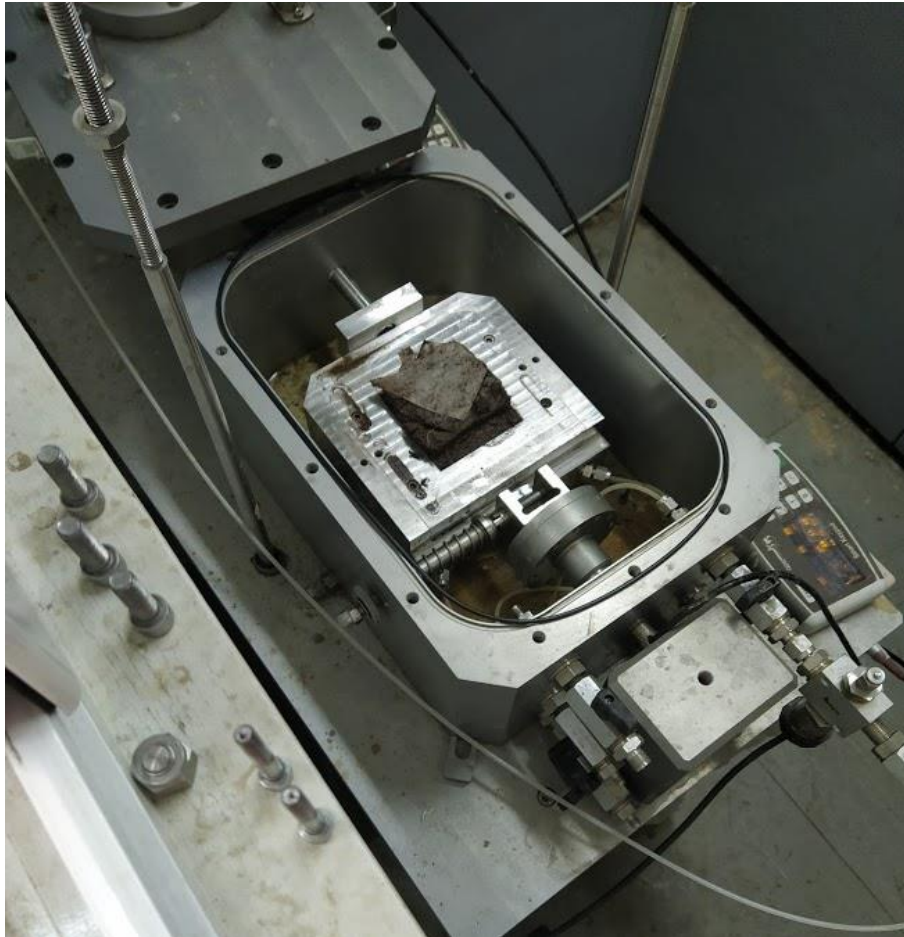
6.5 Άμεσης διάτμησης

Στόχος αυτής της δοκιμής είναι η εύρεσης της συνοχής (c - kPa) και της γωνίας τριβής (ϕ - °) του υλικού. Το έδαφος θραύεται κατά μία προδιαγεγραμμένη επίπεδη επιφάνεια, που λέγεται επιφάνεια διάτμησης. Οι τάσεις που εφαρμόζονται στο δοκίμιο είναι μία σταθερή ορθή τάση (σ) και μία αυξανόμενη διατμητική (τ) με σταθερή ταχύτητα.

Δοκιμή

Το δείγμα τοποθετείται στον υποδοχέα μεταξύ 2 πορόλιθων. Ο υποδοχέας χωρίζεται σε δύο τμήματα, τα οποία ολισθαίνουν το ένα σε σχέση με το άλλο, με σταθερή ταχύτητα. Έπειτα μέσα τοποθετούνται μέσα στο μαύρο κιβώτιο της μηχανής το οποίο κινείται προς τα δεξιά με σταθερή ταχύτητα. Το πάνω κομμάτι συνδέεται με το δυναμομετρικό δακτύλιο και είναι σχετικά ακίνητο, ενώ το κάτω κομμάτι κινείται μαζί με το μαύρο κιβώτιο, επιτυγχάνοντας έτσι τη διάτμηση. Το δείγμα αφήνεται ένα 24ωρο επί σταθερής τάσεως μέχρι να στερεοποιηθεί και έπειτα ξεκινάει η διαδικασία της διάτμησης. Συνολικά πραγματοποιούνται τρεις δοκιμές, αυξάνοντας κάθε φορά την ορθή τάση.

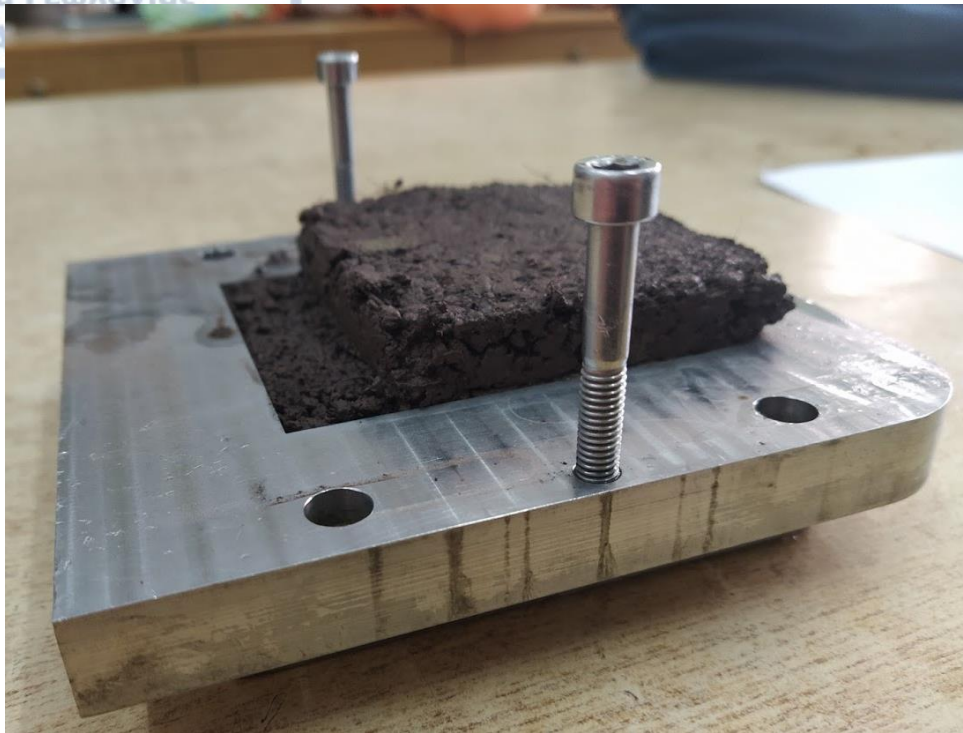
Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε μόνο για τα υλικά του σημείου απόθεσης 2. Πραγματοποιήθηκαν 3 δοκιμές με διαφορετικές τιμές ορθής τάσης. Εφόσον το δείγμα λήφθηκε από 0-1 m από τη περιοχή έρευνας, οι ορθές τάσεις που εισήχθησαν στη δοκιμή, αντιπροσωπεύουν τις επι τόπου. Έτσι εισήχθησαν οι τιμές 25kPa , 50kPa και 75kPa.



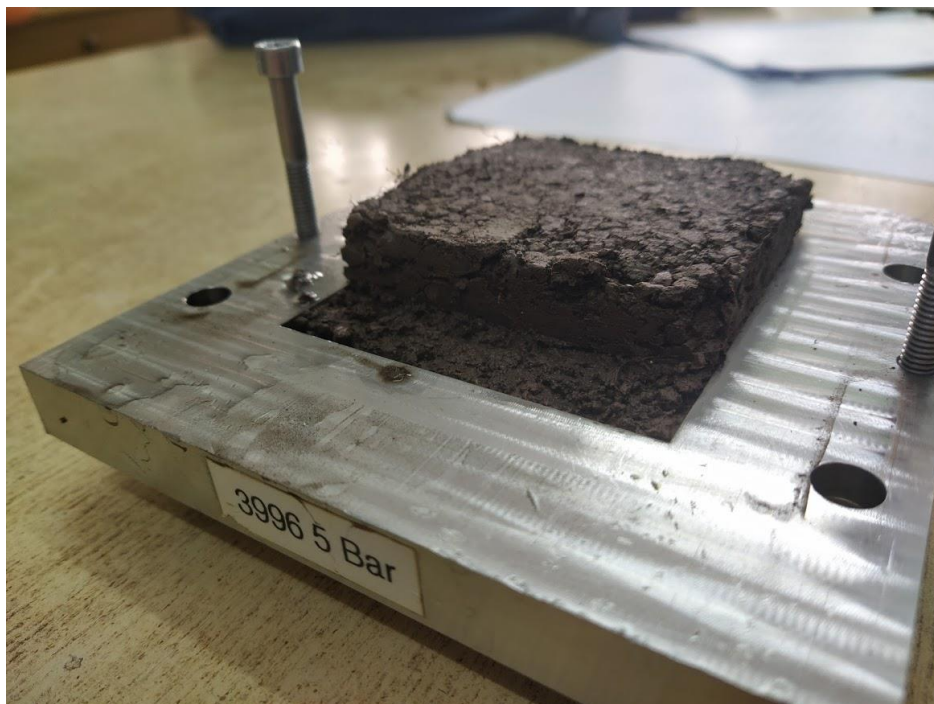
Εικόνα 67: Συσκευή άμεσης διάτμησης, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ.

1^η Δοκιμή

Στην αρχή τοποθετήθηκαν 161,52gr υλικού μέσα στη συσκευή με αρχικό ύψος $h=2,7$. Το υλικό αυτό τέθηκε σε στερεοποίηση για ένα 24ωρο δίνοντας ένα $\Delta h = 2,2207\text{mm}$. Έπειτα από το 24ωρο της στερεοποίησης το υλικό τέθηκε σε διάτμηση με ορθή τάση $\sigma = 25 \text{ kPa}$ δίνοντας τελικά διατμητική τάση $\tau=31\text{kPa}$.



Εικόνα 68: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma = 25 \text{ kPa}$



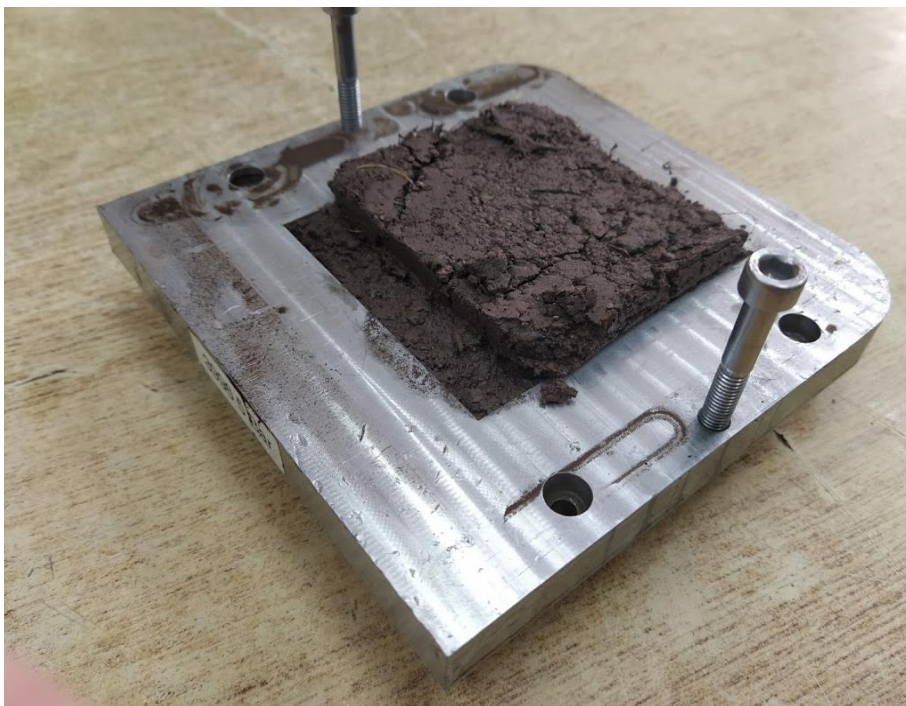
Εικόνα 69: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma = 25 \text{ kPa}$

2^η Δοκιμή

Στην αρχή τοποθετήθηκαν 131,6gr υλικού μέσα στη συσκευή με αρχικό ύψος $h=3,15$. Το υλικό αυτό τέθηκε σε στερεοποίηση για ένα 24ωρο δίνοντας ένα $\Delta h = 2,3784\text{mm}$. Έπειτα από το 24ωρο της στερεοποίησης το υλικό τέθηκε σε διάτμηση με $\sigma = 50 \text{ kPa}$ δίνοντας τελικά μια διατμητική τάση $\tau=59\text{kPa}$. Τέλος μετρήθηκε η υγρασία από το υλικό μετά τη διάτμηση και βρέθηκε ότι η υγρασία είναι ίση με 123,91.



Εικόνα 70: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma= 50\text{kPa}$

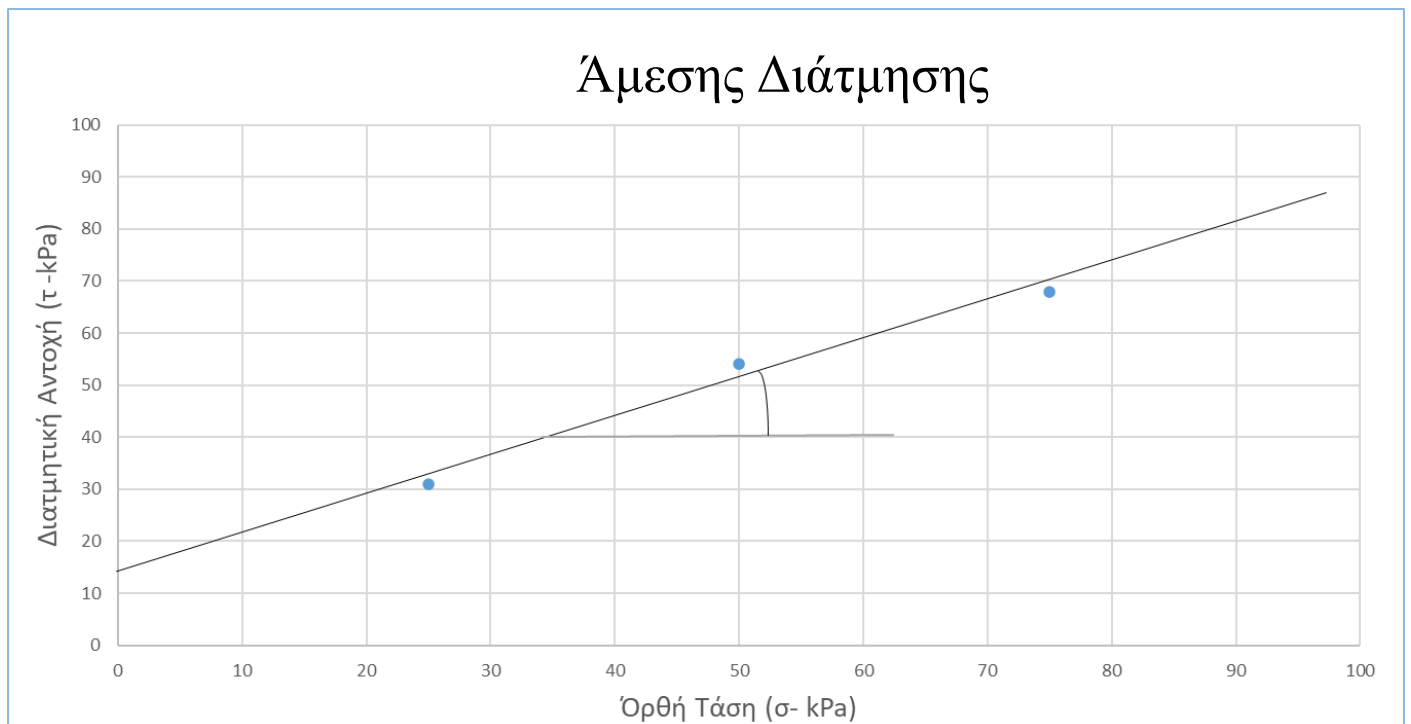


Εικόνα 71: Υλικό μετά τη δοκιμή άμεσης διάτμησης με $\sigma= 50\text{kPa}$

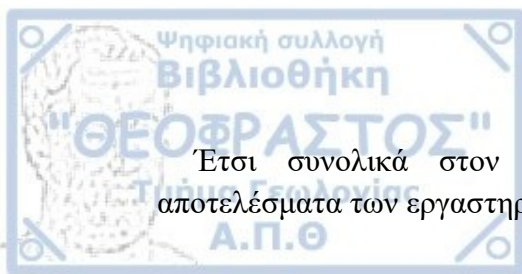
3^η Δοκιμή

Στην αρχή τοποθετήθηκαν 178,48 gr υλικού μέσα στη συσκευή με αρχικό ύψος $h=3,05$. Το υλικό αυτό τέθηκε σε στερεοποίηση για ένα 24ωρο δίνοντας ένα $\Delta h = 4,3228$ mm. Έπειτα από το 24ωρο της στερεοποίησης το υλικό τέθηκε σε διάτμηση με $\sigma = 75$ kPa δίνοντας τελικά μια διατμητική τάση $\tau=66$ kPa. Τέλος μετρήθηκε η υγρασία από το υλικό μετά τη διάτμηση και βρέθηκε ότι η υγρασία είναι ίση με 30,23.

Έτσι τα αποτελέσματα περάστηκαν στο παρακάτω διάγραμμα με άξονα χ την διατμητική τάση (τ) και άξονα y ορθή τάση. Τα τρία ζευγάρια τιμών (σ_1, τ_{1max}), (σ_2, τ_{2max}), (σ_3, τ_{3max}) από τις 3 δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, αποτελούν συντεταγμένες σημείων της περιβάλλουσας θραύσης στο διάγραμμα Mohr. Επομένως σχεδιάστηκε η περιβάλλουσα θραύσης για τον γραφικό υπολογισμό της συνοχής (c -kPa) και της γωνίας τριβής (ϕ - $^\circ$). Έτσι υπολογίστηκε η γωνία τριβής $\phi=17^\circ$ και η συνοχή $c=14$ kPa.



Εικόνα 72: Διάγραμμα διατμητικής -ορθής τάσης για την εύρεση συνοχής και γωνίας τριβής



Έτσι συνολικά στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα διακρίνονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων.

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός Πίνακας των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα 3 δείγματα. Όπου ΔΠΕΔ σημαίνει Δεν Πραγματοποιήθηκε Εργαστηριακή Δοκιμή

Εργαστηριακές Δοκιμές		Θέση Απόθεσης 1	Θέση Απόθεσης 2	Σημείο Μεταφοράς 2
Φυσική υγρασία (%)		14,37	8,46	16,49
Ειδικό βάρος		ΔΠΕΔ	2,388	ΔΠΕΔ
Κόσκια	Κοκκομετρία	Λεπτή έως μέση άμμος	Λεπτή έως μέση άμμος	Μέση έως λεπτή Άμμος
	Συντελεστής ομοιομορφίας	U>15. Πολύ ανομοιόμορφο	U>15. Πολύ ανομοιόμορφο	U>15. Πολύ ανομοιόμορφο
	Βαθμός διαβάθμισης	Καλά διαβαθμισμένο	Καλά διαβαθμισμένο	Καλά διαβαθμισμένο
Όρια Attenberg	LL	μέσης πλαστικότητας ιλύς έως μέσης πλαστικότητας άργιλος	35,20	40,30
	PL		23,50	26,87
	PI		11,70	13,43
Άμεσης Διάτμισης	Συνοχή c (kPa)	ΔΠΕΔ	14	ΔΠΕΔ
	Γωνία τριβής φ (°)	ΔΠΕΔ	17	ΔΠΕΔ

Για την ορθή κατανόηση του μηχανισμού της λασπορροής κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του AutoCAD το παρακάτω μοντέλο (conceptual model), το οποίο απεικονίζει τη περιοχή έρευνας μετά την ενεργοποίηση της λασπορροής. Στο μοντέλο αυτό απεικονίζονται οι ιδιότητες των υλικών όπως αυτές προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Πρόγραμμα FLOW -R (UNIVERSITY OF LAUSANNE) (UNIVERSITY OF LAUSANNE)

Το μοντέλο Flow-R δημιουργήθηκε για την επεξεργασία GIS με βάση την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας των ροών. Το Flow-R διατίθεται δωρεάν για Windows και Linux στο www.flow-r.org. Βασίζεται στη Matlab, αλλά αποτελεί αυτόνομη εφαρμογή χάρη στο Matlab Compiler Runtime. Το Flow-R έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες χώρες για παραγωγή τοπικών χαρτών επιδεκτικότητας με ικανοποιητική ακρίβεια.

Το μοντέλο Flow-R βασίζεται σε μια εμπειρική προσέγγιση για την χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας και έτσι δεν μπορεί να ενσωματώσει τοπικούς παράγοντες ελέγχου και πραγματικές φυσικές συμπεριφορές. Ωστόσο, πολυάριθμες επιτυχημένες μελέτες περιπτώσεων απέδειξαν την καταλληλότητά του για τη δημιουργία χαρτών επιδεκτικότητας ροών. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η χαμηλή απαίτηση δεδομένων. Ένα μόνο DEM μπορεί να είναι επαρκές για την αξιολόγηση της ροής για τις περιοχές πηγών - αν δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων - και για την επεξεργασία της διάδοσης της ροής. Ένα άλλο σημαντικό σημείο είναι η φιλικότητα ως προς τον χρήστη όσον αφορά τις εισόδους και τους αλγόριθμους, γεγονός που το καθιστά εύελκτο για πολύ διαφορετικές μελέτες περιπτώσεων.

Το Flow-R είναι ένα χωρικά κατανομημένο εμπειρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε υπό την Matlab®. Η εφαρμογή του μοντέλου απαιτεί δύο διακριτικά βήματα βασισμένα σε DEM:

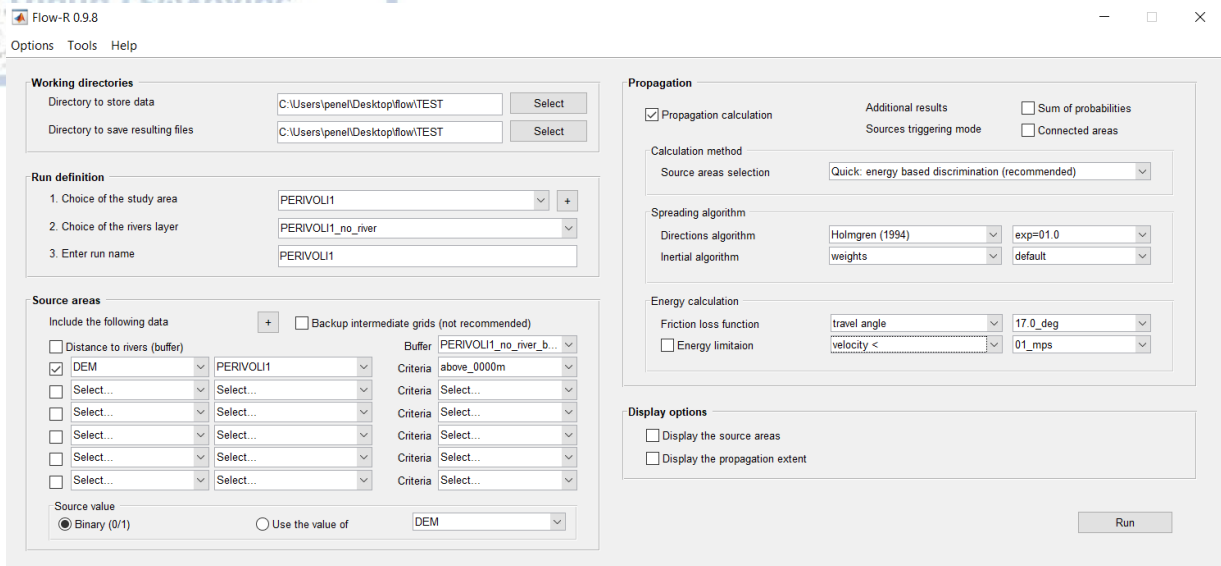
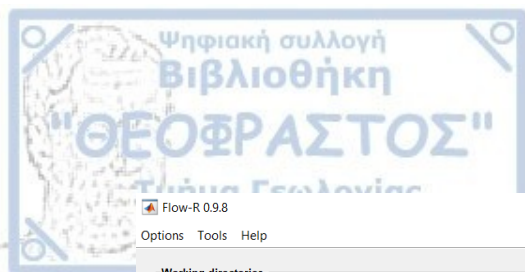
1. οι περιοχές προέλευσης προσδιορίζονται μέσω κριτηρίων, πρώτα μορφολογικών και στη συνέχεια καθορισμένων από τον χρήστη
2. οι ροές, διαδίδονται από αυτές τις πηγές με βάση τους νόμους τριβής και κάποιων αλγόριθμων κατεύθυνσης ροής.

Ο όγκος των υλικών απόθεσης της ροής και η μάζα δεν λαμβάνονται υπόψη, καθώς οι ακριβείς τιμές δεν μπορούν εύκολα να αξιολογηθούν σε μια μεγάλη περιοχή καθώς παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές της μάζας λόγω διαρκούς διάβρωσης και εναπόθεσης (Iverson and Denlinger, 2001).

Οι περιοχές διάδοσης που προκύπτουν από το μοντέλο είναι γενικά μεγαλύτερες από τα παρατηρούμενα γεγονότα στο πεδίο, κάτι που είναι σκόπιμο στο πλαίσιο της ανάλυσης. Πράγματι, ο χάρτης πρέπει να περιέχει κάθε πιθανό γεγονός, ακόμη και τη χειρότερη υπόθεση. Οι χάρτες επιδεκτικότητας προσφέρουν μια καλή επισκόπηση όπου πρέπει να διεξαχθεί έρευνα πεδίου για να διαπιστωθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα. Μεταξύ των δεδομένων που εισάγονται, το DEM είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας καθώς επιτρέπει τον προσδιορισμό των περιοχών πηγών με

την εξαγωγή μορφολογικών κριτηρίων. Τόσο η αναγνώριση των περιοχών πηγών όσο και η διάδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του DEM. Η ανάλυση και η ακρίβειά του είναι βασικά στοιχεία που προϋποθέτουν τη ποιότητα των ροών. Τεχνητά αντικείμενα, όπως ομαλοποιημένα ρέματα, σημαντικά σφάλματα ή κρυφή ροή, π.χ. κάτω από μια γέφυρα ή σε βάθος σε φαράγγια ή μια πυκνή δασοκατοικημένη περιοχή (όπως στη περίπτωση που εξετάζεται σε αυτή τη διπλωματική), μπορεί να είναι παραπλανητικά. Ωστόσο, υπάρχουν μικρές παρατυπίες που δεν επηρεάζουν τις εξόδους εάν οι αλγόριθμοι και οι παράμετροι επιλεγθούν αναλόγως. Αν εκτελείται ανάλυση με DEM μικρής ανάλυσης, ο χρήστης πρέπει να έχει κατά νου ότι τα αποτελέσματα είναι πιθανό να αντιπροσωπεύουν μεγάλους χειμάρρους, παρά ροές. Η ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διάδοση μπορεί να βοηθήσει τους χρήστες του Flow-R να επιλέξουν τα δεδομένα και τους αλγορίθμους τους σύμφωνα με τις ανάγκες τους. Αυτές οι επιλογές εξαρτώνται κυρίως από τους στόχους της μελέτης. Η υπερβολική ακρίβεια είναι χρονοβόρα, όπως ο χρόνος επεξεργασίας αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση ανάλυσης του DEM. Αν κάποιος στοχεύει στη δημιουργία ενός χάρτη επιδεκτικότητας σε μεγάλη περιοχή αρκεί ανάλυση 10 m. Οι Fischer et al. (2012) παρατήρησε επίσης ότι ένα DEM με ανάλυση 10 m παρουσιάζει αποδεκτά αποτελέσματα μεταξύ των εκτιμώμενων περιοχών πηγής και των γνωστών διαδρομών ροής. Ακόμη δημιουργία χαρτών με 25 m ανάλυση παράγει αποτελέσματα χαμηλότερης ποιότητας, αλλά ακόμα αποδεκτά, ενώ στα 50 m η ανάλυση είναι πολύ χονδροειδής και η έκταση που προκύπτει θα πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή. Αν κάποιος στοχεύει στη μελέτη ορισμένων χειμάρρων, μπορεί να προταθεί καλύτερη ανάλυση, αλλά με τη χρήση της τροποποιημένης έκδοσης των αλγορίθμων του Holmgren αποκλειστικά. Η τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου του Holmgren βελτιώνει την εξάπλωση, καθιστώντας την λιγότερο ευαίσθητη στα μικρά χαρακτηριστικά του DEM και ακόμη λιγότερο εξαρτώμενη από την ανάλυση του DEM. Παρέχει μια πιο ρεαλιστική κάλυψη και επιτρέπει για πιο ακριβή εξάπλωση σε επίπεδες περιοχές. Γενικώς από διάφορες μελέτες συνιστάται να χρησιμοποιείται αντί των κλασικών αλγορίθμων για κάθε είδους ροή για τη μοντελοποίηση, με δη συμβατό με τα μελετημένα φαινόμενα.

Το λογισμικό διαθέτει παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το χρήστη που επιτρέπει τον καθορισμό κριτηρίων για την οριοθέτηση των περιοχών προέλευσης και τη δυνατότητα να επιλέξει τους αλγόριθμους και τις παραμέτρους για την αξιολόγηση της διάδοσης.



Εικόνα 73: Περιβάλλον Flow-R

Το Flow-R είναι ένα εργαλείο για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας, αλλά δεν είναι κατάλληλο για μεμονωμένη μοντελοποίηση συμβάντων, επειδή η διάδοση παρέχει μια σειρά πιθανών γεγονότων. Είναι ωστόσο, σκόπιμο να συγκριθεί η εκτιμώμενη ευαίσθητη ζώνη με συγκεκριμένα γεγονότα προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια του αποτελέσματος και η προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου. Η παραμετροποίηση είναι εμπειρική και ο χρήστης πρέπει να καθορίσει τις παραμέτρους ανάλογα με τον τύπο της επικινδυνότητας. Διαφορετικά είδη ροών μέσα στο ίδιο περιβάλλον, όπως οι ροές κορημάτων και οι ροές λάσπης, πρέπει να διαμορφώνονται ξεχωριστά και να μπορούν αργότερα να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας το λογισμικό GIS.

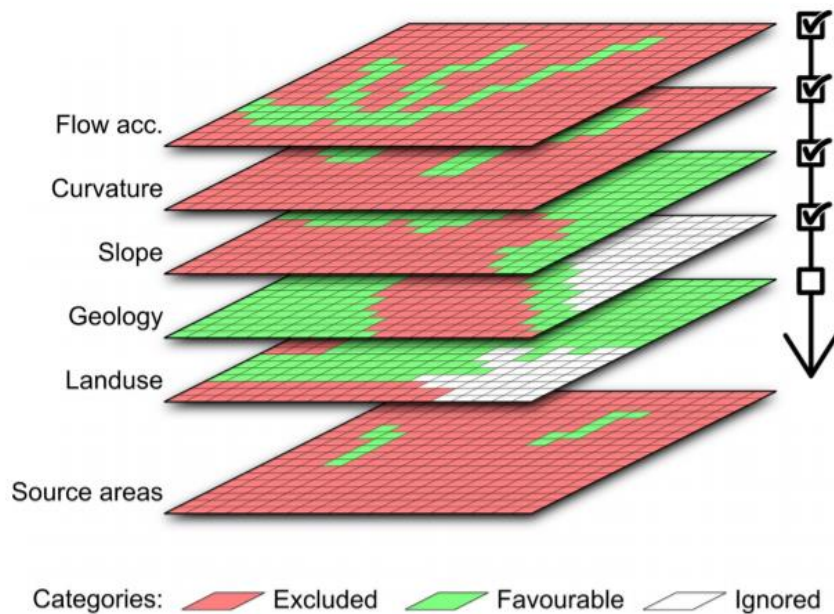
7.1 Περιοχές Προέλευσης

Η οριοθέτηση της περιοχής πηγής χρησιμοποιεί μια προσέγγιση βάσει ευρετηρίου. Τα σύνολα δεδομένων εισόδου μπορούν να αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς τύπους χωρικών πληροφοριών και καθορίζονται από τον χρήστη. Κατά συνέπεια, τα κελιά πλέγματος κάθε συνόλου δεδομένων εισόδου ταξινομούνται ως

1. ευνοϊκό, όταν είναι δυνατή η έναρξη,
2. απόκλιση όταν η έναρξη είναι απίθανη ή
3. αγνοήσιμο όταν δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη αυτή η παράμετρος

Τα σύνολα δεδομένων συνδυάζονται σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα: ένα κελί είναι μια περιοχή προέλευσης η οποία αν τουλάχιστον μία φορά επιλέχθηκε ως ευνοϊκή, ποτέ δεν θα αποκλειστεί στη συνέχεια της ανάλυσης. Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να εισάγει απευθείας περιοχές πηγής οι οποίες έχουν δημιουργηθεί από άλλη προσέγγιση (βασισμένη στο GIS). Η τιμή επιδεκτικότητας των κελιών προέλευσης

είναι 1 από προεπιλογή. Ωστόσο, ο χρήστης μπορεί να εκχωρήσει ένα χωρικό πλέγμα επιδεκτικότητας ή τιμές συχνότητας για τον χαρακτηρισμό των κελιών προέλευσης.



Εικόνα 74: Απεικόνιση του συνδυασμού διαφόρων συνόλων δεδομένων για το αξιολόγηση των περιοχών προέλευσης. (Horton et. Al, 2013)

Σύμφωνα με τους Rickenmann και Zimmermann (1993) και Takahashi (1981), τρία κριτήρια είναι σχετικά με την έναρξη ροής: κλίση εδάφους, νερό και διαθεσιμότητα ιζήματος. Οι περισσότερες ροές συμβαίνουν από το έδαφος με κλίση υψηλότερο από 15° (Rickenmann and Zimmermann, 1993, Takahashi, 1981). Συνήθως θεωρούμε αυτή την τιμή ως χαμηλότερη για το κελί έναρξης.

7.2 Διάδοση

Η διάδοση παρέχει μια πλήρη εκτίμηση των πιθανών γεγονότων σε μία διαδρομή ξεκινώντας από την προηγούμενη αξιολόγηση. Δύο τύποι αλγορίθμων εμπλέκονται στην αξιολόγηση διάδοσης:

1. Διάδοση αλγορίθμων που ελέγχουν τη διαδρομή και την εξάπλωση των ροών συντριμμίων
2. Νόμοι τριβής που καθορίζουν την απόσταση διαρροής.

7.3 Αλγόριθμοι για την αξιολόγηση της διάδοσης

Η εξάπλωση ελέγχεται από αλγόριθμους κατεύθυνσης ροής και λειτουργίες εμμονής. Αρκετοί αλγόριθμοι κατεύθυνσης ροής εφαρμόζονται στο λογισμικό:

1. Ο αλγόριθμος Holmgren (1994) προσθέτει μια παράμετρο στον αλγόριθμο κατεύθυνσης πολλαπλής ροής ως εκθέτης x που επιτρέπει τον έλεγχο της απόκλισης:

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^x} \quad \forall \begin{cases} \tan \beta > 0 \\ x \in [1; +\infty [\end{cases}$$

όπου i, j είναι οι κατευθύνσεις ροής, p_i^{fd} η αναλογία επιδεκτικότητας στην κατεύθυνση i , $\tan \beta_i$ η κλίση μεταξύ του κεντρικού κελιού και του κελιού προς την κατεύθυνση i , και x ο μεταβλητός εκθέτης.

Για $x = 1$ η εξάπλωση είναι παρόμοια προς την πολλαπλή κατεύθυνση ροής. Όταν το x αυξάνεται, η απόκλιση μειώνεται μέχρι να προκύψει στην ενιαία ροή κατεύθυνση

όταν $x \rightarrow \infty$. Αυτή η παράμετρος μας δίνει τον έλεγχο της εξάπλωσης και έτσι μας επιτρέπει να αναπαράγουμε ένα ευρύ φάσμα άλλων συσσωρεύσεων ροής. Με βάση μετρήσεις πεδίου και εργαστηρίου, οι Claessens et al. (2005) προτείνουν μια τιμή του εκθέτη ίση με 4 για τις λασποροές.

2. Έπειτα αναπτύχθηκε μια τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου του Holmgren αλλάζοντας το ύψος του κεντρικού κελιού κατά τον a παράγοντα, ο οποίος θα αλλάξει τις τιμές κλίσεων. Αυτό επιτρέπει την εξομάλυνση της τραχύτητας DEM και την παραγωγή πιο σταθερής εξάπλωσης, ιδίως στην περίπτωση των δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Πράγματι, ένα κελί που είναι 20 εκατοστά ψηλότερο από το κεντρικό pixel, θα φτάσει σίγουρα την πραγματική ροή κορημάτων, ενώ αυτό δεν μπορεί να αναπαραχθεί με οποιοσδήποτε αλγόριθμο κατεύθυνσης ροής καθώς κανένας δεν ενσωματώνει σαν έννοια του ύψους της ροής.
3. Το D8 (O'Callaghan and Mark, 1984 · Jensen και Domingue, 1988) ο αλγόριθμος παρέχει συγκλίνουσα αλλά μη ρεαλιστικά ευθεία ροής και πολύ περιορισμένη εξάπλωση. Μπορεί, ωστόσο, να είναι χρήσιμο για μια ταχεία εκτίμηση των παραμέτρων που σχετίζονται με την απόσταση διαρροής.
4. Ο αλγόριθμος D_{∞} (Tarboton, 1997) επιτρέπει μικρή εξάπλωση, αλλά εξακολουθεί να είναι ανεπαρκής σε ορισμένες συνθήκες όπως στις προσχωσιγενείς αποθέσεις.
5. Ο αλγόριθμος Rho8 (Fairfield και Leymarie, 1991) εισάγει μια στοχαστική προσέγγιση για τη βελτίωση των διαδρομών, αλλά είναι εξαιρετικά συγκλίνουσα και προκαλεί έλλειψη ντετερμινιστικών αποτελεσμάτων (Erskine et al., 2006).
6. Η προσέγγιση της κατεύθυνσης πολλαπλής ροής (Quinn et al., 1991) συχνά οδηγεί σε πολύ μεγάλη εξάπλωση (Huggel et al., 2003).
7. Ο αλγόριθμος Freeman (1991) είναι παρόμοιος με το πολλαπλάσιο της κατεύθυνσης της ροής, με ελαφρώς χαμηλότερη εξάπλωση.

Για την εκτίμηση επιδεκτικότητας των ροών, ο αλγόριθμος Holmgren's ή η τροποποιημένη έκδοσή του πρέπει οποιοδήποτε να επιλέγεται καθώς επιτρέπουν την αναπαραγωγή των περισσότερων άλλων αλγορίθμων κατεύθυνσης ροής.

Το απλοποιημένο μοντέλο με περιορισμένη τριβή (SFLM στο εξής) βασίζεται στη μέγιστη δυνατή απόσταση εκτέλεσης, η οποία χαρακτηρίζεται από μια ελάχιστη γωνία διαδρομής, που ονομάζεται επίσης γωνία προσέγγισης (Corominas, 1996) ή γωνία fahrboschung (Heim, 1932). Είναι η γωνία της γραμμής που συνδέει την περιοχή πηγής με το πιο μακρινό σημείο που φτάνει η ροή, κατά μήκος των μονοπατιών που ακολουθεί:

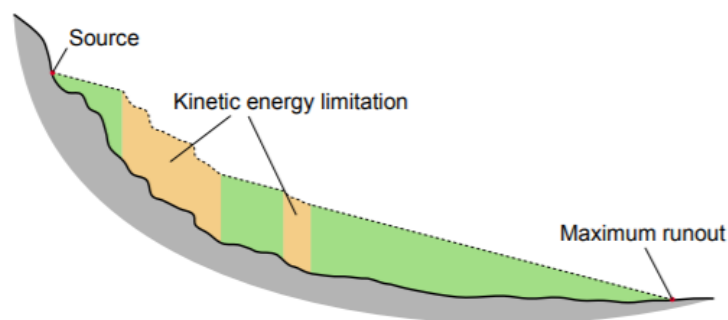
$$E_i^f = g \Delta x \tan \varphi,$$

Όπου E_i^f η ενέργεια που χάνεται λόγω της τριβής από το κεντρικό κελί προς το κελί προς την κατεύθυνση i , Δx η αύξηση της οριζόντιας μετατόπισης, το $\tan \varphi$ της κλίσης της ενεργειακής γραμμής και g επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η ελάχιστη γωνία μεταξύ ενός συνόλου παρατηρήσεων στις Ελβετικές Άλπεις είναι περίπου 11° για χονδρούς και μεσαίους κόκκους κορημάτων (Horton et al., 2013) και 7° για λεπτόκοκκες ροές (Zimmermann et al., 1997). Η τιμή των 11° αναφέρεται σε διάφορες άλλες μελέτες (Rickenmann and Zimmermann, 1993). Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε απίθανες αποστάσεις ροών σε απότομες λεκάνες απορροής λόγω μη ρεαλιστικών ποσοτήτων ενέργειας. Για να διατηρηθεί η ενέργεια μέσα λογικές τιμές, μπορεί να εισαχθεί ένα μέγιστο όριο για να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπερβαίνει τις ρεαλιστικές ταχύτητες. Συνδυάζοντας το με 2 εξισώσεις, μπορούμε να εκφράσουμε την ταχύτητα ως στην εξίσωση :

$$V_i = \min \left\{ \sqrt{V_0^2 + 2g \Delta h - 2g \Delta x \tan \varphi}, V_{\max} \right\}.$$

όπου Δh είναι η διαφορά υψομέτρου μεταξύ του κεντρικού κελιού και του κελιού προς την κατεύθυνση i , V_{\max} είναι το δεδομένο όριο ταχύτητας. Με την παρατηρούμενη μέγιστη ταχύτητα των ροών κορημάτων στην Ελβετία από 13 έως 14 m s^{-1} (Rickenmann και Zimmermann, 1993), συχνά επιλέγουμε όριο 15 m s^{-1} .



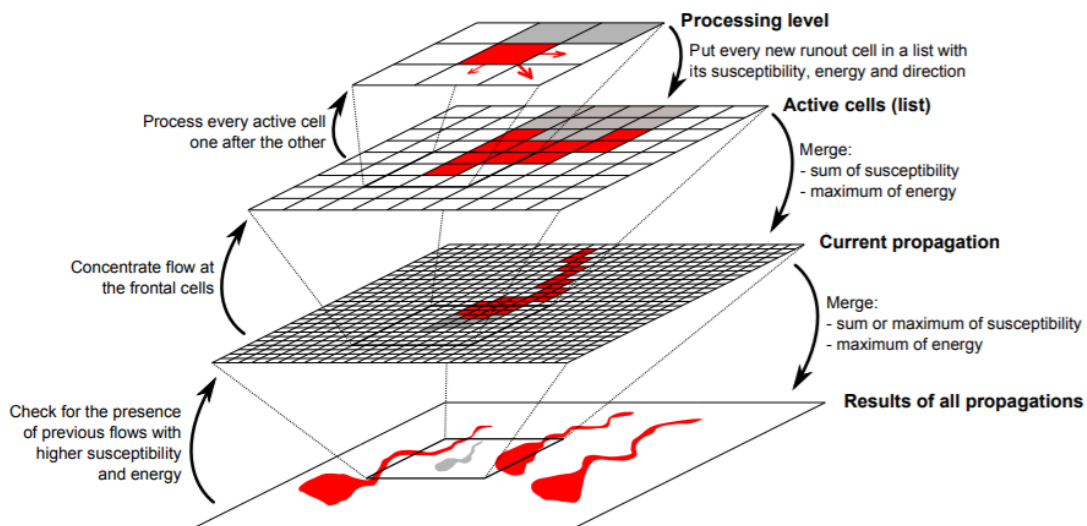
Εικόνα 75 :Απεικόνιση της γωνίας πορείας και ο περιορισμός ταχύτητας του το απλοποιημένο μοντέλο περιορισμένης τριβής (SFLM)

7.4 Εκτέλεση του προγράμματος

Τρεις είναι οι διαφορετικοί τύποι που επιτρέπει το πρόγραμμα να τρέξει τα δεδομένα και απαιτούν πολύ διαφορετικούς χρόνους επεξεργασίας:

1. Επισκόπηση της περιοχής διάδοσης που υποβάλλεται σε επεξεργασία, ενεργοποιώντας μόνο τις πηγές που βρίσκονται στην κορυφή κάθε λεκάνης απορροής.
2. Μια γρήγορη εκτίμηση που ενεργοποιεί πρώτα όλα τα ανώτερα κελιά πηγής (όπως στον τύπο επισκόπησης), αλλά τα οποία επίσης διαδίδει στις υπόλοιπες πηγές σε επόμενο στάδιο. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια δοκιμή κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας για τον εντοπισμό των προηγούμενων εκτιμημένων πολλαπλασιασμών που οδήγησαν σε υψηλότερες τιμές ενέργειας και επιδεκτικότητας. Εάν μια τέτοια πρώην διάδοση βρεθεί στο ίδιο μέρος, η τρέχων επεξεργασία σταματά.
3. Η πλήρης επιλογή ενεργοποιεί κάθε περιοχή προέλευσης, με μη έλεγχο των πολλαπλασιασμών που έχουν υποστεί προηγούμενη επεξεργασία. Αυτή μπορεί να επιλεγεί για να επαληθευτεί ότι διαδικασία της γρήγορης αξιολόγησης δεν έχασε καμία περιοχή διάδοσης, η οποία μπορεί να συμβεί οριακά σε μερικά κελιά λόγω διαφορών στην κατεύθυνση διάδοσης. Μια άλλη και πιο σημαντική εφαρμογή είναι όταν ο χρήστης ενδιαφέρεται για το άθροισμα των διαδόσεων, π.χ. όταν εκχωρούνται τιμές συχνότητας στις περιοχές προέλευσης.

Ο ενεργειακός χάρτης ο οποίος δημιουργείται, λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη τιμή των επικαλυπτόμενων πολλαπλασιασμών, είναι ένα υποπροϊόν του μοντέλου.

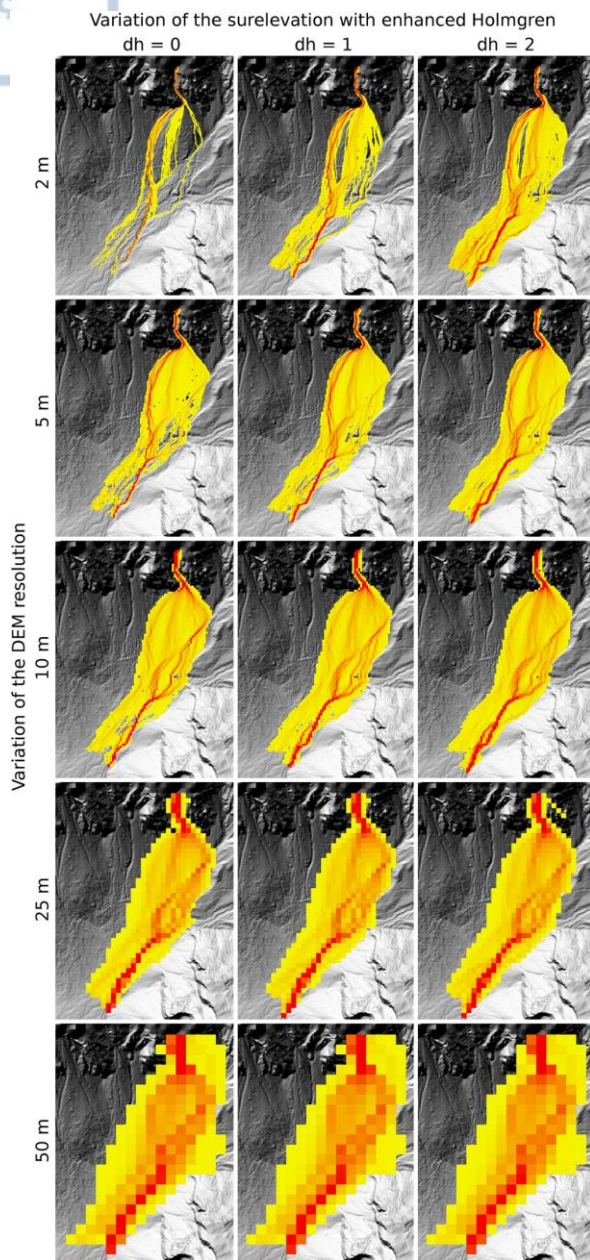


Εικόνα 76: Απεικόνιση των 4 διαφορετικών επιπέδων επεξεργασίας του πολλαπλασιασμού και της σχετικής ροής δεδομένων τους.

Μια μελέτη περίπτωσης που αναλύθηκε από τους Horton et al., 2013, ερευνάει τη ροή κορημάτων που πραγματοποιήθηκε στο Solalex, ένα μικρό χωριό που βρίσκεται νότια του Diablerets Range, στα 1470 m. Η εκδήλωση ροών είναι πολύ

σνηθισμένη στη νότια πλευρά της οροσειράς Diablerets, κλείνοντας τακτικά έναν ιδιωτικό δρόμο. Αυτές οι εξαπλώσεις είναι πολύ ενεργές στη περιοχή καθώς το πάνω μέρος αποτελείται από πτυχωμένο και αρκετά διαρρηγμένο και κατακερματισμένο ασβεστόλιθο με επαναλαμβανόμενες στρώσεις μάργας Diablerets (Badoux and Gabus, 1990). Αυτές οι εμφανίσεις δημιουργούν απότομες, μικρές, αδιαπέραστες λεκάνες υψηλής παραγωγικότητας σε θραύσματα βράχου, έχοντας πολύ μικρό χρόνο συγκέντρωσης. Η διάδοση υποβλήθηκε σε επεξεργασία μέσω του τροποποιημένου αλγόριθμου του Holmgren's. Το DEM, είχε αρχική ανάλυση 1 m, και στη συνέχεια υποβαθμίστηκε σε 2 m, 5 m, 10 m, 25 m και 50 m για να απεικονίσει την επίδραση της ανάλυσης δεδομένων και το ρόλο της τροποποίησης στον αλγόριθμο του Holmgren. Όπως μπορεί κανείς να δει στο παρακάτω σχήμα η έκταση διάδοσης είναι ικανοποιητική σε ανάλυση 10 m για τα αποτελέσματα με την τυπική έκδοση του αλγορίθμου του Holmgren ($dh = 0$). Στις αναλύσεις βέβαια λείπουν σημαντικές περιοχές λόγω της χαμηλής ανάλυσης του DEM και της ισχυρής επίδρασης της διάδοσης σε τέτοια κλίμακα. Οι Zhang και Montgomery (1994), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι «για πολλές περιοχές, το μέγεθος του πλέγματος 10 m παρουσιάζει έναν λογικό συμβιβασμό μεταξύ της αύξησης της ανάλυσης και του όγκου δεδομένων για προσομοίωση γεωμορφολογικών και υδρολογικών διεργασιών». Οι Quinn et al., (1995) προτείνουν επίσης ανάλυση 10 m για αλγόριθμους κατεύθυνσης ροής και επισημαίνουν ότι τα χαμηλότερα μεγέθη κελιών δεν φέρνουν σημαντικές πληροφορίες.

Ωστόσο, όπως ειπώθηκε προηγουμένως, ο τυπικός αλγόριθμος του Holmgren καταλήγει σε ορισμένες περιπτώσεις σε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε εκείνες τις περιπτώσεις έρχεται η τροποποιημένη έκδοση να δώσει μεγαλύτερη συνάφεια, επιτρέποντας στην εξαπλώση να καθοδηγείται από τη γενική τοπογραφία και όχι από τις λεπτομέρειες του DEM. Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί από την παρακάτω εικόνα ότι η έκταση είναι σημαντικά πιο συνεπής ενδιάμεσα στα rixes 2 m, 5 m και 10 m με ένα κεντρικό κελί ανυψωμένο κατά 2 m στον τροποποιημένο αλγόριθμο Holmgren. Για τα 25 m και 50 m DEM, τα αποτελέσματα δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα.



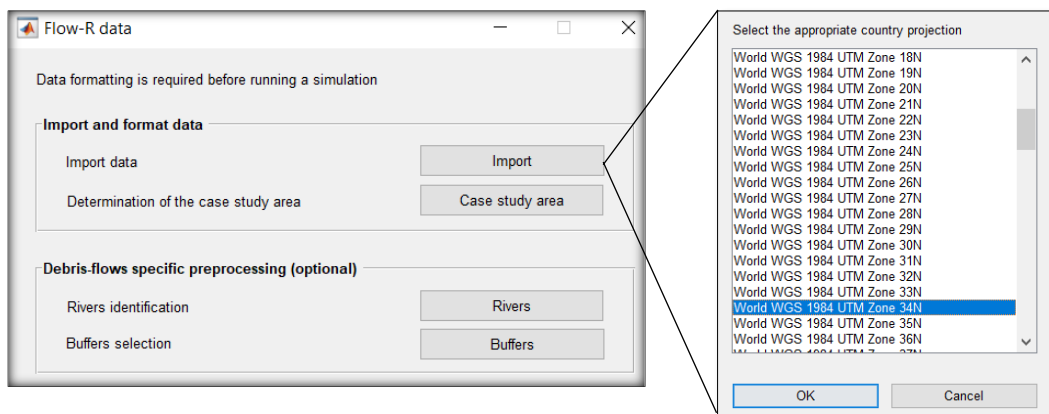
Εικόνα 77: Επίδραση της ανάλυσης DEM και η τροποποίηση του αλγορίθμου εξάπλωσης του Holmgren σε ανεμιστήρα ροής συντριμμιών στο Solalex της Ελβετίας (Geodata © swisstopo - DV084371)

7.5 Περίπτωση λασπορροής το Περιβόλι

Η περιοχή έρευνας όπως αναφέρθηκε σαρώθηκε με σαρωτή LiDAR κατά τη διάρκεια της δεύτερης επίσκεψης στις 26/6/2021. Σκοπός της σάρωσης ήταν αρχικά η αναλυτικότερη απεικόνιση και κατανόηση της δομής και του μηχανισμού της λασπορροής μέσα από την ψηφιακή απεικόνιση της. Σε δεύτερη φάση η σάρωση αποσκοπούσε στην δημιουργία ενός Digital Elevation Model (DEM) μεγάλης κλίμακας, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα στην ανάλυση επιδεκτικότητας με το πρόγραμμα Flow-R. Έπειτα από την επεξεργασία των δεδομένων που λήφθηκαν από το LiDAR η δημιουργία ενός αναλυτικού DEM ήταν ακατόρθωτη, καθώς η περιοχή ήταν πυκνό- δασοκατοικημένη. Επιπλέον ακατόρθωτη ήταν ακόμη και η αφαίρεση των πυκνών κορμών των δέντρων με ειδικά προγράμματα, καθώς δεν διακρίνονταν καθόλου η μορφολογία. Αυτά είχαν σαν αποτέλεσμα τα δεδομένα του LiDAR να μη χρησιμοποιηθούν για αυτόν το σκοπό αλλά να αξιοποιηθεί η χρήση των DEM του Ελληνικού Κτηματολογίου. Πρόκειται για DEM ανάλυσης 5m εκ των οποίων σε ένα μεγάλο ποσοστό της Ελλάδας έχει αφαιρεθεί η δασοκάλυψη (για την περιοχή έρευνας δεν γνωρίζουμε αν έχουν αφαιρεθεί). Με τη χρήση αυτού του DEM επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός χάρτη επιδεκτικότητας, με τη βοήθεια του προγράμματος Flow-R, δηλαδή ενός χάρτη που απεικονίζει διάφορες πηγές προέλευσης (σημεία έναρξης ροής) και την μέγιστη ή ελάχιστη πιθανότητα να εκδηλωθεί λασπορροή στο εκάστοτε σημείο.

7.5.1 Εισαγωγή δεδομένων

Αφού το DEM κόπηκε στο περιβάλλον του GIS απομονώνοντας τη περιοχή έρευνας εισήχθη στο περιβάλλον του Flow-R, δηλώνοντας κατά την εισαγωγή του το προβολικό σύστημα WGS 84 / UTM zone 34N.



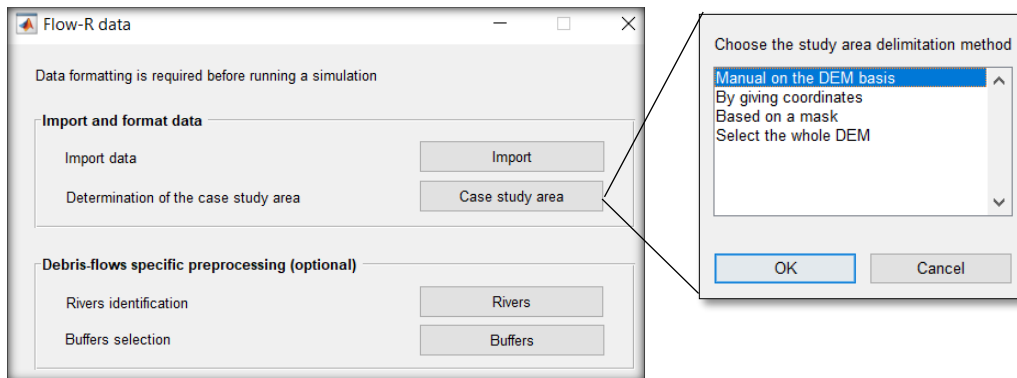
Εικόνα 78: Εισαγωγή DEM σε περιβάλλον GIS

Κατά την εισαγωγή των δεδομένων δίνεται η δυνατότητα για εισαγωγή λιθολογικών χαρτών, χαρτών χρήσεων γης, υδρογεωλογικών και άλλων.

Η χρήση γης βοηθά στον εντοπισμό ορισμένων ανακριβών πηγών, που βρίσκονται σε κατοικημένες περιοχές ή περιοχές που βρίσκονται σε ανθρωπογενείς υποδομές. Οι δασικές επιφάνειες από τον χάρτη χρήσεων γης δεν χρειάζεται να αφαιρούνται από τις πιθανές πηγές. Αυτή η κατάσταση αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των πιθανών πηγών

των ροών, αλλά πρέπει σε συνδυασμό να λαμβάνονται συγκριτικά υπόψιν οι υποκείμενοι κίνδυνοι από ορισμένες περικοπές δέντρων. Στη παρούσα διπλωματική η χρήση τέτοιου χάρτη ήταν αχρείαστη, καθώς η πλαγιά στην οποία πραγματοποιήθηκε η λασπορροή δεν περιλαμβάνει κάποια ανθρωπογενή κατασκευή.

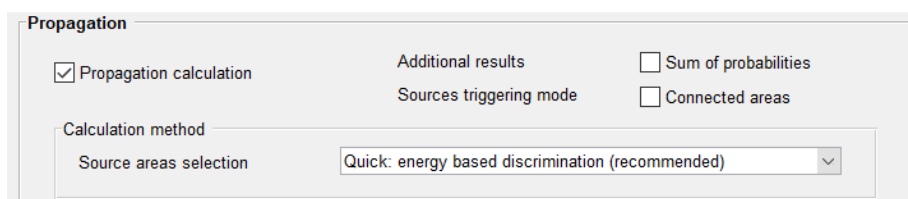
Έπειτα επιλέχθηκε από τον χρήστη πάνω στο DEM η περιοχή ενδιαφέροντος ώστε να τεθεί υπό επεξεργασία.



Εικόνα 79: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αυτόματα ο προσδιορισμός των ποταμών (κάθε είδους: από ρέματα σε μεγάλους ποταμούς). Τα ποτάμια μπορούν να προσδιοριστούν με βάση τη συσσώρευση ροής που υπολογίζεται στο ArcGIS και εισάγονται όπως περιγράφεται παραπάνω. Τέλος έγινε η επιλογή των ζωνών προστασίας. Εκεί λήφθηκαν υπόψη μόνο περιοχές πηγής που βρίσκονται σε συγκεκριμένη απόσταση από τα ποτάμια. Το μέγεθος του buffer (απόσταση από τα pixel αποστράγγισης) πρέπει να καθοριστεί. Το αποτέλεσμα είναι μια μάσκα buffer που περιορίζει την αναγνώριση των περιοχών πηγής.

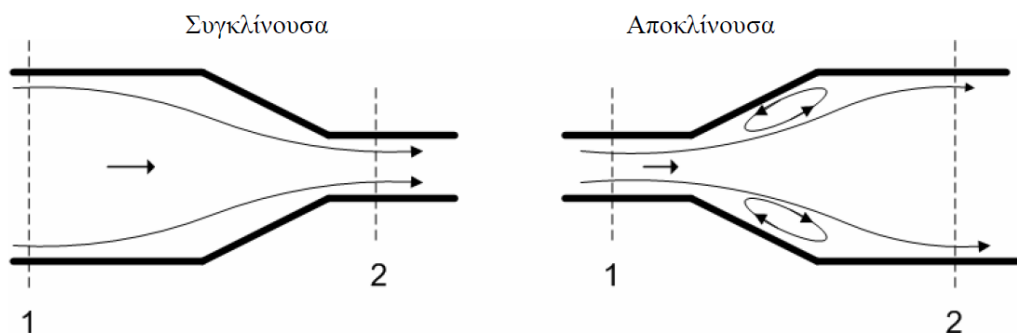
Για την εξαγωγή του χάρτη επιδεκτικότητας χρησιμοποιήθηκε η γρήγορη μέθοδος με διάκριση βάση της ενέργειας, (*Quick: energy based discrimination*). Σε αυτή την μέθοδο ενεργοποιούνται πρώτα οι ανώτερες πηγές και στη συνέχεια εξετάζονται οι άλλες περιοχές προέλευσης. Εάν, κατά τον υπολογισμό της εξάπλωσης, μια άλλη διάδοση έχει λάβει την ίδια τροχιά με παρόμοια ανώτερη ενέργεια, οι υπολογισμοί της τρέχουσας διάδοσης θα σταματήσουν αφού θα είναι περιττός ο υπολογισμός. Αυτή η επιλογή σύμφωνα με την ενέργεια είναι πολύ αποδοτική καθώς μπορεί να εξοικονομήσει πολύ χρόνο και να παράγει αποτελέσματα σχεδόν παρόμοια με την πλήρη προσομοίωση για κάθε πηγή. Η συγκεκριμένη επιλογή συνιστάται ιδιαίτερα από (Horton et al., 2013).



Εικόνα 80: Επιλογή μεθόδου υπολογισμού.

Το τελικό μοντέλο που παράγεται, συνδυάζει πιθανολογικούς και ενεργητικούς αλγόριθμους για την εκτίμηση της διασποράς της ροής. Το μοντέλο που προκύπτει βασίζεται στις καθορισμένες περιοχές πηγής και το DEM. Ξεκινώντας από κάθε επιλεγμένη πηγή, οι πιθανές διαδρομές ροής υπολογίζονται σε 3×3 παράθυρα με αλγόριθμους πολλαπλής ροής. Περιλαμβάνεται μια στάθμιση των κατευθύνσεων λαμβάνοντας υπόψη την εμμονή της ροής, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Holmgren (1994). Οι αλγόριθμοι για την εκτίμηση της απόστασης είναι βασικοί ενεργειακοί υπολογισμοί, οι οποίοι βασίζονται σε ένα κριτήριο μέσης γωνίας κλίσης και ένα κινητικό όριο ενέργειας. Περισσότερες λεπτομερείς περιγραφές των αλγορίθμων βρίσκονται στους Horton et al. (2008).

Οι αλγόριθμοι κατεύθυνσης ροής ελέγχουν την κατεύθυνση της ροής από ένα κελί στους οκτώ γείτονές του. Όσον αφορά τη γωνία της εξάπλωσης, ο Holmgren (1994) εισήγαγε έναν εκθέτη στον αλγόριθμο που ελέγχει τη σύγκλιση της ροής (όσο μεγαλύτερος είναι ο εκθέτης, τόσο πιο συγκλίνουσα είναι η ροή γίνεται). Στην συγκλίνουσα ροή μειώνεται η επιφάνεια της διατομής της ροής, οι γραμμές ροής συγκλίνουν και αυξάνεται η μέση ταχύτητα ροής.



Εικόνα 81: Συγκλίνουσα και αποκλίνουσα ροή

Η τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου του Holmgren βελτιώνει την εξάπλωση, καθιστώντας την λιγότερο ευαίσθητη στα μικρά χαρακτηριστικά του DEM και ακόμη λιγότερο εξαρτώμενη από την ανάλυση του DEM. Παρέχει μια πιο ρεαλιστική κάλυψη και επιτρέπει για πιο ακριβή εξάπλωση σε επίπεδες περιοχές. Γενικώς από διάφορες μελέτες συνιστάται να χρησιμοποιείται αντί των κλασικών αλγορίθμων για κάθε είδους ροή. Για την παρούσα έρευνα επιλέχθηκε ο αλγόριθμος του Holmgren, και ο εκθέτης ορίστηκε σε 4, όπως καθορίστηκε στους Claessens et al. (2005) βάσει πεδίου και εργαστηρίου.

Spreading algorithm			
Directions algorithm	Holmgren (1994) modified	dh=00.5m_exp=04.0	
Inertial algorithm	weights	Gamma_2000	

Εικόνα 82: Επιλογή αλγορίθμου.

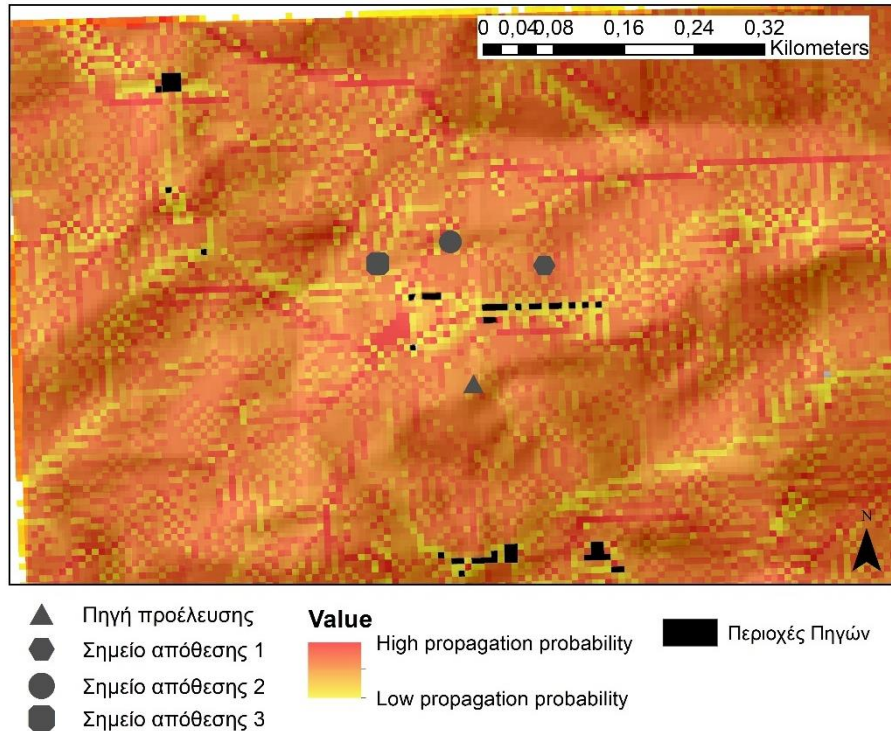
Η γωνία κλίσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας, που καθορίζει την ενεργοποίηση μιας ροής (Takahashi, 1981). Πλέον οι ροές και κυρίως οι ροές κορημάτων εμφανίζονται σε περιοχές με κλίση μεγαλύτερη από 15° (Rickenmann and Zimmermann, 1993· Takahashi, 1981). Όπως και κατά συνέπεια, όλα τα κελιά με γωνία κλίσης μεγαλύτερη από 15° θεωρήθηκαν ως πιθανές πηγές και εκείνες που βρίσκονται κάτω από αυτή τη τιμή εξαιρέθηκαν από την ανάλυση.

Υπολογισμός ενέργειας: Η συνάρτηση απώλειας τριβής καθορίζει την απώλεια ενέργειας ως συνάρτηση διαφορετικών παραμέτρων. Ο ενεργειακός περιορισμός εισάγει ένα ανώτερο ενεργειακό όριο (σε m/s). Το απλοποιημένο μοντέλο περιορισμένης τριβής δίνεται με βάση τη μέγιστη δυνατή απόσταση εκτέλεσης, χαρακτηρίζεται από μια ελάχιστη γωνία διαδρομής, που ονομάζεται επίσης γωνία προσέγγισης (Corominas, 1996). Είναι η γωνία της γραμμής που συνδέει την περιοχή πηγής με το πιο απομακρυσμένο σημείο που φτάνει η ροή των συντριμμίων, κατά μήκος της μονοπάτι. Η ελάχιστη γωνία μεταξύ ενός συνόλου παρατηρήσεων στις Ελβετικές Άλπεις είναι περίπου 11 για χονδρόκοκκες και μεσόκοκκες ροές και 7 για λεπτόκοκκες ροές (Zimmermann et al., 1997).

Energy calculation			
Friction loss function	travel angle	07.0_deg	
<input type="checkbox"/> Energy limitation	velocity <	01_mps	

7.5.2 Αποτελέσματα

Από την εισαγωγή των δεδομένων σύμφωνα με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν, προέκυψε ο χάρτης επιδεκτικότητας (susceptibility map). Ο χάρτης απεικονίζει με μαύρα σημεία τις πηγές προέλευσης (αφετηρίες ροής) που εντοπίζει το πρόγραμμα ότι μπορεί να προκύψουν. Έπειτα περιλαμβάνεται η πληροφορία της πιθανότητας ως αναφορά την ενεργοποίηση μια ροής. Οι περιοχές εξάπλωσης όλων των πηγών συνδυάζονται διατηρώντας τις μέγιστες τιμές πιθανότητας. Οι επιφάνειες με κόκκινο χρώμα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να ενεργοποιηθούν εκδηλώνοντας λασπορροή (είναι πιο επιδεκτικές στο να ενεργοποιηθούν) από τις επιφάνειες με κίτρινο χρώμα (λιγότερο επιδεκτικές).



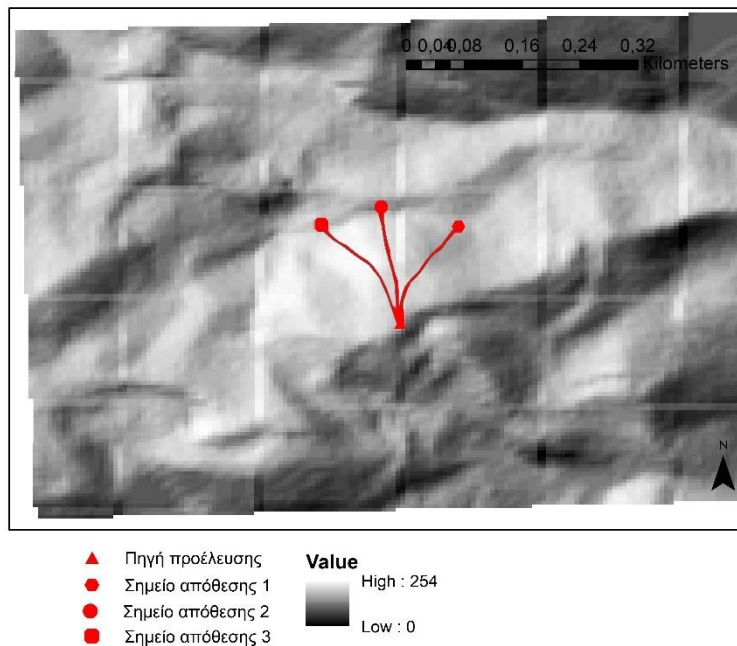
Εικόνα 83: Χάρτης επιδεκτικότητας

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα η ευρύτερη περιοχή της έρευνας είναι κατά θέσεις επιδεκτική ως προς την εκδήλωση ροών, χωρίς όμως να διακρίνονται ενιαίες ροές πάρα μόνο σε ορισμένα σημεία βόρεια και δυτικά του σημείου ενδιαφέροντος. Οι περιοχές πηγών δεν ταυτίζονται με τη πηγή στη περιοχή έρευνας και γενικά το σημείο ενδιαφέροντος παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα της ανάλυσης σε σχέση με την πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει διότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψει αυτό το μοντέλο ήταν το DEM ανάλυσης 5m από το κτηματολόγιο. Τα προβλήματα σε αυτή τη περίπτωση ήταν 2. Το πρώτο και κυριότερο πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η πλειοψηφία των δεδομένων του κτηματολογίου αναφέρεται σε Digital Surface Model (DSM) στο οποίο έχουν τοποθετηθεί ειδικά φίλτρα ώστε να αφαιρεθεί η δασοκάλυψη. Ειδική εξαίρεση αποτελούν ορισμένες περιοχές στις οποίες δεν έχει αφαιρεθεί ακόμη η δασοκάλυψη Digital Terrain Model (DTM). Στη περίπτωση της περιοχής έρευνας ισχύει μάλλον η δεύτερη περίπτωση, γεγονός που δικαιολογεί την παραπάνω εικόνα ασυνέχειας της ροής.

Η περιοχή εξάπλωσης συνδέεται βαθιά με το DEM. Έτσι, σε περίπτωση λανθασμένης αναπαράστασης της πραγματικότητας της περιοχής, θα προκύπτουν ανούσια και χωρίς συνοχή αποτελέσματα. Έτσι το δεύτερο πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα κυρίως σε περιοχές μικρής κλίμακας χρησιμοποιώντας DEM μικρής ανάλυσης (ακόμη και μεγαλύτερης από 5m). Για αναλύσεις συγκεκριμένων περιοχών μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πιο αναλυτικά DEM, με σκοπό την καλύτερη απόδοση των πιο επιδεκτικών περιοχών σε καλύτερη ανάλυση. Σε αυτή την περίπτωση θα

αναγνωρίζονται από το πρόγραμμα περιοχές που στο DEM των 5m δεν λαμβάνονται υπόψιν. Για παράδειγμα ο περιοχή διάδοσης που καταλήγει στο σημείο απόθεσης 2, είχε μέγιστο πλάτος 1m . Σε ένα DEM ανάλυσης 5m αυτό δεν μπορεί να αποτυπωθεί. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που στον παραπάνω χάρτη δεν αποτυπώνεται με ακρίβεια η λασπορροής όπως ακριβώς αποτυπώθηκε από τη χαρτογράφηση.

Η εικόνα που αναμέναμε να πάρουμε σε εκείνο το σημείο είναι περίπου σαν την ακόλουθη.



Εικόνα 84: Αποτύπωση λασπορροής σύμφωνα με την χαρτογράφηση επάνω σε hillshade.

Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αν η δεντροκάλυψη δεν υπήρχε στη περιοχή ή μπορούσε να αφαιρεθεί με ακρίβεια από το DEM που θα λαμβάναμε από τη σάρωση του LiDAR (DEM μεγάλης ανάλυσης) τα αποτελέσματα θα ήταν αναλυτικότερα και πιο κοντά στη πραγματικότητα. Σε αυτό το σημείο πρέπει οπωσδήποτε να αναφερθεί η ύπαρξη των δέντρων στο μοντέλο αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των πιθανών πηγών των ροών, αλλά πρέπει σε συνδυασμό να λαμβάνονται συγκριτικά υπόψιν οι υποκείμενοι κίνδυνοι από ορισμένες περικοπές δέντρων.

Βασικός λοιπόν παράγοντας της αυτών των αποτελεσμάτων είναι ότι το Flow-R είναι ένα εργαλείο για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας, αλλά δεν είναι κατάλληλο για μεμονωμένη μοντελοποίηση συμβάντων, επειδή η διάδοση παρέχει μια σειρά πιθανών γεγονότων. Είναι ωστόσο, σκόπιμο να συγκριθεί η εκτιμώμενη ευαίσθητη ζώνη με συγκεκριμένα γεγονότα προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια του αποτελέσματος και η προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου. Θα είχε λοιπόν περισσότερο νόημα μια ανάλυση η οποία θα αφορούσε την ευρύτερη περιοχή (μικρότερης κλίμακας) και θα αποσκοπούσε στο εντοπισμό μεγαλύτερων επιδεκτικών περιοχών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας ήταν η γεωλογική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των παραμέτρων εκδήλωσης εδαφικής ροής στην περιοχή Περιβόλι Γρεβενών και διερεύνηση του μηχανισμού της. Η εκδήλωση της λασπορροής πραγματοποιήθηκε Παρασκευή 13 Δεκεμβρίου του 2019, ενώ η παρούσα έρευνα ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2020.

Η εργασία διακρίθηκε σε τέσσερα (4) μέρη. Το αρχικό και βασικό μέρος της έρευνας βασίστηκε στην κατανόηση της λασπορροής ως φαινόμενο, ενώ μελετήθηκαν βασικές αρχές κινηματικής ρευστών και διάφορες μελέτες περίπτωσης που αποτυπώνουν το φαινόμενο αυτό. Έτσι αποκτήθηκε ένα ισχυρό γνωστικό θεμέλιο που αφορά τον τρόπο εκδήλωσης, τις παραμέτρους και τους παράγοντες που συμβάλλουν στην ενεργοποίηση του φαινομένου, καθώς και τα μέτρα αντιμετώπισης του φαινομένου. Το δεύτερο μέρος βασίστηκε αποκλειστικά στα αίτια και στο τρόπο εκδήλωσης της λασπορροής στο Περιβόλι Γρεβενών, μέσα από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν εκείνες τις μέρες στη περιοχή, τις μαρτυρίες των κατοίκων και την προσωπική χαρτογράφηση και αποτύπωση της ροής από το σημείο αφετηρίας μέχρι και τα σημεία απόθεσης, μέσα από τις περιοχές διάδοσης (δρόμους μεταφοράς). Βασικό εργαλείο για την αποτύπωση και κατανόηση της λασπορροής αποτέλεσε η σάρωση της περιοχής με σαρωτή LiDAR. Η σάρωση οδήγησε στην δημιουργία ενός λεπτομερούς μοντέλου (προσομοιώματος), όπου αποτυπώνονται τα όρια της λασπορροής, η αφετηρία, οι περιοχές διάδοσης, τα σημεία απόθεσης, οι εργαστηριακές δοκιμές, πληροφορίες για την εκδήλωση του φαινομένου καθώς και στοιχεία της προσωπικής χαρτογράφησης. Το τρίτο μέρος της έρευνας επικεντρώνεται στις εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα που λήφθηκαν από την περιοχή. Οι αναλύσεις αυτές βοήθησαν στην κατάταξη του εδαφικού υλικού τόσο προς την κοκκομετρία του όσο και προς τις ιδιότητες και την αντοχή του. Τέλος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Flow -R (University of Lausanne) για τον εντοπισμό των πιο επιδεκτικών περιοχών και των διάφορων πηγών προέλευσης που θα μπορούσαν να προκαλέσουν μια λασπορροή.

Η περιοχή ανήκει γεωλογικά στην ζώνη της Πίνδου κατά τον Mountraki et al 1983. Συγκεκριμένα η περιοχή του ξενοδοχείου αποτελείται από οφειόλιθους με τη τυπική μορφή του mélange της Αβδέλας. Τα χαρακτηριστικά πετρώματα του mélange είναι οφειόλιθοι, ιζήματα και μεταμορφωμένα πετρώματα. Τα οφειολιθικά πετρώματα είναι αναμειγμένα με πετρώματα τα οποία υπήρχαν στην περιοχή κατά την τοποθέτηση των οφειολίθων πάνω στο ηπειρωτικό τέμαχος. Τα πετρώματα αυτά μπορεί να είναι ιζήματα της εποχής τα οποία συμπαρασύρθηκαν κατά την απόθεση των οφειολίθων είτε να είναι περιδοτίτες, γάββροι, δολερίτες, βασάλτες, σερπεντινίτες. Τα εδαφοποιημένα υλικά της περιοχής έχουν πολύ κακές μηχανικές ιδιότητες, δημιουργώντας έτσι σχετικά γεωτεχνικά προβλήματα, κυρίως όσον αφορά τη σταθερότητα τόσο των φυσικών όσο και των πιθανώς τεχνητών πλαγιών της περιοχής (πιθανές ανθρώπινες αποθέσεις- από τη διάνοιξη δασικού δρόμου).

Σύμφωνα με τις αναφορές του κάτοχου του ξενοδοχείου στις 13/12/2019 εκδηλώθηκε λασπορροή, η οποία όπως αναφέρθηκε είχε σημείο αφετηρίας την αυλή του ξενοδοχείου, όπου και προκάλεσε σοβαρές ζημιές. Το έδαφος υποχώρησε παρασύροντας μαζί του αρκετά δέντρα. Το σημείο αφετηρίας της λασπορροής βρίσκεται στην πίσω αυλή του

ξενοδοχείου και εξελίσσεται με τρία σημεία μεταφοράς βόρεια του ξενοδοχείου. Τα τρία σημεία μεταφοράς της λασπορροής διακλαδίζονται μέχρις ότου να αποτεθούν βόρεια στον επαρχιακό δρόμο σε 3 σημεία απόθεσης. Η αρχή του φαινομένου φαίνεται να πραγματοποιείται με μια μορφή μικρής κατολίσθησης στην αρχή του πρανούς. Η αποδιοργάνωση και χαλάρωση του υλικού δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την δίοδο του νερού στο εσωτερικό του εδάφους. Πιθανολογείται πως το έδαφος τροφοδοτούνταν συνεχόμενα με νερό από πιθανές βλάβες σωληνώσεων. Έπειτα από συνεχόμενη βροχόπτωση στις 10, 11 και 12 Δεκεμβρίου και την ισχυρή βροχόπτωση στις 13 Δεκέμβρη η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους ξεπέρασε το όριο υδαρότητας (LL), προκαλώντας την εκδήλωση της λασπορροής. Η λασπορροή διακλαδίζεται σε 3 σημεία / " δρόμους " μεταφοράς (η δεύτερη περιοχή διάδοσης έχει τη μεγαλύτερη τροφοδοσία υλικού) οι οποίοι είναι πολύ στενοί και μεταφέρουν το υλικό με μεγάλες ταχύτητες προς τα Βόρεια, μέχρις ότου να αποτεθούν. Τέλος τα υλικά αποτέθηκαν και έκλεισαν το δρόμο βόρεια του ξενοδοχείου, σε 3 σημεία απόθεσης. Το Σεπτέμβρη του 2020 όπου πραγματοποιήθηκε η επίσκεψη στη περιοχή έρευνας μετρήθηκαν το μήκος και το πλάτος του με μέτρο καθώς και η κλίση με κλισίμετρο του αποθεθέντος υλικού. Τα νούμερα αυτά έχουν απόκλιση από το πραγματικό μήκος, πλάτος και κλίση του υλικού τις επόμενες μέρες από το συμβάν ο Δήμος καθάρισε το δρόμο από τα υλικά απόθεσης.

Από τη περιοχή μελέτης συλλέχθηκαν δείγματα από 3 σημεία τα οποία τέθηκαν μετέπειτα σε εργαστηριακές δοκιμές στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του ΑΠΘ. Τα δείγματα συλλέχθηκαν και στις 3 περιπτώσεις σε βάθος 0-1m σκάβοντας και αφαιρώντας το επιφανειακό στρώμα. Τα δείγματα συλλέχθηκαν από το 2ο σημείο μεταφοράς, από το 1ο σημείο απόθεσης και από το 2ο σημείο απόθεσης. Σκοπός συλλογής των 3ων δειγμάτων ήταν η σύγκριση των ιδιοτήτων τους στο σημείο μεταφοράς και στα σημεία απόθεσης. Οι θέσεις επιλογής των δειγμάτων συμβάδιζαν με την πιο εύκολη πρόσβαση στα σημεία αλλά και με την περίσσια υλικού, καθώς όπως αναφέρθηκε, το σημείο 2 (μεταφοράς και απόθεσης) ήταν αυτό με την μεγαλύτερη ποσότητα υλικού. Για τα 3 σημεία δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες εργαστηριακές δοκιμές: Φυσική και Περιεχόμενη υγρασία, Κοκκομετρική Ανάλυση με Κόσκινα, Όρια Atterberg. Για το σημείο απόθεσης 2 πραγματοποιήθηκαν επιπλέον: Ειδικό βάρος και Άμεσης Διάτμησης. Τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές αποτυπώνονται στο παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

Εργαστηριακές Δοκιμές		Θέση Απόθεσης 1	Θέση Απόθεσης 2	Σημείο Μεταφοράς 2
Φυσική υγρασία (%)		14,37	8,46	16,49
Ειδικό βάρος		ΔΠΕΔ	2,388	ΔΠΕΔ
Κόσκινα	Κοκκομετρία	Λεπτή έως μέση άμμος	Λεπτή έως μέση άμμος	Μέση έως λεπτή Άμμος
	Συντελεστής ομοιομορφίας	U>15. Πολύ ανομοιόμορφο	U>15. Πολύ ανομοιόμορφο	U>15. Πολύ ανομοιόμορφο
	Βαθμός διαβάθμισης	Καλά διαβαθμισμένο	Καλά διαβαθμισμένο	Καλά διαβαθμισμένο
	LL	35,20	38.10	40,30

Όρια Attenberg	PL	μέσης πλαστικότητας ιλύς έως μέσης πλαστικότητας άργιλος	23,50	25,14	26,87
	PI		11,70	12,96	13,43
Άμεσης Διάτμισης	Συνοχή c (kPa)		ΔΠΕΔ	14	ΔΠΕΔ
	Γωνία τριβής φ (°)		ΔΠΕΔ	17	ΔΠΕΔ

Από τις κοκκομετρικές αναλύσεις προέκυψε το ίδιο αποτέλεσμα (πολύ ανομοιομορφη και καλά διαβαθμισμένη λεπτή έως και μέση Άμμο με χαλίκια). Το ίδιο υλικό βρέθηκε τόσο στα σημεία μεταφοράς όσο και στα σημεία απόθεσης, γεγονός που αποδεικνύει έμμεσα την ύπαρξη της λασπορροής στη περιοχή καθώς ίδιας ποιότητας υλικά από την αφετηρία της πλαγιάς βρέθηκαν στη βάση. Το χαρακτηριστικό της ανομοιομορφίας των υλικών μαρτυρά την προέλευση τους, η οποία φαίνεται να είναι από την αποσάθρωση, τη μεταφορά και τη απόθεση των υπάρχοντων πετρωμάτων, ενώ δεν αποκλείεται η προέλευση των υλικών από ανθρωπογενή παρέμβαση (επιχώσεις για διάνοιξη δασικού δρόμου). Το υλικό είναι μέσης πλαστικότητας ιλύς έως μέσης πλαστικότητας άργιλος.

Η σάρωση της περιοχής με LiDAR οδήγησε στην δημιουργία ενός λεπτομερούς μοντέλου (προσομοιώματος), όπου αποτυπώνονται τα όρια της λασπορροής, η αφετηρία, οι περιοχές διάδοσης, τα σημεία απόθεσης, τα εργαστηριακά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές, πληροφορίες για την εκδήλωση του φαινομένου καθώς και στοιχεία της προσωπικής χαρτογράφησης. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΑΡΞΗΣ ΛΑΣΠΟΡΡΗΣ

Το σημείο έναρξης της λασπορροής τοποθετείται στην αυλή του ξενοδοχείου και εκδηλώνεται με μια μορφή μικρής κατολισθήσεως στην αρχή του πρανούς. Η αποδιοργάνωση και χαλάρωση του υλικού δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την διόδο του νερού στο εσωτερικό του εδάφους. Έπειτα από συνεχόμενη βροχόπτωση στις 10, 11 και 12 Δεκεμβρίου και την ισχυρή βροχόπτωση στις 13 Δεκεμβρη η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους ξεπέρασε το όριο υδατότητας (LL), προκαλώντας την εκδήλωση της λασπορροής

→ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΡΟΗΣ
 ΟΦΙΟΛΙΘΙΟ (mélange της Αβδέλας)

ΔΡΟΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η λασπορροή διακλαδίζεται σε 3 περιοχές διάδοσης οι οποίες είναι πολύ στενοί και μεταφέρουν το υλικό με μεγάλες ταχύτητες προς τα Βόρεια, μέχρις ότου να αποθεθούν.

ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΟ

ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΔΕΝΤΡΑ

Σημείο Μεταφοράς 2

Φυσική υγρασία (%)	16,49
Κοκκομετρία	Μέση έως λεπτή Άμμος
Συντελεστής ομοιομορφίας	U>15. Πολύ ανομοιομορφο
Βαθμός διαβήθμισης	Καλά διαβηθμισμένο
LL	μέσης πλαστικότητας
PL	υλός έως μέσης πλαστικότητας
PI	υλός
	40,3
	26,87
	13,43



120m
110m
100m
90m
80m
70m
60m

ΠΡΑΝΗ

ΘΕΣΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ
 Πλήρως αποδιοργανωμένη και χαλαρωμένη μέσης πλαστικότητας υλός έως μέσης πλαστικότητας άργιλος.

13m
ΘΕΣΗ ΑΠΟΘΕΣΗΣ 1

30m
ΘΕΣΗ ΑΠΟΘΕΣΗΣ 2

14m
ΘΕΣΗ ΑΠΟΘΕΣΗΣ 3

ΥΛΙΚΑ ΛΑΣΠΟΡΡΗΣ



Εργαστηριακές Λοκμές	Θέση Απόθεσης 1
Φυσική υγρασία (%)	14,37
Κοκκομετρία	Λεπτή έως μέση άμμος
Συντελεστής ομοιομορφίας	U>15. Πολύ ανομοιομορφο
Βαθμός διαβήθμισης	Καλά διαβηθμισμένο
LL	μέσης πλαστικότητας
PL	υλός έως μέσης πλαστικότητας
PI	άργιλος
	35,20
	23,50
	11,70

ΔΡΟΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 2
 Είχε τη μεγαλύτερη τροφοδοσία υλικού αφού το σημείο απόθεσης είχε το μεγαλύτερο όγκο κατολισθητίντος υλικού.

ΠΡΟΕΛΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ
 Η ανομοιομορφία των υλικών μαρτυρά την προέλευση τους. Υλικά αποσάθρωσης, μεταφοράς και απόθεσης, ενώ δεν αποκλείεται η προέλευση των υλικών από ανθρωπογενή παρέμβαση (επιχώσεις για διάνοιξη δισκίου δρόμου).



Θέση Απόθεσης 2	
Φυσική υγρασία (%)	8,46
Ειδικό βάρος	2,388
Κοκκομετρία	Λεπτή έως μέση άμμος
Συντελεστής ομοιομορφίας	U>15. Πολύ ανομοιομορφο
Βαθμός διαβήθμισης	Καλά διαβηθμισμένο
LL	μέσης πλαστικότητας
PL	υλός έως μέσης πλαστικότητας
PI	άργιλος
	38,10
	25,14
	12,96
Συνολική c (kPa)	14
Γωνία τριβής φ (°)	17



Εικόνα 85: Γεωλογικό και τεχνικογεωλογικό προσομοίωμα της περιοχής, για την κατανόηση του φαινομένου.

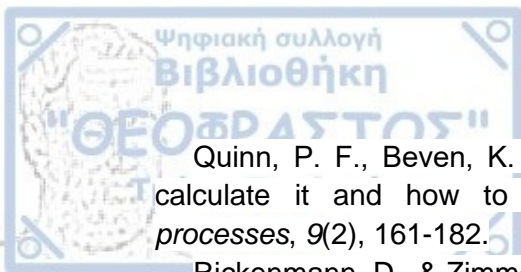
Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη βοήθεια του προγράμματος Flow - R (University of Lausanne), η ευρύτερη περιοχή της έρευνας είναι κατά θέσεις επιδεκτική ως προς την εκδήλωση ροών, χωρίς όμως να διακρίνονται ενιαίες ροές. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την ανάλυση του Flow-R (χάρτης επιδεκτικότητας και χάρτης κινητικής ενέργειας) δεν είναι επί το πλείστον αξιόπιστα. Αυτό συμβαίνει διότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψει αυτό το μοντέλο, ήταν DEM ανάλυσης 5m από το κτηματολόγιο της Ελλάδας, το οποίο περιλαμβάνει περιοχές στις οποίες δεν έχει αφαιρεθεί ακόμη η δασοκάλυψη (terrain model). Επιπλέον το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα κυρίως σε περιοχές μικρής κλίμακας χρησιμοποιώντας DEM μικρής ανάλυσης (ακόμη και μεγαλύτερης από 5m). Για αναλύσεις συγκεκριμένων περιοχών μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πιο αναλυτικά DEM , με σκοπό την καλύτερη απόδοση των πιο επιδεκτικών περιοχών σε καλύτερη ανάλυση. Καθώς λοιπόν η σχέση της περιοχής εξάπλωσης και του DEM, είναι άκρως σημαντική, σε περίπτωση λανθασμένης αναπαράστασης της πραγματικότητας της περιοχής, προκύπτουν ανούσια και χωρίς συνοχή αποτελέσματα. Το Flow-R είναι ένα εργαλείο για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας, αλλά δεν είναι κατάλληλο για μεμονωμένη μοντελοποίηση συμβάντων, επειδή η διάδοση παρέχει μια σειρά πιθανών γεγονότων. Είναι ωστόσο, σκόπιμο να συγκριθεί η εκτιμώμενη ευαίσθητη ζώνη με συγκεκριμένα γεγονότα προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια του αποτελέσματος και η προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου.

Τέλος, πρέπει σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι στην Ελλάδα, ειδικά τα τελευταία χρόνια, λόγω σταδιακής αλλαγής του κλίματος (απότομες και έντονες βροχοπτώσεις) και λόγω έντονων πυρκαγιών (αποψίλωση των δασών) η εκδήλωση τέτοιων φαινομένων είναι συνεχής και επαναλαμβανόμενη. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη για την κατανόηση του τρόπου μηχανισμού και των μέτρων αντιστήριξης τέτοιων φαινομένων από την Ελληνική επιστημονική κοινότητα.

- Ancey, C. (2007). Plasticity and geophysical flows: a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 142(1-3), 4-35.
- Bagnold, R. A. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 225(1160), 49-63.
- Bagnold, R. A. (1956). The flow of cohesionless grains in fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 249(964), 235-297.
- Baumann, V., Wick, E., Horton, P., & Jaboyedoff, M. (2011, October). Debris flow susceptibility mapping at a regional scale along the National Road N7, Argentina. In *Proceedings of the 14th Pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering* (pp. 2-6). Canadian Geotechnical Society.
- Bisantino, T., Fischer, P., & Gentile, F. (2010). Rheological characteristics of debris-flow material in South-Gargano watersheds. *Natural Hazards*, 54(2), 209-223.
- Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S., & Jaboyedoff, M. (2010). Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(11), 2379-2390.
- Blight, G. E. (1997). DESTRUCTIVE MUDFLOWS AS A CONSEQUENCE OF TAILINGS DYKE FAILURES. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 125(1), 9-18.
- Badoux, H., & Gabus, J. H. (1990). Atlas géologique de la Suisse, feuille n 1285, 1: 25'000, Les Diablerets avec notice explicative.
- Bradley, J. B. (1986). Hydraulics and bed material transport at high fine suspended sediment concentrations. Available from University Microfilms International 300 N. Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106, Order, (8618167).
- Brown, B. J. (1988). *Sediment transport in hyperconcentrated flows in sand-bed streams of volcanic origin*. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS HYDRAULICS LAB.
- Calligaris, C., Boniello, M. A., & Zini, L. (2008). Debris flow modelling in Julian Alps using FLO-2D. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 60, 81-88.
- CANNON, S.H., MICHAEL, J.A., GARTNER, J.E. and GLEASON, J.A. (2003a). Assessment of potential debris flow peak discharges from basins burned by the 2002 Missionary Ridge Fire, Colorado. U.S. Geological Survey Open-File Report 03-332.
- Claessens, L., Heuvelink, G. B. M., Schoorl, J. M., & Veldkamp, A. (2005). DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 30(4), 461-477.
- Comegna, L., Picarelli, L., & Urciuoli, G. (2007). The mechanics of mudslides as a cyclic undrained–drained process. *Landslides*, 4(3), 217-232.
- Cousot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3-4), 209-227.
- Floyd, I. E., Sanchez, A., Gibson, S., & Savant, G. (2020). A Modular, Non-Newtonian, Model, Library Framework (DebrisLib) for Post-Wildfire Flood Risk Management. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-21.



- Fontainhas, A. M. C. (2019). *Injection moulding simulation using OpenFOAM®* (Doctoral dissertation).
- Fischer, L., Rubensdotter, L., Sletten, K., Stalsberg, K., Melchiorre, C., Horton, P., & Jaboyedoff, M. (2012, June). Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway. In *Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides* (pp. 3-8).
- Gagoshidze, M. S. (1969). "Mudflows and floods and their control." *Soviet Hydrology: Selected Papers*, 4, 410-422.
- Hänsel, P., Kaiser, A., Buchholz, A., Böttcher, F., Langel, S., Schmidt, J., & Schindewolf, M. (2018). Mud flow reconstruction by means of physical erosion modeling, high-resolution radar-based precipitation data, and UAV monitoring. *Geosciences*, 8(11), 427.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2018). TXT-tool 0.001-2.1 Landslide types: descriptions, illustrations and photos. In *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (pp. 1-38). Springer, Cham.
- Horton, P., Jaboyedoff, M. & Bardou, E. 2008. Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards*, 20–24 mai 2008 Quebec
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. E. A., & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural hazards and earth system sciences*, 13(4), 869-885.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Zimmermann, M., Mazotti, B., & Longchamp, C. (2011). Flow-R, a model for debris flow susceptibility mapping at a regional scale - some case studies. In *Proceedings of the 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment - Italian Journal of Engineering Geology and Environment* (pp. 875–884). Padova, Italy. doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-095
- Iverson, R. M., & Denlinger, R. P. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B1), 537-552.
- Jaboyedoff, M., Choffet, M., Derron, M. H., Horton, P., Loye, A., Longchamp, C., ... & Pedrazzini, A. (2012). Preliminary slope mass movement susceptibility mapping using DEM and LiDAR DEM. In *Terrigenous mass movements* (pp. 109-170). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jakob, M., Hungr, O., & Jakob, D. M. (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena* (Vol. 739). Berlin: Springer.
- Julien, P. Y., & Leon, C. A. (2000). Mud floods, mudflows and debris flows. Classification, rheology and structural design. *Jornadas de Investigación JIFI*.
- Lato, M. (2010). *Geotechnical applications of LiDAR pertaining to geomechanical evaluation and hazard identification* (Doctoral dissertation, Queen's University).
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 244-261.
- O'Brien, J. S., & Julien, P. Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of hydraulic engineering*, 114(8), 877-887.
- Perret, J. (2007). Géotypes, une relecture, Tracés. *Société des éditions des associations techniques universitaires*.



Quinn, P. F., Beven, K. J., & Lamb, R. (1995). The in $(a/\tan/\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrological processes*, 9(2), 161-182.

Rickenmann, D., & Zimmermann, M. (1993). The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8(2-3), 175-189.

Schamber, D. R., & MacArthur, R. C. (1985). *One-dimensional model for mud flows* (No. 109). US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

TAKAHASHI, T. (1981). Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: Soft countermeasures for a disaster. *Natural disaster science*, 3(1), 57-89.

Varnes, D. J. (1978). repr. 1995, Landslide classification system. Dragovich, JD; Brunengo, MJ, Landslide map and inventory, Tilton River–Mineral Creek area, Lewis County, Washington: Washington Division of Geology and Earth Resources Open File Report, 95-1.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.

von Fischer, F., Keiler, M., & Zimmermann, M. (2016). Modelling of individual debris flows using Flow-R: A case study in four Swiss torrents.

Widjaja, B. (2010). Case study of mudflow using Flo2d. *Inc. Sustain. Pract. Mech. Struct. Mater*, 11, 533-537.

Woo, H. (1985). "Sediment concentration in hyperconcentrated flow," Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colo

Zhang, W., & Montgomery, D. R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water resources research*, 30(4), 1019-1028.

Σ. ΠΑΠΑΣΠΥΡΟΥ, 2013, Λασπορροή σε αργιλώδη εδάφη