



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΠΟΙΚΙΛΩΝ
ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ
ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ**



ΚΑΤΣΙΟΥΛΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΡΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ , ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2024

Ευχαριστίες

Με την κατάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών οφείλω πρωτίστως ένα εγκάρδιο ευχαριστώ στον επιβλέποντα της εργασίας μου κύριο Βασίλη Μαρίνο Επ. Καθηγητή ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη που με έδειξε για την ανάθεση της εργασίας, την πολύτιμη καθοδήγηση, τον χρόνο που αφιέρωσε στη διόρθωση και στην αξιολόγησή της καθώς και για το πλήθος των γνώσεων που μου μετέδωσε.

Οφείλω ακόμη ένα ευχαριστώ στους Αν. Καθηγητές ΕΜΠ κύριο Αχιλλέα Παπαδημητρίου και κύριο Νικόλαο Γερόλυμο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Θέλω και πρέπει επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. κύριο Δημήτρη Γεωργίου για την καταλυτική του βοήθεια στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος Slide 2 της εταιρείας Rocscience αλλά και για την συμβολή, την υποστήριξη, τις γνώσεις που προσέφερε και τον χρόνο που αφιέρωσε σε όλη την έκταση της διπλωματικής.

Τέλος, δεν θέλω και δεν πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τον κύριο Αλέξανδρο Παπαμαρινόπουλο, τους συμφοιτητές μου και ανθρώπους που με στήριξαν σε αυτό το ταξίδι των φοιτητικών μου ετών αλλά και την οικογένειά μου για την οικονομική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στον μικρό μου εαυτό

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση της υδατοπερατότητας σε βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς και οι παράγοντες που την καθορίζουν, καθώς και η επίδραση αυτής στην ευστάθεια βραχωδών πρανών. Στην εργασία γίνεται παρουσίαση (Κεφάλαια 2 έως 4) της έννοιας της υδατοπερατότητας των βραχωδών σχηματισμών και τους παράγοντες που την καθορίζουν (π.χ. αποσάθρωση, τεκτονισμός), καθώς και τις εργαστηριακές αλλά και τις επιτόπου μεθόδους στην ύπαιθρο, με τις οποίες μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής υδατοπερατότητας (k) των βραχωδών σχηματισμών. Επίσης, παρουσιάζεται η επίδραση που έχει ο συντελεστής αυτός, στην ευστάθεια των πρανών.

Σε επόμενο στάδιο (Κεφάλαιο 6), παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία και τα αποτελέσματα αυτής, σε δεδομένα δοκιμών υδατοπερατότητας σε τέσσερις βραχώδεις σχηματισμούς: Α) Φλύσχη, Β) Μολάσσας, Γ) Γνευσίου και Δ) Οφιολίθων, όπου προκύπτουν χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας (k) ανά γενικό σχηματισμό, αλλά και ανά πετρολογικό τύπο αυτών, καθώς και η μεταβολή της τιμής του συντελεστή με το βάθος. Ακολουθεί παρουσίαση αναλύσεων ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των λωρίδων (Κεφάλαιο 7), όπου εξετάζεται η επιρροή του συντελεστή υδατοπερατότητας (k), εντός αυτών ανά σχηματισμό, μέσω του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u) και εξετάζεται η μεταβολή του συντελεστή ευστάθειας των πρανών (SF). Γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και σε περιπτώσεις όπου καταγράφηκαν μικροί συντελεστές ασφαλείας (SF), εξετάζεται η επίδραση της αποστράγγισης των πρανών στην αύξηση του συντελεστή ευστάθειας (SF) των πρανών.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των βασικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της εργασίας (Κεφάλαιο 8), που αφορούν κυρίως τις χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας (k) που προέκυψαν από τη στατιστική επεξεργασία του Κεφαλαίου 6, αλλά και την επίδραση αυτού στην ευστάθεια των βραχωδών πρανών, καθώς και την επίδραση της αποστράγγισης στην αύξηση τους συντελεστή ασφαλείας (SF), όπως πρόκυψε από τις αναλύσεις με την μέθοδο των λωρίδων του Κεφαλαίου 7.

ABSTRACT

The purpose of this undergraduate thesis is to investigate water permeability in rocky geological formations and the factors that determine it, as well as its effect on the stability of rocky slopes. The paper presents (Chapters 2 to 4) the concept of water permeability of rock formations and the factors that determine it (e.g. weathering, tectonism), as well as the laboratory and field methods in the countryside, with which the water permeability coefficient (k) of rock formations can be determined.

At a later stage (Chapter 6), the statistical treatment and its results are presented in data on water permeability test data on four rock formations: A) Flysch, B) Molasse, C) Gneiss and D) Ophiolite, where characteristic values of the water permeability coefficient (k) per general formation, but also per petrological type, as well as the change in the value of the coefficient with the depth. The following is a presentation of slope stability analyses using the strip method (Chapter 7), where the influence of the water permeability coefficient (k) is examined within them per formation, through the pore overpressure coefficient (R_u) and the change in slope stability coefficient (SF) is examined. The results of the analyses are annotated and in cases where small safety factors (SF) were recorded, the effect of slope drainage on the increase of slope stability coefficient (SF) is examined.

The paper concludes with the presentation of the main results and conclusions of the thesis (Chapter 8), which mainly concern the characteristic values of the water permeability coefficient (k) resulting from the statistical treatment of Chapter 6, but also its effect on the stability of rocky slopes, as well as the effect of drainage on the increase of the safety factor (SF), as shown by the strip analyses of Chapter 7.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ – ΣΚΟΠΟΣ	1
1.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	1
2. ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	4
2.1. ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (PERMEABILITY)	4
2.1.1. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (COEFFICIENT OF PERMEABILITY).....	5
2.1.1.1. ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	5
2.1.1.2. ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	6
2.1.1.3. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	9
2.1.1.3.1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	9
2.1.1.3.2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΔΟΚΙΜΕΣ LEFRANC)	10
2.1.1.3.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΔΟΚΙΜΕΣ MAAG).....	12
2.1.1.3.4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΠΙΕΣΗ (ΔΟΚΙΜΗ LUGEON).....	17
2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	23
2.2.1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	24
2.2.1.1. ΑΝΤΟΧΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ (σ_c).....	24
2.2.1.2. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ (E_i).....	25
2.2.2. ΜΟΝΟΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ - ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (RQD).....	25
2.2.3. ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	26
2.2.3.1. ΣΥΣΤΗΜΑ Q.....	26
2.2.3.2. ΣΥΣΤΗΜΑ RMR.....	27
2.2.3.3. ΣΥΣΤΗΜΑ GSI	28
2.2.3.4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ RQD	33
2.2.3.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	36
3. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ	37
3.1. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	37
3.1.1. ΓΕΝΙΚΑ	37
3.1.2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	40
3.1.3. ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΖΩΝΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ	41
3.2. ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ.....	41
3.2.1. ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ	41
3.2.1.1. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΕΙΣ.....	42
3.2.2. ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΟΡΦΕΣ.....	43
3.2.3. ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΖΩΝΕΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΕΩΣ	43
3.2.4. ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΕΩΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	43
3.2.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ	44
4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	50
4.1. ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	50
4.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	51
4.2.1. ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	52
4.2.2. ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	53
4.2.2.1. ΚΑΤΑΠΤΩΣΗ (FALL)	56
4.2.2.2. ΑΝΑΤΡΟΠΗ (TOPPLE).....	57
4.2.2.3. ΟΛΙΣΘΗΣΗ (SLIDE).....	58
4.2.2.4. ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗ (LATERAL SPREAD).....	61
4.2.2.5. ΡΟΗ (FLOW).....	62

4.2.2.6.	ΣΥΝΘΕΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΠΡΑΝΩΝ (COMPOSITE SLIDE)	63
4.3.	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ.....	64
4.3.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	64
4.3.2.	ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	66
4.3.3.	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	67
4.3.3.1.	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	68
4.3.3.2.	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ	68
4.4.	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	69
4.4.1.	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	69
4.4.2.	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	70
4.4.3.	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	73
4.4.4.	ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	74
5.	ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	75
5.1.	ΦΛΥΣΧΗΣ	75
5.1.1.	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	75
5.1.2.	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ	76
5.2.	ΜΟΛΑΣΣΑ	81
5.2.1.	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	81
5.2.2.	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ	84
5.3.	ΓΝΕΥΣΙΟΙ - ΓΡΑΝΙΤΕΣ	87
5.3.1.	ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	87
5.3.2.	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ	89
5.4.	ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ	90
5.4.1.	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	90
5.4.2.	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ	93
6.	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ	95
6.1.	ΦΛΥΣΧΗΣ	95
6.1.1.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ	97
6.1.2.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ	98
6.1.3.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ.....	99
6.1.4.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΕΝΑΛΛΑΓΩΝ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΨΑΜΜΙΤΗ (50% - 50%)	100
6.1.5.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΨΑΜΜΙΤΗ	101
6.1.6.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ	103
6.1.7.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΚΑΙ ΨΑΜΜΙΤΗ	104
6.1.8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
6.2.	ΜΟΛΑΣΣΑ	107
6.2.1.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ	109
6.2.2.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ	110
6.2.3.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΕΝΑΛΛΑΓΩΝ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΨΑΜΜΙΤΗ (50%-50%).....	111
6.2.4.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΨΑΜΜΙΤΗ	112
6.2.5.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ	114
6.2.6.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ.....	115
6.2.7.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ ΚΑΙ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ.....	116
6.2.8.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΚΑΙ ΨΑΜΜΙΤΗ	117
6.2.9.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	117
6.3.	ΓΝΕΥΣΙΟΣ.....	119

6.3.1.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΓΝΕΥΣΙΟΥ	120
6.3.2.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΕΝΑΛΛΑΓΩΝ ΓΝΕΥΣΙΟΥ ΜΕ ΜΑΡΜΑΡΟ	121
6.3.3.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΗΓΜΑΤΙΤΗ	123
6.3.4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	124
6.4.	ΟΦΙΟΛΙΘΟΣ	126
6.4.1.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΗ.....	127
6.4.2.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗ	128
6.4.3.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΒΑΣΑΛΤΗ	129
6.4.4.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΓΑΒΒΡΟΥ.....	130
6.4.5.	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟΥ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	131
6.4.6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	133
7.	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	135
7.1.	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	135
7.1.1.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ	135
7.1.2.	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SLIDE2.....	139
7.1.3.	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	140
7.1.4.	ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	140
7.1.5.	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ – ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	143
7.1.5.1.	ΦΛΥΣΧΗΣ	143
7.1.5.2.	ΜΟΛΑΣΣΑ	148
7.1.5.3.	ΓΝΕΥΣΙΟΣ.....	153
7.1.5.4.	ΟΦΙΟΛΙΘΟΣ	155
7.2.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	161
7.2.1.	ΦΛΥΣΧΗΣ	161
7.2.2.	ΜΟΛΑΣΣΑ	162
7.2.3.	ΓΝΕΥΣΙΟΣ.....	164
7.2.4.	ΟΦΙΟΛΙΘΟΣ	165
7.3.	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.....	167
7.3.1.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	168
7.3.2.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	170
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	173
9.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	186

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1:	Δοκιμές υδροπερατότητας σταθερού και μεταβλητού φορτίου (DAS, 1990).	8
Εικόνα 2:	Τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου. (Πηγή: Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου).	12
Εικόνα 3:	Τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού φορτίου. (Πηγή: Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου).	13
Εικόνα 4:	Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon με τη χρήση μονού και διπλού παρεμβύσματος (racker), πάνω και κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. (Πηγή: Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου).	18
Εικόνα 5:	Διαγράμματα επιβαλλόμενης πίεσης-απορρόφησης (Π.ΜΑΡΙΝΟΣ, 1991).	21
Εικόνα 6:	Βαθμονόμηση βραχώμαζας με βάση το σύστημα GSI (Hoek & Marinos, 2000).	29
Εικόνα 7:	Εκτίμηση του δείκτη GSI για ετερογενείς βραχώμαζες. Εδώ ειδικά για τον φλύσχη.	30
Εικόνα 8:	Εκτίμηση του δείκτη GSI για σχάσιμη μολάσση.....	31
Εικόνα 9:	Εκτίμηση του GSI σε γνευσιακές βραχώμαζες.	32

Εικόνα 10: Εκτίμηση του GSI σε οφιόλιθους.....	33
Εικόνα 11: Λιθολογικά σχεδιασμένη διαπερατότητα έναντι RQD (Mohsinet.al.n.d).	35
Εικόνα 12: Κατανομή περατότητας- RQD για κάθε λιθολογική μονάδα (Mohsinet.al.n.d.).....	35
Εικόνα 13: Πλημμύρα στο Παλατινάτο της Γερμανίας, 2021.	51
Εικόνα 14: Κατολίσηση στην περιφέρεια Ουταρακάντ της Ινδίας.	51
Εικόνα 15: Ολίσηση οδοστρώματος επαρχιακής οδού Κοζάνης (2015).	52
Εικόνα 16: Κατολίσηση σε ορυχείο χαλκού Γιούτα, ΗΠΑ (2013).	52
Εικόνα 17: Βασικοί τύποι αστοχίας πρανών (Παπαδόπουλος και Λουπασάκης, 2016).	55
Εικόνα 18: Κατάπτωση (US Geological Survey, 2004)	56
Εικόνα 19: Κατάπτωση Βράχων στην εθνική οδό Λάρισας-Θεσσαλονίκης (2022).	56
Εικόνα 20: Ανατροπή (US Geological Survey, 2004).	57
Εικόνα 21: Ανατροπή στη λίμνη Πάουελ της Αριζόνα, ΗΠΑ (2022).	57
Εικόνα 22: Ολίσηση (US Geological Survey, 2004).	58
Εικόνα 23: Ιδεατή απεικόνιση περιστροφικής ολίσησης (Κουκής και Σαμπατακάκης, 2007).	59
Εικόνα 24: Περιστροφική Ολίσηση Σκάρμπορο, Αγγλία (British Geological Survey, 1993). ..	59
Εικόνα 25: Μεταθετική Ολίσηση (US Geological Survey, 2004).	60
Εικόνα 26: Μεταθετική Ολίσηση στη Βρετανική Κολούμπια, Καναδάς (Canada Geological Survey, 2001).	60
Εικόνα 27: Πλευρική Εξάπλωση (US Geological Survey, 2004).	61
Εικόνα 28: Πλευρική Εξάπλωση σε δρόμο στην Καλιφόρνια, 1989 (US Geological Survey, 1989).	62
Εικόνα 29: Ροή (US Geological Survey, 2004).	63
Εικόνα 30: Ροή Κορημάτων στο Λεφτ Χαντ Κρικ, Κολοράντο, ΗΠΑ (Colorado Geological Survey, 2013).	63
Εικόνα 31: Πιθανές μορφές αστοχίας πρανών, Budhu (2010).	65
Εικόνα 32: Κατολισθήσεις λόγω βροχοπτώσεων στο Ρίο ντε Τζανέιρο, Βραζιλία, 2010.	69
Εικόνα 33: Κατολίσηση λόγω βροχοπτώσεων, Πουέρτο Ρίκο, 1985 (Πηγή: US Geological Survey).	71
Εικόνα 34: Ροή υλικών την εποχή του μουσώνα, Nepal, 2014.	72
Εικόνα 35: Πιθανά αποτελέσματα καιρικών φαινομένων στη διάβρωση και την ευστάθεια ενός πρανούς	73
Εικόνα 36: Σήραγγα Ανθοχωρίου. Καταγεγραμμένες εισροές νερού (Μαρίνος Β. 2007).	78
Εικόνα 37: Σήραγγα Αηγιλίου. Καταγραφείσες εισροές (Μαρίνος Β. 2007).	79
Εικόνα 38: Σήραγγα Δρίσκου. Καταγραφείσες εισροές υπογείων υδάτων εντός της σήραγγας (Μαρίνος Β. 2007).	80
Εικόνα 39: Κατανομή της περατότητας του Φλύσχη, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής Ψαμμίτη - Ιλυολίθου (Marinos P. et al. 2007).	80
Εικόνα 40: Σχηματική στήλη των μολασσικών σχηματισμών στη λεκάνη της Ροδόπης, ΒΑ Ελλάδα: 1. ψαμμίτης, 2. αργιλικόι σχιστόλιθοι ή ιλυόλιθοι, 3. ψαμμίτες με ιλυολιθικούς ή αργιλικούς ψαμμίτες, 4. κροκαλοπαγή, 5. ασβεστόλιθοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι ή μάργες (Από τον Γεωλογικό Χάρτη Ελλάδος 1:50000, φύλλο Μέση-Ξυλαγάνη, ΙΓΜΕ, 1980).	82
Εικόνα 41: Οι κυριότερες μολασσικές λεκάνες του Ελληνικού Τόξου. 1: Ροδόπης Βορείου Αιγαίου (Ηώκαινο-Ανώτερο Ολιγόκαινο), 2: Μεσοελληνική Αύλακα (Ανώτερο Ηώκαινο-Μέσο Μειόκαινο), 3: Ηπείρου-Ακαρνανίας (Ανώτερο Ολιγόκαινο-Μέσο Μειόκαινο), 4: Κυκλάδων (Κατώτερο Μειόκαινο), 5: Κρητικού Πελάγους (Ανώτερο Μειόκαινο-Τεταρτογενές). (Παπανικολάου,1986).	83

Εικόνα 42: Αποτελέσματα δοκιμών υδροπερατότητας που έγιναν στους σχηματισμούς της μολάσσας τα οποία υποδεικνύουν αρκετά χαμηλή υδροπερατότητα (Μαρίνος Β. 2007). ...	85
Εικόνα 43: Κατανομή του βάθους του νερού στους μολασσικούς σχηματισμούς. Η υψηλή στάθμη του νερού σε πιεζόμετρα των γεωτρήσεων υποδεικνύει αρκετά χαμηλή διαπερατότητα στο σύνολο των μολασσικών σχηματισμών. Ο παράγοντας μορφολογία θεωρούμε ότι δεν επηρεάζει τη διαπίστωση αυτή λόγω της λοφώδους μονοτονίας που επικρατεί σε όλη την περιοχή των σηράγγων μολάσσας (Μαρίνος Β. 2007).....	86
Εικόνα 44: Κατανομή της περατότητας της Μολάσσας, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής Ψαμμίτη - Ιλυολίθου (Marinos P. et al. 2007).....	87
Εικόνα 45: Χαρακτηριστική λιθοστρωματογραφική-τεκτονική στήλη της Πελαγονικής ενότητας, όπου διακρίνεται η τεκτονική σχέση των γνευσιακών δομών με τα άλλα πετρώματα (Μουντράκης, 1985).....	89
Εικόνα 46: Τεκτονικό μοντέλο της εξέλιξης των οφιολίθων στους ορεινούς όγκους της Πίνδου και του Βούρινου στη Βόρεια Ελλάδα (προσαρμοσμένο από Jones et al, 1991, και Pe-Piper and Piper, 2002).	91
Εικόνα 47: Οφιόλιθοι: συνθετική και θεωρητική στήλη (από τους Foucault και Raoult 1995 με απλοποιημένες περιγραφές).	92
Εικόνα 48: Μέθοδος Bishop (Bishop, 1955).	137
Εικόνα 49: Λωρίδα μεθόδου Bishop (Bishop, 1955).	138
Εικόνα 50: Γενική προσέγγιση δυνάμεων στις μεθόδους λωρίδων (Τσόγκας και Τσόγκα, 2000).	139
Εικόνα 51: Γεωμετρία μοντέλου προσομοίωσης ορύγματος στο λογισμικό Slide 2.	140
Εικόνα 52: Επιλογή τιμών GSI για τον Ιλυόλιθο του Φλύσχη.....	144
Εικόνα 53: Επιλογή τιμών GSI για τον Ψαμμίτη του Φλύσχη.	145
Εικόνα 54: Επιλογή τιμών GSI για το Κροκαλοπαγές του Φλύσχη.....	147
Εικόνα 55: Επιλογή τιμών GSI για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυολίθου του Φλύσχη σε ίσες αναλογίες.	148
Εικόνα 56: Επιλογή τιμών GSI για τον Ιλυόλιθο της Μολάσσας.	149
Εικόνα 57: Επιλογή τιμών GSI για τον Ψαμμίτη της Μολάσσας.	151
Εικόνα 58: Επιλογή τιμών GSI για το Κροκαλοπαγές της Μολάσσας.....	152
Εικόνα 59: Επιλογή τιμών GSI για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυολίθου της Μολάσσας σε ίσες αναλογίες.	153
Εικόνα 60: Επιλογή τιμών GSI για το Γνεύσιο.	154
Εικόνα 61: Επιλογή τιμών GSI για τον Σερπεντίνη.	156
Εικόνα 62: Επιλογή τιμών GSI για τον Περιδοτίτη.	158
Εικόνα 63: Επιλογή τιμών GSI για τον Γάββρο.	160
Εικόνα 64: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο του Ιλυολίθου του Φλύσχη.	161
Εικόνα 65: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών Ψαμμίτη και Ιλυολίθου του Φλύσχη, σε ίσες αναλογίες.	162
Εικόνα 66: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο του Ιλυολίθου της Μολάσσας.	163
Εικόνα 67: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο του Κροκαλοπαγούς της Μολάσσας.	164
Εικόνα 68: Ανάλυση ευστάθειας στο σχηματισμό του Γνευσίου.	165
Εικόνα 69: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπου του Σερπεντίνη του σχηματισμού του Οφιολίθου.	166
Εικόνα 70: Επίδραση των αποστραγγιστικών οπών (horizontal drain) στη μεταβολή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (Rahardjo & Leong, 2002).	169
Εικόνα 71: Εσωτερική αποστράγγιση με τη χρήση στραγγιστηρίων.	170

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1	Τυπικές τιμές συντελεστών υδροπερατότητας (TERZAGHI and PECK, 1967).	4
Πίνακας 2	Εργαστηριακός συντελεστής υδροπερατότητας, k , πετρωμάτων.	5
Πίνακας 3:	Εκτίμηση του συντελεστή «θύλακα», C , για δοκιμές υδροπερατότητας σταθερού και μεταβλητού φορτίου σε εδάφη και βραχομάζες, για διαφορετικές μορφές του εισπιεζόμενου τμήματος (από HOEK and BRAY, 1977).	14
Πίνακας 4:	Κατηγορίες πετρωμάτων βάσει της αντοχής (ISRM, 1981).	24
Πίνακας 5:	Βαθμονόμηση της βραχώμαζας βάσει του δείκτη RQD.	25
Πίνακας 6:	Κατάταξη βραχώμαζας βάσει του συστήματος Q (Barton et al. 1974).	27
Πίνακας 7:	Κατάταξη βραχώμαζας βάσει του δείκτη RMR.	28
Πίνακας 8:	Τεχνική κατάταξη των ασυνεχειών της βραχομάζας.	39
Πίνακας 9:	Κατάταξη Thorntwaite (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).	42
Πίνακας 10:	Κατάταξη βάσει δείκτη T/E (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).	42
Πίνακας 11:	Μηχανική ταξινόμηση των αποσαθρωμένων πετρωμάτων (Fooker et al, 1971) (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).	45
Πίνακας 12:	Ταξινόμηση των βραχωδών σχηματισμών με βάση το βαθμό αποσαθρώσεως (London Geological Society, 1970, με αλλαγές) (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).	49
Πίνακας 13:	<i>Ταξινόμηση Κατολισθήσεων με βάση το είδος μετακίνησης (Varnes, 1978).</i>	54
Πίνακας 14:	Κατηγορίες Κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα (Cruden & Varnes, 1996)...	55
Πίνακας 15:	Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του φλύσχη.	96
Πίνακας 16:	Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.	107
Πίνακας 17:	Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό της μολάσσας.	108
Πίνακας 18:	Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο μολάσσας.	118
Πίνακας 19:	Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του γνευσίου.	119
Πίνακας 20:	Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.	125
Πίνακας 21:	Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του οφιόλιθου.	126
Πίνακας 22:	Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο οφιόλιθου.	134
Πίνακας 23:	Συγκεντρωτικός πίνακας του συντελεστή υδατοπερατότητας (k) των γεωλογικών σχηματισμών, ανά λιθολογικό τύπο και ανά βάθος.	141
Πίνακας 24:	Συγκεντρωτικός πίνακας του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u) των γεωλογικών σχηματισμών, ανά λιθολογικό τύπο και ανά βάθος.	142
Πίνακας 25:	Επιλογή παραμέτρων για τον Ιλυόλιθο του Φλύσχη.	144
Πίνακας 26:	Επιλογή παραμέτρων για τον Ψαμμίτη του Φλύσχη.	146
Πίνακας 27:	Επιλογή παραμέτρων για το Κροκαλοπαγές του Φλύσχη.	147
Πίνακας 28:	Επιλογή παραμέτρων για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυόλιθου του Φλύσχη σε ίσες αναλογίες.	148

Πίνακας 29: Επιλογή παραμέτρων για τον Ιλυόλιθο της Μολάσσας.....	150
Πίνακας 30: Επιλογή παραμέτρων για τον Ψαμμίτη της Μολάσσας.....	151
Πίνακας 31: Επιλογή παραμέτρων για το Κροκαλοπαγές της Μολάσσας.....	152
Πίνακας 32: Επιλογή παραμέτρων για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυόλιθου της Μολάσσας σε ίσες αναλογίες.....	153
Πίνακας 33: Επιλογή παραμέτρων για τον Γνεύσιο.....	155
Πίνακας 34: Επιλογή παραμέτρων για τον Σερπεντίνη.....	156
Πίνακας 35: Επιλογή παραμέτρων για τον Περιδοτίτη.....	158
Πίνακας 36: Επιλογή παραμέτρων για τον Γάββρο.....	160
Πίνακας 37: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό του Φλύσχη.....	161
Πίνακας 38: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό της Μολάσσας.....	163
Πίνακας 39: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό του Γνευσίου.....	164
Πίνακας 40: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό του Οφιολίθου.....	166
Πίνακας 41: Αναλύσεις ευστάθειας με εφαρμογή μέτρων αποστράγγισης.....	167
Πίνακας 42: Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας με εφαρμογή μέτρων αποστράγγισης.....	171
Πίνακας 43: Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας με εφαρμογή μέσων αποστράγγισης.....	184

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του φλύσχη.....	96
Διάγραμμα 2: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό του φλύσχη.....	97
Διάγραμμα 3: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.....	98
Διάγραμμα 4: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.....	98
Διάγραμμα 5: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.....	99
Διάγραμμα 6: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.....	99
Διάγραμμα 7: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς.....	100
Διάγραμμα 8: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς.....	100
Διάγραμμα 9: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).....	101
Διάγραμμα 10: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).....	101
Διάγραμμα 11: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.....	102
Διάγραμμα 12: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.....	102
Διάγραμμα 13: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.....	103
Διάγραμμα 14: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.....	104

Διάγραμμα 15: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη.	105
Διάγραμμα 16: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη.	105
Διάγραμμα 17: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.	107
Διάγραμμα 18: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό της μολάσσας.	108
Διάγραμμα 19: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό της μολάσσας..	109
Διάγραμμα 20: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.....	110
Διάγραμμα 21: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.	110
Διάγραμμα 22: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.....	111
Διάγραμμα 23: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.	111
Διάγραμμα 24: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).	112
Διάγραμμα 25: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).	112
Διάγραμμα 26: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.	113
Διάγραμμα 27: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.	113
Διάγραμμα 28: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.	114
Διάγραμμα 29: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.	115
Διάγραμμα 30: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς.	116
Διάγραμμα 31: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς.	116
Διάγραμμα 32: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο μολάσσας.	118
Διάγραμμα 33: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του γνευσίου.	119
Διάγραμμα 34: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό του γνευσίου. .	120
Διάγραμμα 35: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του γνευσίου.....	121
Διάγραμμα 36: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του γνευσίου.	121
Διάγραμμα 37: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών γνευσίου με μάρμαρο.	122
Διάγραμμα 38: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών γνευσίου με μάρμαρο.	122
Διάγραμμα 39: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ηηγματίτη.	123

Διάγραμμα 40: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του πηγματίτη.	124
Διάγραμμα 41: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.	125
Διάγραμμα 42: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του οφιόλιθου.	126
Διάγραμμα 43: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό του οφιόλιθου.	127
Διάγραμμα 44: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του σερπεντίνη.....	128
Διάγραμμα 45: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του σερπεντίνη.	128
Διάγραμμα 46: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του περιδοτίτη.	129
Διάγραμμα 47: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του περιδοτίτη.	129
Διάγραμμα 48: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του βασάλτη.....	130
Διάγραμμα 49: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του βασάλτη.	130
Διάγραμμα 50: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του γάββρου.	131
Διάγραμμα 51: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του γάββρου.	131
Διάγραμμα 52: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του οφιολιθικού συμπλέγματος.	132
Διάγραμμα 53: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του οφιολιθικού συμπλέγματος.	132
Διάγραμμα 54: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο οφιόλιθου.	134
Διάγραμμα 55: Συσχέτιση του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (Ru), με το συντελεστή υδατοπερατότητας (k).....	142
Διάγραμμα 56: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.	177
Διάγραμμα 57: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.	178
Διάγραμμα 58: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο μολάσσας.	179
Διάγραμμα 59: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο μολάσσας.....	180
Διάγραμμα 60: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.	181
Διάγραμμα 61: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.	181
Διάγραμμα 62: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο οφιόλιθου.	183
Διάγραμμα 63: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο οφιόλιθου.....	183

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ – ΣΚΟΠΟΣ

Η παρούσα εργασία εστιάζει σε πρώτο στάδιο στις επί τόμου δοκιμές περατότητας σε βραχώδεις σχηματισμούς και σε δεύτερο στάδιο στην επίδραση της παρουσίας του νερού στην ευστάθεια των πρανών. Το νερό αποτελεί μία από τις σημαντικές παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την δημιουργία ενός έργου. Σε κάθε έργο απαιτείται συνδυασμός γνώσεων που σχετίζονται με την γεωλογία της περιοχής, τα τεχνικογεωλογικά, γεωτεχνικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους κ.λπ.. Αυτό συνεπάγεται τη συνεργασία διαφόρων ειδικοτήτων έτσι ώστε να υλοποιηθεί ένα άρτιο και λειτουργικό έργο.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση της στατιστικής επεξεργασίας δεδομένων από επιτόπου δοκιμές περατότητας σε βραχώδεις σχηματισμούς: α) φλύσχη, β) μολάσσας, γ) γνεύσιου και δ) οφιόλιθου, από ερευνητικές γεωτρήσεις στον ελλαδικό χώρο (κυρίως από το έργο της Εγνατίας Οδού) με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα για την περατότητα των ανωτέρω σχηματισμών. Έπειτα, βάσει των χαρακτηριστικών τιμών που εξάχθηκαν σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας πρανών, ώστε να ληφθούν τα αποτελέσματα της επίδρασης της υδροπερατότητας στην ευστάθεια των πρανών.

1.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εργασία ακολουθεί μια πορεία που έχει ως αφετηρία την επισήμανση στοιχείων θεωρίας και έπειτα βάσει αυτών καταλήγει σε συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων των αναλύσεων των δοκιμών της υδροπερατότητας των σχηματισμών και της ευστάθειας των πρανών.

Σε πρώτο στάδιο, αξιολογήθηκε η βιβλιογραφία, ελληνική και ξενόγλωσση, από την οποία συλλέχθηκαν χρήσιμα στοιχεία επί εννοιών της Τεχνικής Γεωλογίας που σχετίζονται με τα ζητούμενα της εργασίας.

Στο πρώτο κομμάτι του σταδίου αυτού, τα στοιχεία αυτά αφορούν: α) την υδροπερατότητα, β) τη βαθμονόμηση της βραχομάζας, γ) την τεκτονική και δ) την αποσάθρωση. Εισάγεται η έννοια του συντελεστή υδροπερατότητας k και από τι αυτός εξαρτάται, καθώς επίσης και ταξινόμηση εδαφών και πετρωμάτων μέσω αυτού. Κατόπιν, γίνεται αναφορά στους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να τον προσδιορίσουμε. Αυτό γίνεται εργαστηριακά, είτε με τη δοκιμή σταθερού φορτίου είτε με τη δοκιμή μεταβλητού φορτίου ενώ στο πεδίο γίνεται μέσω των δοκιμών εισπιέσεων, Lefranc, Maag, Lugeon. Στη συνέχεια εισάγονται οι παράμετροι του άρρηκτου πετρώματος μέσω των εννοιών της αντοχής (σ_c) και του μέτρου ελαστικότητας (E_i). Υπεισέρχεται η έννοια του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας (RQD) και πώς σχετίζεται η περατότητα με αυτόν. Εν συνεχεία, αναφέρονται τα

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

συνηθέστερα συστήματα βαθμονόμησης της βραχομάζας (Q, RMR, GSI). Ακολουθεί η έννοια των ασυνεχειών και τι αυτές αντιπροσωπεύουν και πώς μέσω αυτών υποβαθμίζονται η μηχανική και η υδραυλική συμπεριφορά των εδαφών. Επισημαίνεται η σημασία του κλίματος και πώς οδηγείται ένα πέτρωμα σε αποσάθρωση και η ταξινόμηση αυτού με βάση το βαθμό αποσαθρώσεώς του. Η επισκόπηση αυτών των χαρακτηριστικών-παραμέτρων κρίθηκε χρήσιμη για την αξιολόγηση της διακύμανσης της περατότητας με το βάθος ανά γεωλογικό σχηματισμό.

Στο δεύτερο κομμάτι του σταδίου αυτού, τα στοιχεία αφορούν: α) τους γεωκινδύνους και τις κατολισθήσεις και β) την ευστάθεια των πρηνών. Εισάγεται η έννοια της κατολίσθησης και γίνεται αναφορά στις ποικίλες αιτίες πρόκλησης αυτών(σεισμοί, βροχοπτώσεις, κ.λπ.) και τους ποικίλους τύπους κατολισθήσεων (κατάπτωση, ανατροπή, κ.λπ.). Στη συνέχεια εισάγεται η έννοια του πρηνούς και παρουσιάζονται αιτίες πρόκλησης αστοχίας σε αυτό (επιβολή εξωτερικών φορτίσεων, σεισμός, διάβρωση του πρηνούς, κ.λπ.). Γίνεται αναφορά σε μέτρα προστασίας και σταθεροποίησης αυτών (τοιχοί αντιστήριξης, έργα αποστράγγισης, κ.λπ.). Εν συνεχεία, γίνεται μια μικρή ιστορική αναδρομή σε όλους τους ερευνητές που προσπάθησαν να δώσουν λύσεις στην ανάλυση της ευστάθειας (Rankine, Coulomb, Fellenius, Bishop, κ.λπ.). Εισάγεται η έννοια της διατμητικής αντοχής του εδάφους η οποία εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής και τη συνοχή και πώς η διατμητική αντοχή του εδάφους μπορεί να μεταβληθεί υπό την επίδραση δυνάμεων βαρύτητας, νερού και σεισμικών φορτίσεων και πώς αυτά μεταβάλλουν την ευστάθεια του πρηνούς. Για τους λόγους επίτευξης της ευστάθειας στα έργα είναι εύλογη η δημιουργία της έννοιας του συντελεστή ασφαλείας. Τέλος, παρατηρείται πώς η επίδραση του νερού και η κλιματική αλλαγή επηρεάζουν την ευστάθεια των πρηνών και οδηγούν σε κατολισθήσεις. Η κλιματική αλλαγή, μέσω μεταβολών στον κύκλο του νερού, επιφέρει έντονες βροχοπτώσεις και μεγάλες ξηρές περιόδους. Στην περίπτωση των έντονων βροχοπτώσεων, έχουμε διάβρωση του εδάφους, καθώς ο μεγάλος όγκος νερού συμπαρασύρει μαζί του μεγάλες ποσότητες εδαφικών υλικών, με άμεση συνέπεια την αλλαγή των γεωμετρικών και όχι μόνο χαρακτηριστικών των πρηνών της πληγείσας περιοχής και έμμεση την ενδεχόμενη αύξηση της πίεσης στους πόρους του εδάφους-βραχομάζας με αποτέλεσμα την δημιουργία αστοχιών.

Στο τρίτο κομμάτι του σταδίου αυτού, συλλέχθηκαν πιο συγκεκριμένα στοιχεία για το γεωλογικό περιβάλλον και το υδρογεωλογικό καθεστώς των βραχωδών σχηματισμών του φλύσχη, της μολάσσας, του γνευσίου και του οφιόλιθου. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε ποιες περιοχές συναντάται ο εκάστοτε σχηματισμός στον ελλαδικό χώρο. Για το γεωλογικό περιβάλλον κάθε σχηματισμού γίνεται αναφορά στο πλήθος των λιθολογιών-πετρολογικών συνδυασμών. Όσον αφορά το υδρογεωλογικό καθεστώς κάθε σχηματισμού, δίνεται ένας γενικός ποιοτικός χαρακτηρισμός ως προς την περατότητα και που μπορεί ο σχηματισμός να εμφανίζει διαφορετικές τιμές.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Σε δεύτερο στάδιο, αξιοποιήθηκαν στοιχεία από επιτόπου δοκιμές περατότητας σε καθέναν από τους σχηματισμούς. Συνολικά αξιολογήθηκαν 1054 αποτελέσματα δοκιμών περατότητας στους προαναφερθέντες σχηματισμούς. Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων δοκιμών περατότητας στους τέσσερεις βραχώδεις σχηματισμούς, προέκυψαν διαγράμματα και αντίστοιχα συμπεράσματα σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης της περατότητας ανά σχηματισμό, ώστε να προκύψει η επικρατούσα περατότητα του κάθε σχηματισμού. Προκύπτει λοιπόν η μέση τιμή της περατότητας κάθε σχηματισμού, και αντίστοιχος σχολιασμός σύμφωνα με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, ανά λιθολογικό τύπο. Τέλος, έγινε συσχέτιση της περατότητας κάθε σχηματισμού με το βάθος και προέκυψαν αντίστοιχα συμπεράσματα.

Σε τρίτο στάδιο, έγιναν αναλύσεις ευστάθειας τεχνητών πρυνών υπό την επίδραση της περατότητας των σχηματισμών. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των πρυνών, ελέγχθηκε η περατότητα. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των αναλύσεων αυτών, γίνεται έλεγχος της επίδρασης που θα έχει ο συντελεστής υδατοπερατότητας (k) των σχηματισμών αυτών, στην ευστάθεια του ορύγματος, καθώς χαμηλές τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας (k), ισοδυναμούν με χαμηλή περατότητα του σχηματισμού και συνεπώς «εγκλωβισμό» των υπόγειων υδάτων εντός αυτού, που θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της πίεσης πόρων και μείωση της διατμητικής αντοχής του σχηματισμού. Τέλος, γίνεται παρουσίαση των βασικών παραδοχών που λήφθηκαν υπόψιν στις αναλύσεις, αλλά και των επιτευχθέντων συντελεστών ασφαλείας (SF) της ευστάθειας των πρυνών για κάθε περίπτωση. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Slide 2 της εταιρείας Rocscience.

2. ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

2.1. ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (PERMEABILITY)

Υδροπερατότητα ή διαπερατότητα (permeability) του εδάφους είναι η ικανότητα που έχει ένας γεωλογικός σχηματισμός (έδαφος ή πέτρωμα) να επιτρέπει τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού διαμέσου αυτού. Η μελέτη της ροής του νερού διαμέσου του εδάφους είναι σημαντική και αναγκαία για τον υπολογισμό του μεγέθους των διαρροών κάτω από διαφορετικές υδραυλικές συνθήκες (π.χ. φράγματα), την εξέταση προβλημάτων που αφορούν την άντλησή του καθώς επίσης και την επίδρασή του στην ευστάθεια πρανών, επιχωμάτων κ.λπ..

Από το νόμο του *Darcy* είναι γνωστό ότι ισχύει: $v=k \times i$ που περιγράφει την ταχύτητα (φαινόμενη) εκφόρτισης (ροής) του νερού (v) σε κορεσμένα εδάφη. Για γραμμικές (σε χάλικες και χονδρόκοκκες άμμους οι συνθήκες ροής μπορεί να είναι και τυρβώδεις (turbulent)) συνθήκες το k ορίζεται σαν συντελεστής διαπερατότητας ή υδροπερατότητας (coefficient of permeability) ή αλλιώς υδραυλική αγωγιμότητα και i είναι η υδραυλική κλίση. Το k έχει μονάδες ταχύτητας (π.χ. m/sec) και αποτελεί φυσική ιδιότητα του εδάφους η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- ✓ το ιξώδες του ρευστού,
- ✓ την κατανομή του μεγέθους των κόκκων και των πόρων,
- ✓ το λόγο κενών,
- ✓ την τραχύτητα των τεμαχιδίων που αποτελούν το έδαφος,
- ✓ το βαθμό κορεσμού του εδάφους.

Ο προσδιορισμός του συντελεστή υδροπερατότητας γίνεται εργαστηριακά σε δείγματα εδάφους, καθώς επίσης και με επί τόπου δοκιμές υδροπερατότητας κατά την εκτέλεση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, δοκιμές τύπου *Maag*, *Lefranc* και *Lugeon*, ή ακόμα με την εκτέλεση αντλήσεων από υδρογεωτρήσεις. Μερικές τιμές του k για τα διάφορα εδάφη καθώς επίσης και μια ταξινόμησή τους από πλευρά υδροπερατότητας δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Τυπικές τιμές συντελεστών υδροπερατότητας (TERZAGHI and PECK, 1967).

Κατηγορία	k (cm/sec)	Τύπος εδάφους
Υψηλή	$>10^{-1}$	Καθαρά χαλίκια, αμμώδη χαλίκια
Μέση	$10^{-1}-10^{-3}$	Καθαρές άμμοι, αμμοχάλικα
Χαμηλή	$10^{-3}-10^{-5}$	Λεπτόκοκκες άμμοι, αμμώδεις ιλύες, ιλύες
Πολύ χαμηλή	$10^{-5}-10^{-7}$	Ιλυώδεις άργιλοι, αργιλοϊλύες
Πρακτικά αδιαπέρατο	$<10^{-7}$	Άργιλοι

Η πρωτογενής υδροπερατότητα δίνει πληροφορίες για την πιθανή επικοινωνία των πόρων και των μικρορωγμών του ακέραιου πετρώματος μεταξύ τους και μπορεί να έχει πραγματική σημασία για ειδικά τεχνικά έργα, όπως είναι π.χ. η άντληση ή αποθήκευση νερού και υγρών καυσίμων σε πορώδεις σχηματισμούς και υπόγεια έγκοιλα ή θαλάμους, η διάθεση υγρών αποβλήτων, η στεγανότητα ενός ταμειυτήρα ή η εκτίμηση της εισροής νερού σε μία σήραγγα. Είναι γνωστό ότι η υδροπερατότητα της βραχομάζας εξαρτάται κυρίως από την ύπαρξη ασυνεχειών ενώ αυτή που μετρείται στο ακέραιο πέτρωμα είναι η πρωτογενής υδροπερατότητα η οποία είναι εξαιρετικά χαμηλή. Ο συντελεστής υδροπερατότητας, k , έχει διαστάσεις ταχύτητας (cm/sec) και υπολογίζεται από το νόμο του Darcy με βάση τη σχέση:

$$q_x = k dh/dx A$$

όπου q_x είναι η παροχή κατά τη διεύθυνση x με διαστάσεις (L^3T^{-1}), dh/dx είναι η υδραυλική κλίση κατά τη διεύθυνση x και A η επιφάνεια διατομής κάθετα προς τη διεύθυνση x με διαστάσεις (L^2).

Οι εργαστηριακές δοκιμές είναι οι τυπικές δοκιμές σταθερού και μεταβλητού φορτίου που αναφέρονται και για τα εδάφη (ΚΟΥΚΙΣ, 1978). Τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα υδροπερατότητας λαμβάνονται προφανώς από επιτόπου δοκιμές υδροπερατότητας.

Στον Πίνακα 2 δίνονται μερικές τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας, k , για χαρακτηριστικά πετρώματα.

Πίνακας 2 Εργαστηριακός συντελεστής υδροπερατότητας, k , πετρωμάτων.

Πέτρωμα	k (cm/sec)
Ψαμμίτης	$3 \times 10^{-3} - 8 \times 10^{-8}$
Αργιλικός σχιστόλιθος	$10^{-9} - 5 \times 10^{-13}$
Ασβεστόλιθος	$10^{-5} - 10^{-13}$
Δολομίτης	$10^{-5} - 10^{-13}$
Βασάλτης	10^{-12}
Γρανίτης	$10^{-7} - 10^{-11}$
Σχιστόλιθος	10^{-8}

2.1.1. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (COEFFICIENT OF PERMEABILITY)

Προσδιορίζεται εργαστηριακά με τις δοκιμές σταθερού φορτίου και μεταβλητού φορτίου.

2.1.1.1. ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Η διαφορά φορτίου, h , μεταξύ εισόδου και εξόδου για το απεσταγμένο νερό παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Αφού επιτευχθεί σταθερή ταχύτητα ροής, συλλέγεται η ποσότητα (Q) του νερού γνωστής χρονικής περιόδου (t) σε βαθμονομημένη φιάλη.

Η δοκιμή επαναλαμβάνεται αυξάνοντας το σταθερό υδροδυναμικό ύψος κατά 0.5 cm, ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η περιοχή της στρωτής ροής, όπου η ταχύτητα, V ($V=Q/At$), είναι ανάλογη της υδραυλικής κλίσης, i ($i=h/L$).

Έτσι προσδιορίζεται το k ως εξής:

$$Q=AVt=A(ki)t=A(kh/L)t$$

όπου,

- ✓ Q : όγκος του συλλεγμένου νερού,
- ✓ A : επιφάνεια κάθετης διατομής του δείγματος,
- ✓ t : διάρκεια συλλογής του νερού.

Επίσης,

$$i=h/L$$

όπου,

- ✓ L : μήκος δοκιμίου,

οπότε:

$$Q=A(kh/L)t \text{ και } k=QL/Aht$$

Η δοκιμή αυτή είναι πιο κατάλληλη για χονδρόκοκκα εδάφη που έχουν υψηλούς συντελεστές υδροπερατότητας, προϋπόθεση δε της δοκιμής θεωρείται ο κορεσμός του δοκιμίου που μπορεί να είναι αδιατάρακτο ή να προέρχεται από συμπύκνωση. Μετά το τέλος της διαδικασίας το δοκίμιο στραγγίζεται και εξετάζεται σε ποιο βαθμό ήταν ομοιογενές και ισότροπο. Τυχόν διαδοχικές άσπρες και σκουρόχρωμες ραβδώσεις είναι ένδειξη συγκέντρωσης λεπτόκοκκων υλικών.

2.1.1.2. ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το υδροδυναμικό ύψος του νερού μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το νερό (απεσταγμένο) διαμέσου ενός σωλήνα ρέει στο έδαφος και καταγράφεται το αρχικό φορτίο h_1 σε χρόνο $t=0$. Στη συνέχεια αφήνεται το νερό να διατρέξει το δείγμα και καταγράφεται η διαφορά φορτίου h_2 σε χρόνο t . Ο μανομετρικός σωλήνας ξαναγεμίζεται μέχρι τη στάθμη h_1 και η δοκιμή επαναλαμβάνεται ακόμη 2 ή 3 φορές.

Ο συντελεστής υδροπερατότητας (k) υπολογίζεται από τη σχέση:

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

$$k(\text{cm/sec}) = 2.303(aL/At) \text{Log}_{10}(h_1/h_2)$$

όπου το 2.303 είναι ο συντελεστής μετασχηματισμού του \log_e σε \log_{10} .

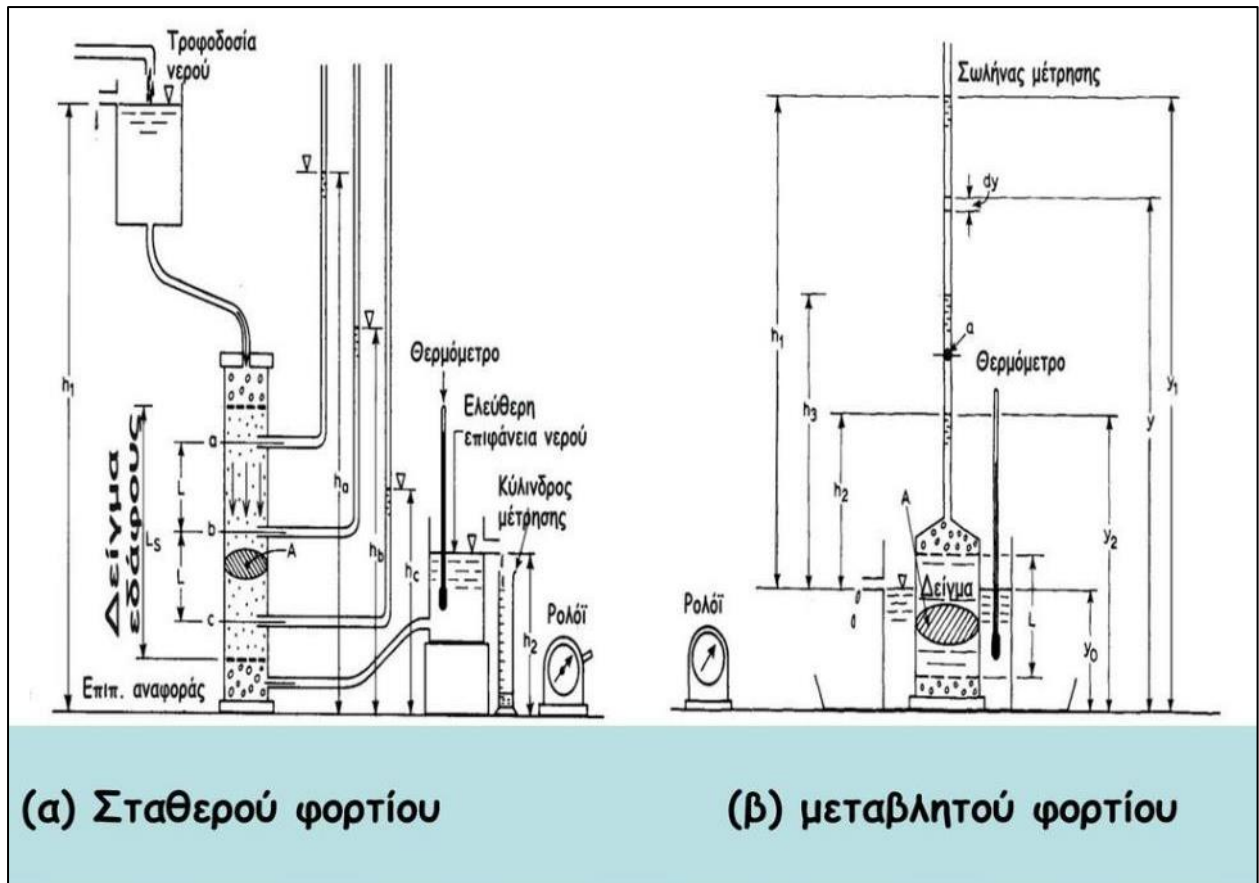
Τα στοιχεία που μετριοούνται και καταγράφονται κατά τη δοκιμή είναι:

- ✓ L: μήκος του δοκιμίου, cm,
- ✓ A: διατομή του δοκιμίου, cm^2 ,
- ✓ a: διατομή του μανομετρικού σωλήνα, cm^2 ,
- ✓ h_1 : αρχική στάθμη του νερού στο μανομετρικό σωλήνα,
- ✓ h_2 : στάθμη του νερού στο μανομετρικό σωλήνα στο τέλος μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου t,
- ✓ t: χρονική περίοδος πτώσης στάθμης από h_1 σε h_2 σε sec.

Η δοκιμή αυτή είναι πιο κατάλληλη κυρίως για αργιλικά ή ιλυώδη εδάφη και λεπτόκοκκες άμμους με υδροπερατότητα k που κυμαίνεται μεταξύ 10^{-2} έως 10^{-8} cm/sec.

Τα δείγματα πρέπει να είναι κορεσμένα πριν την έναρξη της δοκιμής και σε αδιατάρακτη κατάσταση ή μετά από συμπύκνωση. Ο κορεσμός του δείγματος μπορεί να γίνει στη συσκευή πριν την έναρξη της δοκιμής με τη βοήθεια αντλίας κενού που απαερώνει τους πόρους του δοκιμίου και κορέννεται έτσι με νερό.

Στην Εικόνα 1 φαίνονται οι διατάξεις των δοκιμών σταθερού και μεταβλητού φορτίου.



Εικόνα 1: Δοκιμές υδροπερατότητας σταθερού και μεταβλητού φορτίου (DAS, 1990).

Σημειώνεται σχετικά ότι ο συντελεστής υδροπερατότητας μπορεί να προσδιοριστεί και κατά τη δοκιμή στερεοποίησης, πολλές δε εμπειρικές εξισώσεις προτάθηκαν στο παρελθόν, όπως αυτή του Hazen, για σχεδόν ομοιόμορφες άμμους:

$$k(\text{cm/sec}) = cD_{10}^2$$

όπου, D_{10} το ενεργό μέγεθος και $c=100$ όταν D_{10} σε mm ενώ $c=1$ όταν D_{10} σε cm.

Για αμμούχα εδάφη με αξιόλογο ποσοστό ιλύος και αργίλου το k αλλάζει σημαντικά και ο Casagrande πρότεινε την παρακάτω εξίσωση:

$$k = 1.4e^2 k_{0.85}$$

όπου,

- ✓ k : συντελεστής υδροπερατότητας για λόγο κενών e ,
- ✓ $k_{0.85}$: η αντίστοιχη τιμή για λόγο κενών 0.85.

Σε στρωσιγενείς σχηματισμούς η ισοδύναμη υδροπερατότητα για όλο το σχηματισμό προσδιορίζεται αφού ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς τα στρώματα, n , και η διεύθυνση ροής. Έτσι σε

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

σχηματισμό με οριζόντια επίπεδα στρώσης, όπου η ροή έχει επίσης οριζόντια διεύθυνση, το k δίνεται από την εξίσωση:

$$k_{H(eq)} = 1/H (k_{H1}H_1 + k_{H2}H_2 + k_{H3}H_3 + \dots + k_{Hn}H_n)$$

Για σειρά στρωμάτων όπου η ροή έχει κάθετη προς τη στρώση διεύθυνση, το k δίνεται από την εξίσωση:

$$k_{V(eq)} = H / (H_1/k_{V1} + H_2/k_{V2} + H_3/k_{V3} + \dots + H_n/k_{Vn})$$

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή υδροπερατότητας είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ιξώδες του νερού στις διάφορες θερμοκρασίες. Είναι πρακτικό να γίνεται η μετατροπή της τιμής του $k_{T^\circ C}$ σε $k_{20^\circ C}$ με βάση τον τύπο:

$$k_{20^\circ C} = n_T k_{T^\circ C} / n_{20^\circ C}$$

όπου,

n_T : το ιξώδες του νερού σε θερμοκρασία $T^\circ C$ και $20^\circ C$, αντίστοιχα.

2.1.1.3. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

2.1.1.3.1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στο σχεδιασμό και στη διαστασιολόγηση των τεχνικών έργων. Βασικής σημασίας είναι ο υπολογισμός της υδροπερατότητας του υπεδάφους, όπως αυτή εκφράζεται με το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, k , που υπολογίζεται με τις επιτόπου δοκιμές εισπιέσεων. Οι δοκιμές αυτές γίνονται κατά τη διάρκεια προχώρησης της δειγματοληπτικής γεώτρησης, όπου σε συγκεκριμένο απομονωμένο τμήμα της διοχετεύεται νερό και μετριέται, άμεσα ή έμμεσα, η ποσότητα νερού που απορροφάται από το έδαφος, σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεσή του.

Η γνώση της υδροπερατότητας έχει μεγάλη σημασία στις εφαρμογές και μελέτες στεγανότητας του υποβάθρου τεχνικών έργων (π.χ. φραγμάτων, ΧΥΤΑ), αποστραγγίσεων (π.χ. σηραγγών, κατολισθήσεων), κ.λπ.. Στις μελέτες και εφαρμογές εκμετάλλευσης υπόγειων νερών χρησιμοποιούνται κυρίως οι **δοκιμαστικές αντλήσεις**, οι οποίες είναι δοκιμές μεγαλύτερης ακρίβειας και περισσότερο αντιπροσωπευτικές καθόσον αναφέρονται σε μεγαλύτερη έκταση του υπεδάφους. Η χρησιμοποίηση των δοκιμαστικών αντλήσεων για γεωτεχνικούς σκοπούς δεν ενδείκνυται, λόγω του σχετικά υψηλού κόστους τους αλλά και της αδυναμίας εκτίμησης του k , τόσο κατά συγκεκριμένα βάθη όπως αυτό είναι συνήθως επιθυμητό, όσο και στην ακόρεστη ζώνη (πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα).

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Υπάρχουν οι παρακάτω τρεις κατηγορίες δοκιμών εισπιέσεων, ανάλογα με τις συνθήκες εκτέλεσής τους και κυρίως με τον τρόπο διοχέτευσης και μέτρησης του νερού που απορροφάται:

1. **Δοκιμές σταθερού φορτίου** (δοκιμή **Lefranc**-κατάσταση ισορροπίας), όπου μετριέται η ποσότητα νερού που διοχετεύεται στο υπέδαφος ώστε να διατηρείται σταθερή στάθμη πάνω από το τμήμα της γεώτρησης που γίνεται η δοκιμή.

2. **Δοκιμές μεταβλητού φορτίου** (δοκιμή **Maag**-κατάσταση μη ισορροπίας), όπου μετριέται ο χρόνος πτώσης της στάθμης του νερού που διοχετεύεται στο τμήμα της γεώτρησης που γίνεται η δοκιμή.

3. **Δοκιμές αποστολής νερού με πίεση** (δοκιμή **Lugeon**), όπου μετριέται η ποσότητα του νερού που διοχετεύεται σε απομονωμένο με παρέμβυσμα (racker) τμήμα της γεώτρησης, σε σχέση με την επιβαλλόμενη πίεση αποστολής του νερού.

2.1.1.3.2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΔΟΚΙΜΕΣ LEFRANC)

Οι δοκιμές αυτές είναι κατάλληλες κυρίως για ομοιογενή χαλαρά ή μέτριας συνεκτικότητας και μεγάλης υδροπερατότητας εδάφη, ενώ λιγότερο για ομοιογενή πετρώματα.

Όταν η διάτρηση της δειγματοληπτικής γεώτρησης φθάσει στο επιθυμητό βάθος, γίνεται εξαγωγή της διατρητικής στήλης και ανύψωση της εξωτερικής σωλήνωσης επένδυσης ώστε να δημιουργηθεί «θύλακας» (εισπιεζόμενο τμήμα). Το μήκος του «θύλακα» εξαρτάται κυρίως από το είδος του εδαφικού υλικού και κυμαίνεται από μηδενικό (όταν το εδαφικό υλικό είναι πολύ χαλαρό, οπότε έχουμε και κατάπτωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης) μέχρι περίπου 0.5 μέτρα ή και περισσότερο. Στην περίπτωση που έχουμε χαλαρά αμμώδη εδάφη γίνεται συνήθως πλήρωση του πυθμένα της γεώτρησης με χαλικόφιλτρο (χαλίκι 5-10mm) πριν από την ανύψωση του σωλήνα για τη δημιουργία του «θύλακα». Με τον τρόπο αυτό παρεμποδίζεται και η άνοδος της άμμου μέσα στον «θύλακα». Στην περίπτωση άλλων χαλαρών εδαφικών υλικών (αμμοχάλικων, αργιλωδών άμμων, κ.λπ.) χρησιμοποιούνται διάτρητοι εσωτερικοί σωλήνες ώστε να γίνεται δυνατή η δημιουργία του «θύλακα» ή ακόμα περιορίζεται το εισπιεζόμενο τμήμα μόνο στην κυκλική επιφάνεια του πυθμένα της γεώτρησης (δηλαδή δεν γίνεται ανύψωση της εξωτερικής σωλήνωσης).

Στη συνέχεια ρυθμίζεται η παροχή του νερού που διοχετεύεται στη γεώτρηση ώστε η στάθμη του μέσα στη σωλήνωση επένδυσης της γεώτρησης να είναι σταθερή. Συνήθως γίνεται πλήρωση της σωλήνωσης με νερό μέχρι το άνω άκρο της (χείλος), οπότε και διατηρείται εκεί η στάθμη σταθερή με ρύθμιση της παροχής. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται άμεση οπτική εικόνα από τον χειριστή σχετικά με τη διατήρηση της σταθερής στάθμης.

Η υδροπερατότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$k=Q/(Ch_c)$$

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

όπου,

- ✓ k : συντελεστής υδροπερατότητας,
- ✓ Q : παροχή νερού που διοχετεύεται ώστε να παραμένει σταθερή η στάθμη του,
- ✓ h_c : η σταθερή στάθμη νερού που επιβάλλεται και μετρείται από τη μέση του εισπιεζόμενου τμήματος,
- ✓ C : συντελεστής «θύλακα» που εξαρτάται από τη γεωμετρική μορφή του εισπιεζόμενου τμήματος. Οι πιο απλές και συνηθισμένες τιμές για τις διάφορες μορφές «θυλάκων» δίνονται στον Πίνακα 3.

Στην Εικόνα 2 δίνεται τυπική διάταξη της δοκιμής σταθερού φορτίου, ανάλογα με τη θέση του εισπιεζόμενου τμήματος σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα και στην περίπτωση που γίνεται πλήρωση της σωλήνωσης επένδυσης μέχρι το άνω άκρο της. Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι χαμηλότερα από το εισπιεζόμενο τμήμα ισχύει:

$$h_c = H_B + L/2 + u$$

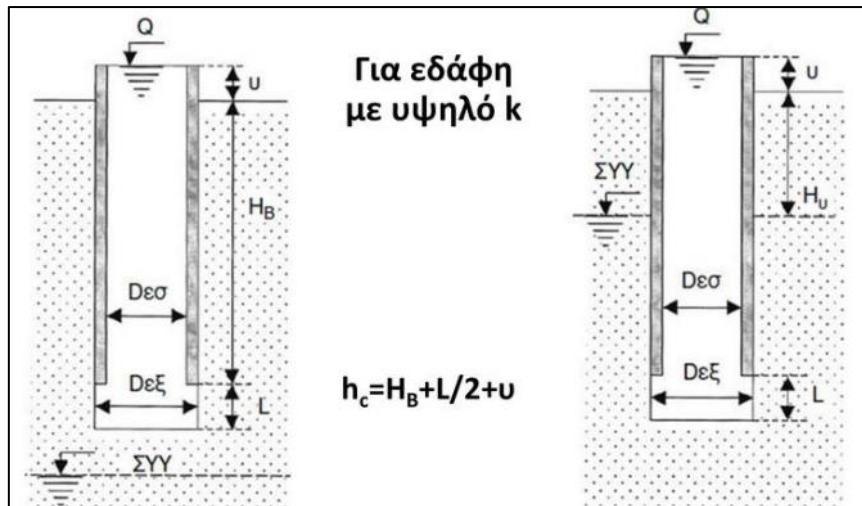
όπου,

- ✓ H_B : το βάθος της σωλήνωσης επένδυσης,
- ✓ $L/2$: το μισό του εισπιεζόμενου τμήματος,
- ✓ u : το μήκος του σωλήνα επένδυσης που «εξέχει» της επιφάνειας του εδάφους.

Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι υψηλότερα από το εισπιεζόμενο τμήμα ισχύει:

$$h_c = H_u + u$$

όπου H_u είναι το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 2: Τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου. (Πηγή: Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου).

2.1.1.3.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΔΟΚΙΜΕΣ MAAG)

Οι δοκιμές αυτές είναι κατάλληλες κυρίως για ομοιογενή χαλαρά ή μέτριας συνεκτικότητας και μικρότερης υδροπερατότητας εδάφη, ενώ λιγότερο για ομοιογενή πετρώματα.

Όταν η διάτρηση της δειγματοληπτικής γεώτρησης φθάσει στο επιθυμητό βάθος, ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία που περιγράφηκε στη δοκιμή σταθερού φορτίου με τη διαφορά ότι γίνεται πλήρωση με νερό της σωλήνωσης επένδυσης και στη συνέχεια μετريέται ο ρυθμός πτώσης της στάθμης με το χρόνο.

Η διαπερατότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$k = A/C(t_2 - t_1) \cdot \ln(h_1/h_2)$$

όπου,

- ✓ k: συντελεστής υδροπερατότητας,
- ✓ A: διατομή της στήλης νερού μέσα στη γεώτρηση ($=\pi D_{\epsilon\sigma}^2/4$) με $D_{\epsilon\sigma}$ την εσωτερική διάμετρο της σωλήνωσης,
- ✓ C: συντελεστής «θύλακα» που εξαρτάται από τη γεωμετρική μορφή του εισπιεζόμενου τμήματος,
- ✓ h_1 και h_2 : οι στάθμες του νερού σε χρονικές στιγμές t_1 και t_2 αντίστοιχα ενώ για τη μέτρησή τους ισχύουν περίπου τα ίδια με τον υπολογισμό της στάθμης που αναφέρθηκε στη δοκιμή σταθερού φορτίου.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Στην Εικόνα 3 φαίνεται διάταξη της δοκιμής μεταβλητού φορτίου, ανάλογα με τη θέση του εισπιεζόμενου τμήματος σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα. Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι χαμηλότερα από το εισπιεζόμενο τμήμα τότε:

$$h_1 = H_B + L/2 + u - \omega_1$$

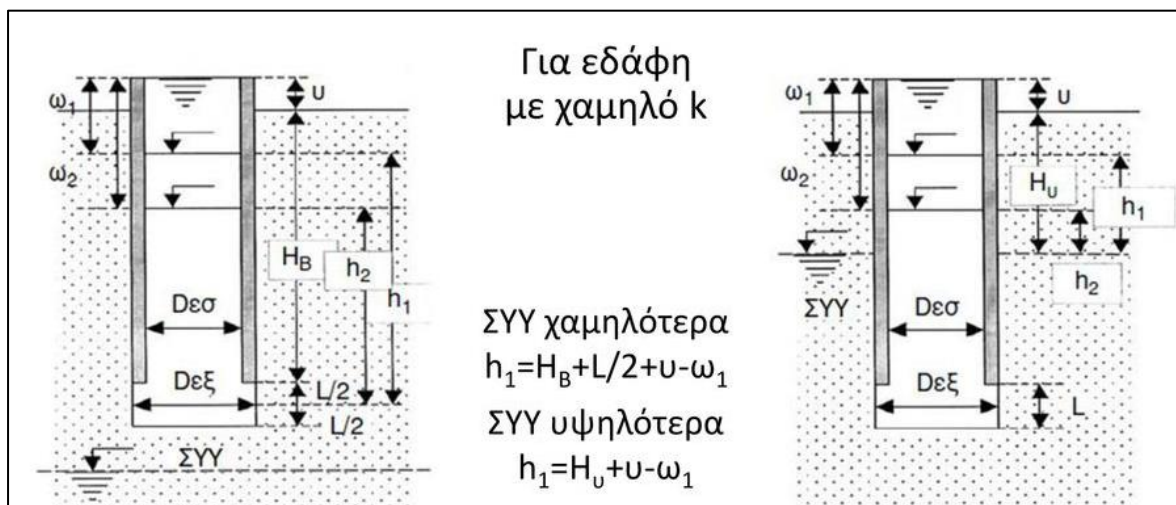
όπου,

- ✓ H_B : το βάθος της σωλήνωσης επένδυσης,
- ✓ $L/2$: το μισό του εισπιεζόμενου τμήματος,
- ✓ u : το μήκος του σωλήνα επένδυσης που «εξέχει» της επιφάνειας του εδάφους,
- ✓ ω : η μετρούμενη στάθμη του νερού από το άκρο του σωλήνα (ω_1 και ω_2 για h_1 και h_2 αντίστοιχα).

Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι υψηλότερα από το εισπιεζόμενο τμήμα, ισχύει:

$$h_1 = H_u + u - \omega_1$$

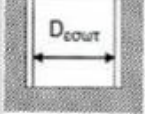
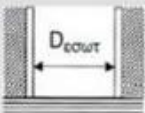


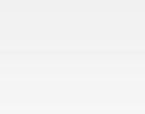
όπου, H_u είναι το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 3: Τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού φορτίου. (Πηγή: Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου).

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Πίνακας 3: Εκτίμηση του συντελεστή «θύλακα», C, για δοκιμές υδροπερατότητας σταθερού και μεταβλητού φορτίου σε εδάφη και βραχομάζες, για διαφορετικές μορφές του εισπιεζόμενου τμήματος (από HOEK and BRAY, 1977).

ΜΟΡΦΗ ΘΥΛΑΚΑ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΥΛΑΚΑ
(1) 	Το άκρο των σωλήνων επένδυσης σε επαφή με το έδαφος στον πυθμένα της γεώτρησης. Η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης είναι $D_{εσωτ}$ $C = 2.75 D_{εσωτ}$
(2) 	Το άκρο των σωλήνων επένδυσης στην επαφή αδιαπέρατου και διαπερατού στρώματος. Η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης είναι $D_{εσωτ}$ $C = 2.0 D_{εσωτ}$
(3) 	Το άκρο των σωλήνων επένδυσης σε απόσταση L από τον πυθμένα της γεώτρησης. Η διάμετρος της γεώτρησης είναι $D_{εξωτ}$ $C = \frac{2\pi L}{\ln(2L / D_{εξωτ})}$ για $L > 4 D_{εξωτ}$
(4) 	Το άκρο των σωλήνων επένδυσης σε απόσταση L από τον πυθμένα της γεώτρησης. Το έδαφος παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση οριζόντιας (k_h) και κατακόρυφης υδροπερατότητας (k_v). Η διάμετρος της γεώτρησης είναι $D_{εξωτ}$ Για τον υπολογισμό του k_h $C = \frac{2\pi L}{\ln(2Lm / D_{εξωτ})}$ $m = (k_h / k_v)^{1/2}$ για $L > 4 D_{εξωτ}$ Ο λόγος k_h / k_v μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά με εργαστηριακές δοκιμές.
(5) 	Το άκρο των σωλήνων επένδυσης σε απόσταση L από τον πυθμένα της γεώτρησης. Το έδαφος μέχρι το άκρο των σωλήνων επένδυσης είναι πρακτικά αδιαπέρατο. Η διάμετρος της γεώτρησης είναι $D_{εξωτ}$ $C = \frac{2\pi L}{\ln(4L / D_{εξωτ})}$ για $L > 4 D_{εξωτ}$

Παρατηρήσεις

(Πηγή: Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου).

1. Η ακριβής μέτρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (H_u) είναι απαραίτητη και δεν πρέπει να γίνεται σύγκριση αυτής με τη στάθμη των νερών της γεώτρησης.
2. Η πιο αντιπροσωπευτική και αξιόπιστη μορφή «θύλακα» είναι του τύπου (3) στον Πίνακα 3, ενώ οι διαστάσεις του θα πρέπει να είναι μικρές σε σχέση με το πάχος του εδαφικού στρώματος μέσα στον οποίο βρίσκεται. Συνήθως το μήκος του (L) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.5 μέτρα. Λόγω της δυσκολίας συγκράτησης των τοιχωμάτων του εδάφους πολύ συχνή είναι η μορφή «θύλακα» τύπου (1), η οποία είναι λιγότερο ικανοποιητική από πλευρά ακρίβειας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση αυτή η ροή του νερού ελέγχεται κυρίως από την κατακόρυφη υδροπερατότητα του υπεδάφους που είναι γενικά μικρότερη της οριζόντιας.

3. Πριν την εκτέλεση των δοκιμών στο συγκεκριμένο βάθος, απαιτούνται συνθήκες κορεσμού στο έδαφος που περιβάλλει το «θύλακα», δηλαδή διοχέτευση νερού για κάποιο χρονικό διάστημα πριν από την έναρξη της δοκιμής. Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος στην περίπτωση που η δοκιμή γίνεται στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους (πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα).
4. Η ταξινόμηση των εδαφών με βάση την υδροπερατότητά τους δίνεται στον Πίνακα 1.

Παρατηρήσεις στην εκτέλεση και αξιολόγηση των δοκιμών Lefranc και Maag

(Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).

1. Αν ο «θύλακας» βρίσκεται κοντά σε υδρογεωλογικό όριο, ο συντελεστής «θύλακα» διορθώνεται σε $1/C'=(1/C)+(1/8\pi\zeta_1)$ ή $1/C'=(1/C)-(1/8\pi\zeta_2)$, με ζ_1 και ζ_2 , τις αποστάσεις του υδροφόρου ορίζοντα, αντιστοίχως.
2. Δεν πρέπει να εφαρμόζονται μεγάλα υδραυλικά φορτία, ιδιαίτερα σε σχηματισμούς μεγάλης περατότητας, για να μην αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες, πέραν των ορίων ισχύος του νόμου Darcy.
3. Πριν από την εκτέλεση της δοκιμής πρέπει να ελέγχεται η στάθμη του νερού μέσα στη γεώτρηση και να μη συγχέεται με το νερό διατρήσεως. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να αμφισβητηθεί, αναλόγως της θέσης του «θύλακα» και την περατότητα του υπό δοκιμασία εδάφους. Αφού η δοκιμή επηρεάζει, έτσι κι αλλιώς, ένα μικρό χώρο γύρω από το «θύλακα», η παρουσία του νερού διατρήσεως έχει ως αποτέλεσμα ένα υδροστατικό αρχικό φορτίο («θύλακας» στην ακόρεστη ζώνη) ή ένα πρόσθετο φορτίο («θύλακας» στην κορεσμένη ζώνη). Η εκτέλεση των δοκιμών αυτών βασίζεται στη θεώρηση ενός νέου, πρόσθετου υδραυλικού φορτίου και, από την άποψη αυτή, το παραμένον, προσωρινώς, νερό διατρήσεως δεν αλλοιώνει, πρακτικώς, το αποτέλεσμα της δοκιμής.
4. Για κάθε εισπνεζόμενο τμήμα πρέπει να εκτελούνται τρεις, τουλάχιστον, δοκιμές, με διαφορετικά « h_c » ή « h_1 » και « h_2 » και ο έλεγχος να γίνεται με βάση διαγράμματα h_c-Q (Lefranc) ή $\ln(h/h_0)-t$ (Maag). Αν τα αποτελέσματα του ελέγχου δεν δίνουν γραμμική συσχέτιση, τότε (με την προϋπόθεση σωστής εκτελέσεως της δοκιμής) θα πρέπει να αναζητηθούν σφάλματα από απώλειες φορτίου ή μη γραμμική ροή.
5. Πρέπει να σημειωθεί, ιδιαίτερα στην περίπτωση των ανισότροπων εδαφών, ότι η δοκιμή ελέγχεται περισσότερο από την οριζόντια συνιστώσα της περατότητας και λιγότερο από την κατακόρυφη, όπως συμβαίνει και στη μη εξαναγκασμένη ροή (ροή λόγω βαρύτητας). Αλλά και στα ισότροπα εδάφη, η ακτίνα επιδράσεως της δοκιμής, γύρω από το «θύλακα», είναι μικρή, όπως φαίνεται και στο ηλεκτρικό ανάλογο του Schneebeli, στο οποίο το έδαφος, έξω από την

- ισοδυναμική καμπύλη του 10% δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της δοκιμής (οι ισοδυναμικές καμπύλες χαραχτήκαν για διάφορους λόγους L/D).
6. Η αποσυμπίεση του πυθμένα του «θύλακα», στην καλύτερη περίπτωση, έχει ως αποτέλεσμα μια πλασματική αύξηση της περατότητας και στη χειρότερη, μπορεί να κλείσει το «θύλακα» εντελώς. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται, είτε με μηδενικό L (σωλήνωση μέχρι τον πυθμένα), οπότε η απορρόφηση γίνεται αποκλειστικώς από τον πυθμένα, εκφράζοντας την κατακόρυφη περατότητα του εδάφους, είτε με την τοποθέτηση χονδρόκοκκου χαλικόφιλτρου (με μεγάλη περατότητα), που επιτρέπει τη διακίνηση του απορροφούμενου νερού στο έδαφος και που, με το βάρος του, εμποδίζει την αποσυμπίεση των τοιχωμάτων και την άνοδο του πυθμένα (ενίοτε από υδρογεωλογικά αίτια), είτε και με τα δύο μαζί.
 7. Σφάλμα σημειώνεται, πολλές φορές στην ακόρεστη ζώνη, σε σχέση με το χρόνο που χρειάζεται για να κορεστεί το έδαφος, πριν από την εκτέλεση της δοκιμής (ενισχυτικό της αμφισβητήσεως της παρατηρήσεως 3).
 8. Αν εμφανίζεται σοβαρό πρόβλημα ανόδου άμμου στον πυθμένα, αντιμετωπίζεται με το χαλικόφιλτρο, όπως προηγουμένως, ή και με ειδικές διατάξεις, όπως είναι τα «manchon Lefranc». Αν τα μέτρα δεν αποδώσουν ή δεν διατίθεται ο κατάλληλος εξοπλισμός στο εργοτάξιο, τότε, τα αποτελέσματα της δοκιμής πρέπει να διορθώνονται με βάση προκατασκευασμένα πρότυπα νομογράμματα, όπως αυτό της εταιρείας Soletanche. Πρέπει να σημειωθεί ότι μεγάλο μέρος στη διατύπωση της θεωρητικής αναλύσεως και της πρακτικής εφαρμογής των δοκιμών εισπιάσεων οφείλεται στα ερευνητικά εργαστήρια ιδιωτικών μελετητικών και κατασκευαστικών εταιρειών.
 9. Σε περίπτωση αρτεσιανισμού, η δοκιμή Lefranc πραγματοποιείται με αντλία, ενώ χρησιμοποιείται εξισωτήρας αρτεσιανισμού στην κεφαλή της γεωτρήσεως (επέκταση της σωληνώσεως της γεωτρήσεως προς τα πάνω και μέχρι να καλυφθεί το ύψος της αρτεσιανής στήλης). Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται και για την εκτέλεση της δοκιμής Maag στις ίδιες συνθήκες.
 10. Στην περίπτωση εξειδικευμένων ερευνών και έντονης οριζόντιας ανισοτροπίας, τα αποτελέσματα των δοκιμών μπορούν να ελεγχθούν και να τροποποιηθούν, ενδεχομένως, με παρατηρήσεις σε δορυφόρα πιεζόμετρα. Προϋπόθεση αυτής της εφαρμογής είναι οι, σχετικές, παρατεταμένες δοκιμές, αναλόγως με την απόσταση των πιεζόμετρων.
 11. Το νερό των δοκιμών πρέπει να είναι καθαρό για να μην εμφανίζονται φαινόμενα εμφράξεως στους πόρους του εδάφους.

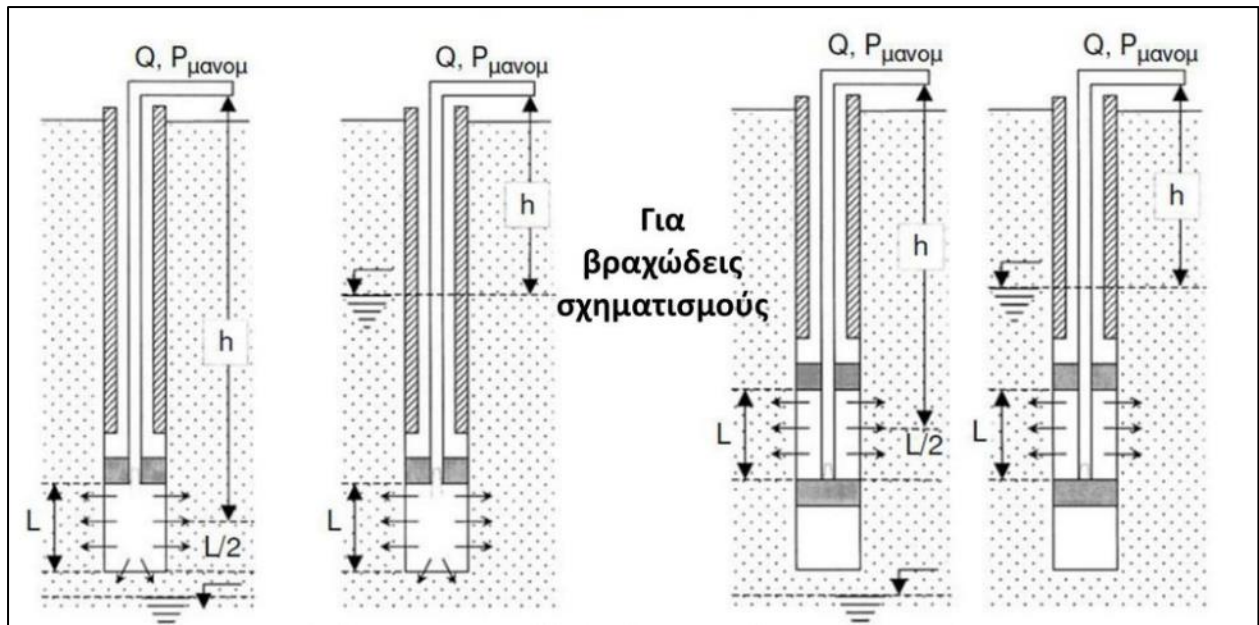
12. Οι δοκιμές πρέπει να εκτελούνται από εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό, με την άμεση επίβλεψη του Γεωλόγου μελετητή.

2.1.1.3.4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΠΙΕΣΗ (ΔΟΚΙΜΗ LUGEON)

Οι δοκιμές αυτές είναι κατάλληλες για πετρώματα και κυρίως για έντονα διακλασμένες βραχομάζες. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν σε σκληρά εδάφη με την προϋπόθεση ότι μπορούν να αντέξουν τις πιέσεις που εξασκούνται κατά τη δοκιμή.

Το εισπνεζόμενο τμήμα έχει μήκος 3 μέχρι 5 μέτρα από τον πυθμένα της γεώτρησης και απομονώνεται από πάνω με ειδικό παρέμβυσμα (racker), το οποίο διογκούμενο μηχανικά ή υδραυλικά, εφάπτεται στα τοιχώματα της γεώτρησης και δεν επιτρέπει διαφυγές του νερού προς τα πάνω κατά την εκτέλεση της δοκιμής (Εικόνα 4). Εναλλακτικά, μπορεί το εισπνεζόμενο τμήμα να περικλείεται μεταξύ δύο παρεμβυσμάτων στην περίπτωση που οι δοκιμές εκτελούνται σε επιθυμητά βάθη, μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληπτικής γεώτρησης. Εισπνέζεται νερό με τη χρήση αντλίας με μανόμετρο από την επιφάνεια και με υδρομετρητή μετριέται η παροχή του.

Η δοκιμή εκτελείται με εισπίεση νερού κατά βαθμίδες. Για κάθε σταθερή βαθμίδα πίεσης, μετριέται η ποσότητα νερού που απορροφάται σε χρονική διάρκεια 10min (όταν η απορρόφηση είναι μεγάλη ο χρόνος μέτρησης γίνεται 5min). Στη συνέχεια αυξάνεται η πίεση και μετριέται η νέα απορρόφηση των 10 ή 5min. Η δοκιμή συνεχίζεται και με άλλες πιέσεις με αύξουσα σειρά μέχρι μια μέγιστη τιμή πίεσης. Στη συνέχεια, ακολουθείται αντίστροφη σειρά επιβολής πιέσεων με φθίνουσα μορφή, δηλαδή έχουμε μια κυκλική εξέλιξη με βαθμίδες. Ο αριθμός των βαθμίδων της εφαρμοζόμενης πίεσης δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 3 μέχρι 4 για κάθε σειρά (αύξουσα-φθίνουσα) ενώ ο συνηθισμένος αριθμός είναι 5. Για κάθε βαθμίδα πίεσης μετριέται η απορρόφηση που αντιστοιχεί σε δεκάλεπτη διάρκεια και σε εισπνεζόμενο τμήμα μήκους L, σε λίτρα ανά εισπνεζόμενο μέτρο ανά λεπτό (lit/m.min). Επίσης υπολογίζεται και η τιμή της μονάδας lugeon (U.L) η οποία αποτελεί μία έκφραση της υδροπερατότητας του γεωλογικού σχηματισμού που αναφέρεται σε ανομοιογενή μέσα όπως είναι η ασυνεχής βραχομάζα. Το 1 U.L αντιπροσωπεύει απορρόφηση 1 lit/m.min σε επιβαλλόμενη πίεση 10kg/cm² όταν αυτή διαρκεί 10min.



Εικόνα 4: Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon με τη χρήση μονού και διπλού παρεμβύσματος (racker), πάνω και κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. (Πηγή: Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου).

Ο συντελεστής υδροπερατότητας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$k=Q/2\pi LP_{\text{πραγμ}} \cdot \ln(2L/D_{\text{εξωτ}})$$

όπου,

- ✓ k: συντελεστής υδροπερατότητας,
- ✓ Q: παροχή νερού που διοχετεύεται,
- ✓ L: το εισπιεζόμενο τμήμα,
- ✓ $D_{\text{εξωτ}}$: η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης επένδυσης,
- ✓ $P_{\text{πραγμ}}$: η πραγματική πίεση που εξασκείται στο βάθος εκτέλεσης της δοκιμής. Η πίεση αυτή εκφράζεται σαν υδραυλικό φορτίο, δηλαδή σε μέτρα στήλης νερού και γενικά ισχύει $h(m)=P_{\text{πραγμ}}(\text{kg/cm}^2) \times 10$.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής και στη συνέχεια την επεξεργασία των αποτελεσμάτων πρέπει να λαμβάνονται οπωσδήποτε υπόψη τα παρακάτω:

1. Η μέγιστη πίεση (P) που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή εξαρτάται από τις συνθήκες υδραυλικής πίεσης που θα επικρατήσουν στο υπεδάφος κατά την κατασκευή και λειτουργία του τεχνικού έργου και σπάνια υπερβαίνει τα 10kg/cm^2 . Συνήθως αυτή ορίζεται, για λόγους ασφαλείας (για να μην προκληθεί «υδραυλική θραύση» του υπεδάφους), ίση με τη γεωστατική τάση λόγω

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

υπερκεκλιμένων στο συγκεκριμένο βάθος της δοκιμής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα βέβαια τη δυσκολία εκτέλεσης δοκιμών κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

2. Η πίεση που χρησιμοποιείται στην ερμηνεία και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής πρέπει να είναι η πραγματική ($P_{\text{πραγμ}}$) και όχι αυτή που μετρείται στο μανόμετρο ($P_{\text{μανομ}}$). Γενικά ισχύει:

$$P_{\text{πραγμ}} = P_{\text{μανομ}} + P_{\text{υδροστ}} - P_{\text{απωλ}}$$

Η υδροστατική πίεση ($P_{\text{υδροστ}}$) αντιπροσωπεύει την πίεση της στήλης του νερού στη σωλήνωση, από το μανόμετρο μέχρι το εισπνεζόμενο τμήμα (συνήθως λαμβάνεται το μέσο του εισπνεζόμενου τμήματος). Στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας είναι υψηλότερα του εισπνεζόμενου τμήματος τότε η υδροστατική πίεση ($P_{\text{υδροστ}}$) αντιπροσωπεύει την πίεση της στήλης του νερού στη σωλήνωση, από το μανόμετρο μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, Δηλαδή, γενικά ισχύει:

$P_{\text{υδροστ}} = h/10$ (όπου h το ύψος μανομέτρου-μέσου εισπνεζόμενου τμήματος ή μανομέτρου-βάθους υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι υπόγειου υδροφόρου και για φαινόμενο βάρος νερού = 10 kN/m^3). Οι απώλειες φορτίου ($P_{\text{απωλ}}$) αντιπροσωπεύουν την απομείωση της πίεσης που εξασκείται από την αντλία και οφείλεται κυρίως στο είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται (τριβές σε σωλήνες, στενώματα διαμέτρων κ.α.). Αυτές αποκτούν πρακτικό ενδιαφέρον σε μεγάλα σχετικά βάθη και για μεγάλες παροχές απορρόφησης. Οι διορθώσεις από τις απώλειες φορτίου δίνονται συνήθως με τυποποιημένα νομογράμματα ή πίνακες, η χρήση των οποίων πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη. Συνήθως η σχεδίαση των καμπυλών απωλειών φορτίου γίνεται πειραματικά στο εργοτάξιο για το συγκεκριμένο εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί (π.χ. εκτέλεση εισπιέσεων στην επιφάνεια με μέτρηση των πιέσεων στα άκρα των σωλήνων για διάφορα μήκη αυτών). Οι απώλειες αυξάνονται γενικά με την παλαιότητα και τη φθορά του εξοπλισμού και κυρίως των σωληνώσεων, συνδέσμων κ.λπ.. Προσεγγιστικά, παρατηρείται αύξηση κατά 30% περίπου των απωλειών σε σχέση με τις απώλειες που ισχύουν για τους καινούργιους σωλήνες.

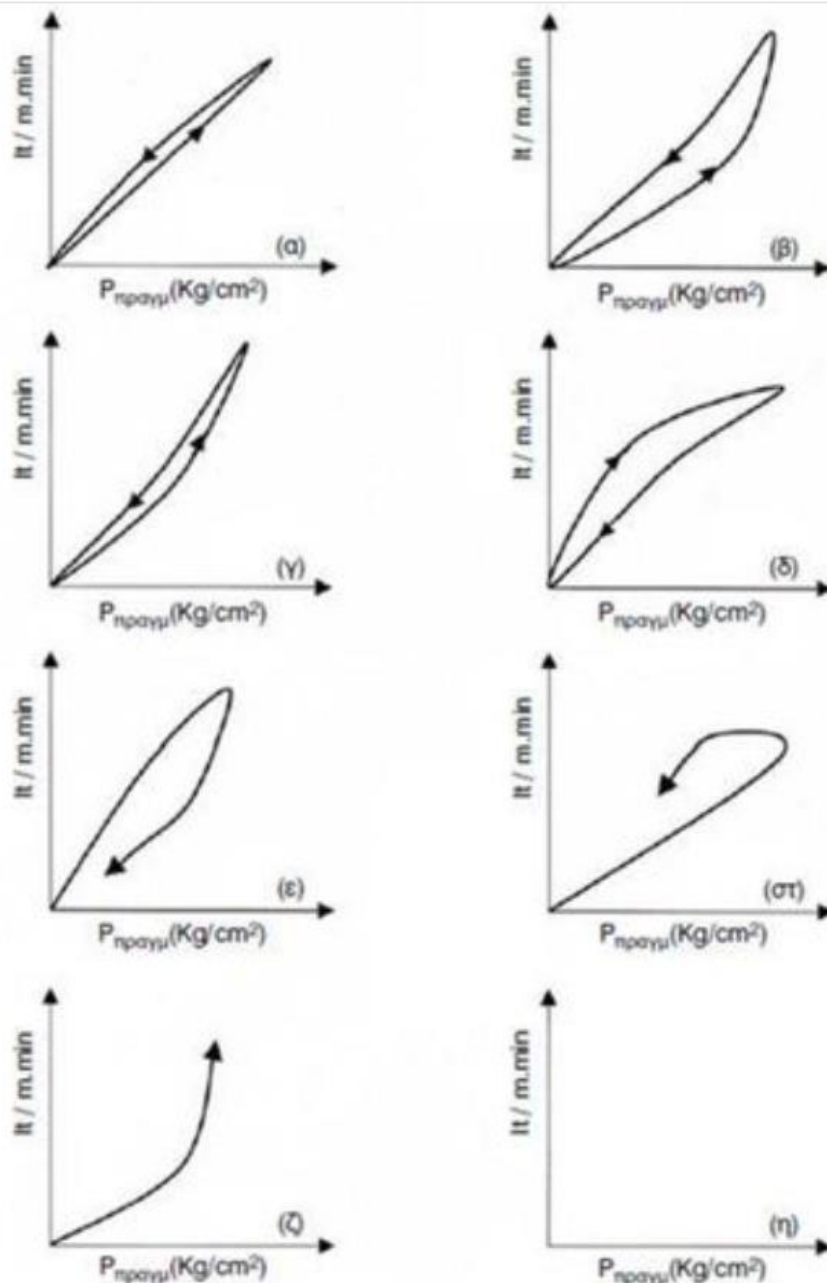
Πάντως, υπάρχουν ειδικά συστήματα μέτρησης της πίεσης του νερού που εξασκείται στο βάθος του εισπνεζόμενου τμήματος και με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται όλες οι σχετικές διορθώσεις.

3. Ο *LUGEON (1933)* στην τυποποιημένη δοκιμή που πρότεινε, καθόρισε την πίεση των 10bars (10 kg/cm^2 , 1000 kPa) με βάση την οποία ορίστηκε και η μονάδα lugeon (U.L). Στην πράξη όμως χρησιμοποιούνται αρκετά χαμηλότερες πιέσεις, οπότε και η μονάδα lugeon (U.L) για κάθε βαθμίδα πίεσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (από *A. HOULSBY, 1976*):

$$U. L = \text{ποσότητα νερού που απορροφάται (lt/m.min)} \times 10 \text{ (bars)} / P_{\text{πραγμ}} \text{ (bars)}$$

Η παραπάνω σχέση προϋποθέτει ότι έχουμε γραμμική ροή πράγμα που μπορεί να εκτιμηθεί από τα διαγράμματα πίεσης-απορρόφησης (Εικόνα 5). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι 1 U.L ισούται περίπου με $1-2 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ για διάμετρο γεώτρησης 5 μέχρι 10cm.

4. Σε κάθε δοκιμή, σχεδιάζεται το διάγραμμα πραγματικής πίεσης-απορρόφησης από την επεξεργασία του οποίου μπορούν να εξαχθούν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα, τόσο για την υδραυλική συμπεριφορά του υπεδάφους όσο και για την αξιόπιστη εκτέλεση της δοκιμής. Μερικά ενδεικτικά παραδείγματα της σχέσης των απορροφήσεων στις αύξουσες-φθίνουσες πραγματικές πιέσεις, δίνονται στην Εικόνα 5 (από Π. ΜΑΡΙΝΟ, 1991): (α) Θεωρητική περίπτωση. Η αύξηση της παροχής είναι ανάλογη της αύξησης της πίεσης ενώ στον κλάδο με τις φθίνουσες πιέσεις οι τιμές απορρόφησης είναι ίδιες. Ροή γραμμική. (β) Καθαρισμός ρωγμών ή διαστολή (μη ελαστική) ρωγμών από την πίεση. Για το λόγο αυτό ο κλάδος με τις φθίνουσες πιέσεις παρουσιάζει μεγαλύτερες υδροπερατότητες. Εδώ, ενδιαφέρουν περισσότερο οι απορροφήσεις της καμπύλης επιστροφής. (γ) Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά ότι οι παραμορφώσεις (διαστολή) των ρωγμών είναι ελαστικές. (δ) Προοδευτικός κορεσμός του πετρώματος (συνήθως περιορισμένης έκτασης δίκτυο ρωγμών) ή πλήρωσή τους από φερτά υλικά. (ε) Γραμμική ροή στην αρχή και στη συνέχεια πλήρωση των ρωγμών σε υψηλές πιέσεις. (στ) Γραμμική ροή στην αρχή και στη συνέχεια απόφραξη ή διαστολή των ρωγμών σε υψηλές πιέσεις. (ζ) Απότομη αύξηση της απορρόφησης μετά από κάποια πίεση. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατές οι παρακάτω περιπτώσεις: «υδραυλική θραύση» του πετρώματος, απόφραξη κοντινών ρωγμών με αποτέλεσμα την επικοινωνία με δίκτυο μεγάλης υδροπερατότητας, ή τέλος «διαρροές» από τα παρεμβύσματα λόγω μη καλής απομόνωσής τους, οπότε και η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί.



Εικόνα 5: Διαγράμματα επιβαλλόμενης πίεσης-απορρόφησης (Π.ΜΑΡΙΝΟΣ, 1991).

Παρατηρήσεις στην εκτέλεση και αξιολόγηση της δοκιμής Lugeon

1. Η πίεση που χρησιμοποιείται σε κάθε φάση αξιολόγησης της δοκιμής είναι η πραγματική.
 - ✓ Αυτό, γιατί εκείνο που έχει σημασία είναι το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο που εφαρμόζεται και όχι φορτίο που, το δοκιμαζόμενο τμήμα, δεχόταν πριν λόγω του υδροφόρου ορίζοντα.
 - ✓ Αν η όχι σωστή διάκριση της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα έχει σχετική επίδραση στην αξιοπιστία των δοκιμών Lefranc και Maag, ιδιαιτέρως στις μικρές πιέσεις, εδώ αποκτά

καθοριστική σημασία (πάλι στο πεδίο των χαμηλών πιέσεων και δοκιμών πολύ κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα) λόγω των μεγάλων πιέσεων της δοκιμής.

2. Η σωστή εκτέλεση της δοκιμής προϋποθέτει την επίτευξη μιας καταστάσεως ισορροπίας στην υπόγεια ροή. Στην αρχή της κάθε φάσης της δοκιμής, η ποσότητα που απορροφάται δε φτάνει αμέσως στην κατάσταση ισορροπίας. Η απορρόφηση αυξάνεται συστηματικώς μέχρι να φτάσει σε κάποιο μέγιστο, που προηγείται της καταστάσεως ισορροπίας. Η ταχύτητα της διαδικασίας αυτής εξαρτάται από τη φύση των ασυνεχειών του εισπιεζόμενου πετρώματος. Για να αποφεύγονται έλεγχοι απορροφήσεως, η συμβατική δεκάλεπτη δοκιμή πρέπει να θεωρείται από τη στιγμή της σταθεροποιήσεως της απορροφήσεως.
3. Τα εισπιεζόμενα τμήματα δεν πρέπει να έχουν μεγάλο μήκος (μεγαλύτερο από 3m), ιδιαιτέρως σε πετρώματα εντελώς ανομοιογενή και ανισότροπα, γιατί είναι δύσκολο να γίνει γνωστό σε ποια ζώνη του πετρώματος αναφέρονται τα αποτελέσματα της δοκιμής. Για λόγους ευνότητος, πρέπει κι εδώ να χρησιμοποιείται καθαρό νερό για την εισπίεση.
4. Συνηθισμένο σφάλμα της δοκιμής είναι η κακή απομόνωση από το racker ή η παράκαμψή του από κάποιο δίκτυο ασυνεχειών, με αποτέλεσμα ένα μέρος του νερού να επιστρέφει στη γεώτρηση, πάνω από το racker. Αυτό, ελέγχεται με τη στάθμη του νερού μέσα στη γεώτρηση και συνοδεύεται από πτώση της εφαρμοζόμενης πιέσεως. Αντιμετωπίζεται με αλλαγή ή μετατόπιση του racker ή και με τσιμεντενέσεις.
5. Αν, για οποιοδήποτε λόγο, δεν είναι δυνατή ή επιθυμητή η εφαρμογή πραγματικής πιέσεως 10kg/cm^2 , τότε στο διάγραμμα «πίεσεως-απορροφήσεως», δεν συνιστάται η προεκβολή της καμπύλης εξ αιτίας της ανώμαλης και, συνήθως, απρόβλεπτης συμπεριφοράς των πετρωμάτων σε συνθήκες αυξήσεως της πιέσεως, όπως γίνεται σαφές και στα διαγράμματα αναλύσεως της μορφής των καμπυλών, που έχουν, ήδη, αναφερθεί.
6. Τα φαινόμενα αποφράξεως, διαστολής ή και θραύσεως του πετρώματος πρέπει να εξετάζονται στο σύνολο της καμπύλης και να αιτιολογούνται. Ιδιαιτέρως, πρέπει να συνεκτιμάται η αναμενόμενη πίεση από την κατασκευή του έργου για να μην υπερεκτιμώνται οι μελλοντικές διαφυγές π.χ. στην περίπτωση που η αναμενόμενη πίεση είναι μικρότερη από τη μέγιστη πραγματική της δοκιμής και από την πίεση που προκάλεσε τέτοια φαινόμενα.
7. Σε αδιαπέρατους σχηματισμούς, μπορεί να σημειωθεί πρόσκαιρη απορρόφηση λόγω της ελαστικής τους παραμορφώσεως από την πίεση της δοκιμής π.χ. στις επαφές συμπαγούς ασβεστόλιθου και αργίλου, μέσα στις κοιλότητές του. Μετά το τέλος της δοκιμής, το νερό επιστρέφει στη γεώτρηση με μια διαδικασία αποσυμπίεσεως, ανάλογη με το μηχανισμό

εναποθηκεύσεως στους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες. Μια τέτοια επιστροφή νερού πρέπει, πάντοτε, να ελέγχεται.

8. Η, κάθε φορά, συγκεκριμένη απορρόφηση μπορεί να οφείλεται, είτε σε μια μεγάλη ασυνέχεια, είτε σε σύνολο πολλών μικρών. Αν η τεκτονική κατάσταση του πετρώματος δεν είναι επαρκώς γνωστή από τους πυρήνες της γεωτρήσεως, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μετά τη δοκιμή εισπίεσεως, δοκιμαστικές τσιμεντενέσεις για τον έλεγχο της ποσότητας του ενέμματος που θα απαιτηθεί (μικρή ποσότητα σε δίκτυο ασυνεχειών, μεγάλη σε εκτεταμένη μεγάλη ασυνέχεια). Επισημαίνεται, πάντως, ότι δεν είναι εύκολη η συσχέτιση ενέμματος και περατότητας σε μονάδες Lugeon, λόγω των μεγάλων διαφορών στις φυσικές ιδιότητες του νερού και των ενεμμάτων και λόγω της διαφοράς πίεσεως στην κάθε εφαρμογή (μεγαλύτερες πιέσεις στις τσιμεντενέσεις).
9. Σε συνθήκες γραμμικής ροής, η απορρόφηση από μια ρωγμή είναι ανάλογη της πίεσεως και του κύβου του εύρους της

$$Q = [\pi/6n \ln(R/r)] P \epsilon^3$$

με n , το ιζώδες του νερού, r , την ακτίνα της γεωτρήσεως και R , την απόσταση στο εσωτερικό της ασυνέχειας που η πίεση μηδενίζεται. Γίνεται φανερό ότι και μεγάλες αλλαγές στο λόγο R/r δεν επηρεάζουν την τάξη μεγέθους, αφού τα μεγέθη υπεισέρχονται με το λογάριθμό τους.

10. Η παραμόρφωση του πετρώματος από τις πιέσεις της δοκιμής μπορεί, γενικώς και κατά προσέγγιση, να εκφραστεί ως $\Delta \epsilon = \alpha(P/E)$, ανάλογη προς την πίεση και αντιστρόφως ανάλογη προς το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος, με $\Delta \epsilon$, την αύξηση του εύρους της ασυνέχειας. Η εξίσωση της παρατηρήσεως 9 γίνεται

$$Q = [\pi/6n \ln(R/r)] P [\epsilon_0 + (\alpha/E) P]^3$$

11. Η περατότητα που εκτιμάται επηρεάζεται από τον προσανατολισμό των ρωγμών του πετρώματος, σε σχέση με τη διεύθυνση της γεωτρήσεως. Σε περίπτωση μεγάλων σφαλμάτων, που οφείλονται σε συγκεκριμένες οικογένειες ασυνεχειών, πρέπει να διορθώνονται οι τιμές της περατότητας ή να εκτελούνται δοκιμές και σε κεκλιμένες γεωτρήσεις.

2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Η βραχώμαζα σπανίως βρίσκεται σε άρρηκτη μορφή. Συνηθέστερα είναι ρωγματωμένη και οι ασυνέχειες που τη διέπουν μπορεί να είναι είτε μεμονωμένες είτε να συναντώνται σε ένα ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες διακρίνονται σε συγγενικές δομές (επίπεδα στρώσης, σχιστότητα, κλπ.) και σε επιγενετικές (διακλάσεις, ρήγματα, ζώνες διάτμησης, φλέβες πλήρωσης, πτυχές, κλπ.), ως απόρροια της τεκτονικής και των ορογενέσεων. Εκτός από ασυνεχής, η βραχώμαζα συνήθως εμφανίζεται ανομοιογενής και ανισότροπη, ενώ μπορεί να παρουσιάζει έντονες

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

μεταβολές αναφορικά με το βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης. Στη βραχομηχανική, ο όρος ασυνέχεια περιγράφει οποιαδήποτε θραύση του πετρώματος, όπως τα ασθενή επίπεδα στρώσης, οι διακλάσεις, τα ρήγματα και οι διεπιφάνειες χαμηλής εφελκυστικής αντοχής.

Η βραχόμαζα είναι αναγκαίο να ταξινομείται τόσο στη φάση του σχεδιασμού όσο και κατά τη διάρκεια της κατασκευής των τεχνικών έργων. Τεχνικά έργα μεγάλου μήκους- όπως οι σήραγγες- σχεδιάζονται για παραπάνω από μία κατηγορίες βραχόμαζας, οι οποίες αντιστοιχούν σε τυπικές διατομές σχεδιασμού. Κατά την κατασκευή, γίνεται επί τόπου βαθμονόμηση της βραχόμαζας έτσι ώστε να εφαρμοστεί η αντίστοιχη τυπική διατομή της μελέτης.

Η ποσοτικοποίηση των παραμέτρων της βραχόμαζας δε γίνεται κατά τρόπο άμεσο. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ανάμεσα σε αναλυτικές, εμπειρικές και ημιεμπειρικές προσεγγίσεις για την ποσοτική και ποιοτική ταξινόμηση της βραχόμαζας. Λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του άρρηκτου βράχου (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μέτρο ελαστικότητας κ.λπ.) και η επιρροή των υπόγειων υδάτων. Η βαθμονόμηση μέσω εμπειρικών και ποσοτικών μεθόδων πραγματοποιείται με βάση μίας ή περισσότερων παραμέτρων.

2.2.1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

2.2.1.1. ΑΝΤΟΧΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ (σ_{ci})

Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος από το οποίο αποτελείται η βραχόμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής σ_{ci} και προκύπτει από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (UCS), η οποία εκτελείται σε συμπαγή κυλινδρικά δοκίμια του άρρηκτου βράχου. Κατά τις δοκιμές μπορεί να παρουσιάζονται αποκλίσεις στα αποτελέσματα και πιθανόν να οφείλονται στην παρουσία επιφανειών μικρής αντοχής εντός των δοκιμίων με δυσμενή διεύθυνση (στρώσεις, διακλάσεις, ασυνέχειες, κ.λπ.). Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα ενδέχεται να μην είναι αντιπροσωπευτικά της αντοχής του άρρηκτου βράχου. Βάσει της αντοχής σ_{ci} , τα πετρώματα κατατάσσονται στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Κατηγορίες πετρωμάτων βάσει της αντοχής (ISRM, 1981).

Βαθμός κατά Brown (1981)	Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία Πετρώματος	Περιγραφή
R6	>250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δε θραύεται με γεωλογικό σφυρί.
R5	100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί.
R4	50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί.
R3	25-50	Μετρίως ισχυρό	Δε χαράσσεται με μαχαίρι.

R2	5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι.
R1	1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δε χαράσσεται με το νύχι.
R0	0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι.

2.2.1.2. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ (Ei)

Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος προκύπτει επίσης από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial Compressive Strength), η οποία πραγματοποιείται σε κυλινδρικά δοκίμια συμπαγούς πετρώματος. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σ-ε που προκύπτει κατά τη δοκιμή, όπου λαμβάνεται ο λόγος $E = \sigma/\epsilon$ στο σημείο που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντοχής του δοκιμίου.

2.2.2. ΜΟΝΟΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ - ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας RQD (Rock Quality Designation), διατυπώθηκε από τον Deere το 1964. Βάσει αυτού η βραχώμαζα αξιολογείται μέσω της ποσοτικής εκτίμησης του κερματισμού της, από πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (τοις εκατό) του μήκους των τεμαχίων του πυρήνα μιας γεώτρησης άνω των 10cm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης.

$$RQD (\%) = [\Sigma (\text{μήκους τεμαχίων πυρήνα} > 10\text{cm}) / \text{Ολικό μήκος πυρήνα}] \times 100\%$$

Για υπαίθριες μετρήσεις χωρίς τη βοήθεια γεωτρήσεων ο προσδιορισμός του δείκτη RQD για βραχώμαζα που δεν περιέχει άργιλο δίνεται από τη σχέση (Palmstrom, 1982):

$$RQD (\%) = 115 - 3.3 \times J_v$$

όπου J_v : το πλήθος των διακλάσεων ανά κυβικό μέτρο βραχώμαζας.

Βάσει του δείκτη RQD προκύπτει η βαθμονόμηση της βραχώμαζας που φαίνεται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Βαθμονόμηση της βραχώμαζας βάσει του δείκτη RQD.

RQD (%)	Ποιότητα της Βραχώμαζας
0-25	Πολύ πτωχή
25-50	Πτωχή
50-75	Μέση
75-90	Καλή
90-100	Εξαιρετική

2.2.3. ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Τα συνηθέστερα συστήματα βαθμονόμησης βραχώμαζας τα οποία χρησιμοποιούν περισσότερες της μίας παραμέτρους είναι τα εξής:

- ✓ Σύστημα Q,
- ✓ Σύστημα RMR (Beniawski),
- ✓ Σύστημα GSI.

Τα συστήματα Q και RMR εστιάζουν στη συσχέτιση των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας με τα απαιτούμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης της εκσκαφής. Ενώ, σε δεύτερο επίπεδο χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων. Αντίθετα, το σύστημα GSI αποσκοπεί στη βαθμονόμηση της βραχώμαζας και την παραμετροποίηση του γεωυλικού, για τον μετέπειτα σχεδιασμό βάσει αριθμητικών ή αναλυτικών σχέσεων.

2.2.3.1. ΣΥΣΤΗΜΑ Q

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε από τους *Barton et al.* το 1974 στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) βάσει δεδομένων από τη διάνοιξη 200 σηράγγων. Στόχος του είναι ο καθορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας και η εμπειρική εκτίμηση των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων με τη συμβατική μέθοδο NATM. Ο δείκτης Q υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$Q = (RQD / J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$$

όπου:

RQD: Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας.

J_n : Δείκτης του πλήθους των συστημάτων ασυνεχειών.

J_r : Βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών.

J_a : Βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών.

J_w : Συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού.

SRF: Συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (Stress Reduction Factor).

Οι τρεις λόγοι της παραπάνω σχέσης εκφράζουν τα εξής:

RQD / J_n : Μέσο μέγεθος των τεμαχίων της βραχώμαζας.

J_r / J_a : Αλληλοκλείδωμα-συνάφεια τεμαχίων της βραχώμαζας με βάση τη διατμητική αντοχή των διεπιφανειών των ασυνεχειών.

J_w / SRF: Υφιστάμενο τασικό πεδίο.

Στον Πίνακα 6 φαίνεται η κατάταξη της βραχώμαζας με βάση το σύστημα ταξινόμησης Q. Το εύρος των τιμών του δείκτη Q κυμαίνεται από 0.001 έως 1000. Πολύ μικρές τιμές του δείκτη Q αντιστοιχούν σε βραχώμαζα εξαιρετικά πτωχής ποιότητας με ιδιότητες που προσιδιάζουν σε έδαφος, ενώ πολύ υψηλές τιμές αφορούν σε άρρηκτο βράχο.

Πίνακας 6: Κατάταξη βραχώμαζας βάσει του συστήματος Q (Barton et al. 1974).

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Q-Ia	Εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	Πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	Πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	Καλή
4-10	Q-IIIb	Μέτρια
1-4	Q-IVa	Πτωχή
0.1-1	Q-IVb	Πολύ πτωχή
0.01-1	Q-Va	Πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	Εξαιρετικά πτωχή

Το σύστημα Q αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των άμεσων μέτρων υποστήριξης κατά την εκσκαφή σήραγγων με συμβατικά μέσα. Ωστόσο, το 2000 προτάθηκε από τον Barton η χρήση του δείκτη Q σε ένα εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού του στιγμιαίου ρυθμού προχώρησης και κατά συνέπεια και του μέσου ρυθμού προχώρησης της εκσκαφής μιας σήραγγας με τη χρήση μηχανήματος ολομέτωπης εκσκαφής TBM (Tunnel Boring Machine). Σε αυτό το εμπειρικό μοντέλο συνυπολογίζονται και άλλοι παράγοντες όπως η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη, η δύναμη ώσης που επιβάλλει το μηχάνημα, η αποξεστικότητα (abrasiveness) της βραχώμαζας και οι γεωστατικές τάσεις του μετώπου της σήραγγας.

2.2.3.2. ΣΥΣΤΗΜΑ RMR

Το σύστημα RMR, γνωστό και ως Γεωμηχανική Ταξινόμηση (Geomechanics Classification), προτάθηκε από τον Bieniawski το 1973, παρουσιάσθηκε τελειοποιημένο το 1979 και αναθεωρήθηκε το 1989 χωρίς ουσιαστικές αλλαγές. Για την ταξινόμηση της βραχώμαζας υπολογίζεται ο δείκτης RMR ως το άθροισμα έξι (6) επί μέρους δεικτών που αντιστοιχούν στις εξής παραμέτρους:

1. Αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_c)
2. Βαθμός κερματισμού της βραχώμαζας βάσει του RQD

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

3. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
4. Κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών
5. Παρουσία υπόγειου νερού
6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών ως προς τη φορά διάνοιξης του έργου

Στον Πίνακα 7 φαίνονται οι κατηγορίες της βραχόμαζας με βάση τον δείκτη RMR.

Πίνακας 7: Κατάταξη βραχόμαζας βάσει του δείκτη RMR.

Δείκτης RMR	Κατηγορία Βραχόμαζας
81-100	I- Πολύ Καλή
61-80	II-Καλή
41-60	III-Μέτρια
21-40	IV-Πτωχή
0-20	V-Πολύ Πτωχή

2.2.3.3. ΣΥΣΤΗΜΑ GSI

Το σύστημα βαθμονόμησης της βραχόμαζας GSI (Geological Strength Index) αρχικά αναπτύχθηκε το 1995 από τον E. Hoek, στη συνέχεια βελτιώθηκε με τη συνεισφορά των Hoek, Kaiser, Bawden, Brown, Marinis, Benissi και το 2000 παρουσιάστηκε τελειοποιημένο (Hoek & Marinis, 2000). Το σύστημα GSI είναι ένα εύχρηστο γεωλογικό εργαλείο μέσω του οποίου εκτιμάται η ποιότητα και η αντοχή της βραχόμαζας. Σε αντίθεση με το RMR, το σύστημα GSI παρουσιάζει ιδιαίτερο πλεονέκτημα για την εφαρμογή του σε βραχόμαζες με πτωχή ποιότητα ($RMR < 40$), διότι προσφέρει καλύτερη διακριτοποίηση αποφεύγοντας τις απότομες μεταβολές. Για βραχόμαζες καλής ποιότητας ($RMR > 40$) τα δύο συστήματα είναι εν γένει συμβατά μεταξύ τους.



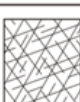



Η βαθμονόμηση με τη χρήση του συστήματος GSI γίνεται συνεκτιμώντας δύο παραμέτρους:

- ✓ Της δομής της βραχόμαζας που καθορίζει την αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών της.
- ✓ Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που καθορίζει τη διατμητική αντοχή τους.

Μέσω του συστήματος GSI βαθμονομούνται βραχόμαζες με τεμάχια που παρουσιάζουν αλληλεμπλοκή, δηλαδή βραχόμαζες με μικρό ποσοστό σε εδαφικό υλικό (μικρότερο του 20% του όγκου της βραχόμαζας). Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται το διάγραμμα GSI, όπου πρέπει να σημειωθεί ότι δεν εφαρμόζεται όταν πρόκειται για βραχόμαζες με διακριτές ασυνέχειες. Στις περιπτώσεις αυτές οι αστοχίες είναι δομικές-βαρυτικές και αφορούν σε επίπεδες ολισθήσεις, αστοχίες σφηνών κ.λπ..

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου υπάρχει υπόγειο νερό ενδείκνυται η μετατόπιση προς τα δεξιά για κατηγορίες βραχώμαζας πτωχότερης ποιότητας.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000) Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καρπίδες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατημημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
ΔΟΜΗ		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξείδιωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επιφλοώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοώματα
 ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90				N/A	N/A
 ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθόγωνα τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70				
 ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	60	50				
 ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας	40	30				
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων	20					
 ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	N/A	N/A				10

Εικόνα 6: Βαθμονόμηση βραχώμαζας με βάση το σύστημα GSI (Hoek & Marinos, 2000).

Υπάρχουν, επίσης, εξειδικευμένα διαγράμματα GSI τα οποία προέκυψαν έπειτα από την ερευνητική εφαρμογή του συστήματος GSI σε γεωτεχνικά έργα όπου προϋπήρχε συσσωρευμένη εμπειρία. Αυτά τα διαγράμματα αφορούν σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη [(Hoek & Marinos, 2001), (Marinos, 2007)], η σχάσιμη μολάσσα (E. Hoek, Π. Μαρίνος, Β. Μαρίνος, 2004), σε γνευσιακές βραχώμαζες (Marinos, 2007) και τα οφιολιθικά συμπλέγματα (E. Hoek, Π. Μαρίνος, Β. Μαρίνος, 2004). Στην Εικόνα 7 παρατίθεται το εξειδικευμένο διάγραμμα βαθμονόμησης GSI για τον φλύσχη. Στις

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων






Εικόνες 8,9,10 παρατίθενται, αντίστοιχά τα εξειδικευμένα διαγράμματα βαθμονόμησης GSI για σχάσιμη μολάσση, γνευσιακές βραχώμαζες και οφίολιθους.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (B. Μαρίνος, 2007)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (κυρίως επίπεδα στρώσης)	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ										
Ετερογενείς βραχώμαζες εννοούνται εδώ αυτές που εναλλάσσονται στρώματα σαφώς διαφορετικών λιθολογικών τύπων με σημαντικές διαφορές στο χαρακτηριστικό αντοχής τους. Για τον φλύσχη αυτές οι εναλλαγές αναφέρονται κυρίως σε ψαμίτες και ιλυόλιθους. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται και αργιλικό σχιστόλιθο. Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώμαζας επιλέγεται το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Η επιλογή της δομής πρέπει να καθορίζεται με βάση την τεκτονική διαταραχή (αδιάτακτο, μέτρια διαταραγμένη, πολύ πτυχωμένη - διαταραγμένη, αποδιοργανωμένη, διατμημένη), την αναλογία ψαμιτών και ιλυόλιθων και την εκτεταμένη εσωτερική στρωμάτωση τους. Στους τύπους IV και V όταν το πάχος των τραπεζών του ψαμίτη είναι μεγάλο (~50 cm) προτείνεται η αύξηση της τιμής GSI κατά 5 μονάδες. Από τον τύπο IV και στους επόμενους τύπους τα επίπεδα στρώσης διακρίνονται μέσα στη μάζα του ιλυόλιθου. Επιλέξτε τη θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών π.χ. από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων προς κάθε κατεύθυνση. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επιπέδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχώμαζων μειώνεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς το δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.			ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, υγείες, μη αποσπασθρομένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρώς αποσπασθρομένες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μέτριας αποσπασθρομένες και ερρολιωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιάδα θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθρομένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοιώσης						
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ													
	ΤΥΠΟΣ I. Αδιάτακτος, μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμίτης με απορριχτούς πολύ λεπτούς υμένες ιλυόλιθου. Σε αβασθείς σήραγγες ή πρηνή αν ο μηχανισμός αστάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμποδισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI		ΤΥΠΟΣ II. Αδιάτακτος συμπαγής ιλυόλιθος (δεν διακρίνονται τα επίπεδα στρώσεων) με απορριχτές λεπτές ενστρώσεις ψαμιτών	80	I	II	N/A	N/A					
	ΤΥΠΟΣ III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυόλιθων		ΤΥΠΟΣ IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαζα που αποτελείται από εναλλαγές ψαμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες		ΤΥΠΟΣ V. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμιτών		ΤΥΠΟΣ VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραίες ενστρώσεις ψαμιτών	60	III	IV	V	VI	N/A
	ΤΥΠΟΣ VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες		ΤΥΠΟΣ VIII. Έντονα διαταραγμένη-πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί-διατμηθεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο ή και αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις ψαμίτη	N/A	N/A	40	VII	VIII					
	ΤΥΠΟΣ IX. Αποδιοργανωμένη βραχώμαζα που απαντάται συνήθως σε μεγάλες ζώνες ρηγιμάτων ή/και έντονης αποσάθρωσης. Στον τύπο αυτό απαντώνται κυρίως φαθούρα γεωυλικά με διαταραγμένο ιλυολιθικό υλικό ανάμεσα		ΤΥΠΟΣ X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χασοτική δομή. Οι στρώσεις του ψαμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιλυόλιθου	N/A	N/A	30	IX	X					
	ΤΥΠΟΣ XI. Τεκτονικός ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χασοτική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα ψαμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Ορισικά η συμπεριφορά των γεωυλικών μπορεί να προσομοιωθεί με εδαφικά			N/A	N/A	20	XI	10					

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

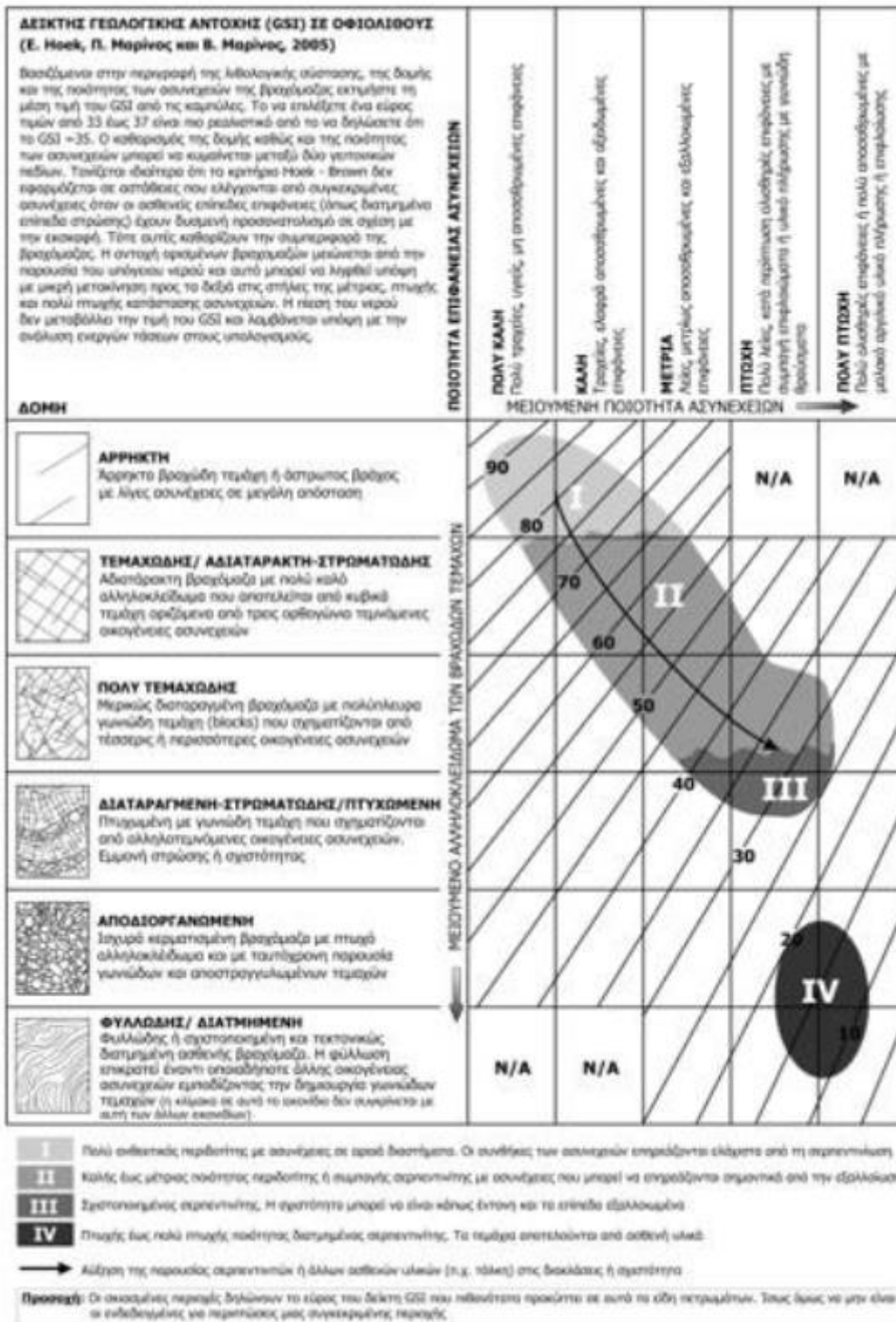
Εικόνα 7: Εκτίμηση του δείκτη GSI για ετερογενείς βραχώμαζες. Εδώ ειδικά για τον φλύσχη.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΓΙΑ ΣΧΑΣΙΜΗ ΜΟΛΑΣΣΑ Εφαρμόζεται κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές (E. Hoek, Π. Μαρίνος και Β. Μαρίνος, 2004) Βασίζομενοι στην περιγραφή της lithολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώδους επιλέξτε το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Επιλέξτε τη θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γεωγονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατηρημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η αντοχή ορισμένων βραχωσών μειώνεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (κυρίως επίπεδα στρώσης)	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγρές, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρώς αποσπασθαιμένες και αεραυαμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθαιμένες και εραυαωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπίεση επικαλύματα ή υλικό πλήρωσης με γαλιόση θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μαλακό αφρώδες υλικό πλήρωσης ή επικάλυψη
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ					
 ΤΥΠΟΣ Μ3. Παχιστρωματώδης ψαμίτης σε στρώσεις μεγάλου πάχους ή ισχυρά συγκολλημένα κροκαλοπαγή. Η επίδραση των ιαυλικών ενστρώσεων ελαχιστοποιείται από τον περιορισμό της βραχώδους. Σε ρηχές σήραγγες ή πρανή, αυτές οι στρώσεις ίσως προκαλέσουν δομικά ελεγχόμενη αστάθεια	70	60	M3	50			
 ΤΥΠΟΣ Μ4. Ψαμίτης ή ισχυρά συγκολλημένα κροκαλοπαγή με λεπτές ενστρώσεις ιαυλίθου	 ΤΥΠΟΣ Μ5. Ψαμίτης και κροκαλοπαγή με σχιστώδη ιαυλίθου σε ανάλογες ποσότητες	 ΤΥΠΟΣ Μ6. Στρωματώδης - σχιστώδης - σχιστώδης ιαυλίθου ή ιαυλής σχιστώδης με ενστρώσεις ψαμίτη		M4	M5	M6	
 ΤΥΠΟΣ Μ7. Έντονα, ανάλογα την αποσθρωση, στρωσιγενής - σχιστός έως αποσθρωσιγενής ιαυλίθου ή ιαυλής σχιστώδης με ή χωρίς μερικές πολύ λεπτές στρώσεις ψαμίτη				40	30	20	
						10	

Εικόνα 8: Εκτίμηση του δείκτη GSI για σχάσιμη μολάσσα.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 10: Εκτίμηση του GSI σε οφιόλιθους.

2.2.3.4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ RQD

Εφόσον οι επί τόπου δοκιμές περατότητας της βραχώδους διέπονται από τις ασυνέχειές της γίνεται κατανοητή η ανάγκη να μπορούν να συσχετιστούν με το δείκτη κερματισμού της βραχώδους, (RQD). Ο El-Naqa (2001) βασιζόμενος στη θεωρία των Snow(1968) και Carlsson, Olsson (1992) προσπάθησε να υπολογίσει μέσω αυτής της συσχέτισης την υδραυλική αγωγιμότητα του φλύσχη στην κεντρική

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Ιορδανία. Πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμές περατότητας, πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις και χαρτογράφηση υπαίθρου προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Καθώς ο δείκτης κερματισμού (RQD) σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της, ο El- Naqa (2001) προσπάθησε να καταλήξει σε μία εμπειρική σχέση ανάμεσα στην περατότητα και το δείκτη RQD.

Η πρώτη εξίσωση προέκυψε από τα δεδομένα των γεωτρήσεων και η δεύτερη από τη χαρτογράφηση των ασυνεχειών:

$$K = 177.45 \times e^{-0.0361 \times RQD}, (r=0.64)$$

$$K = 890.9 \times e^{-0.00559 \times RQD}, (r=0.87)$$

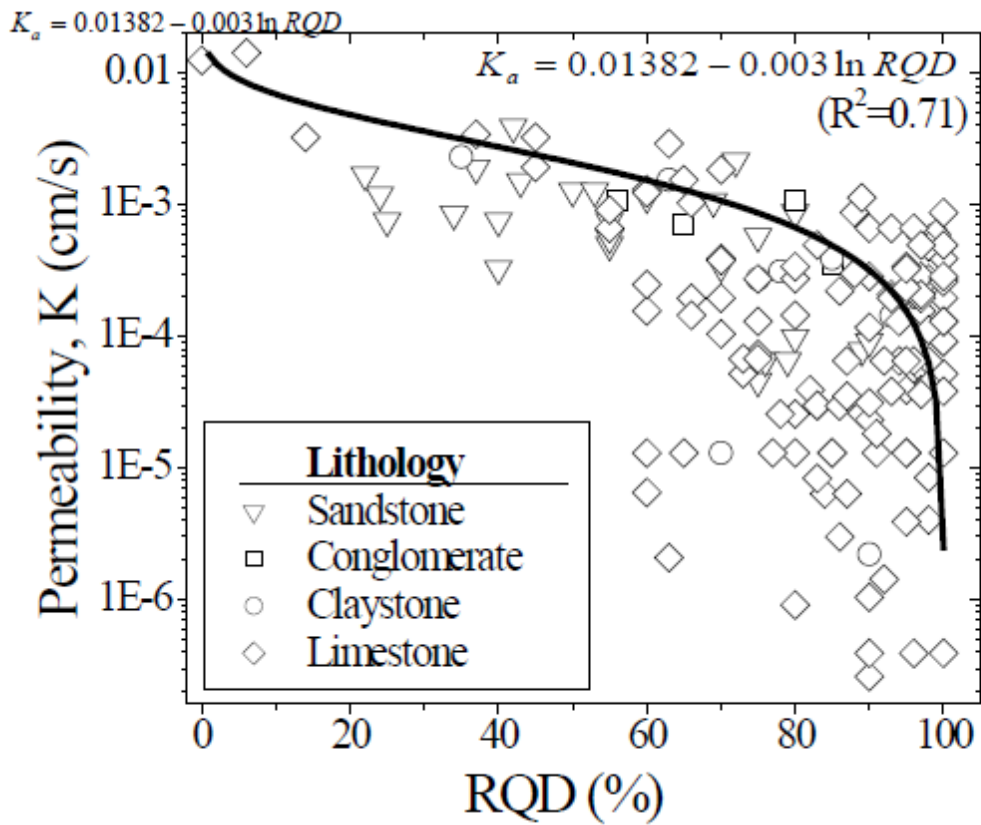
όπου η υδραυλική αγωγιμότητα είναι σε μονάδες Lugeon ($1LU = 1.3 \times 10^{-7} m/sec$). Όπως φαίνεται η δεύτερη εξίσωση δίνει καλύτερο βαθμό συσχέτισης. Από τις παραπάνω σχέσεις (El- Naqa, 2001), προκύπτει ότι με τη μείωση του δείκτη κερματισμού και με την αύξηση του βαθμού των ασυνεχειών, παρατηρείται και αύξηση στην τιμή της περατότητας.

Οι Mohsinet.al. (n.d.) κατέληξαν επίσης σε μία εμπειρική σχέση, συσχέτισης της περατότητας με το δείκτη RQD.

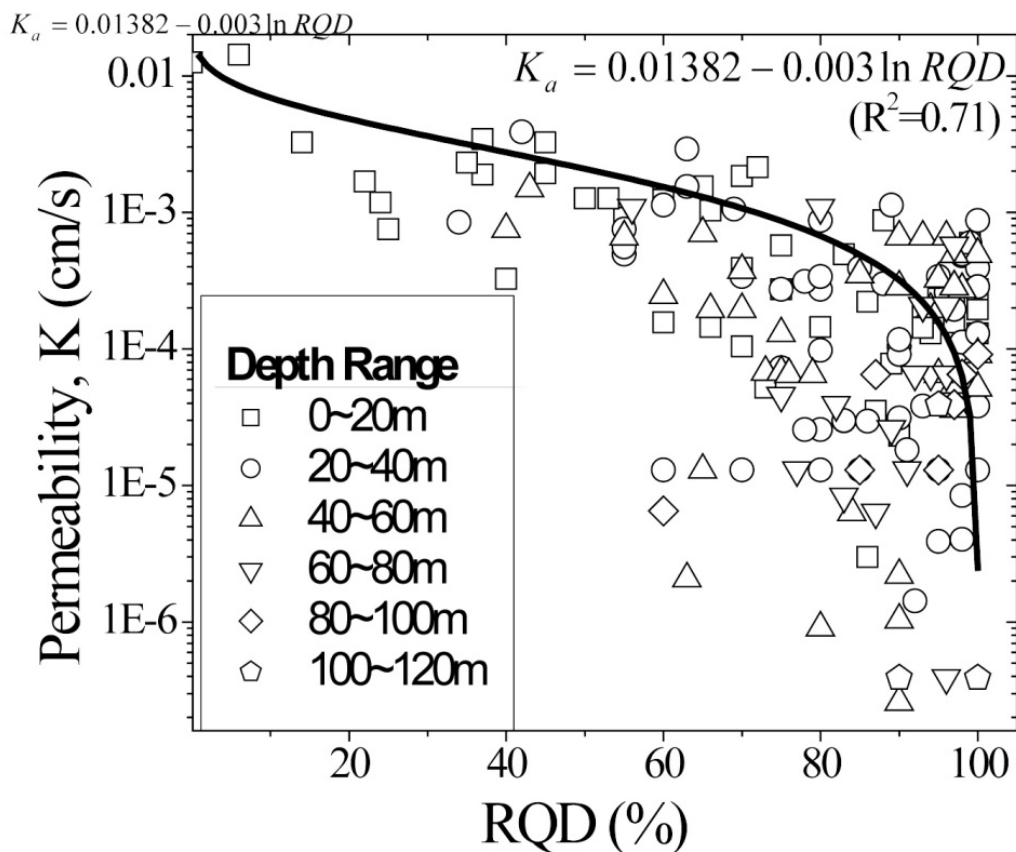
$$K_{\alpha} = 0.01382 - 0.003 \ln RQD, (R^2=0.71)$$

όπου, η υδραυλική αγωγιμότητα K_{α} εκφράζεται σε cm/sec και ο δείκτης RQD σε ποσοστό επί τοις εκατό(%). Η εξίσωση αυτή προέκυψε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών περατότητας και της μέσης τιμής του δείκτη κερματισμού. Για την ακρίβεια πραγματοποιήθηκαν 367 δοκιμές περατότητας (Lugeon) σε 33 γεωτρήσεις που έφθαναν μέχρι μέγιστο βάθος 120m, εκ των οποίων οι 23 σε ιλύ, 296 σε ασβεστόλιθο, 5 σε ετερογενείς σχηματισμούς και 43 σε ψαμμίτη, στην περιοχή Oman (Mohsinet.al., n.d.).

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 11: Λιθολογικά σχεδιασμένη διαπερατότητα έναντι RQD (Mohsinet.al.n.d.).



Εικόνα 12: Κατανομή περατότητας- RQD για κάθε λιθογική μονάδα (Mohsinet.al.n.d.).

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Οι Mohsinet.al. (n.d.) μετέφεραν τις τιμές που προέκυψαν από την παραπάνω εξίσωση σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα (Εικόνα 11, Εικόνα 12). Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα για κάθε λιθολογική μονάδα, παρατηρείται ότι στις δοκιμές για το βάθος από 0 έως 20m, επικρατούν χαμηλές τιμές RQD και η περατότητα είναι αυξημένη, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη η βραχώμαζα έχει υψηλές τιμές RQD και χαμηλή περατότητα. Αυτό συμβαίνει διότι στην επιφάνεια η βραχώμαζα παρουσιάζει αυξημένο αριθμό ασυνεχειών και είναι πιο κερματισμένη.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στην εργασία τους οι Mohsinet.al. (n.d.) δε έλαβαν υπόψη τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των δοκιμών περατότητας.

2.2.3.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΠΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Η παρουσία υπόγειου νερού επιδρά δυσμενώς στα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Περισσότερο επηρεάζονται οι βραχώμαζες χαμηλής αντοχής με αυξημένη εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Στις βραχώμαζες αυτές λόγω των αργυλικών ορυκτών πλήρωσης προκαλείται διόγκωση παρουσία του υπόγειου νερού. Αντίθετα, σε βραχώμαζες όπου η αποσάθρωση δεν είναι σημαντική ή όταν οι ασυνέχειες δεν έχουν υλικό πλήρωσης, η επίδραση από το υπόγειο νερό είναι μικρή έως αμελητέα και γίνεται αισθητή μόνο στη μείωση των ενεργών τάσεων. Ωστόσο, όταν πρόκειται για βραχώμαζες με μεγάλες τιμές διαπερατότητας και υδραυλικού φορτίου προκαλούνται φαινόμενα αστάθειας, λόγω των αυξημένων υδατικών παροχών που δημιουργούν μεγάλες δυνάμεις διήθησης (Καββαδάς, 2004).

3. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ

Η παρουσία τεκτονικών δομών (ρήγματα, πτυχές, επωθήσεις κλπ.), επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα της βραχώμαζας, όπου πλέον ο συμπαγής και άρρηκτος βράχος καταπονείται και μετατρέπεται σε μία κερματισμένη βραχώμαζα με σημαντική παρουσία διακλάσεων. Η αύξηση του μεγέθους της καταπόνησης αυτής, οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κερματισμού της βραχώμαζας με ταυτόχρονη μείωση του δείκτη RQD και πλέον το κερματισμένο υλικό λόγω των διακλάσεων θα αναπτύξει περατότητα, υπό τη μορφή δευτερογενούς περατότητας (περατότητα λόγω ρωγμάτωσης).

Με βάση τα προαναφερθέντα, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι ο κερματισμός της βραχώμαζας έχει σημαντική επιρροή στην περατότητα των βραχωδών σχηματισμών, καθώς σχηματισμοί που έχουν πολύ μικρή περατότητα, μπορεί λόγω του κερματισμού τους να αναπτύξουν περατότητα (δευτερογενές πορώδες). Επίσης η ανάπτυξη δευτερογενούς περατότητας σε αυτούς τους σχηματισμούς, θα έχει άμεση επιρροή στις παραμέτρους αντοχής της βραχώμαζας, όπου η αύξηση της περατότητας θα τις υποβαθμίσει.

Από την άλλη, η παρουσία όλκιμων πετρωμάτων, όπως τα αργιλικής σύστασης, δεν ευνοεί την ανάπτυξη μεγάλου σε μήκους ασυνεχειών, όπως στα ψαθυρά πετρώματα. Σε αυτή την περίπτωση, οι ασυνέχειες κλείνουν ή διακόπτονται με αποτέλεσμα η περατότητα να μειώνεται.

Επίσης, όταν η αποσάθρωση είναι έντονη σε ορισμένα πετρώματα, όπως τα κρυσταλλικά γνευσιακά ή γρανιτικά, αναπτύσσεται είτε αργιλικός «φραγμός» ανάμεσα στις ασυνέχειες είτε και στο σύνολο της βραχομάζας. Και σε αυτή την περίπτωση, η περατότητα μειώνεται σημαντικά και αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις πόρων στα ορύγματα.

3.1. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

3.1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η τεκτονική συνιστά ένα σημαντικό παράγοντα στον καθορισμό της τεχνικής (μηχανικής και υδραυλικής) συμπεριφοράς των γεωυλικών. Η τεκτονική είναι η έκφραση και το αποτέλεσμα των παραμορφώσεων, της διαδικασίας μεταβολής της μορφής και της εσωτερικής δομής, τόσο ενός μεμονωμένου κρυστάλλου, όσο και μιας ολόκληρης οροσειράς. Είναι οι διαδικασίες, που μεταβάλλουν το σχήμα ή τη μορφή ενός γεωλογικού σώματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των διαφόρων γεωλογικών δομών. Η θεώρηση της τεκτονικής ξεκινά από το επίπεδο της μεγατεκτονικής, όπου βρίσκει κανείς τη γενεσιουργό αιτία, την τεκτονική των πλακών και, στη συνέχεια, τις μεγαδομές (σύγκλινα, αντίκλινα, πτυχές, επωθήσεις, εφιπτεύσεις, ρήγματα). Συνεχίζεται στο επίπεδο της

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

μεσοτεκτονικής (διακλάσεις και κάθε λογής και προελεύσεως ασυνέχειες της γεωμάζας) και καταλήγει στο επίπεδο της μικροτεκτονικής (σχιστότητα, σε επίπεδο πετρώματος, σχιστότητα, σε επίπεδο κρυστάλλου). Η τεκτονική εικόνα των πετρωμάτων συμπληρώνεται και από παραμορφώσεις, πέραν των εφαλτομενικών τάσεων κατά την περίοδο των ορογενέσεων, που αποτελούν το κύριο αίτιο τεκτονισμού. Τέτοιες πρόσθετες παραμορφώσεις, με τη μορφή ασυνεχειών, προέρχονται από

- ✓ το εντατικό πεδίο (διατημητικές και εφελκυστικές τάσεις, ροπές στρέψης), ανεξαρτήτως διαδικασίας γενέσεως του πεδίου αυτού
- ✓ την ηφαιστειακή δράση (ασυνέχειες από απότομη ψύξη του μάγματος στην επιφάνεια)
- ✓ τη διαδικασία συρρικνώσεως (στυλοειδής κατάτμηση ηφαιστειακών δομών, αφυδάτωση αργιλικών ιζημάτων)
- ✓ από τη σεισμική δράση (σεισμικές διατμήσεις)
- ✓ από το σχηματισμό ιζηματογενών πετρωμάτων, όπως τα επίπεδα στρώσης, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για ασυνέχειες, παράλληλη με τη στρώση (διακοπή προσφοράς υλικού ιζηματογενέσεως) ή απλή αλλαγή χρωματισμού (αλλαγή φύσης υλικού ιζηματογενέσεως, που κι αυτή η αλλαγή είναι επίπεδο αδυναμίας της βραχομάζας)
- ✓ από τη συνδυασμένη δράση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων (ασυνέχειες διατμήσεως και εφελκυσμού από κατολισθήσεις και καθιζήσεις)

Σημαντικό πρόβλημα στην προσέγγιση του καθεστώτος των ασυνεχειών ενός πετρώματος (τεκτονική κατάσταση) αποτελεί η δειγματοληψία (καταγραφή διευθύνσεως και κλίσης της ασυνέχειας και περιγραφής των χαρακτηριστικών της). Στην κλασική Γεωλογία, συνήθως, χρησιμοποιείται η, λεγόμενη, συστηματική καταγραφή, η καταγραφή όλων, ανεξαιρέτως, των ασυνεχειών που εμφανίζονται κατά μήκος μιας (νοητής) γραμμής του πετρώματος (μονοδιάστατη δειγματοληψία), ενός επιπέδου (δισδιάστατη δειγματοληψία) ή ενός όγκου (τριδιάστατη δειγματοληψία). Η διαδικασία αυτή δίνει, ασφαλώς, τη σωστή τεκτονική εικόνα του πετρώματος, εξομοιώνει, όμως, τις μεγάλες και σημαντικές ασυνέχειες με τις μικρές και ασήμαντες, αφού όλες αντιπροσωπεύονται από ένα σημείο στο στερεογραφικό διάγραμμα. Έτσι, οι σημαντικές ασυνέχειες χάνονται μέσα στη γενική διασπορά. Στη Τεχνική Γεωλογία, χρησιμοποιείται, συνήθως, η λεγόμενη επιλεκτική δειγματοληψία, στην οποία καταγράφονται μόνο οι ασυνέχειες που παίζουν ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τεχνικής συμπεριφοράς του πετρώματος ή της βραχομάζας. Αυτές, μπορούν να διακριθούν σε κατηγορίες, αναλόγως της βαρύτητάς τους και του ρόλου τους στην υδραυλική ή μηχανική συμπεριφορά του γεωυλικού, συμφώνως με τον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Τεχνική κατάταξη των ασυνεχειών της βραχομάζας.

Μήκος, άνοιγμα	Είδος ασυνεχειών	Υδραυλική συμπεριφορά	Μηχανική συμπεριφορά
Μικρό-πολύ μικρό	Ασυνέχειες διατμητικές	✓	✓
Μέτριο-μεγάλο	Ασυνέχειες υδραυλικές	✓	
Μέτριο-μεγάλο	Ασυνέχειες διατμητικές		✓
Μεγάλο-τεράστιο	Ασυνέχειες υδρογεωλογικές	✓	
Μεγάλο-τεράστιο	Ασυνέχειες αστάθειας		✓

Η προτίμηση, όμως, της επιλεκτικής δειγματοληψίας ενέχει ένα, άλλου είδους, πρόβλημα. Η επιλογή των ασυνεχειών γίνεται με βάση το ίχνος τους στην επιφάνεια, που μπορεί να μην ανταποκρίνεται στο σύνολο των χαρακτηριστικών της ασυνέχειας στο εσωτερικό της γεωμορφής. Το μήκος, το άνοιγμα, η τραχύτητα, το υλικό πλήρωσης, η πυκνότητα, ο βαθμός διασυνδέσεως και, γενικώς, όλα τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται με το βάθος απλώς ή με τη μεσολάβηση τεκτονικών ή άλλων επεισοδίων. Από την άλλη, οι εξωγενείς παράγοντες (νερό, άνεμος, θερμοκρασιακές μεταβολές, αποσυμπίεση πρηνών, χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις, δράση πανίδας και χλωρίδας) μεταβάλλουν, επίσης, τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών.

Οι κάθε μορφής και προελεύσεως ασυνέχειες (discontinuities) του πετρώματος, μαζί με το ακέραιο ή άθικτο πέτρωμα (intact rock) συνιστούν την έννοια της βραχομάζας (rock mass), που αποτελεί το σημαντικότερο επίπεδο μελέτης της υδραυλικής και μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο εφαρμογής (βελτίωση συμπεριφοράς γεωυλικών, κατασκευή τεχνικών έργων, αντιμετώπιση καταστροφικών φαινομένων, εκμετάλλευση ορυκτών πόρων, κ.λπ.).

Όσο κι αν αυτό δεν γίνεται ευκόλως κατανοητό στους μη Γεωλόγους, οι περισσότερες παραμορφώσεις των γεωλογικών σωμάτων συνδέονται, τελικώς, με την τεκτονική των πλακών. Τα όρια των πλακών, οι ζώνες επαφής μεταξύ τους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, από τις οποίες προκύπτουν τα μεγάλα πεδία των τάσεων, η σεισμική δραστηριότητα, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και οι υψομετρικές μετακινήσεις της ξηράς. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- ✓ Οι δημιουργικές ζώνες, όπου δημιουργείται νέο ωκεάνιο υλικό σε ζώνες ανυψώσεως του ωκεάνιου πυθμένα

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

- ✓ Οι καταστροφικές ζώνες, όπου το παλαιό ωκεάνιο υλικό καταστρέφεται με την καταβύθιση σε τάφρο
- ✓ Οι συντηρητικές ζώνες, όπου το όριο της τεκτονικής πλάκας είναι ένα ρήγμα μετασχηματισμού με κίνηση κατά τη διεύθυνσή του

Ενεργές ζώνες επαφής πλακών συγκεντρώνουν, όπως είναι φυσικό, σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα. Τμήματα του ηπειρωτικού στερεού φλοιού, πλησίον σε δημιουργικές ζώνες, εκδηλώνουν εφελκυστική τεκτονική και μια λέπτυνση του πάχους του στερεού φλοιού, όπως είναι φανερό στην Ερυθρά Θάλασσα και στο Κόλπο του Άντεν. Το ηπειρωτικό περιθώριο σε περιοχή καταστροφικής ζώνης, εκδηλώνει συμπίεστική (θλιπτική) τεκτονική, σε συνδυασμό με αύξηση του πάχους του στερεού φλοιού και των ορέων (ορογένεση), αποτέλεσμα των συγκλιτικών κινήσεων των πλακών. Η περίπτωση δύο πλακών στην κατάσταση αυτή είναι χαρακτηριστική στην Κεντρική Ασία. Συντηρητικές ζώνες, που τέμνουν ηπειρωτικό στερεό φλοιό, συνδέονται με, μάλλον, σύνθετες ζώνες διευθύνσεων, περιέχοντας όχι μόνο ρήγματα ολισθήσεως, αλλά επίσης, πτυχές και συμπίεστικά ρήγματα.

3.1.2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Το γενικό τεκτονικό καθεστώς, όπως διαμορφώνεται σε κάθε περίπτωση, μεταφέρεται μέχρι την επιφάνεια, ως έχει ή τροποποιημένο και εκδηλώνεται, κατά περίπτωση στα επί μέρους πετρώματα. Οι ασυνέχειες, που προκαλούνται από την τεκτονική δράση, κυρίως, ή άλλα αίτια, έχουν μια κυρίαρχη επίδραση στη τεχνική συμπεριφορά του πετρώματος, στην πραγματικότητα της βραχομάζας. Οι ασυνέχειες που προκαλούνται από την τεκτονική δραστηριότητα έχουν μια ελεγμένη επίδραση στην αντοχή των πετρωμάτων και η κατανόηση της προελεύσεώς τους αποτελεί σημαντικό βήμα στην τεχνικογεωλογική μελέτη των γεωυλικών. Εξ άλλου, είναι αυτές οι ασυνέχειες που οργανώνονται σε κανονικές (σε σχέση με τη διεύθυνση προελεύσεώς των τάσεων) οικογένειες, ενώ οι υπόλοιπες, εμφανίζουν μια χαώδη κατανομή, που τη μεταφέρουν, σε κάποιο βαθμό, στο σύνολο των ασυνεχειών. όταν αυτές θεωρούνται (αναγκαστικώς) ως σύνολο και υφίστανται κοινή στατιστική επεξεργασία. Οι πιο σημαντικές από τις ασυνέχειες είναι οι ασυνέχειες διατμήσεως (διακλάσεις, ρήγματα), που εμφανίζονται από την παραμόρφωση των πετρωμάτων σε συνθήκες θραύσης. Το πέρασμα αυτό, με αύξηση της ολκιμότητας, οδηγεί σε περισσότερο σύνθετες δομές (πτυχές, ζώνες διατμήσεως), που μπορεί να συνοδεύονται από υφές που διαπερνούν τη μάζα του πετρώματος και που αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά διαμορφώσεως της αντοχής της βραχομάζας. Οι δομές αυτές είναι εκδηλώσεις της τοπικής παραμορφώσεως των πετρωμάτων, που, τελικώς, ελέγχονται από την παγκόσμια τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Οι ασυνέχειες αντιπροσωπεύουν επιφάνειες αδυναμίας (μειωμένης αντοχής), ενώ οι ζώνες των τεκτονικών επεισοδίων εμφανίζουν μια τεχνική συμπεριφορά, τελείως διαφορετική από το υπόλοιπο πέτρωμα. Το πρόβλημα της τεχνικής συμπεριφοράς του πετρώματος μεταπίπτει, στο μεγαλύτερο μέρος του, στο πρόβλημα της τεχνικής συμπεριφοράς των ασυνεχειών του.

3.1.3. ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΖΩΝΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ

Οι ζώνες των τεκτονικών επεισοδίων(ρήγματα, εφιππεύσεις, πτυχώσεις) είναι ευνόητο ότι διαφοροποιούνται από πλευράς τεχνικής συμπεριφοράς από το υπόλοιπο πέτρωμα.

Από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς, η καταπόνηση, η θραύση, ο κερματισμός, κ.λπ. του πετρώματος υποβαθμίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας στη ζώνη επιρροής του επεισοδίου. Από την «καρδιά» του τεκτονικού επεισοδίου, όπου εμφανίζεται το ελάχιστο της μηχανικής συμπεριφοράς, αυτή βαίνει βελτιούμενη ένθεν και ένθεν του άξονα του τεκτονισμού, μέχρι την ανέπαφη συνέχεια του πετρώματος.

Από πλευράς υδραυλικής συμπεριφοράς, η περατότητα αυξάνεται πρωτογενώς για τους ίδιους λόγους για τους οποίους μειώνεται η μηχανική συμπεριφορά. Δεν είναι, όμως, λίγες οι φορές που οι ζώνες αυτές αποκτούν μια δευτερογενή στεγανότητα λόγω πλήρους κονιοποίησης και αργιλοποίησης (μυλωνιτοποίησης) του υλικού. Η στεγανότητα αυτή μπορεί, τριτογενώς, να μετατραπεί σε περατότητα μέσου ασυνεχειών, με τη δημιουργία εκλεκτικών οδών διακινήσεως του νερού, από τη δική του δράση.

3.2. ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ

3.2.1. ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ

Η σημασία του κλίματος μπορεί να επιβεβαιωθεί και να διερευνηθεί στο πλαίσιο των επόμενων πεδίων.

1. Την επίδραση του κλίματος στη φύση, μέγεθος και συχνότητα φυσικών διαδικασιών (π.χ. πλημμύρες, εδαφικοί ορίζοντες, αλατότητα υπόγειων νερών, δράση παγετού κ.α.)
2. Τα όρια που θέτει το κλίμα στις κατασκευαστικές διαδικασίες (λόγω βροχοπτώσεων, χιονοπτώσεων, ανέμων, θερμοκρασίας κ.α.)
3. Τη δράση του κλίματος, ως αποσαθρωτικού παράγοντα στα δομικά και διακοσμητικά υλικά
4. Τη δράση του κλίματος, ως αποσαθρωτικού παράγοντα στη δημιουργία εδαφών

Δεν υπάρχουν τέλειες κατατάξεις των σημερινών κλιματικών συνθηκών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ακριβή προσδιορισμό των επιπτώσεων της αποσαθρώσεως. Στο ίδιο

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

πλαίσιο, πρέπει να εξεταστεί το γεγονός ότι κλιματικές μεταβολές άφησαν πίσω τους αποσπασμένα πετρώματα, που δημιουργήθηκαν από παρεμφερείς διαδικασίες με αυτές που διαδραματίζονται σήμερα στην ίδια θέση. Οι μορφές διαβρώσεως και τα προϊόντα τους είναι, επίσης, συνάρτηση του τύπου του πετρώματος. Η φύση ενός εδάφους που θα δημιουργηθεί εξαρτάται, όχι μόνο από το κλίμα, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του μητρικού πετρώματος, το οποίο θα υποστεί την αποσάθρωση.

3.2.1.1. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΕΙΣ

Πολλές κατατάξεις έχουν δει το φως της δημοσιότητας, κυρίως βασισμένες στις σχέσεις βροχοπτώσεως (P), θερμοκρασίας (T) και εξατμίσεως (E) και στους, έτσι, διαμορφούμενους δείκτες. Η κατάταξη που πρότεινε ο Thornthwaite είναι μια κατάταξη που χρησιμοποιείται ευρέως και είναι η εμφανιζόμενη στον παρακάτω πίνακα.

Οι υγρασιακές αυτές επαρχίες υποδιαιρούνται, στη βάση της εποχής των βροχοπτώσεων, ως εξής:

Πίνακας 9: Κατάταξη Thornthwaite (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).

Υγρασιακές επαρχίες	Χαρακτηριστική βλάστηση	Δείκτης P/E
A Βροχερή	Βροχερό δάσος	>128
B Υγρή	Δάσος	64-127
Γ Ύψυγρη	Εδαφική Βλάστηση	32-63
Δ Ημιάνυδρη	Στέπα	16-31
Ε Άνυδρη	Έρημος	<16

r: βροχόπτωση επαρκής σε όλες τις εποχές

s: έλλειμμα βροχής το καλοκαίρι

w: έλλειμμα βροχής το χειμώνα

d: έλλειμμα βροχής όλες τις εποχές

Η χρήση του δείκτη T/E οδηγεί σε μια άλλη, ανάλογη, κατάταξη:

Πίνακας 10: Κατάταξη βάσει δείκτη T/E (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).

Θερμοκρασιακές επαρχίες	Δείκτης T/E
A Τροπική	>128
B Μεσόθερμη	64-127
Γ Μικρόθερμη	32-63

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Δ Τάϊγκα	16-31
Ε Τούνδρα	1-15
Ζ Πάγος	0

Σε κάθε μια από τις υγρασιακές ή θερμοκρασιακές αυτές επαρχίες δημιουργούνται διαφορετικά εδαφικά υλικά, ως προϊόντα διαφορετικών αποσαθρωτικών διαδικασιών, που διαφοροποιούνται μέσα στο κλιματικό πλαίσιο της κάθε περιοχής.

3.2.2. ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΟΡΦΕΣ

Οι Tricart, Cailleux δημιούργησαν και πρότειναν ένα παγκόσμιο χάρτη συσχετισμού κλίματος και γεωμορφών, στον οποίο εμφανίζονται οι διάφορες μορφοκλιματικές περιοχές, που, συνοπτικώς, περιλαμβάνουν:

- ✓ Περιοχές ψύχους (παγετώδεις, περιπαγετώδεις)
- ✓ Δασώδεις περιοχές μέσων γεωγραφικών πλατών (θαλάσσιες, με ήπιο χειμώνα, όπου παραμένουν παγετώδεις και περιπαγετώδεις μορφές ή ηπειρωτικές, με δριμύ χειμώνα, όπου παραμένουν τεταρτογενείς μορφές permafrost ή μεσογειακές, με υγρό θέρος)
- ✓ Άνυδρες ή ημιάνυδρες ζώνες μικρών και μέσων γεωγραφικών πλατών, με διάκριση βροχοπτώσεων ανάμεσα στις στέπες και στις ερήμους και με διάκριση ανάμεσα στη θερμοκρασία χειμώνα ψυχρών και θερμών περιοχών
- ✓ Διατροπικές ζώνες, με διάκριση στην εποχή των βροχοπτώσεων (σαβάννα, δάσος)

Ένα εναλλακτικό σχήμα, που εμφανίζει τις, λεγόμενες μορφογενετικές περιοχές προτάθηκε από τον Peltier, με τις προτεινόμενες περιοχές, στη βάση του συνδυασμού του φάσματος της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και του φάσματος της μέσης ετήσιας βροχοπτώσεως και με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής.

3.2.3. ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΖΩΝΕΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΕΩΣ

Με βάση τις κλιματικές κατατάξεις και τις προκύπτουσες γεωμορφές, που, ήδη, παρουσιάστηκαν ο Strakhon πρότεινε μια παγκόσμια ζωνοποίηση, βασισμένη ευθέως στη φύση των συγχρόνων διαδικασιών αποσαθρώσεως, χωρίς πάντως, να παίρνει υπ' όψη τις διαφοροποιήσεις των γεωυλικών, που οφείλονται σε κλιματικές μεταβολές.

3.2.4. ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΕΩΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Το τελικό αποτέλεσμα της γενικότερης εξαλλοιώσεως των πετρωμάτων είναι το έδαφος ή, όπως ονομάζεται στην Τεχνική Γεωμορφολογία, το μηχανικό έδαφος (engineering soil), ως αποτέλεσμα της

συνδυασμένης δράσης των συγχρόνων και παλαιότερων κλιματικών συνθηκών, της ανθρώπινης δραστηριότητας (από ένα σημείο και μετά) και των χαρακτηριστικών του μητρικού πετρώματος.

Οι περισσότεροι παγκόσμιοι εδαφικοί χάρτες έχουν συνταχθεί στη βάση των γεωργικών χαρακτήρων των εδαφών, αφού η γεωργία ήταν η πρώτη που προέβαλε απαιτήσεις ως προς το πάχος, τα ορυκτολογικά και χημικά χαρακτηριστικά και τις άλλες ιδιαιτερότητες των εδαφών. Οι χάρτες αυτοί τροποποιήθηκαν στη συνέχεια, περιλαμβάνοντας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφικών συνόλων, ομάδων και υποομάδων. Είναι απαραίτητο να υπογραμμιστεί ότι, σε τοπική κλίμακα, τα εμφανιζόμενα μεταφερμένα εδάφη, από το υδρογραφικό δίκτυο, κυρίως, αλλά και από τον άνεμο, δεν αντιπροσωπεύουν την *in situ* αποσάθρωση των πετρωμάτων, ούτε και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και μεταβολές τους. Τέτοια εδάφη περιλαμβάνουν π.χ. παγετώδεις αποθέσεις, αλουβιακές αποθέσεις, ερημικές άμμους, loess και αποθέσεις ακτών κ.α. Ανάμεσα στις διάφορες μηχανικές κατατάξεις των εδαφών, είναι και οι παρατιθέμενες στη συνέχεια (Πίνακας 2). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο σημείο ότι οι κατατάξεις αυτές δεν αντικαθιστούν τις κλασικές κατατάξεις των εδαφών στο πλαίσιο της Εδαφομηχανικής, αλλά αντιπροσωπεύουν την προσέγγιση στις κατηγορίες εδαφών με το πρίσμα της Τεχνικής Γεωμορφολογίας, έστω κι αν εμφανίζουν τεχνικογεωλογικές ιδιότητες και περιγραφές.

3.2.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ

Το σύγχρονο κλίμα και οι τοπικές ιδιαιτερότητες και μεταβολές του επιδρούν, σε μεγάλο βαθμό, στα κατασκευαστικά προβλήματα. Η σχέση κατείδυση/εξάτμιση στην επιφάνεια του εδάφους ελέγχει τον υδροφόρο ορίζοντα και το βαθμό κορεσμού των επιφανειακών γεωυλικών. Αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια προσωρινών εκσκαφών, ένα έλλειμμα νερού οδηγεί στον κίνδυνο καταπτώσεως ή καταρρεύσεως, αν τα εδάφη είναι υγρά και παρεμποδίζεται η εξάτμιση. Ακόμα, η ίδια η εξάτμιση μπορεί να οδηγήσει σε, προς τα πάνω, μετανάστευση αλάτων του υπόγειου νερού. Η ισορροπία αυτή είναι, συνήθως, εποχιακή, με σοβαρές μεταβολές στην περίπτωση σημαντικών αλλαγών στο περιεχόμενο νερό των επιφανειακών σχηματισμών, κάτι που μπορεί να επηρεάσει, σε σύντομο χρόνο, την ευστάθεια των θεμελιώσεων αναχωμάτων και την παροχτευτικότητα των λιθορριπών. Σύγχρονες, μεγάλης κλίμακας, μετακινήσεις, συνήθως περιορίζονται σε περιόδους, στις οποίες οι «ξηρές συνθήκες» επικρατούν σε σχέση με τις «υγρές συνθήκες», πράγμα που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον άνεμο, καθώς επίσης και από το μέγεθος και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Η σύγχρονη βλάστηση, συνάρτηση, επίσης, του κλίματος, ασκεί ισχυρή επίδραση στο υπόγειο νερό, ιδιαιτέρως στο ισοζύγιο του. Μπορεί, επίσης, να σταθεροποιεί και να αποτρέπει επιφανειακές διαβρώσεις, σε φυσικά ή τεχνητά πρηνή.

Ειδική περίπτωση συνδυασμού χημικής (από τη χημική δράση σταγόνων νερού, ιδιαιτέρως θαλασσινού) και αιολικής αποσαθρώσεως (από τη μηχανική δράση σταγόνων νερού και σκόνης, που μεταφέρει ο άνεμος) αποτελεί ο σχηματισμός ειδικών γεωμορφών, των tafoni (μεγάλες κοιλότητες) και alveoles (μικρές κοιλότητες, ακόμα και στο εσωτερικό των tafoni). Η μορφή των κοιλοτήτων που προκύπτουν μπορεί να προσαρμόζεται στο γενικό σχήμα του πετρώματος (π.χ. σφαιρικοί όγκοι γρανιτών) ή να είναι εντελώς ανεξάρτητη από τη γεωμετρία του πετρώματος. Σχιστόλιθοι και γρανίτες είναι από τα πλέον ευπρόσβλητα πετρώματα από τη μορφή αυτής της διαβρώσεως.

Ανακεφαλαιώνοντας το ρόλο των κλιματικών παραγόντων και τις τοπικές γεωμορφολογικές συνθήκες στο βαθμό εκδηλώσεως φαινομένων αποσαθρώσεως, υπογραμμίζονται τα εξής. Υπάρχουν τρεις τύποι αποσαθρώσεως, ενεργούντες ανεξαρτήτως ή σε συνδυασμό. Η αποδόμηση (degradation) του γεωλογικού σχηματισμού. Τυπικώς απαντάται, προκειμένου περί πετρωμάτων, σε περιοχές επικρατήσεως τραχέων ηπειρωτικών συνθηκών, κυρίως, ορεινών περιοχών. Η αποδόμηση (decomposition) του γεωυλικού, προκαλείται από τη δράση χημικών παραγόντων, περιεχομένων στον αέρα της ατμόσφαιρας και στο νερό που περιέχει, σε διάλυση, άλατα και αέρια, κυρίως οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα, συνδεδόμενα με την αποδόμηση οργανικής ύλης. Η βιολογική δράση και η επίδραση της βλαστήσεως είναι ποικίλη, φυσικής φύσης, όπως η δράση του ριζικού συστήματος ή το λίκνισμα υψηλών δέντρων από τον άνεμο ή χημικής φύσης όπως οξέα που απελευθερώνονται από το ριζικό σύστημα.

Πίνακας 11: Μηχανική ταξινόμηση των αποσαθρωμένων πετρωμάτων (Fooker et al, 1971) (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).

Τάξη	Βαθμός αποδομήσεως	Αναγνώριση πεδίου		Μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων
		Προσέγγιση από την πλευρά των Εδαφών-Μαλακών Βράχων	Προσέγγιση από την πλευρά των Πετρωμάτων	
VI	Έδαφος	Το αρχικό έδαφος έχει εντελώς	Το πέτρωμα έχει αποχρωματιστεί και	Ακατάλληλο για σοβαρές

Τάξη	Βαθμός αποδομήσεως	Αναγνώριση πεδίου		Μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων
		μεταβληθεί σε μια νέα δομή και σύσταση, σε συμφωνία με τις υπάρχουσες συνθήκες της επιφάνειας	εντελώς μεταβληθεί σε έδαφος, στο οποίο, η αρχική δομή έχει εντελώς καταστραφεί. Σημειώνεται μεγάλη μεταβολή όγκου.	Θεμελιώσεις. Ασταθές στα πρανή, με ή χωρίς βλάστηση και διαβρώνεται χωρίς κάλυμμα. Επιλογή πριν τη χρήση ως λιθορριπή.
V	Εντελώς αποσαθρωμένο υλικό	Το έδαφος έχει αποχρωματιστεί και εξαλλοιωθεί, χωρίς ίχνη της αρχικής δομής.	Το πέτρωμα έχει αποχρωματιστεί και μεταβληθεί σε έδαφος, αλλά η αρχική δομή διατηρείται. Οι ιδιότητες του εδάφους εξαρτώνται από τη φύση του μητρικού πετρώματος.	Εκσκαφή με απλά μηχανικά μέσα. Ακατάλληλο για θεμελίωση φραγμάτων από σκυρόδεμα και μεγάλων κατασκευών. Ασταθές σε υψηλά και απότομα ορύγματα. Ενδεχόμενη εμφάνιση νέου δικτύου ασυνεχειών. Απαιτεί προστασία έναντι διαβρώσεως.
IV	Ισχυρώς αποσαθρωμένο υλικό	Το έδαφος έχει, κυρίως, εξαλλοιωθεί, με σποραδικές εμφανίσεις λιθοϋπολειμμάτων από το αρχικό	Το πέτρωμα έχει αποχρωματιστεί. Οι ασυνέχειες μπορεί να είναι ανοικτές με επιφάνειες αποχρωματισμένες. Η	Παρόμοιο με το προηγούμενο. Ακανόνιστη εμφάνιση ογκολίθων το κάνει ακατάλληλο για

Τάξη	Βαθμός αποδομήσεως	Αναγνώριση πεδίου		Μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων
		έδαφος. Λίγα ή καθόλου ίχνη της αρχικής δομής.	αρχική δομή του πετρώματος εμφανίζεται εξαλλοιωμένη κοντά στις ασυνέχειες. Η εξαλλοίωση διεισδύει αλλά πυρήνες βράχου είναι, ακόμα, παρόντες.	Θεμελίωση μεγάλων κατασκευών.
III	Μετρίως αποσαθρωμένο υλικό	Το έδαφος αποτελείται από μεγάλα αποχρωματισμένα λιθοϋπολείμματα του αρχικού εδάφους και μεταξύ αυτών εξαλλοιωμένα υλικά. Η εξαλλοίωση διαπερνά το υλικό, από τις επιφάνειες των ασυνεχειών.	Το πέτρωμα έχει αποχρωματιστεί, οι ασυνέχειες μπορεί να είναι ανοικτές, με αποχρωματισμό και την εξαλλοίωση να διαπερνά προς τα μέσα. Το ακέραιο πέτρωμα, σημαντικώς ασθενέστερο από το υγιές.	Εκσκαφή δύσκολη χωρίς εκρηκτικά. Κατάλληλο για θεμελίωση μικρών φραγμάτων από σκυρόδεμα ή λιθορριπών. Κατάλληλο για ημιπερατό υλικό πλήρωσεως. Αστάθεια εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.
		Προσέγγιση από την πλευρά των Εδαφών-Μαλακών Βράχων	Προσέγγιση από την πλευρά των Πετρωμάτων	
II	Ελαφρώς αποσαθρωμένο υλικό	Το υλικό συνίσταται από γωνιώδη μπλοκ υγιούς πετρώματος, αποχρωματισμένα ή όχι. Εξαλλοιωμένο	Το πέτρωμα έχει ελαφρώς αποχρωματιστεί, ιδιαιτέρως κοντά στις ασυνέχειες, που μπορεί	Απαιτεί εκρηκτικά για εκσκαφή. Κατάλληλο για βαριές θεμελιώσεις. Ισχυρώς περατό

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Τάξη	Βαθμός αποδομήσεως	Αναγνώριση πεδίου		Μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων
		υλικό αρχίζει να διεισδύει από τις ασυνέχειες που διαχωρίζουν τα μπλοκ.	να είναι ανοικτές. Ακέραιο πέτρωμα όχι σημαντικώς ασθενέστερο από το υγιές.	μέσω των ασυνεχειών, με αύξηση από πάνω προς τα κάτω. Συζητήσιμο ως αδρανές σκυροδέματος.
I	Ελαφρώς αποσαθρωμένο υλικό	Το μητρικό πέτρωμα δεν δείχνει αποχρωματισμό, απώλεια αντοχής ή άλλα χαρακτηριστικά, οφειλόμενα στην αποσάθρωση.	Το μητρικό πέτρωμα δεν δείχνει αποχρωματισμό, απώλεια αντοχής ή άλλα χαρακτηριστικά, οφειλόμενα στην αποσάθρωση.	Η κηλίδωση σημαίνει διείσδυση νερού μέσω των ασυνεχειών. Μεμονωμένα κομμάτια απομακρύνονται από εκρήξεις ή από υπολειμματικές τάσεις. Ενδεχόμενη υποστήριξη σε σήραγγες ή εκσκαφές.

Η χρησιμοποίηση του Πίνακα 11 απαιτεί κάποια προσοχή, καθώς δευτερογενείς παράγοντες, σε πολλές περιπτώσεις, μεταβάλλουν την εικόνα της βραχομάζας. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα συνιστούν περιοχές με μεγάλες τοπογραφικές κλίσεις ή/και εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους. Τόσο οι άνεμοι, όσο και η βροχή ξεπλένουν την επιφάνεια της βραχομάζας, καθώς και το εσωτερικό του ίχνους των ασυνεχειών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ψευδών εντυπώσεων για το βαθμό αποσαθρώσεως του πετρώματος. Στην περίπτωση αυτή και εφ' όσον συνηγορεί το είδος του πετρώματος, πρόσθετα στοιχεία μπορεί να προσφέρει η ορυκτολογική εξέταση, με στόχο τον προσδιορισμό ορυκτών εξαλλοιώσεως. Στις συνηθισμένες εφαρμογές, πάντως, το γεγονός αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς αυτό που ενδιαφέρει είναι η τεχνητή συμπεριφορά του πετρώματος ως έχει και όχι η γεωλογική του ιστορία.

Πίνακας 12: Ταξινόμηση των βραχωδών σχηματισμών με βάση το βαθμό αποσάθρωσης (London Geological Society, 1970, με αλλαγές) (Πηγή: Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα).

Κατηγορία	Συμβολισμός	Χαρακτηριστικά
I _A	F (Fresh)	Χωρίς ίχνος αποσάθρωσης. Το πέτρωμα είναι πολύ κοντά στην αρχική του κατάσταση.
I _B	FW (Faintly Weathered)	Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών του πετρώματος.
II	SW (Slightly Weathered)	Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών, λιγότερο έντονη στο ακέραιο πέτρωμα.
III	MW (Moderately Weathered)	Εκτεταμένη αποσάθρωση σε όλη τη βραχομάζα, χωρίς ενδείξεις ευθρυπτότητας.
IV	HW (Highly Weathered)	Εκτεταμένη αποσάθρωση σε όλη τη βραχομάζα, με τοπικές ενδείξεις ευθρυπτότητας.
V	CW (Completely Weathered)	Πλήρης αποσύνθεση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση υφής και δομής του πετρώματος.
VI	RS (Residual Soil)	Η μάζα μπορεί να χαρακτηριστεί ως εδαφικός σχηματισμός, χωρίς υφή και δομή του πετρώματος.

4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

4.1. ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Οι γεωκίνδυνοι (ή γεωλογικοί κίνδυνοι) είναι αποτελέσματα φυσικών, ενεργών διεργασιών. Μπορεί να είναι επικίνδυνα για τους ανθρώπους ή τις υποδομές ή μπορεί να εμφανίζονται φυσικά σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς επικίνδυνες επιπτώσεις. Οι γεωκίνδυνοι περιλαμβάνουν: ηφαιστειακές εκρήξεις, σεισμούς, κατολισθήσεις, χιονοστιβάδες, πλημμύρες, τσουνάμι και άλλες καταρρεύσεις εδάφους λόγω της απόψυξης του μόνιμου παγετού. Συχνά, οι γεωκίνδυνοι συμβαίνουν γρήγορα και χωρίς ιδιαίτερη προειδοποίηση, γεγονός που αυξάνει την ανάγκη και τη σημασία της μακροπρόθεσμης παρακολούθησης περιοχών υψηλού κινδύνου, όπως ηφαίστεια, ενεργές κατολισθήσεις ή ροές συντριμμιών ή περιοχές όπου είναι γνωστό ότι ο μόνιμος παγετός ξεπαγώνει.

Οι προαναφερθέντες γεωκίνδυνοι επιφέρουν μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις και κατά συνέπεια δημιουργούνται πολλαπλά προβλήματα, τόσο στα φυσικά, αλλά και στα τεχνητά πρανά. Εκεί δηλαδή όπου έχει υπάρξει ανθρωπογενής παρέμβαση. Αστοχίες σε έργα κομβικής σημασίας για τις κατά τόπους περιοχές, ή ακόμη και εμφάνιση καταστροφών σε κατοικημένες περιοχές. Οι γεωκίνδυνοι προσβάλλουν πέρα από την ίδια κατασκευή, τα πρανά στα οποία αυτή στηρίζεται ή και την περιβάλλουν. Εξαιρώντας τις κατοικημένες περιοχές, ο μεγαλύτερος αντίκτυπος καταστροφών από γεωκινδύνους παρατηρείται σε έργα μεγάλων διαστάσεων όπως είναι οι αγωγοί, οι αυτοκινητόδρομοι, τα ορυχεία, οι γέφυρες, τα φράγματα και όλες οι κατασκευές και οι παρεμβάσεις που επηρεάζουν άμεσα και έμμεσα την ανθρώπινη ζωή.

Στις *Εικόνες 13* και *14* απεικονίζονται τα αποτελέσματα δύο καταστροφών. Η πρώτη σε ευρωπαϊκό έδαφος στη Γερμανία στις καταιγίδες του 2021 και η δεύτερη στην Ουταρακάντ της Ινδίας. Κοινό χαρακτηριστικό και των δύο απώλειες υλικές αλλά και ανθρώπινες. Συγκεκριμένα στη νοτιοανατολική Ασία ο αριθμός των γεωκινδύνων έχει πενταπλασιαστεί από το 1970 έως το 2000, με αποτέλεσμα

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

καταστροφές συνολικού ύψους 25 δισεκατομμυρίων δολαρίων μόνο για την πενταετία 2008-2012 σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα.



Εικόνα 13: Πλημμύρα στο Παλατινάτο της Γερμανίας, 2021.



Εικόνα 14: Κατολίσθηση στην περιφέρεια Ουταρακάντ της Ινδίας.

4.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Με τον όρο κατολίσθηση εννοείται η καθολική αργή ή γρήγορη μετακίνηση μιας εδαφικής μάζας λόγω της βαρύτητας. Μια κατολίσθηση ενεργοποιείται όταν οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του εδάφους υπερβαίνουν αυτές που το έδαφος μπορεί να αντισταθεί.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Οι κατολισθήσεις μπορεί να δημιουργηθούν λόγω γενικής αστοχίας, με τον συνδυασμό αυξημένων φορτίων λόγω σεισμού, αύξησης της πίεσης των πόρων ή και μείωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Οι κατολισθήσεις (βλ. *Εικόνα 15* και *Εικόνα 16*) είναι ένα φαινόμενο με τεράστιες σε ορισμένες περιπτώσεις κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες, αφού εκτός από την οικονομική επιβάρυνση λόγω της κατάρρευσης ενός τεχνικού έργου ή της διακοπής της συγκοινωνίας, συνοδεύονται από την απώλεια ανθρώπινων ζωών (Λοΐζος, 1964).



Εικόνα 15: Ολίσθηση οδοστρώματος επαρχιακής οδού Κοζάνης (2015).



Εικόνα 16: Κατολίσηση σε ορυχείο χαλκού Γιούτα, ΗΠΑ (2013).

4.2.1. ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Οι κατολισθήσεις αποτελούν έναν από τους πιο συχνούς γεωκινδύνους με τους οποίους ο άνθρωπος έρχεται αντιμέτωπος και τα αίτια τους ποικίλουν. Η παραδοσιακή άποψη ότι οι κατολισθήσεις περιορίζονται σε εξαιρετικά οι απότομες πλαγιές και το αφιλόξενο έδαφος δεν αντικατοπτρίζουν με

ακρίβεια την πραγματική διάσταση του προβλήματος. Οι περισσότερες χώρες στον κόσμο έχουν επηρεαστεί κατά κάποιο τρόπο από κατολισθήσεις. Ο λόγος για την τόσο ευρεία γεωγραφική κάλυψη έχει να κάνει πολύ με τους πολλούς διαφορετικούς μηχανισμούς ενεργοποίησης για κατολισθήσεις.

Οι υπερβολικές βροχοπτώσεις, οι σεισμοί, τα ηφαίστεια, οι δασικές πυρκαγιές και άλλοι μηχανισμοί, και πιο πρόσφατα, ορισμένες επικίνδυνες δραστηριότητες είναι μόνο μερικές από τις βασικές αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν κατολισθήσεις.

Όμοια, οι κατολισθήσεις είναι γνωστό ότι συμβαίνουν τόσο στην ξηρά όσο και κάτω από το νερό. Το ίδιο ισχύει και για την καλλιεργούμενη γη, τις άγονες πλαγιές και τα φυσικά δάση, όλα υπόκεινται σε κατολισθήσεις.

Μπορεί να επηρεαστούν, τόσο οι εξαιρετικά ξηρές, όσο και οι πολύ υγρές περιοχές από αστοχίες πρανών, και το πιο σημαντικό, οι απότομες κλίσεις δεν αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβούν κατολισθήσεις. Παρατηρήθηκε ότι οι κατολισθήσεις μπορούν να συμβούν σχεδόν οπουδήποτε στον κόσμο, ωστόσο, αναγνωρίζουμε ορισμένα πρότυπα στην εμφάνισή τους.

Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι οι τύποι κατολισθήσεων ποικίλλουν σε σχέση με τις τοπικές και περιφερειακές συνθήκες.

Οι χείμαρροι συντριμμίων απαιτούν κανάλια και χαράδρες για να συμβούν, ενώ οι πτώσεις βράχων θα συμβούν μόνο όπου υπάρχουν απότομες, εκτεθειμένες όψεις από βράχους ή πλούσιες σε ογκόλιθους κοιτάσματα. Επομένως, ως βασικότερες αιτίες κατολισθήσεων θεωρούνται: Η λιθολογική σύσταση και το βάρος του εδαφικού υλικού, οι δυνάμεις ροής, οι μεταβολές στις μηχανικές παραμέτρους του εδαφικού υλικού, οι μεταβολές στη γεωμετρία του πρανού, καθώς και οι κλιματολογικές συνθήκες έχουν επίσης σημαντικό ρόλο. Ακόμη, βασικό ρόλο διαδραματίζουν και οι επιφορτίσεις με τεχνικά έργα, κατασκευές, επιχώσεις. Τέλος, υψίστης σημασίας κρίνεται και η συμβολή του υδάτινου στοιχείου σε όλες τις παραλλαγές του, είτε με τη μορφή επιφανειακής ροής νερού, είτε υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, είτε ως παγετού. Ακόμη σημαντικό ρόλο κατέχουν οι σεισμοί και η βλάστηση.

4.2.2. ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Πέρα από την ταξινόμηση των κατολισθήσεων με κριτήριο το είδος της μετακίνησης (*Πίνακας 13*), οι *Cruden και Varnes (1996)* πρότειναν ένα είδος κατηγοριοποίησης βασισμένο στην ταχύτητα κίνησης.

Πίνακας 13: Ταξινόμηση Κατολισθήσεων με βάση το είδος μετακίνησης (Varnes, 1978).

Τύπος Μετακίνησης		Τύπος Μετακινούμενου Υλικού		
		Βραχώδεις Υπόβαθρο	Εδάφη	
			Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Κατάπτωση		Κατάπτωση Βράχων	Κατάπτωση Κορημάτων	Κατάπτωση Γαιών
Ανατροπή		Ανατροπή Βράχων	Ανατροπή Κορημάτων	Ανατροπή Γαιών
Ολίσθηση	Περιστροφική Ολίσθηση	Περιστροφική Ολίσθηση Βράχων	Περιστροφική Ολίσθηση Κορημάτων	Περιστροφική Ολίσθηση Γαιών
	Μεταθετική Ολίσθηση	Μεταθετική Ολίσθηση Βράχων	Μεταθετική Ολίσθηση Κορημάτων	Μεταθετική Ολίσθηση Γαιών
Ροές		Ροή Βράχων	Ροή Κορημάτων	Ροή Γαιών
Πλευρική Εξάπλωση		Εξάπλωση Βράχων	Εξάπλωση Κορημάτων	Εξάπλωση Γαιών
Σύνθετη Μετακίνηση		Συνδυασμός Δύο ή Περισσότερων Κύριων Τύπων Μετακίνησης		

Με κριτήριο την ταχύτητα διακρίνονται επτά κατηγορίες κατολισθήσεων (Πίνακας 14), όπου στην πρώτη κλάση είναι εκείνες των οποίων η ταχύτητα είναι εξαιρετικά αργή και καθίστανται στην πραγματικότητα ανεπαίσθητες και μπορεί να αποφευχθεί κάθε δυνητική καταστροφή ή ζημία. Στις κατολισθήσεις δεύτερης και τρίτης κλάσης η ταχύτητα χαρακτηρίζεται ως πολύ αργή και αργή αντίστοιχα. Δηλαδή κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά του μέτρου έως ελάχιστα μέτρα το έτος. Στις περιπτώσεις αυτές σε αντίθεση με την πρώτη κλάση προκύπτουν κάποιες μικρές καταστροφές, αλλά ο ορίζοντας δράσης τους επιτρέπει ευρείες παρεμβάσεις και επιδιορθώσεις, έτσι ώστε να προλαμβάνονται τα χειρότερα και η κλίμακα των ζημιών και καταστροφών να είναι η ελάχιστη. Όσον αφορά κατολισθήσεις τέταρτης και πέμπτης κλάσης, οι ταχύτητές τους χαρακτηρίζονται ως μέτρια και γρήγορη και τα αποτελέσματά τους είναι καταστροφικά για τις περιουσίες, όχι όμως και για την ανθρώπινη ζωή για την οποία υπάρχει αρκετός χρόνος εκκένωσης, καθώς οι ταχύτητες περιορίζονται από μερικά μέτρα το μήνα, σε ελάχιστα μέτρα ανά ώρα. Στην έκτη και έβδομη κλάση όπου οι ταχύτητες περιγράφονται ως πολύ γρήγορη και εξαιρετικά γρήγορη δεν υπάρχει καμία δυνατότητα αντίδρασης, με ταχύτητες μέτρων ανά λεπτό και δευτερόλεπτο αντίστοιχα, τα περιθώρια

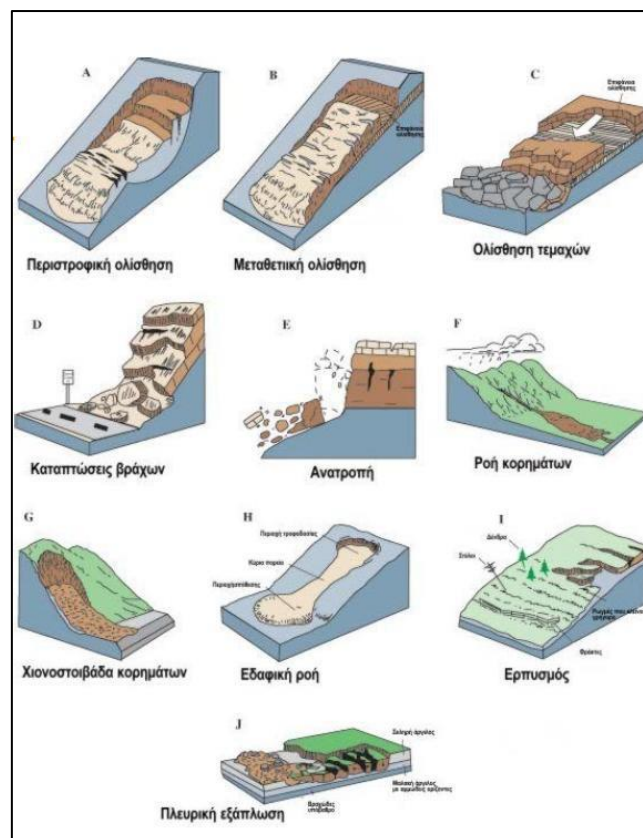
Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

γενικευμένης αντίδρασης είναι ουσιαστικά ανύπαρκτα, με αποτέλεσμα τεράστιο κόστος σε υποδομές και ανθρώπινες ζωές.

Πίνακας 14: Κατηγορίες Κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα (Cruden & Varnes, 1996).

Κλάση Ταχύτητας	Περιγραφή	Ταχύτητα (mm/s)	Τυπική Ταχύτητα
1	Εξαιρετικά Αργή	-	-
2	Πολύ Αργή	$<5 \times 10^{-7}$	15 mm/year
3	Αργή	5×10^{-5}	1.6 m/year
4	Μέτρια	5×10^{-3}	13 m/month
5	Γρήγορη	5×10^{-1}	1.8 m/h
6	Πολύ Γρήγορη	5×10	3 m/min
7	Εξαιρετικά Γρήγορη	5×10^3	5 m/s

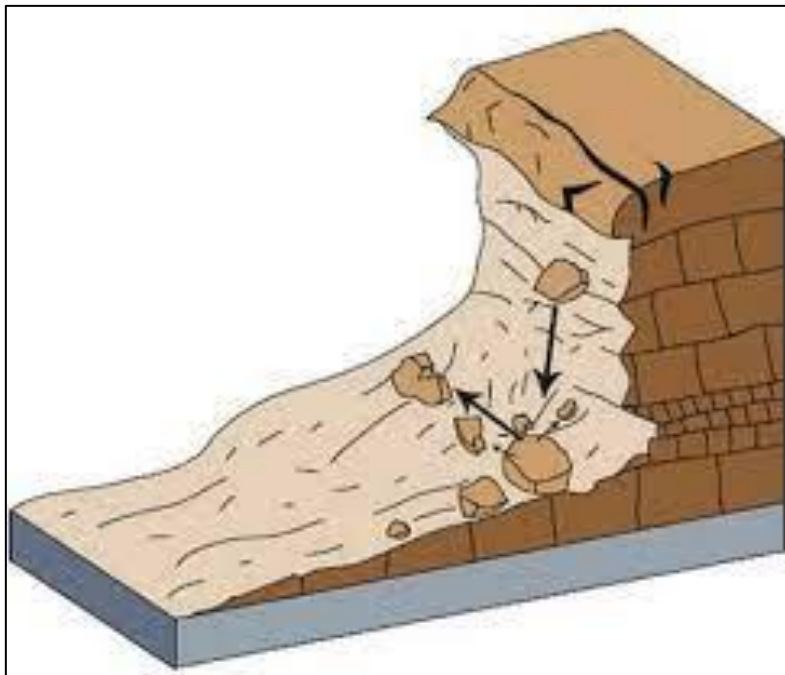
Ανά τα χρόνια, έχουν προταθεί από μηχανικούς και γεωλόγους διάφορα συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων, τα οποία βασίζονται σε πληθώρα παραμέτρων, ένα εκ των οποίων είναι η ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978). Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί αστοχίας πρανών απεικονίζονται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Βασικοί τύποι αστοχίας πρανών (Παπαδόπουλος και Λουπασάκης, 2016).

4.2.2.1. ΚΑΤΑΠΤΩΣΗ (FALL)

Πρόκειται για μια αστοχία πρανών που συναντάται σε βραχώδεις σχηματισμούς όπου μια μάζα πετρώματος αλλά και συνεκτικού εδάφους, οποιουδήποτε μεγέθους αποσπάται από ένα βραχώδες ή απότομο εδαφικό πρανές, χωρίς διατμητική μετατόπιση. Οι καταπτώσεις (Εικόνες 18 και 19) είναι πιο συχνές στα απότομα πρανή πολύ συνεκτικών εδαφών ή βράχων, τα οποία αλλοιώνονται από τα θαλάσσια κύματα ή την ορμή των ποταμών καθώς φυσικά και από παρεμβάσεις ανθρωπογενούς χαρακτήρα.



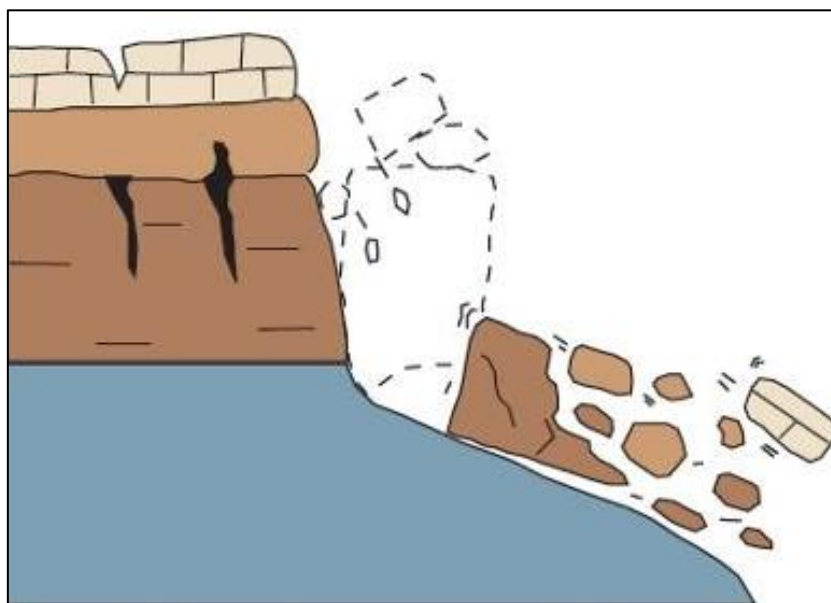
Εικόνα 18: Κατάπτωση (US Geological Survey, 2004)



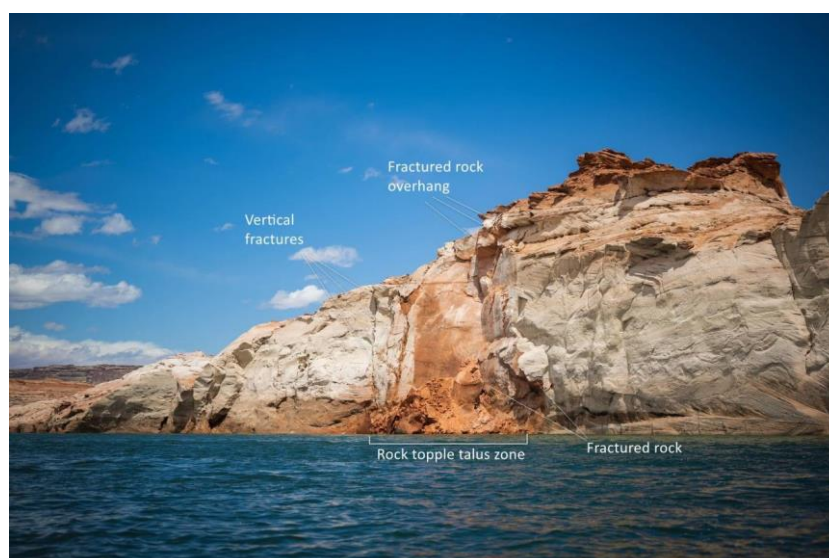
Εικόνα 19: Κατάπτωση Βράχων στην εθνική οδό Λάρισας-Θεσσαλονίκης (2022).

4.2.2.2. ΑΝΑΤΡΟΠΗ (TOPPLE)

Πρόκειται για κίνηση προς τα εμπρός της μάζας που αποσπάται από ένα, γύρω από έναν άξονα περιστροφής ο οποίος βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους το u της προαναφερθείσας μάζας και συναντάται κυρίως στα βραχώδη πρανή. Σε μία ανατροπή (Εικόνα 20), η κίνηση ξεκινά αργά, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός αυξάνεται. Βασικές αιτίες που οδηγούν σε ανατροπές είναι το υδάτινο στοιχείο (Εικόνα 21), είτε διατρέχοντας συνεχώς τις ρωγμές και τις ασυνέχειες του πρανού είτε, οι ίδιες δυνάμεις βαρύτητας του πρανού. Διακρίνονται επίσης σε τρεις κατηγορίες (Hoek & Bray, 1977): Την ανατροπή τεμαχίων λόγω κάμψης (block-flexural toppling), την ανατροπή τεμαχίων (block toppling) και την ανατροπή λόγω κάμψης (flexural toppling).



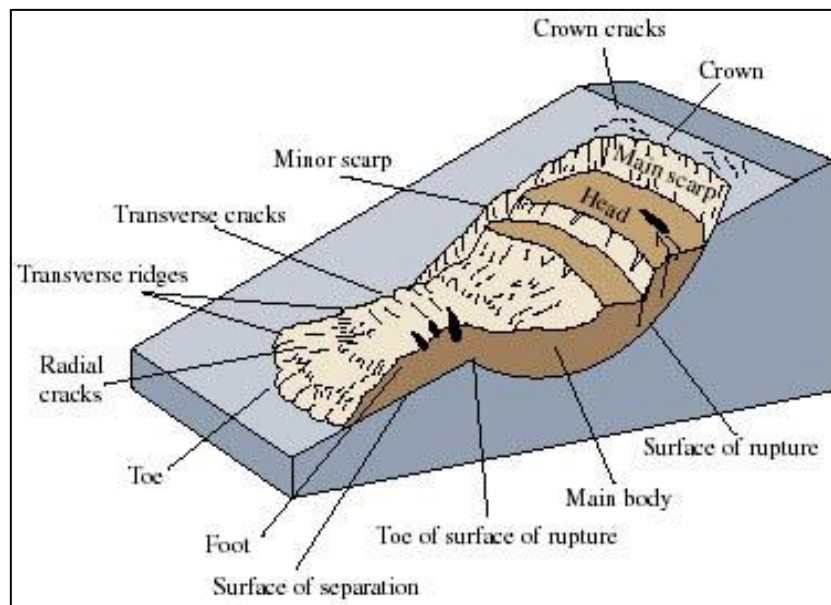
Εικόνα 20: Ανατροπή (US Geological Survey, 2004).



Εικόνα 21: Ανατροπή στη λίμνη Πάουελ της Αριζόνα, ΗΠΑ (2022).

4.2.2.3. ΟΛΙΣΘΗΣΗ (SLIDE)

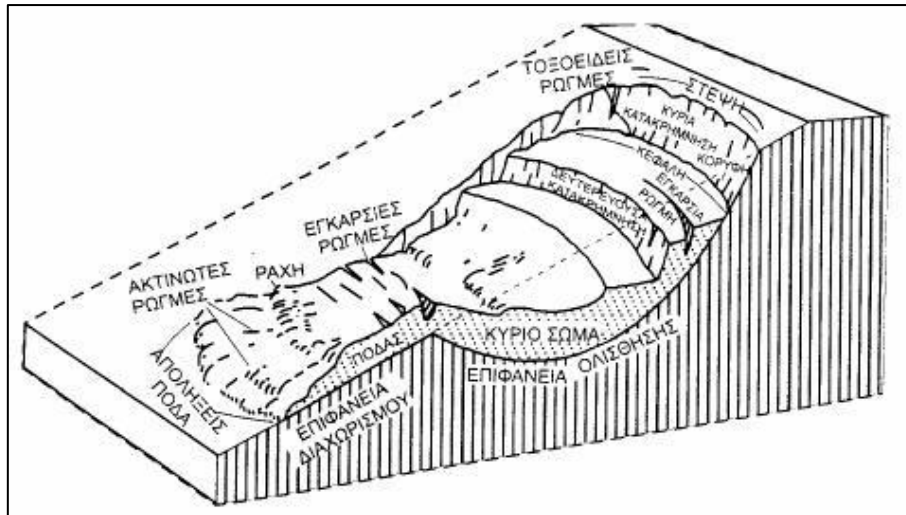
Πρόκειται για καθοδική κίνηση της εδαφικής ή βραχώδους μάζας πάνω σε ζώνες ή επιφάνειες θραύσης, οι οποίες έχουν ως κεντρικό χαρακτηριστικό έντονη διατμητική παραμόρφωση (Εικόνα 22). Η κίνηση δεν εκδηλώνεται σε όλη την επιφάνεια αστοχίας ταυτόχρονα αλλά με σταδιακό τρόπο. Κατά τον Varnes, η ολίσθηση ενός πρानούς διακρίνεται ανάμεσα σε περιστροφική και μεταθετική. Βασική διάκριση των δύο περιπτώσεων είναι πως στην περιστροφική ολίσθηση η μάζα που αστοχεί τείνει να ισορροπήσει, ενώ η μεταθετική εξελίσσεται ανεξέλεγκτα.



Εικόνα 22: Ολίσθηση (US Geological Survey, 2004).

Η περιστροφική (rotational) ολίσθηση (Εικόνες 22 και 23) ορίζεται ως η κίνηση της εδαφικής μάζας η οποία πραγματοποιείται κατά μήκος κεκλιμένης επιφάνειας αστοχίας, η οποία στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω. Ακόμη, στην περίπτωση ομοιογενών υλικών η επιφάνεια αστοχίας τείνει προς τον κύκλο. Στα πρानή τα οποία στερούνται, ανθρωπογενών παρεμβάσεων (φυσικά πρानή), τα υλικά τείνουν να είναι ανομοιογενή και συνεπώς η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας βασίζεται σε προηγούμενες επιφάνειες αστοχίας και τις παρούσες ανομοιογένειες του πρανούς και δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο σχήμα.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 23: Ιδεατή απεικόνιση περιστροφικής ολίσθησης (Κουκής και Σαμπατακάκης, 2007).

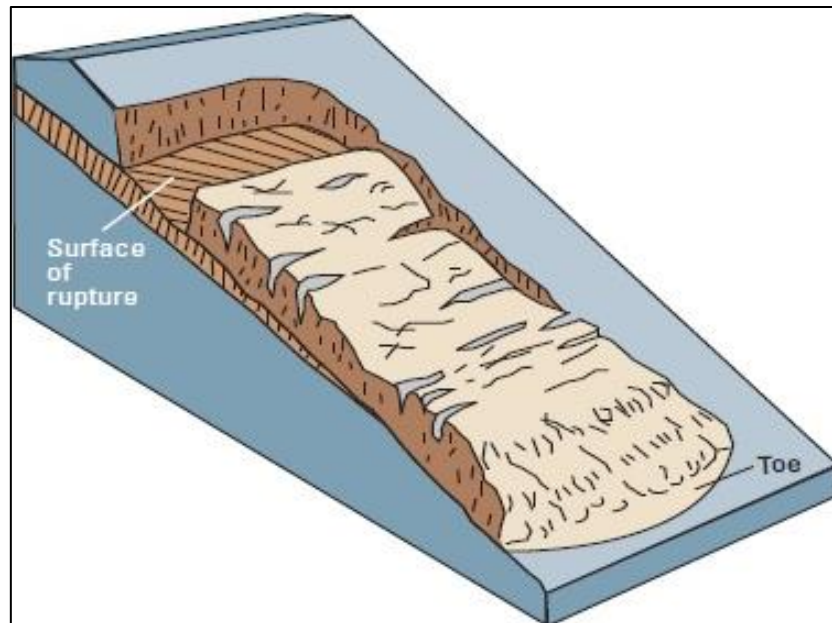


Εικόνα 24: Περιστροφική Ολίσθηση Σκάρμπορο, Αγγλία (British Geological Survey, 1993).

Η μεταθετική (transitional) ολίσθηση (Εικόνα 25) ορίζεται ως η ολίσθηση κατά μήκος μιας κυματοειδούς ή επίπεδης επιφάνειας θραύσης, με μικρή περιστροφική κίνηση, με επιφάνεια αστοχίας είτε επίπεδη, είτε σε μορφή σφήνας. Η αστοχία υπό σφηνοειδή μορφή συμβαίνει όταν το ίχνος της τομής δύο επιφανειών ασυνέχειας που περιβάλλουν τη μάζα που αστοχεί και η κλίση του πρηνούς έχουν όμοια διεύθυνση, ενώ η επίπεδη επιφάνεια αστοχίας έχει ως προϋπόθεση η επιφάνεια του πρηνούς να είναι σχεδόν παράλληλη με την επιφάνεια ολίσθησης (Εικόνα 26). Αναγκαία προϋπόθεση για αστοχία κάθε μορφής είναι η κλίση του ίχνους ή της επιφάνειας

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

ολίσθησης, να είναι μεγαλύτερη της γωνίας εσωτερικής τριβής στις αντίστοιχες επιφάνειες ασυνέχειας. Ακόμη και οι μεταθετικές ολισθήσεις είναι πιο αβαθείς από τις περιστροφικές και συνήθως το μήκος τους υπερβαίνει το δεκαπλάσιο του βάθους τους (Skempton and Hatchinson, 1969).



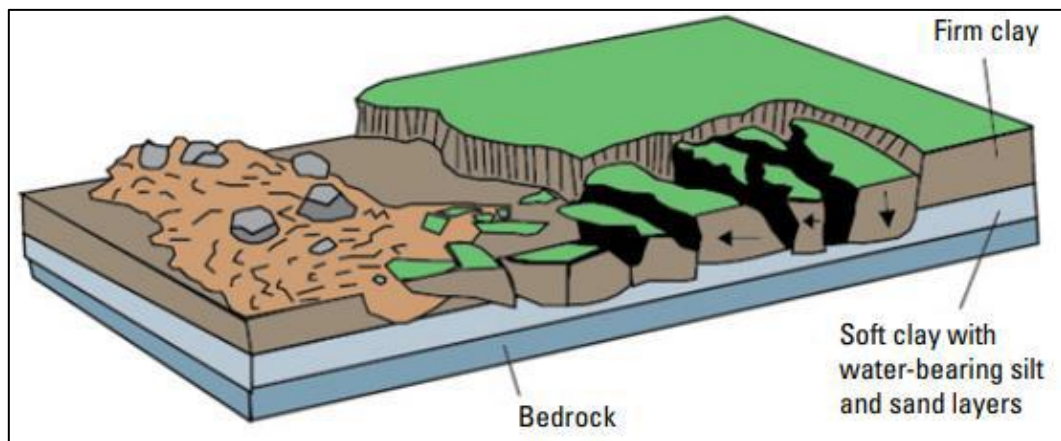
Εικόνα 25: Μεταθετική Ολίσθηση (US Geological Survey, 2004).



Εικόνα 26: Μεταθετική Ολίσθηση στη Βρετανική Κολούμπια, Καναδάς (Canada Geological Survey, 2001).

4.2.2.4. ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗ (LATERAL SPREAD)

Ο όρος «εξάπλωση» χρησιμοποιήθηκε (Terzaghi and Peck, 1948) για να περιγράψει τις απότομες μετακινήσεις ρευστοποιημένων στρωμάτων άμμου ή ιλύος στα οποία υπέρκεινται ομογενή στρώματα αργίλου ή τα οποία έχουν φορτίσει από επιχώματα. Στις πλευρικές εξαπλώσεις (Εικόνα 27) η κίνηση συνοδεύεται από διατμητικές και εφελκυστικές ρωγμές. Οι πλευρικές εξαπλώσεις διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: Την εξάπλωση ρευστοποίησης και την εξάπλωση βράχων (Εικόνα 28).



Εικόνα 27: Πλευρική Εξάπλωση (US Geological Survey, 2004).

Στην εξάπλωση ρευστοποίησης η αστοχία του εδάφους προκύπτει όταν ρευστοποιούνται χαλαρά ιζήματα, τα οποία υπόκεινται του συνεκτικού υλικού και προκαλούν θραύση και επέκταση αυτού. Η συγκεκριμένη μορφή εξάπλωσης είναι πιθανό να προκύψει είτε λόγω σεισμού ή και με τη βοήθεια τεχνικών μέσων. Ακόμη, η διαδικασία της θραύσης πραγματοποιείται βαθμιαία, ενώ η επέκταση είναι μια εξαιρετικά γρήγορη διαδικασία. Στην κατηγορία της πλευρικής εξάπλωσης βράχων, πρόκειται για μια πολύ αργή διαδικασία εξάπλωσης της βραχώδους εδαφικής μάζας, η οποία παρουσιάζει ρωγμές και υπέρκειται μαλακών υλικών.



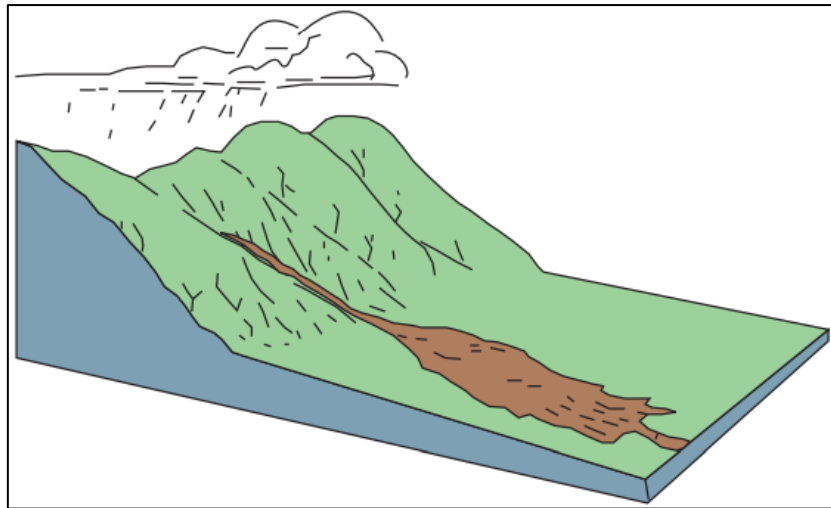
Εικόνα 28: Πλευρική Εξάπλωση σε δρόμο στην Καλιφόρνια, 1989 (US Geological Survey, 1989).

4.2.2.5. ΡΟΗ (FLOW)

Ως ροή χαρακτηρίζεται η διαρκής κίνηση εδαφικού υλικού στον χώρο, με μικρής έκτασης διατμητικές επιφάνειες, οι οποίες τείνουν να μην διατηρούνται (Εικόνα 29). Οι ροές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: Τις ροές βράχων, γαιών και κορημάτων. Στις ροές βράχων, εμφανίζονται παραμορφώσεις χωρίς να παρουσιάζεται μετατόπιση κατά μήκος μιας επιφάνειας.

Οι ροές γαιών ξεχωρίζουν λόγω του σχήματός τους, το οποίο θυμίζει “κλεψύδρα”. Παράλληλα εμφανίζονται σε λεπτόκοκκα υλικά ή βραχώδη με άργιλο και σε εκείνη την περίπτωση το υποκείμενο υλικό ρευστοποιείται, οδηγώντας στην καθοδική κίνηση των γαιών και τελικά σε ρευστοποίηση ολόκληρης της εδαφικής μάζας. Τέλος, οι ροές κορημάτων (Εικόνα 30) προκαλούνται συνήθως από έντονη ροή νερού στην επιφάνεια της εδαφικής μάζας, είτε λόγω δυνατής βροχόπτωσης, είτε λόγω πάγων που λιώνουν. Πρόκειται για μια εξαιρετικά γρήγορη μετακίνηση εδαφικής μάζας, η οποία παρατηρείται συνήθως σε εκτάσεις με μειωμένη βλάστηση.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 29: Ροή (US Geological Survey, 2004).



Εικόνα 30: Ροή Κορημάτων στο Λεφτ Χαντ Κρικ, Κολοράντο, ΗΠΑ (Colorado Geological Survey, 2013).

4.2.2.6. ΣΥΝΘΕΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΠΡΑΝΩΝ (COMPOSITE SLIDE)

Ως σύνθετη μετακίνηση πρανών ορίζεται, εκείνη η σύνθετη μετακίνηση που συμβαίνει μεταξύ τουλάχιστον δύο από τις παραπάνω κατηγορίες κατολισθήσεων. Στην πραγματικότητα, η υπόθεση πως κάθε είδος κατολίθησης περιλαμβάνει ενός και μόνο είδους κίνηση, είναι μια αναγκαία απλούστευση-παραδοχή, προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη και η κατηγοριοποίησή τους. Συνεπώς κάθε κατολίθηση δυνητικά θα μπορούσε να θεωρηθεί ως σύνθετη (composite).

4.3. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

4.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

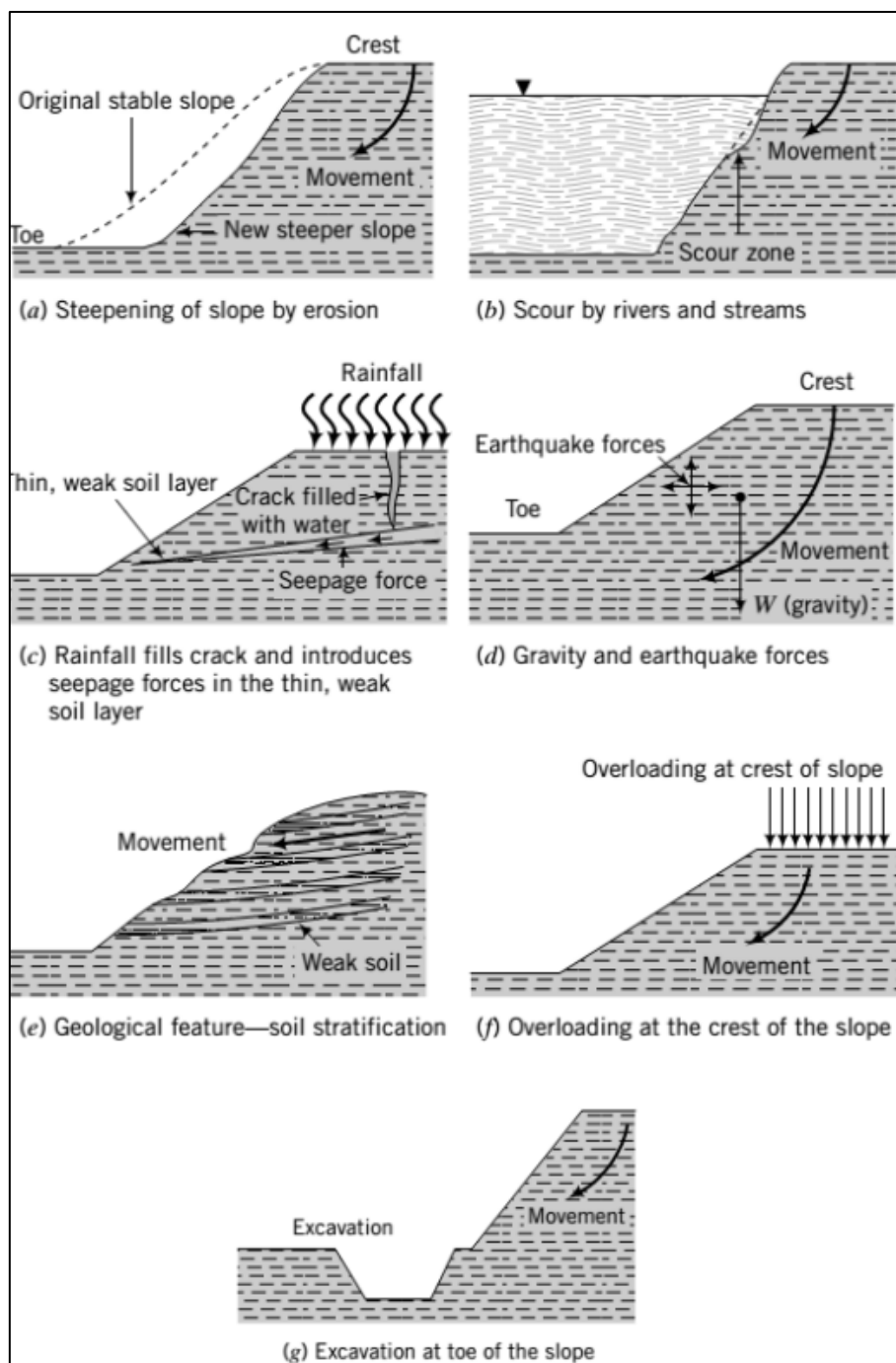
Ως πρανή ορίζονται οι κεκλιμένοι, φυσικοί ή τεχνητοί, σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Τα φυσικά πρανή σχηματίζονται σταδιακά, έπειτα από πολλά έτη, και προκύπτουν ως συνέπεια φυσικών διεργασιών, όπως της διάβρωσης. Αντίστοιχα, τεχνητά ονομάζονται τα πρανή που κατασκευάζονται από τον άνθρωπο, με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά, ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται. Τεχνητά είναι τα πρανή των εκσκαφών, των ορυγμάτων, των επιχωμάτων καθώς και αυτά των χωμάτινων φραγμάτων.

Η διαφορά στάθμης, οι κλίσεις σε συνδυασμό με τις δυνάμεις βαρύτητας και την πιθανή παρουσία νερού στο έδαφος κάθε πρανούς, δημιουργούν διατμητικές τάσεις εσωτερικά του πρανούς, στις οποίες η διατμητική αντοχή του εδάφους αντιτίθεται. Τα πρανή, φυσικά ή τεχνητά, χάνουν την ευστάθειά τους όταν οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπερβούν την διατμητική αντοχή και τότε δημιουργείται κατολίσθηση.

Η πρόληψη έναντι των κατολισθητικών φαινομένων της αστάθειας των πρανών, κατά το σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου, αλλά και η δυνατότητα εφαρμογής μέτρων αποκατάστασης, σε περίπτωση που αυτά συμβούν, συνοδεύεται άρρηκτα με τη γνώση των συνθηκών, κάτω από τις οποίες αυτά τα φαινόμενα τείνουν να εκδηλώνονται. Εύλογα, η ανάγκη προκειμένου να αποκτηθεί η γνώση αυτή οδήγησε σε ανάπτυξη πλήθους μεθόδων ανάλυσης για την ευστάθεια των πρανών.

Κάποιες από τις αιτίες πρόκλησης αστοχίας σε ένα πρανές είναι: Η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας, η χαμηλή διατμητική αντοχή του πρανούς ή κάποιας από τις εδαφικές του στρώσεις, η μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους που μπορεί να οφείλεται στην αύξηση της πίεσης του νερού στους πόρους, στην επιβολή εξωτερικών φορτίσεων, κάποια ενδεχόμενη εκσκαφή, διάβρωση στη βάση του πρανούς ή και σεισμός.

Οι πιο συνηθισμένες μορφές αστοχίας που εμφανίζονται κατά την απώλεια της ευστάθειας εμφανίζονται στην *Εικόνα 31* στην οποία περιλαμβάνονται αστοχίες λόγω: (α) διάβρωσης πρανούς, (b) διάβρωσης πρανούς εξ αιτίας ποταμού, (c) πλήρωσης ρωγμών με βρόχινο νερό, (d) σεισμών και βαρύτητας, (e) λεπτών αδύναμων στρώσεων εντός του εδαφικού σχηματισμού, (f) τάσεων στην άνω επιφάνεια του πρανούς και (g) εκσκαφής στην βάση του πρανούς.



Εικόνα 31: Πιθανές μορφές αστοχίας πρανών, Budhu (2010).

Όπου στο παρελθόν υπήρξε αστάθεια, οι προηγούμενες εδαφικές μάζες δημιουργούν «μια πρώτη ολίσθηση», η οποία έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές παραμορφώσεις, κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης.

Στην αρχή η μεγαλύτερη αντοχή, η οποία εντοπίζεται σε τμήματα της επιφάνειας ολίσθησης, είναι η μέγιστη αλλά μετά από κάποιο βαθμό παραμόρφωσης εκπίπτει στην αντοχή κρίσιμης κατάστασης ή στην παραμένουσα αντοχή.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Καθώς η διαθέσιμη αντοχή μειώνεται σε αυτά τα σημεία, η μέγιστη αντοχή αναπτύσσεται σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας ολίσθησης, μέχρι η αντοχή κατά μήκος όλης της επιφάνειας να βρίσκεται στην τιμή κρίσιμης κατάστασης. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται προοδευτική αστοχία.

Σε περίπτωση που το έδαφος υποστεί περαιτέρω μείωση της αντοχής, έπειτα από σημαντικές παραμορφώσεις, η προοδευτική αστοχία μειώνει την αντοχή από τη μέγιστη σε αυτή της κρίσιμης κατάστασης και τελικά, για κάποιες αργίλους στην παραμένουσα αντοχή.

4.3.2. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Ως μέτρα προστασίας (remedial measures) ονομάζονται γενικά εργασίες και κατασκευές τεχνικών έργων που έχουν στόχο την πρόληψη των φαινομένων ή την αποκατάσταση και σταθεροποίηση μιας εδαφικής μετακίνησης. Τα πρώτα ονομάζονται προληπτικά μέτρα και τα δεύτερα μέτρα αποκατάστασης ή σταθεροποίησης.

- **Έργα επιφανειακής αποστράγγισης:**
 - ✓ Σφραγίσεις ρωγμών,
 - ✓ Επιφανειακοί αγωγοί απομάκρυνσης νερού.
- **Έργα ρηχής αποστράγγισης:**
 - ✓ Υπόγειοι οχετοί,
 - ✓ Στραγγιστήρια,
 - ✓ Συνδυασμοί οχετών στραγγιστηρίων,
 - ✓ «Εξωτερικά» στραγγιστήρια,
 - ✓ Οριζόντιες στραγγιστικές γεωτρήσεις.
- **Έργα βαθιάς αποστράγγισης:**
 - ✓ Κατακόρυφα στραγγιστήρια,
 - ✓ Οριζόντιες στραγγιστικές γεωτρήσεις,
 - ✓ Στραγγιστικά φρεάτια μεγάλης διαμέτρου,
 - ✓ Σήραγγες αποστράγγισης.
- **Έργα σταθεροποίησης όχθων-κοίτης.**
- **Εκσκαφές.**
- **Πάσσαλοι.**

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

- Φρεατοπάσσαλοι.
- Αντίβαρα ποδός.
- Τοίχοι αντιστήριξης.
- Αγκυρώσεις.

4.3.3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Οι βασικοί παράγοντες που παίζουν ρόλο στην ευστάθεια ενός χερσαίου πρανού, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη εντάσσονται εκείνοι που σχετίζονται με το φυσικό περιβάλλον και τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό, ενώ στην δεύτερη ανήκουν οι παράγοντες που σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες. Φυσικά, μια αστοχία ενός πρανού δεν μπορεί να αποδοθεί ποτέ σε έναν και μοναδικό παράγοντα, αλλά συνήθως βασίζεται σε συνδυασμό παραγόντων.

Οι βασικότεροι παράγοντες στη ρύθμιση της ισορροπίας ενός πρανού, και τυχόν υπεύθυνοι για ενδεχόμενη αστοχία του, εντάσσονται στο φυσικό περιβάλλον. Ο σημαντικότερος παράγοντας είναι αναμφίβολα η βαρύτητα, η οποία ορίζει τις διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό του πρανού και τείνει να το μετακινήσει αν αυτές υπερβούν τη διατμητική αντοχή του υλικού από το οποίο αποτελείται.

Ακόμη, κομβικό ρόλο διαδραματίζουν οι ιδιότητες του εδαφικού υλικού, αφού καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ισορροπία του πρανού. Αναλυτικά, η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ , deg) και η συνοχή (c , kPa), αποτελούν τις ιδιότητες που καθορίζουν τη διατμητική αντοχή του υλικού και κατά συνέπεια κατέχουν κομβικό ρόλο στην ευστάθεια του πρανού. Μεγαλύτερη συνοχή συνεπάγεται μεγαλύτερη ευστάθεια. Αντίστοιχα, υψηλότερη τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής συνεπάγεται μεγαλύτερη ευστάθεια.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η παρουσία του νερού. Η πίεση που ασκεί το νερό στο εδαφικό υλικό μειώνει τη διατμητική αντοχή του, αυξάνοντας τις πιέσεις των πόρων στην περίπτωση της υπόγειας ροής.

Ακόμη, οι δυνάμεις βαρύτητας που ασκούνται στο πρανές σε συνδυασμό με την κλίση του κάθε πρανού, καθώς και τυχόν υδροστατικές πιέσεις, μπορεί να οδηγήσουν το πρανές σε αστοχία. Η κλίση αποτελεί έναν παράγοντα που επηρεάζεται τόσο από το πέρασμα του χρόνου, όσο και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Αξίζει να σημειωθεί και ο ρόλος των σεισμικών δονήσεων. Οι σεισμοί αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια ενός πρανού, αφού μπορεί είτε να μειώσει

τη συνοχή του εδαφικού υλικού, και συνεπώς τη διατμητική αντοχή αυτού, είτε να προκαλέσει αύξηση των διατμητικών τάσεων που ασκούνται σε αυτό.

4.3.3.1. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όπως αναλύθηκε και παραπάνω οι βαρυτικές δυνάμεις αποτελούν έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες στην ευστάθεια ενός πρανού στην ξηρά. Η δύναμη βαρύτητας μπορεί να αναλυθεί σε οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα, οι οποίες με τη σειρά τους αναφέρονται σε διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα.

Σε στατικές συνθήκες, όσο μεγαλύτερη είναι η διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού, σε σχέση με τη διατμητική τάση που ασκείται στο πρανές, τόσο πιο στέρεο είναι το πρανές. Εναλλακτικά, στην περίπτωση που η διατμητική τάση υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή, αναμένεται αστοχία. Η αστοχία μπορεί να προκύψει, είτε με αύξηση της διατμητικής τάσης που ασκείται λόγω της βαρύτητας, είτε με μείωση της διατμητικής αντοχής, η οποία οφείλεται σε ανάλογη μεταβολή των ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού.

Η διατμητική αντοχή του εξαρτάται από τις εξής ιδιότητες του εδαφικού υλικού: α) Τη γωνία εσωτερικής τριβής και β) τη συνοχή, μείωση των οποίων οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση της διατμητικής αντοχής. Τέλος, καθοριστικός παράγοντας για τη διατμητική τάση που ασκείται στο πρανές λόγω της βαρύτητας είναι η γωνία κλίσης του πρανού, η οποία όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μεγαλώνει αντίστοιχα και η διατμητική τάση.

4.3.3.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Ως συντελεστής ασφάλειας πρανών (Factor of Safety, FS) ορίζεται ο λόγος του αθροίσματος των δυνάμεων αντίστασης προς αυτές που συμβάλλουν στην ολίσθηση (Λουπασάκης, 2014),

FS= Δυνάμεις αντίστασης / Δυνάμεις ολίσθησης

Εάν η τιμή του FS αυξάνεται πέρα από τη μονάδα, μαζί της αυξάνεται και η ευστάθεια του πρανού. Αστάθεια παρατηρείται όταν αναπτύσσονται επιφάνειες ολίσθησης και εκδηλώνονται κινήσεις μέσα στη μάζα του εδάφους.

Ο συντελεστής ασφαλείας που τελικά χρησιμοποιείται στα έργα, είναι μεγαλύτερος του υπολογιζόμενου, καθώς πρέπει να ενσωματώνει αφενός μεν το ποσοστό άγνοιας των πραγματικών εδαφικών συνθηκών και αφετέρου (βάσει των ισχυόντων κανονισμών) πρέπει να ανταποκρίνεται στις κατά περίπτωση, απαιτήσεις όπως είναι αυτές της προστασίας των ανθρώπων που επηρεάζεται η δραστηριότητά τους καθώς και του φυσικού περιβάλλοντος.

4.4. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

4.4.1. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Το νερό αποτελεί έναν από τους πιο επιδραστικούς παράγοντες στην ευστάθεια των πρανών, καθώς μειώνει τη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού με πολλούς τρόπους. Μια ισχυρή βροχόπτωση ή το λιώσιμο των πάγων ενέχουν κινδύνους όπως η άνοδος του υδροφόρου ορίζοντα, τόσο όσον αφορά αυτόν της επιφάνειας, όσο και αυτόν της υπόγειας ροής. Ακόμη, πιθανή είναι και μια πλημμύρα, και όλες αυτές οι παραλλαγές μπορούν να οδηγήσουν ένα χερσαίο πρανές σε κατολίσθηση, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 32*.



Εικόνα 32: Κατολισθήσεις λόγω βροχοπτώσεων στο Ρίο ντε Τζανέιρο, Βραζιλία, 2010.

Σε πρώτη φάση, η διείσδυση μεγάλης ποσότητας νερού στο εδαφικό υλικό, έχει ως συνέπεια την αύξηση του βάρους του υλικού, και με τη σειρά τους αυξάνονται οι δυνάμεις βαρύτητας που ασκούνται. Το πρανές αστοχεί, όταν οι διατμητικές τάσεις λόγω των βαρυτικών δυνάμεων ξεπεράσουν την διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού.

Ακόμη, το νερό που διεισδύει στο έδαφος μπορεί με τη σειρά του να προκαλέσει άνοδο του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και συγχρόνως αύξηση της πίεσης στους πόρους του υλικού, με αποτέλεσμα να μειωθούν οι ενεργές τάσεις και κατά συνέπεια η διατμητική αντοχή του, και το πρανές να οδηγηθεί σε αστοχία.

Παράλληλα, η ενδεχόμενη ανύψωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, και κατά συνέπεια η αύξηση του όγκου του νερού που ήδη βρίσκεται εντός του εδάφους, οδηγεί σε μείωση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής μεταξύ των κόκκων αυτού. Οι δύο αυτές ιδιότητες του εδαφικού

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

υλικού καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την διατμητική αντοχή του και η μείωση τους συνεπάγεται μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού, γεγονός που καθιστά το πρανές ευάλωτο σε αστοχία.

Ως συνέπεια των βροχοπτώσεων, η επιφανειακή ροή του νερού, μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του εδάφους μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την διατμητική αντοχή του υλικού ή και μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς. Εάν η εν λόγω μείωση είναι μεγάλη ή η αλλαγή της γεωμετρίας έντονη, μπορεί να προκληθεί κατολίσθηση.

4.4.2. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Ο κορεσμός των πρανών από το νερό είναι η κύρια αιτία κατολισθήσεων. Μπορεί να συμβεί κορεσμός με τη μορφή έντονων βροχοπτώσεων, τήξης χιονιού, μεταβολών στη στάθμη των υπόγειων υδάτων και μεταβολών της στάθμης των επιφανειακών υδάτων κατά μήκος των ακτών, των χωματουργικών φραγμάτων και στις όχθες λιμνών, δεξαμενών, καναλιών και ποταμών. Οι κατολισθήσεις και οι πλημμύρες συνδέονται στενά γιατί και τα δύο σχετίζονται με τη βροχόπτωση, την απορροή και τον κορεσμό του εδάφους από το νερό.

Ακόμη, μια πλημμύρα μπορεί να προκαλέσει κατολισθήσεις μεταβάλλοντας τις όχθες ρεμάτων και ποταμών και από κορεσμό πρανών από επιφανειακά ύδατα (χερσαία ροή). Επιπλέον, ρέουν συντρίμια και λάσπες, εμφανίζονται συνήθως σε μικρά, απότομα κανάλια ρεμάτων και συνήθως μπερδεύονται με πλημμύρες.

Στην πραγματικότητα, αυτά τα δύο γεγονότα συμβαίνουν συχνά ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή. Αντίστροφα, οι κατολισθήσεις μπορούν επίσης να προκαλέσουν πλημμύρες όταν γλιστρούν βράχοι και συντρίμια, μπλοκάρουν κανάλια ρεμάτων και άλλες υδάτινες οδούς, επιτρέποντας σε μεγάλους όγκους νερού να αναρροφηθούν πίσω από τέτοια φράγματα.

Αυτό προκαλεί πλημμύρα τέλματος και, εάν το φράγμα αποτύχει, επακολουθεί κατάντη πλημμύρα. Επιπλέον, τα στερεά συντρίμια κατολισθήσεων μπορούν να προκαλέσουν όγκο και πυκνότητα στην κανονική ροή του ρεύματος ή να προκαλέσουν μπλοκαρίσματα και εκτροπές καναλιών, δημιουργώντας συνθήκες πλημμύρας ή τοπική διάβρωση.

Απότομα πρανή που έχουν καεί από πυρκαγιές είναι συχνά επιρρεπή σε κατολισθήσεις λόγω του συνδυασμού της καύσης και επακόλουθης απογύμνωσης της βλάστησης στις πλαγιές. Η αλλαγή στη χημεία του εδάφους λόγω καύσης, σε συνδυασμό με επακόλουθο κορεσμό των πρανών από νερό από διάφορες πηγές, όπως οι βροχοπτώσεις, οδηγούν το πρανές σε αστοχία. Οι ροές κορημάτων είναι ο πιο συνηθέστερος τύπος κατολίσθησης σε καμένες πλαγιές. Οι πυρκαγιές, φυσικά, μπορεί να είναι αποτέλεσμα φυσικών ή ανθρώπινων αιτιών. Στην *Εικόνα 33* απεικονίζεται μια καταστροφική

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

κατολίσθηση που κατέστρεψε περιουσίες και ανθρώπινες ζωές και προκλήθηκε από βροχοπτώσεις (Highland, L.M. and Bobrowsky, Peter, 2008).



Εικόνα 33: Κατολίσθηση λόγω βροχοπτώσεων, Πουέρτο Ρίκο, 1985 (Πηγή: US Geological Survey).

Τα εδαφικά υλικά αλληλοεπιδρούν στενά με την υδρολογία και την υδρογεωλογία. Το νερό ίσως αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα αστάθειας των πρανών.

Η έλλειψη κατανόησης των υδρολογικών συνθηκών είναι συχνή αιτία αποτυχίας σε διαχειριζόμενα πρανή. Το έτος 1966, στο Aberfan στη Νότια Ουαλία για παράδειγμα (Bishop et al., 1969), έγινε μία μεγάλη καταστροφή με περισσότερους από 140 ανθρώπους να χάνουν τη ζωή τους από μια κατολίσθηση. Μια κατολίσθηση η οποία βασίστηκε σε υδάτινο ρεύμα, που προώθησε συνθήκες πλήρους κορεσμού μετά από περιόδους των έντονων βροχοπτώσεων.

Ωστόσο, το νερό μπορεί να έχει επίσης πιο σύνθετο ρόλο στην αστάθεια. Για παράδειγμα, σε ορισμένες περιπτώσεις μερικώς κορεσμένων υλικών, μπορεί να προσφέρει πρόσθετη δύναμη μέσω της δημιουργίας αναρροφητικών δυνάμεων, ενώ σε άλλες συνθήκες κορεσμού μπορεί να προάγει την ρευστοποίηση του εδάφους μετά από αστοχία, μετατρέποντας μια αργή κατολίσθηση σε μια εξαιρετικά κινητική και εξαιρετικά καταστροφική ροή.

Ένας ακόμη βασικός παράγοντας αστοχιών, μπορεί να αποβεί η χρήση της γης. Μερικοί τύποι βλάστησης μπορεί να βελτιώσουν την ευστάθεια των πρανών, παρέχοντας πρόσθετη αντοχή στο έδαφος μέσω ριζικών συστημάτων και με ρύθμιση της διείσδυσης του νερού και της απορρόφησης του μέσω διαπνοής. Γενικά, τα δασώδη πρανή είναι πιο σταθερά από αυτά που παραμένουν γυμνά και υπάρχει μεγάλος όγκος αποδεικτικών στοιχείων για να υποστηρίξει το επιχείρημα ότι υπάρχει

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

αυξημένη δραστηριότητα ροής κορημάτων μετά από την πάροδο πυρκαγιών, οι οποίες έχουν αφαιρέσει την υπάρχουσα βλάστηση (Cannon και Garter, 2005, Shakesby και Doerr, 2006), ενώ ακόμη αυξημένες εμφανίζονται και οι κατολισθήσεις μετά από αλόγιστη υλοτόμηση (Jakob, 2000). Συνεπώς, η απομάκρυνση της βλάστησης, επηρεάζει αρνητικά την ευστάθεια των πρανών. Πράξεις όπως οι αναδασώσεις αποτελούν έναν δύσκολο (αλλά αποτελεσματικός όπου είναι επιτυχημένες) τρόπο αποκατάστασης της ευστάθειας. Η αποψίλωση των δασών αναδεικνύει την δράση των ανθρώπων ως τον τελικό βασικό παράγοντα πρόκλησης κατολισθήσεων, καθώς οι άνθρωποι τροποποιούν το τοπίο, η πιθανότητα κατολίσθησης μεταβάλλεται.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι άνθρωποι προάγουν την αστάθεια κόβοντας τα πρανή σε πιο απότομες κλίσεις, ή με την αφαίρεση της βλάστησης και αλλαγή των υδρολογικών συνθηκών της περιοχής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο χρόνος αστοχίας σχετίζεται με ένα συμβάν ενεργοποίησης της αστοχίας. Ωστόσο, αυτό δεν χρειάζεται να είναι πάντα αλήθεια. Υπάρχουν αυξανόμενες ενδείξεις ότι τα πρανή μπορούν να αστοχήσουν, μέσω προοδευτικών μηχανισμών που συνεπάγονται την εξασθένιση της διατμητικής αντοχής του πρανούς. Για παράδειγμα, στον ετήσιο κύκλο κατολισθήσεων ως αποτέλεσμα βροχοπτώσεων, κυριαρχούν οι μουσώνες της ανατολικής και νότιας Ασίας, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 34*. Ο αντίκτυπος ενός μουσώνα στο νότιο τμήμα των Ιμαλαίων, βρίσκει συμμάχους στην τοπογραφία και στα εδαφικά υλικά της περιοχής, καθιστώντας την περιοχή παγκόσμιο κέντρο (hotspot) κατολισθήσεων. Ωστόσο, ο ίδιος συσχετισμός μεταξύ κατολισθήσεων και βροχοπτώσεων δεν περιορίζεται γεωγραφικά και φυσικά ισχύει και για κάθε άλλη περιοχή.



Εικόνα 34: Ροή υλικών την εποχή του μουσώνα, Νεπαί, 2014.

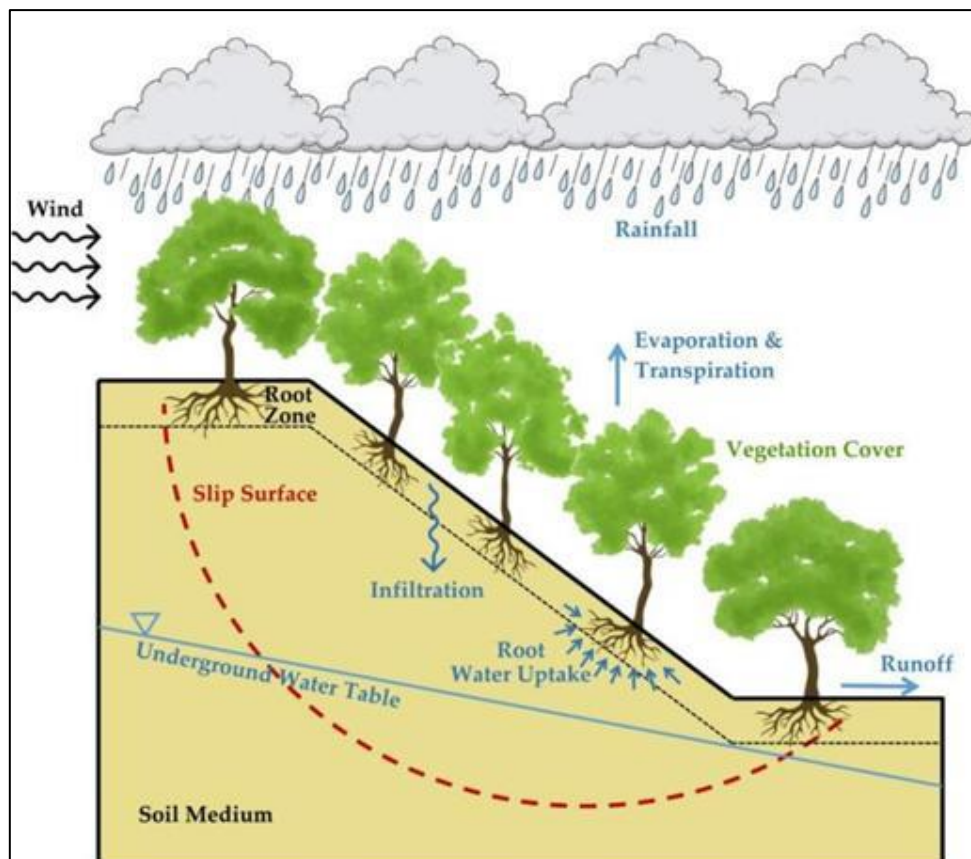
4.4.3. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί έναν παράγοντα ο οποίος κατέχει αδιαμφισβήτητα σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια πρανών, ειδικά τα τελευταία χρόνια. Η δράση της κλιματικής αλλαγής αποτυπώνεται σε ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας, αλλαγές στη συχνότητα και την ένταση βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων, καθώς και καύσωνες και παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας.

Όσο περνούν τα χρόνια παρατηρούνται εντονότερες βροχοπτώσεις, οι οποίες είναι μικρότερες σε διάρκεια και σπανιότερες συγκριτικά σε σχέση με παλαιότερα έτη. Η επίδραση του νερού της βροχής στην ευστάθεια ενός πρανούς εξαρτάται από τον συνδυασμό πολλών παραγόντων, όπως, η γωνία εσωτερικής τριβής, η συνοχή και η διηθητικότητα του, αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού, όπως η γωνία κλίσης και το ύψος.

Τα εδαφικά υλικά με υψηλότερες τιμές συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευστάθεια κατά τη διάρκεια μιας ισχυρής βροχόπτωσης. Ωστόσο, ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει μείωση όσο αυξάνεται το ύψος και η γωνία κλίσης του πρανούς. Παράλληλα, πρανή που αποτελούνται από εδαφικά υλικά υψηλής διηθητικότητας θεωρούνται λιγότερο ευσταθή από άλλα, αφού παρατηρείται ταχεία μείωση του συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα 35: Πιθανά αποτελέσματα καιρικών φαινομένων στη διάβρωση και την ευστάθεια ενός πρανούς

Πέρα από τις χιονοπτώσεις και τις βροχοπτώσεις, φαινόμενα όπως μια απότομη άνοδος της θερμοκρασίας, αυξάνουν τον κίνδυνο αστοχίας για ένα πρανές, καθώς η υψηλότερη θερμοκρασία επιτρέπει τη διείσδυση μεγαλύτερης ποσότητας νερού στο εδαφικό υλικό του πρανούς. Ακόμη, αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον, συνεπάγεται και αύξηση των πιέσεων στα κενά του υλικού, με αποτέλεσμα η διατμητική αντοχή να μειώνεται. Παράλληλα, η απότομη άνοδος της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της τήξης των πάγων, η οποία με τη σειρά της επιφέρει αύξηση της ποσότητας νερού, το οποίο μπορεί να εισέλθει στο πρανές, αυξάνοντας το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

4.4.4. ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Σύμφωνα με διάφορους ερευνητές, η κλιματική αλλαγή θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στις μηχανολογικές κατασκευές και υποδομές.

Αν και η εκτίμηση του μεγέθους αυτών των αλλαγών περιλαμβάνει πολλές αβεβαιότητες, το γεγονός ότι το κλίμα της Γης αλλάζει είναι αδιαμφισβήτητο. Πολλά σενάρια για την αξιολόγηση της κλιματικής αλλαγής έχουν οριστεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο, στην πέμπτη και πιο πρόσφατη Έκθεση Αξιολόγησης (AR5), η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) αναφέρεται σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια (IPCC, 2013 ' IPCC, 2014).

Εξετάζοντας το εύρος αυτών των σεναρίων και τις υποθέσεις που σχετίζονται με αυτά, ο μεγάλος βαθμός αβεβαιότητων που εμπλέκονται στην προβολή του μελλοντικού κλίματος γίνεται εύκολα αντιληπτός, σε συνδυασμό με τις αβεβαιότητες που προστίθενται από τα μοντέλα παγκόσμιας κυκλοφορίας. Επομένως, ανάλογα με το σενάριο που επιλέγεται προς ανάλυση, η ένταση των συνεπειών μεταβάλλεται αντίστοιχα.

5. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

5.1. ΦΛΥΣΧΗΣ

Ο σχηματισμός του φλύσχη αποτελεί ένα σύνολο διαφόρων πετρωμάτων οι οποίοι με τη σειρά τους σχηματίζουν πολλαπλούς συνδυασμούς βραχομαζών. Ο φλύσχη απαντάται σε πολλές περιοχές του ελληνικού χώρου μέσω των αντίστοιχων γεωτεκτονικών ενοτήτων του.

5.1.1. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ο όρος φλύσχη καθιερώθηκε από τον Γερμανό γεωλόγο B. Studer και προέρχεται από τη γερμανική λέξη “fliessen” η οποία σημαίνει ροή και χρησιμοποιείται για να αποδώσει τα συνεχή κατολισθητικά φαινόμενα στους φλυσχικούς σχηματισμούς (**Marinos and Hoek, 2001**). Ο φλύσχη αποτελείται από κλαστικά ιζημάτα και συνδέεται με την τεκτονική εξέλιξη μιας λεκάνης ιζηματογένεσης. Κλείνει τον κύκλο ιζηματογένεσης πριν από την παροξυσμική πτύχωση και ορογένεση της λεκάνης, αφού είχε ήδη προηγηθεί χέρσευση στη γειτονική περιοχή που προσέφερε κλαστικά υλικά από τη διάβρωσή της (*Μαρίνος, Β. (2007). Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).*

Ο φλύσχη, αποτελείται συνήθως από εναλλαγές στρωμάτων ψαμμίτη και λεπτόκοκκων πηκτικών υλικών. Το σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει και κροκαλοπαγείς ή ασβεστολιθικές στρώσεις. Στα κράσπεδα των μεγάλων λεκανών ιζηματογένεσης του φλύσχη, είναι δυνατή μια απόθεση του υλικού με ακαταστασία. Εκεί δεν διακρίνεται στρωμάτωση αλλά μια τουρβιδιτική δομή. Η δομή αυτή έχει χαοτικούς χαρακτήρες αλλά τεχνικογεωλογικά διαφέρει από τις χαοτικές δομές που οφείλονται σε τεκτονικά αίτια (π.χ. συμπίεσεις σε ζώνες επωθήσεων) όπου οι βραχώμαζες γίνονται εξαιρετικά ασθενείς. Τα πηλιτικά πετρώματα που είναι και τα ασθενέστερα μέλη του σχηματισμού συνήθως είναι ιλυόλιθοι, μάργες, αργιλόλιθοι και αργιλικόι σχιστόλιθοι. Σπανιότερα μπορεί να αναπτύσσονται και στρώματα ασβεστόλιθου και να έχουν επίσης παρεισφρήσει οφιόλιθοι οι οποίοι σχηματίζουν ακανόνιστες μάζες. Τα πάχη των κύριων πετρογραφικών τύπων κυμαίνονται από μερικά μέτρα έως και δεκάδες μέτρα. Οι ασυνέχειες των στρώσεων των ιζημάτων μέσα στα πάχη αυτά μπορούν να είναι πολύ συχνές. Επιπλέον, η επιδεκτικότητα των ιζημάτων μπορεί να υφίστανται σχάση, όταν δεν περιορίζονται από το περιβάλλον, αυξάνει τις ασυνέχειες αυτού του τύπου στα πηλιτικά μέλη του σχηματισμού.

Το συνολικό πάχος του φλύσχη είναι συχνά πολύ μεγάλο (εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες μέτρα). Σε αυτό το πάχος είναι δυνατόν να παρουσιάζονται εναλλαγές διαφόρων λιθολογικών τύπων. Οι πιο

συνηθισμένοι είναι ο παχυστρωματώδης ψαμμίτης, οι τυπικές εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυολίθου και η ιλυολιθική μάζα με λεπτές ενστρώσεις ή τεμάχια ψαμμίτη. Το συνολικό πάχος του φλύσχη συχνά ελαττώνεται σημαντικά από τη διάβρωση ή τις τεκτονικές λεπιώσεις. Τα πάχη επηρεάζονται δευτερογενώς από ανάστροφα ρήγματα και επιπτεύσεις που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη του σχηματισμού. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την επακόλουθη κατά περίπτωση μετατεκτονική ρηγμάτωση, έχει συχνά σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της γεωτεχνικής ποιότητας της βραχώμαζας του φλύσχη.

Φλύσχη απαντάται σε πολλές ενότητες στην Ελλάδα, όπως στην ενότητα των Παξών, της Ιονίου, της Γαβρόβου-Τρίπολης, της Πίνδου, του Παρνασσού, της Βοιωτίας αλλά και σε μεταμορφωμένες μορφές στις ενότητες των εσωτερικών ενοτήτων. Αν και δεν αποτελεί κανόνα, υπάρχει συχνά μια συστηματικότητα στις εναλλαγές διαφόρων τύπων φλύσχη στη στρωματογραφική κολώνα κάθε μίας από τις ζώνες αυτές.

5.1.2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

Ο φλύσχη εμφανίζει στο σύνολό του χαμηλή διαπερατότητα και θεωρείται πρακτικά στεγανός σχηματισμός. Οι ρωγμές δεν είναι έντονες ούτε συνεχείς λόγω της παρουσίας πετρωμάτων με ιλυο-αργιλικό υλικό, είτε συνεχώς είτε με παρεμβολές. Η περατότητα πάντως εξαρτάται και από το αν επικρατούν οι ψαμμίτες, οπότε λόγω της ψαθυρής τους θραύσης οι ρωγμές είναι σημαντικότερες, όχι όμως όσο σε άλλα ανθεκτικότερα πετρώματα (Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).*

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη των αργιλικών υλικών σε συνδυασμό με την παρουσία νερού μπορεί να εξασθενήσει σε σημαντικό βαθμό τη βραχώμαζα αφού έτσι δεν ευνοείται η ελεύθερη αποστράγγιση.

- ✓ **Ιλυόλιθος:** Ο σχηματισμός θεωρείται απολύτως αδιαπέρατος με πολύ μικρές τιμές του συντελεστή περατότητας ($k \approx 10^{-9}$ m/sec). Έχει μικρό πορώδες, λεπτότατους πόρους και κλειστές ασυνέχειες. Κάτω από μια επιφανειακή ζώνη κυκλοφορίας και ανανέωσης του νερού, η βραχώμαζα είναι κορεσμένη. Το νερό αυτό λόγω της λεπτότητας των πόρων είναι σχεδόν στο σύνολό του συνδεδεμένο με τα στοιχεία της βραχώμαζας με μοριακές δυνάμεις, με αποτέλεσμα η κίνηση του υπόγειου νερού να μην ελέγχεται μόνο από τη βαρύτητα. Ως εκ τούτου στη βραχώμαζα δεν συναντώνται ελεύθεροι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες. Στις σήραγγες, δεν παρουσιάζει υδροφορία με ροή, αλλά υπό μορφή σποραδικών σταγόνων και υγρασίας. Στα μεγάλα δε βάθη η ανωτέρω κατάσταση, πολύ μικρής περατότητας δημιουργεί

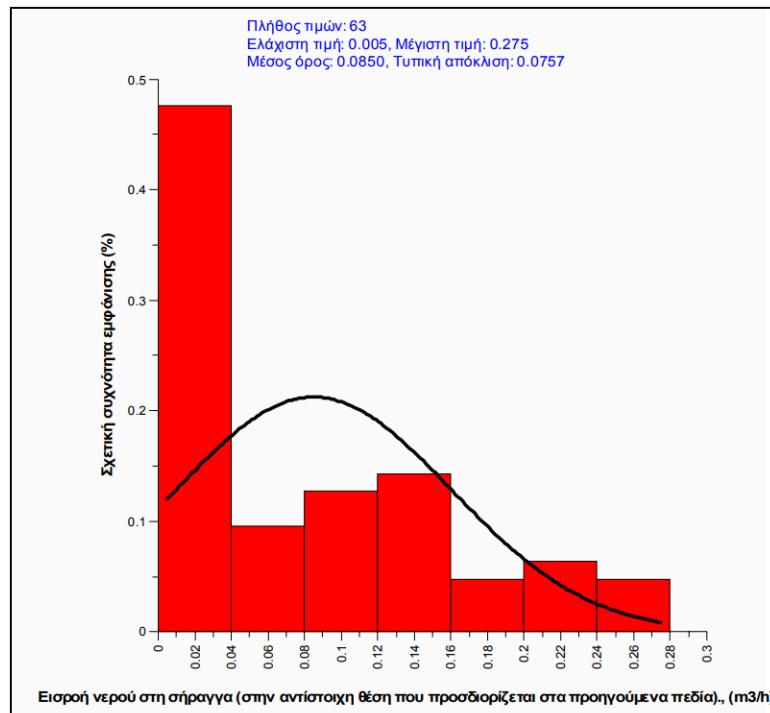
συνθήκες απουσίας νερού. Μόνο σε περιορισμένη επιφανειακή ζώνη, που δεν ξεπερνά τα λίγα μέτρα, μπορούν να δημιουργηθούν συνθήκες κυκλοφορίας και αποθήκευσης υπόγειου νερού και να σχηματισθούν ασθενείς φρεάτιοι υδροφόροι ορίζοντες.

- ✓ **Εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών:** Η κατείδυση, η αποθήκευση και η κυκλοφορία νερού είναι δυνατή μόνο στα μεμονωμένα ψαμμιτικά στρώματα του σχηματισμού ανάλογα με την ρωγμάτωση. Είναι όμως γενικά στεγανός σχηματισμός, με πολύ μικρό συντελεστή κατείδυσης ($k \approx 10^{-7}$ m/sec), περιορισμένη ανάπτυξη, αποθηκευτικότητα και κυκλοφορία νερού λόγω των παρεμβαλλομένων στρωμάτων ιλυολίθου.
- ✓ **Μεσοστρωματώδεις-Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες:** Ο σχηματισμός στην αδιατάρακτη του μορφή είναι πολύ μικρής περατότητας με συντελεστή κατείδυσης ($k \approx 10^{-7}$ m/sec). Στην κερματισμένη μορφή του είναι πιο υδροπερατός σχηματισμός με χαμηλή έως μέτρια συνήθως περατότητα ($10^{-7} < k < 10^{-5}$ m/sec). Η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδους, δηλαδή μέσω των επίπεδων ασυνεχειών, διευκολύνει την κυκλοφορία του νερού. Η ανάπτυξη υδροφόρων οριζόντων εμποδίζεται όμως από τις αδιαπέρατες ιλυολιθικές ενστρώσεις, στις οποίες οφείλεται και η δημιουργία επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, μικρής όμως δυναμικότητας σε διάφορα βάθη του σχηματισμού.

Οι ιλυολιθικοί σχηματισμοί είναι πρακτικά αδιαπέρατοι. Οι ψαμμίτες μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν μια μικρή περατότητα όταν είναι υγιείς εξαιτίας του δευτερογενούς πορώδους. Στην περίπτωση που είναι κερματισμένοι επιτρέπουν την κυκλοφορία ύδατος μέσω των ρωγμών.

Από καταγραφές μέτρησης εισροής υδάτων κατά τη διάνοιξη σήραγγων της Εγνατίας Οδού, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με τη περατότητα του Φλύσχη:

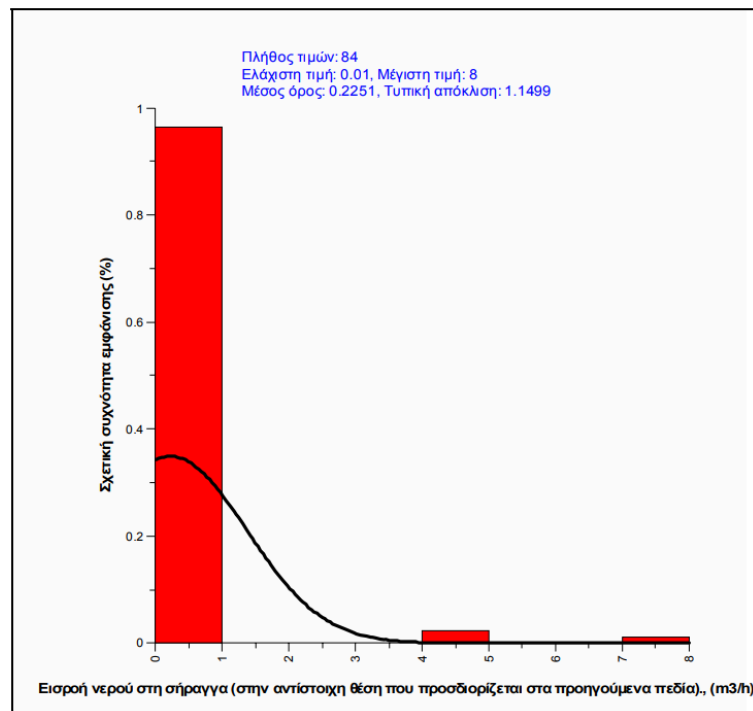
- Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας του Ανθοχωρίου δεν αναμένονταν σημαντικές εισροές υδάτων και πράγματι, στη περιοχή διέλευσης της σήραγγας δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές εισροές. Στο μεγαλύτερο μήκος της σήραγγας κατά τη διάνοιξή της παρατηρήθηκε υγρασία και μικρή ροή κατά θέσεις στο μέτωπο εκσκαφής, η οποία κυμάνθηκε από 0.005 έως 0.3 m³/h, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 36).



Εικόνα 36: Σήραγγα Ανθοχωρίου. Καταγεγραμμένες εισροές νερού (Μαρίνος Β. 2007).

Συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες εισροές παρουσιάστηκαν στην έξοδο της σήραγγας (ανατολικό στόμιο) σε αντίθεση με την είσοδο. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο ότι η διάνοιξη της σήραγγας στην περιοχή της εξόδου προηγούταν της εισόδου και η περιοχή είχε αποστραγγιστεί σε μεγάλο βαθμό. Ένας άλλος λόγος ίσως είναι η δομή των πετρωμάτων και κυρίως της διεύθυνσης των λεπιώσεων στην περιοχή της σήραγγας. Οι λεπιώσεις βυθίζονται από την είσοδο προς την έξοδο με αποτέλεσμα τα μπλοκ του ψαμμίτη που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη υδροφορία (αν και αρκετά τοπική-επικρεμμάμενη), να βυθίζονται και αυτά προς την έξοδο και να αποστραγγίζουν κυρίως προς αυτή την διεύθυνση. Πάντως, αν και οι εισροές νερού ήταν μικρές, όπως άλλωστε αναμενόταν, η παρουσία του και μόνο έφθανε για σημαντική υποβάθμιση της γεωτεχνικής ποιότητας του αργιλικού κυρίως χαρακτήρα της χαοτικής βραχώμαζας.

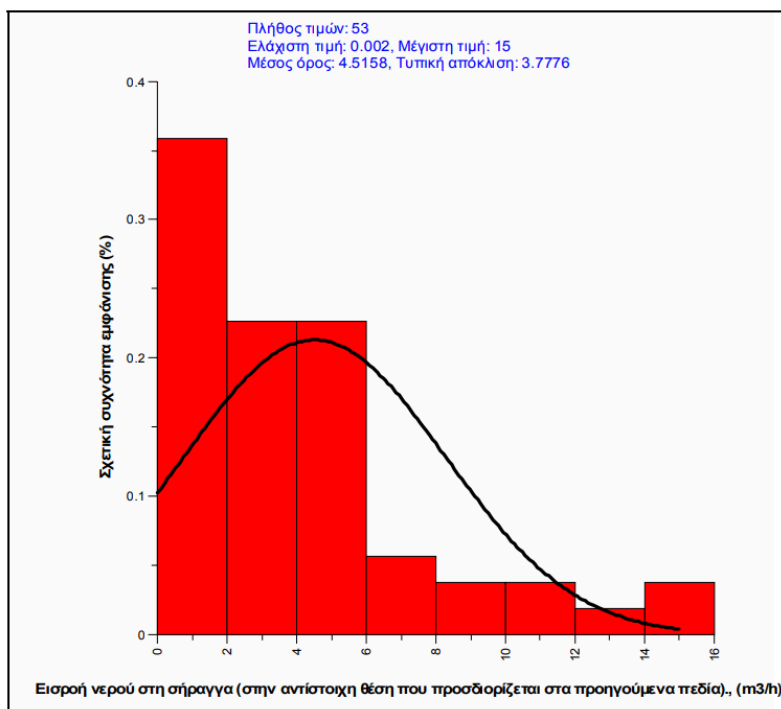
- Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας του Ανηλίου, παρατηρήθηκαν μικρές εισροές υδάτων. Στο μεγαλύτερο μήκος της σήραγγας κατά τη διάνοιξή της παρατηρήθηκε υγρασία και ροή με μικρή πίεση κατά θέσεις στο μέτωπο εκσκαφής. Η ροή νερού κυμάνθηκε από 0.01 έως 0.015 m³/h, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 37). Συγκριμένα, ροή υπό πίεση παρατηρήθηκε στην έξοδο της σήραγγας στην επαφή του ψαμμίτη με το τεκτονικό χαοτικό μείγμα.



Εικόνα 37: Σήραγγα Ανηλίου. Καταγραφείσες εισροές (Μαρίνος Β. 2007).

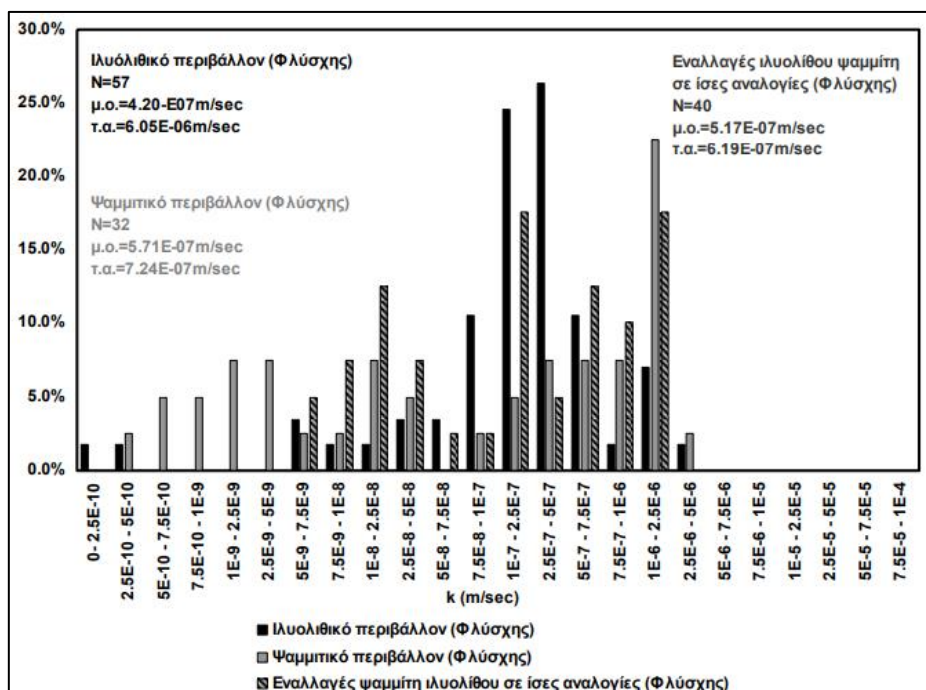
- Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας του Δρίσκου, προβλεπόταν ροή υδάτων να συναντηθεί στην περιοχή της εξόδου της σήραγγας (ανατολικό), όπου παρουσιάζονται παρακατακόρυφες ζώνες υδροφόρων στρωμάτων, όπως κροκαλοπαγές και ψαμμίτης. Στις υπόλοιπες περιοχές, όπου αναπτύσσονται ιλύολιθοι σε εναλλαγές με ψαμμίτη αναμενόταν υγρασία έως μικρή ροή ανάλογα την παρουσία επικρεμμάτων υδροφόρων οριζόντων ή όχι. Πράγματι, στην περιοχή διέλευσης της σήραγγας παρατηρήθηκαν εισροές. Η κατανομή των εισροών παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 38). Η ροή υδάτων κυμάνθηκε από 1 έως 15 m³/h και εμφανίστηκαν κυρίως στον αριστερό κλάδο ο οποίος προπορευόταν και αποστράγγιζε τα πετρώματα. Επίσης, παρουσία νερού παρουσιάστηκε και στη ζώνη της έντονης διάτμησης όπου και παρουσιάστηκαν σημαντικά προβλήματα συγκλίσεων, στο κέντρο της σήραγγας.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 38: Σήραγγα Δρίσκου. Καταγραφείσες εισροές υπογείων υδάτων εντός της σήραγγας (Μαρίνος Β. 2007).

Επίσης, από έρευνα των *Marinos P. et al.* (2007), πραγματοποιήθηκε σύγκριση στη περατότητα διάφορων λιθολογικών τύπου Φλύσχη (α: ψαμμιτικός, β: ιλυολιθικός και γ: με εναλλαγές σε ίδιες αναλογίες), όπου όπως παρουσιάζεται και στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 39), προκύπτει ένα βασικό συμπέρασμα ότι η αύξηση του ποσοστού του Ψαμμίτη στη βραχώμαζα, θα αυξήσει ελάχιστα την περατότητα σε σχέση με την παρουσία του Ιλυολίθου.



Εικόνα 39: Κατανομή της περατότητας του Φλύσχη, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής Ψαμμίτη - Ιλυολίθου (*Marinos P. et al.* 2007).

5.2. ΜΟΛΑΣΣΑ

Σε πολλές περιοχές του Ελληνικού χώρου εναποτέθηκε μια σειρά από εναλλαγές χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ιζημάτων σε λεκάνες που δημιουργήθηκαν πίσω από νέες οροσειρές, αμέσως μετά την κύρια ορογένεση, που συνέχιζε να εξελίσσεται μεταναστεύοντας προς Δυτικά. Το περιβάλλον λοιπόν είναι πλέον «ήρεμο» γεωλογικά και τα συμπιεστικά φαινόμενα περιορίζονται κυρίως στα κράσπεδα των νέων λεκανών. Η συμπεριφορά αυτών των αποθέσεων, που είναι γνωστές με τον όρο «μολάσσα» σε όλο τον Ευρωπαϊκό χώρο, είναι αρκετά διαφορετική από εκείνη του φλύσχη, αν και από πλευράς λιθολογικής σύστασης αποτελούνται από σειρά στρωμάτων παρόμοιων με αυτά του φλύσχη. Θεωρούμε ότι ο προτεινόμενος γεωτεχνικός χαρακτηρισμός μπορεί να εφαρμοστεί γενικά σε ιζηματογενή πετρώματα που εναποτέθηκαν σε ένα ήρεμο αβαθές θαλάσσιο περιβάλλον και δεν έχουν υποστεί σημαντικές τεκτονικές διαταραχές συμπιεστικού χαρακτήρα.

Ο σχηματισμός της μολάσσας αποτελεί, συνεπώς, ένα σύνολο διαφόρων πετρωμάτων οι οποίοι με τη σειρά τους σχηματίζουν διαφόρους συνδυασμούς βραχομαζών. Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν ουσιαστικές τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές διαφορές με τον φλύσχη.

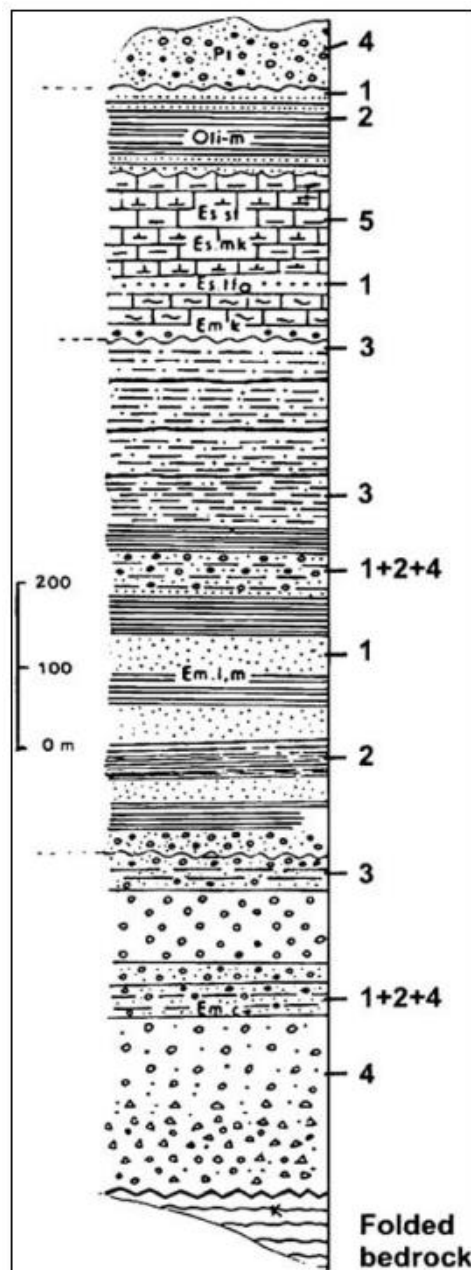
5.2.1. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Το όνομα μολάσσα προέρχεται από ένα Ελβετικό τοπικό όνομα που αποδόθηκε αρχικά σε μαλακό ψαμμίτη σχετιζόμενο με μάργα και κροκαλοπαγή που ανήκαν στο Τριτογενές και ο οποίος είχε μεγάλη ανάπτυξη στα πεδινά τμήματα της Ελβετίας έχοντας δημιουργηθεί από υπολείμματα της αποσάθρωσης και διάβρωσης του Αλπικού ορεινού περιγύρου. Ο όρος χρησιμοποιείται πλέον για να χαρακτηρίσει όλες τις ορογενείς αποθέσεις παρόμοιας γένεσης, δηλαδή να περιγράψει ιζήματα που παράγονται από τη διάβρωση οροσειρών μετά την τελική φάση της ορογένεσης, στην περιοχή της οπισθοχώρας τους (Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής.*

Η μολάσσα αποτελείται από μία σχεδόν αδιατάρακτη συνέχεια ψαμμιτών, ιλυολίθων, αργιλολίθων ή μαργών μεγάλου συνολικού πάχους. Τα πετρώματα αυτά ενδέχεται να εναλλάσσονται σε στρώσεις ανά δεκάδες εκατοστά του μέτρου ή να αποτελούν συμπαγή στρώματα μεγάλου πάχους (κυρίως ψαμμιτών με περιστασιακές ενστρώσεις ιλυολίθων). Κροκαλοπαγή εμφανίζονται αρκετά συχνά, σχηματίζοντας ζώνες μεγάλου επίσης πάχους σε κάποιες περιπτώσεις. Ενδέχεται, επίσης να υπάρχουν αρκετά περιορισμένοι ορίζοντες ασβεστολίθων. Λόγω του ότι η ιζηματογένεση των υλικών αποσάθρωσης έλαβε χώρα κοντά στην ακτογραμμή και στη συνεχή βύθιση της νεοδημιουργηθείσας λεκάνης, οι μολάσσες ενδέχεται να χαρακτηρίζονται από μία εναλλαγή θαλάσσιων, λιμναίων και

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

χερσαίων εναποθέσεων, ιδιαίτερος στην περιφέρειά τους καθώς και από πλευρικές μεταβάσεις από ένα λιθολογικό τύπο στρώσεων σε άλλο. Μια στρωματογραφική στήλη και ένα γεωλογικό προφίλ των μολασσικών σχηματισμών της Ελλάδας εμφανίζεται στην ακόλουθη Εικόνα 40. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι ψαμμίτες είναι χαλαροί και ενδέχεται να εξομοιώνονται με πυκνές άμμους. Σε τόσο ασθενείς μολλάσσες, εμφανίζεται επίσης άργιλος και ιλύς και το υλικό μπορεί να προσομοιωθεί με έδαφος.



Εικόνα 40: Σχηματική στήλη των μολασσικών σχηματισμών στη λεκάνη της Ροδόπης, ΒΑ Ελλάδα: 1. ψαμμίτες, 2. αργιλοί σχιστόλιθοι ή ιλύολιθοι, 3. ψαμμίτες με ιλυολιθικούς ή αργιλικούς ψαμμίτες, 4. κροκαλοπαγή, 5. ασβεστόλιθοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι ή μάργες (Από τον Γεωλογικό Χάρτη Ελλάδος 1:50000, φύλλο Μέση-Ξυλαγάνη, ΙΓΜΕ, 1980).

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Οι μολασσοί σχηματισμοί της Ελλάδας μπορούν να διακριθούν σε τρεις μεγάλες μολασσικές λεκάνες, που έδρασαν σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα και σε διαφορετικές θέσεις κατά την αλπική εξέλιξη του Ελληνικού ορογενούς. Ό,τι ισχύει γεωγραφικά και χρονολογικά για την «κίνηση» του ορογενετικού κύματος, την έναρξη της φλυσχικής ιζηματογένεσης και τη διαβάθμιση των μεταλπικών σχηματισμών, ισχύει και για τις μολασσικές λεκάνες (Εικόνα 41), με i) τη μολάσσα της Ροδόπης στον πυρήνα του τόξου κατά το Ηώκαινο-Ολιγόκαινο, ii) τη μολάσσα της Μεσοελληνικής Αύλακας στο μέσον της Ηπειρωτικής Ελλάδας κατά το Ανώτερο Ηώκαινο-Μέσο Μειόκαινο, iii) τη μολάσσα Ηπείρου-Ακαρνανίας στη Δυτική Ηπειρωτική Ελλάδα κατά το Ανώτερο Ολιγόκαινο-Μειόκαινο. Σε αυτές τις μολασσικές αποθέσεις θα πρέπει να προστεθεί και η πιθανή προέκταση της Μεσοελληνικής Αύλακας στις Κυκλάδες (iv) με τη μολάσσα κάτω-μειοκαινικής ηλικίας.



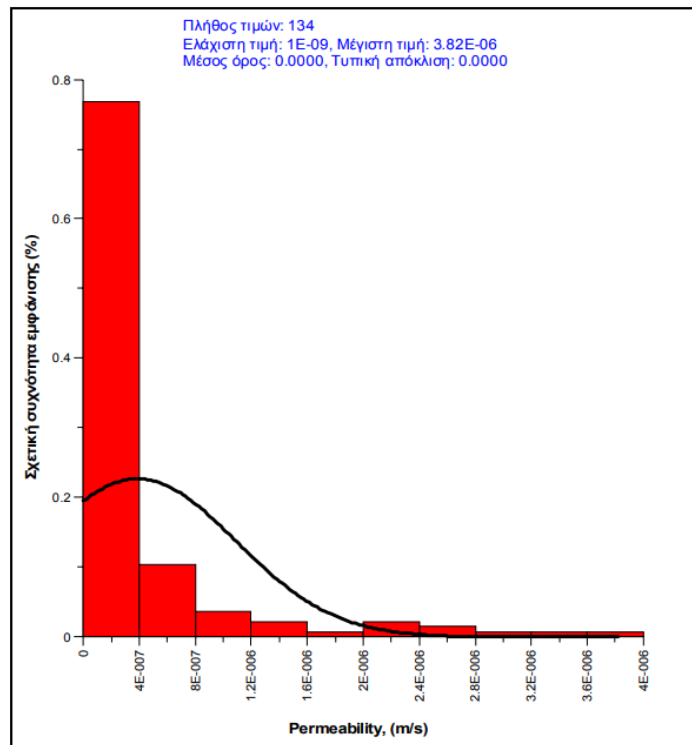
Εικόνα 41: Οι κυριότερες μολασσικές λεκάνες του Ελληνικού Τόξου. 1: Ροδόπης Βορείου Αιγαίου (Ηώκαινο-Ανώτερο Ολιγόκαινο), 2: Μεσοελληνική Αύλακα (Ανώτερο Ηώκαινο-Μέσο Μειόκαινο), 3: Ηπείρου-Ακαρνανίας (Ανώτερο Ολιγόκαινο-Μέσο Μειόκαινο), 4: Κυκλάδων (Κατώτερο Μειόκαινο), 5: Κρητικού Πελάγους (Ανώτερο Μειόκαινο-Τεταρτογενές). (Παπανικολάου,1986).

5.2.2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από συνολική χαμηλή έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα, χαρακτηριστικό των ιλυολίθων που κυριαρχούν. Το μικρό πορώδες και οι κλειστές ασυνέχειες που χαρακτηρίζουν συνήθως τους ιλυόλιθους δημιουργούν συνθήκες χαμηλής υδροπερατότητας έως πρακτικά αδιαπέρατης υδρογεωλογικής συμπεριφοράς. Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες κυρίως λόγω της παρουσίας περισσότερων ασυνεχειών με πιο ανοικτές διεπιφάνειες, κοντά στην επιφάνεια, παρουσιάζουν γενικά υψηλότερη υδροπερατότητα συγκριτικά με τους ιλυόλιθους αλλά και αυτοί στο σύνολο, σε βάθος, έδειξαν από δοκιμές υδροπερατότητας ότι κυμαίνονται γενικά στην κατηγορία χαμηλής υδροπερατότητας. Οι ορίζοντες ή οι ενστρώσεις των κροκαλοπαγών είναι δυνατόν να εμφανίζουν μια μικρής δυναμικότητας υδροφορία, η οποία μπορεί να γίνει πιο αξιόλογη εάν υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, όπως ο χαμηλός βαθμός συγκόλλησης, η σύσταση της συγκολλητικής ύλης καθώς και ο βαθμός κερματισμού τόσο των κροκαλοπαγών, όσο και των περιβαλλόντων πετρωμάτων, ώστε να διευκολύνεται η κατείσδυση και η τροφοδοσία τους (Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).*

Στο σύνολό τους, οι σχηματισμοί της μολλάσσας παρουσιάζονται με τη μορφή εναλλασσόμενων οριζόντων με συχνές πλευρικές μεταβάσεις από την αδρομερή στη λεπτόκοκκη φάση και προκύπτει ότι δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός ενιαίου υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των ερευνητικών γεωτρήσεων και τις δοκιμές υδροπερατότητας που έγιναν σε διάφορα βάθη στους σχηματισμούς αυτούς. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υδροπερατότητας που έγιναν στους σχηματισμούς της μολλάσσας, παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 42).

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

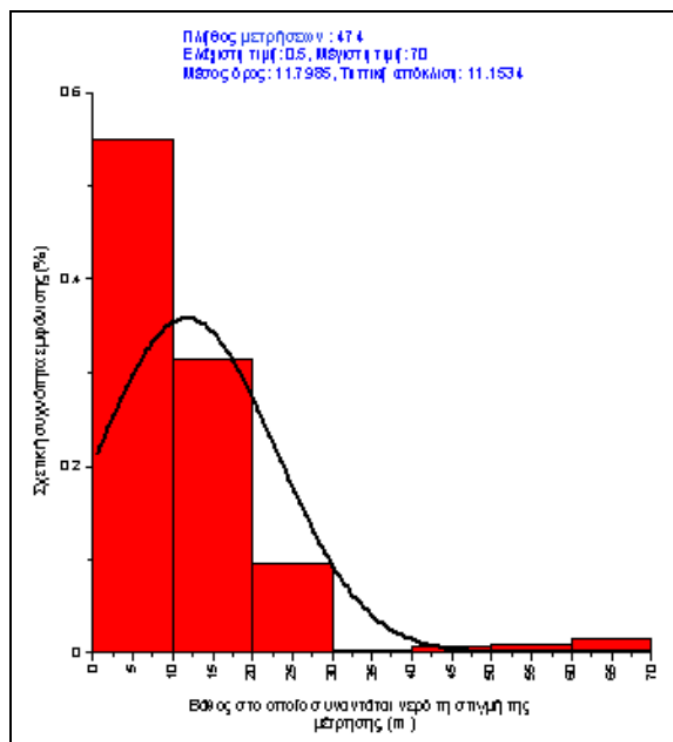


Εικόνα 42: Αποτελέσματα δοκιμών υδροπερατότητας που έγιναν στους σχηματισμούς της μολάσας τα οποία υποδεικνύουν αρκετά χαμηλή υδροπερατότητα (Μαρίνος Β. 2007).

Βέβαια, η παρουσία στάθμης νερού στις γεωτρήσεις και η ανάπτυξη μικροαναβλύσεων στην περιοχή, υποδηλώνουν ότι μέσα στο δευτερογενές πορώδες των ψαμμιτικών πάγκων αναπτύσσονται μικρής δυναμικότητας υδροφόροι, που λόγω της στρωσιγένειάς της ανάμεσα σε ιλύολιθους μπορεί να βρίσκονται υπό πίεση. Η υψηλή στάθμη όμως του νερού στο σύνολο των γεωτρήσεων υποδεικνύει αρκετά χαμηλή διαπερατότητα στο σύνολο των μολασσικών σχηματισμών, όπως παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 43). Φυσικά, η στάθμη αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στα φορτία κατά το σχεδιασμό του κελύφους της υποστήριξης και για την απομείωσή τους θα πρέπει να προβλέπεται αποτόνωσή τους.

Μια άλλη ένδειξη της χαμηλής διαπερατότητας των μολασσικών σχηματισμών είναι το πυκνό υδρογραφικό δίκτυο που αναπτύσσεται στην περιοχή τους.

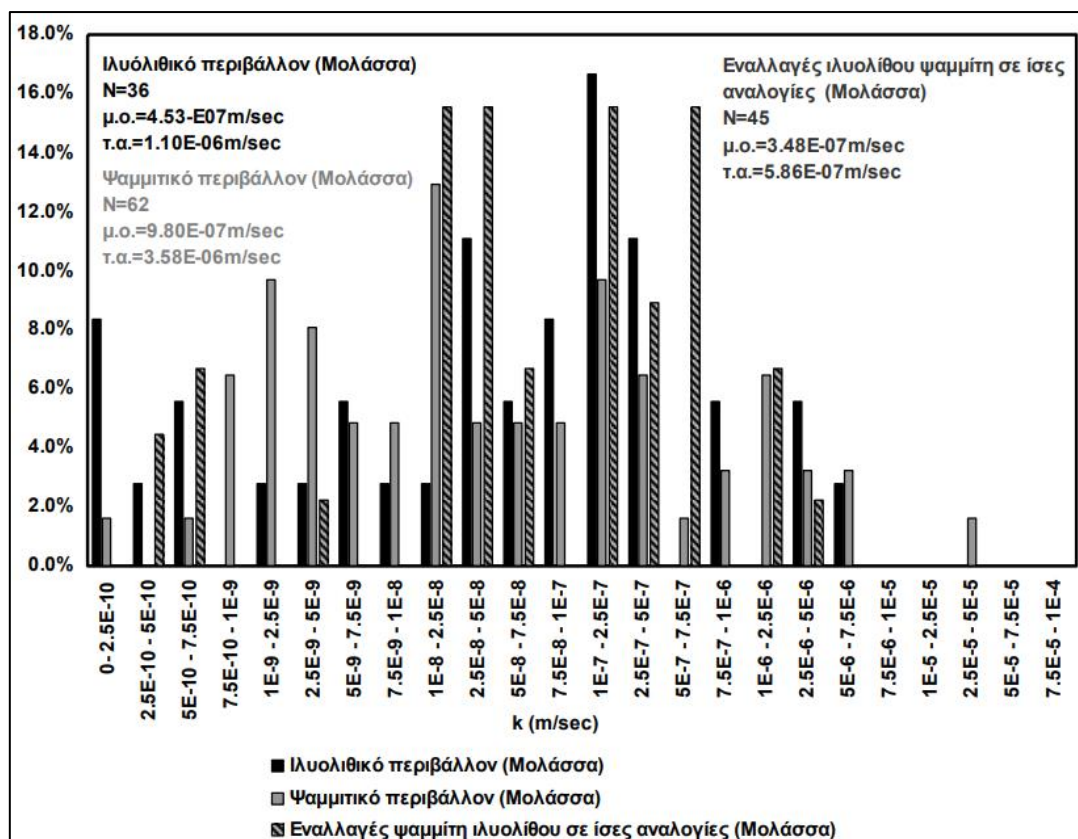
Οι ζώνες ρηγματώσης, αν και πιο περατές λόγω του σημαντικού δευτερογενούς πορώδους τους δεν είναι ούτε πολλές ούτε έχουν μεγάλο εύρος με αποτέλεσμα να μην αποτελούν γενικά, όπως σε άλλους σχηματισμούς, σημαντικές ζώνες επιλεκτικής υδροφορίας.



Εικόνα 43: Κατανομή του βάθους του νερού στους μολασσικούς σχηματισμούς. Η υψηλή στάθμη του νερού σε πιεζόμετρα των γεωτρήσεων υποδεικνύει αρκετά χαμηλή διαπερατότητα στο σύνολο των μολασσικών σχηματισμών. Ο παράγοντας μορφολογία θεωρούμε ότι δεν επηρεάζει τη διαπίστωση αυτή λόγω της λοφώδους μονοτονίας που επικρατεί σε όλη την περιοχή των σηράγγων μολάσας (Μαρίνος Β. 2007).

Με βάση τα προαναφερθέντα, αναμένεται περιορισμένη παρουσία νερού στα έργα σηράγγων σε μολάσσα, η οποία εκδηλώνεται κυρίως με τη μορφή αυξημένης υγρασίας έως στάγδην και σπανιότερα τη μορφή διαλείπουσας ή συνεχούς χαμηλής ροής σε διάφορες θέσεις κυρίως σε επαφές ψαμμιτικών-ιλυολιθικών στρωμάτων και κατά μήκος σημαντικών ασυνεχειών. Πάντως, αυτή η παρουσία υποβαθμίζει τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην εκτίμηση τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού.

Σε ερεύνα των *Marinos P. et al.* (2007), πραγματοποιήθηκε σύγκριση στη περατότητα μεταξύ ιλυολιθικής και ψαμμιτικής μολάσας και βάση των αποτελεσμάτων, όπως παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 44), προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι η περατότητα της ψαμμιτικής μολάσας, είναι περίπου διπλάσια σε σχέση με αυτή της ιλυολιθικής μολάσας.



Εικόνα 44: Κατανομή της περατότητας της Μολάσσας, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής Ψαμμίτη - Ιλυολίθου (Marinos P. et al. 2007).

5.3. ΓΝΕΥΣΙΟΙ - ΓΡΑΝΙΤΕΣ

Ο όρος «γνεύσιος» φαίνεται να χρησιμοποιείται αρχικά στο λεξιλόγιο σαξονικών μεταλλείων για να αποδοθεί σε ένα πέτρωμα ο χαρακτηρισμός του άχρηστου μεταλλεύματος. Οι γνεύσιοι είναι συνήθη πετρώματα και απαντώνται ευρέως σε όλο τον κόσμο και έχουν δημιουργηθεί από την μεταμόρφωση είτε ιζηματογενών είτε πυριγενών σχηματισμών.

Στην Ελλάδα απαντώνται γνεύσιοι σε πολλές περιοχές όπως στην ενότητα της Πελαγονικής, στη Σερβομακεδονική Ενότητα, στη μάζα της Ροδόπης και την Αττικοκυκλαδική.

5.3.1. ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι γνεύσιοι είναι πετρώματα τα οποία παρουσιάζουν ταινιωτή υφή λόγω του προσανατολισμού των ορυκτών τους. Η διακριτή αυτή επιφάνεια μέσα στη βραχώμαζα προκύπτει όταν τα ορυκτά διαχωρίζονται και τοποθετούνται γραμμικά σε σκοτεινόχρωμες σειρές φεμικών (σιδηρομαγνησιούχων) ορυκτών με επικράτηση του βιοτίτη και της κερροσίλβης και ανοιχτόχρωμες με επικράτηση αστρίων και χαλαζία. Σημαντικά επιπρόσθετα ορυκτά όπως ο μοσχοβίτης και ο γρανάτης μπορεί να απαντώνται στους γνεύσιους και να είναι σημαντικά συστατικά του. Η ταινιωτή υφή εξαρτάται από το βαθμό της μεταμόρφωσης, το αρχικό πέτρωμα (π.χ. σχιστόλιθος) αλλά και από

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

το αν είναι ή όχι μικροφθαλμώδης ή όχι (μεγάλοι κρύσταλλοι αστρίων). Οι γνεύσιοι παρουσιάζουν επίσης κατά θέσεις ποικίλλοντα βαθμό σχιστότητας με ζωνώδεις διαφοροποιήσεις ως προς την ορυκτολογική σύσταση (Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).*

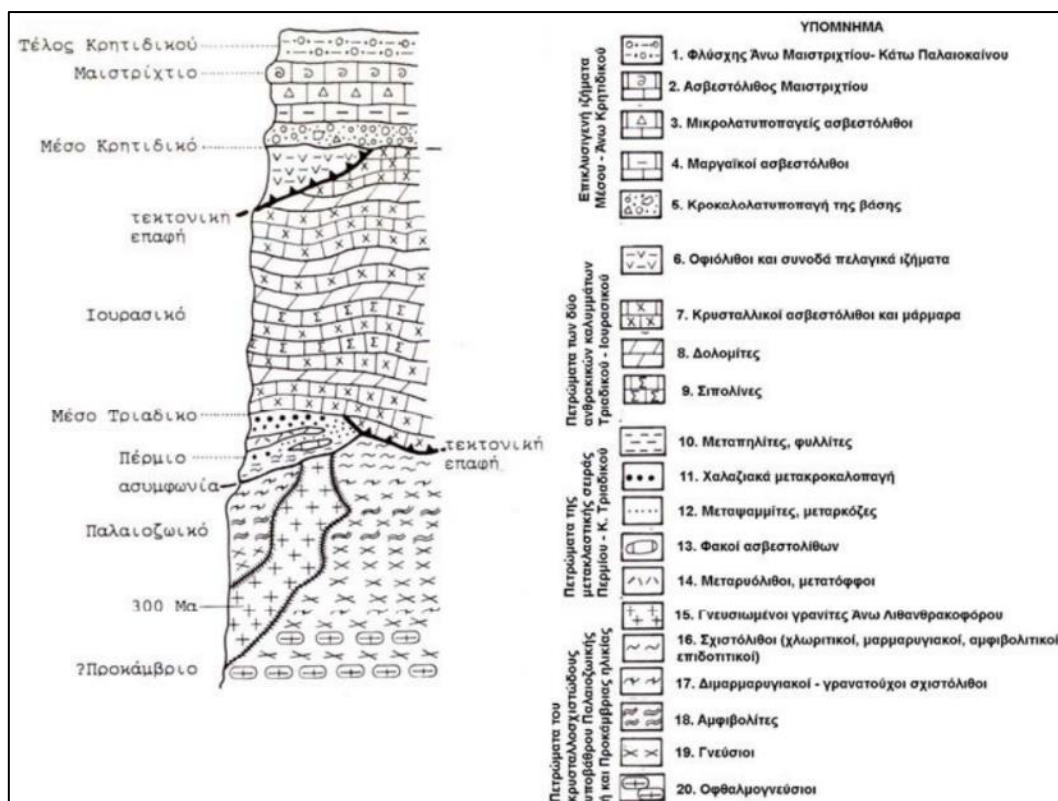
Η περιεκτικότητά τους σε φεμιστικά συστατικά ποικίλει από περιοχή σε περιοχή, ενώ κατά θέσεις παρατηρούνται εναλλαγές με λεπτά στρώματα αμφιβολιτών ή αμφιβολιτικών σχιστολίθων. Στις θέσεις όπου ο γνεύσιος εναλλάσσεται με τα στρώματα αυτά ή με μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους δημιουργούνται ασυνέχειες, συνήθως αδυναμίας, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια ή στον περίγυρο των τεκτονικών διαρρήξεων. Χαρακτηριστικό του σχηματισμού είναι ότι διατρέχονται από απλιτικές φλέβες, συνήθως σε συζυγείς κατευθύνσεις. Πρόκειται για διεισδύσεις, που συνίστανται κυρίως από χαλαζία και αστρίους και έχουν χρώμα λευκό. Μπορεί να παρουσιάζουν έντονη σχιστότητα και φυλλώδη δομή όταν έχουν επηρεασθεί από την μεταμόρφωση. Το δίκτυο απλιτικών φλεβών τοπικά μπορεί να φτάνει και τα 20m εύρος.

Η υφή ανάλογα πόσο σχιστώδης είναι επιτρέπει τα πετρώματα αυτά να ταξινομούνται σε γνεύσιους, σχιστογνεύσιους και γνευσιοσχιστόλιθους κατά αυξανόμενη σχιστότητα.

Παράλληλα, στο περιβάλλον όπου απαντώνται γνευσιακά πετρώματα συχνά υπάρχουν και διεισδύσεις πυριγενών πετρωμάτων. Ο κύριος όγκος των διεισδύσεων αφορά για γρανίτες. Στην περίμετρο των γρανιτικών διεισδύσεων εμφανίζονται οι γρανιτογνεύσιοι και οι γνευσιογρανίτες. Τα όρια μεταξύ γρανίτη, γνευσιογρανίτη και γρανιτογνεύσιου δεν είναι πάντοτε σαφή, έχουν ανάλογη αποσάθρωση και έχουν παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, με διαφορά στη σχιστότητα που παρουσιάζουν οι δύο τελευταίοι.

Μια χαρακτηριστική λιθοστρωματογραφική-τεκτονική στήλη της Πελαγονικής ενότητας παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 45.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 45: Χαρακτηριστική λιθοστρωματογραφική-τεκτονική στήλη της Πελαγονικής ενότητας, όπου διακρίνεται η τεκτονική σχέση των γνευσιακών δομών με τα άλλα πετρώματα (Μουντράκης, 1985).

5.3.2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

Οι σχηματισμοί των γνευσίων, γρανιτών και σχιστολίθων, κατατάσσονται στους σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας έως πρακτικά αδιαπέρατους. Η κυκλοφορία του νερού μπορεί να γίνει επιλεγμένα μέσω του συστήματος ασυνεχειών της βραχώμαζας, η οποία όμως μειώνεται όταν η αποσάθρωση είναι έντονη. Μικρές ποσότητες κατεισδύοντος νερού μπορούν να συναντηθούν εκλεκτικά και στις ζώνες τεκτονικής καταπόνησης και τοπικά να δημιουργούνται επικρεμάμενοι υδροφόροι οριζόντες μικρού δυναμικού (Μαρίνος, Β. (2007). Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).

Ο μανδύας αποσάθρωσης των γνευσίων και των γρανιτών παρουσιάζει κάποια διαπερατότητα όχι πάντως μεγάλη λόγω της παρουσίας αργιλικών υλικών. Επιτρέπει την διακίνηση μικρών μόνο ποσοτήτων νερού.

Σημειώνεται πάντως ότι η παρουσία του νερού σε ζώνες κερματισμού και αποσάθρωσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δυσμενών συνθηκών ευστάθειας λόγω της διαβροχής των αργίλων που συναντώνται στις θέσεις αυτές. Η υγρασία αυτή επηρέασε τη φύση των αργιλικών υλικών (προϊόντα

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

αποσάθρωσης των γνευσιακών πετρωμάτων) με αποτέλεσμα τη μείωση των διατμητικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών.

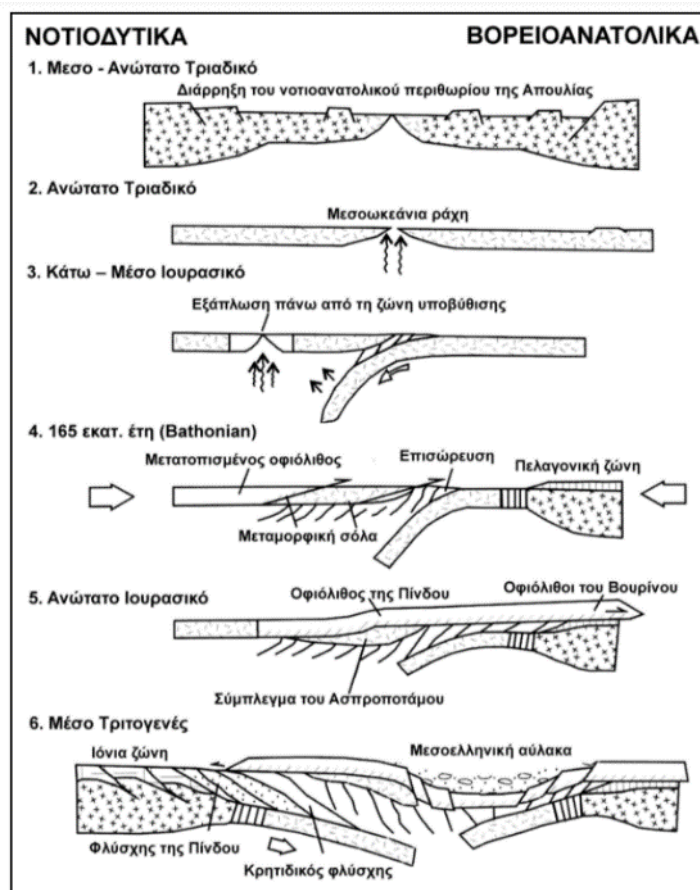
Στην περιοχή διέλευσης της σήραγγας Σ13 Πολύμυλου Κοζάνης και Σ10 Πολύμυλου-Λευκόπετρας δεν παρατηρήθηκαν εισροές. Στο μεγαλύτερο μήκος της σήραγγας το μέτωπο παρατηρήθηκε στεγνό έως απλώς υγρό. Η υγρασία αυτή επηρέασε τη φύση των αργιλικών πετρωμάτων (προϊόντα αποσάθρωσης των γνευσιακών πετρωμάτων) που συχνά παρουσιαζόταν με υγρασία με αποτέλεσμα τη μείωση των διατμητικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών.

5.4. ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ

Ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα είναι αποτέλεσμα σύνθετων γεωλογικών διεργασιών με διαφορετικούς συμμετέχοντες πετρολογικούς τύπους, βαθμό τεκτονικής καταπόνησης και με βασική ιδιαιτερότητα, τον βαθμό και έκτασης της σερπεντινίωσης των κύριων μελών του. Η πολυπλοκότητα που παρουσιάζει στην μεταβολή των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των βραχομαζών του απαίτησε την ανάγκη για ειδικότερη ανάλυση και τεχνικογεωλογικό χαρακτηρισμό με βάση τις ιδιαιτερότητες τόσο στη δομή του όσο και στα βραχώδη χαρακτηριστικά του.

5.4.1. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

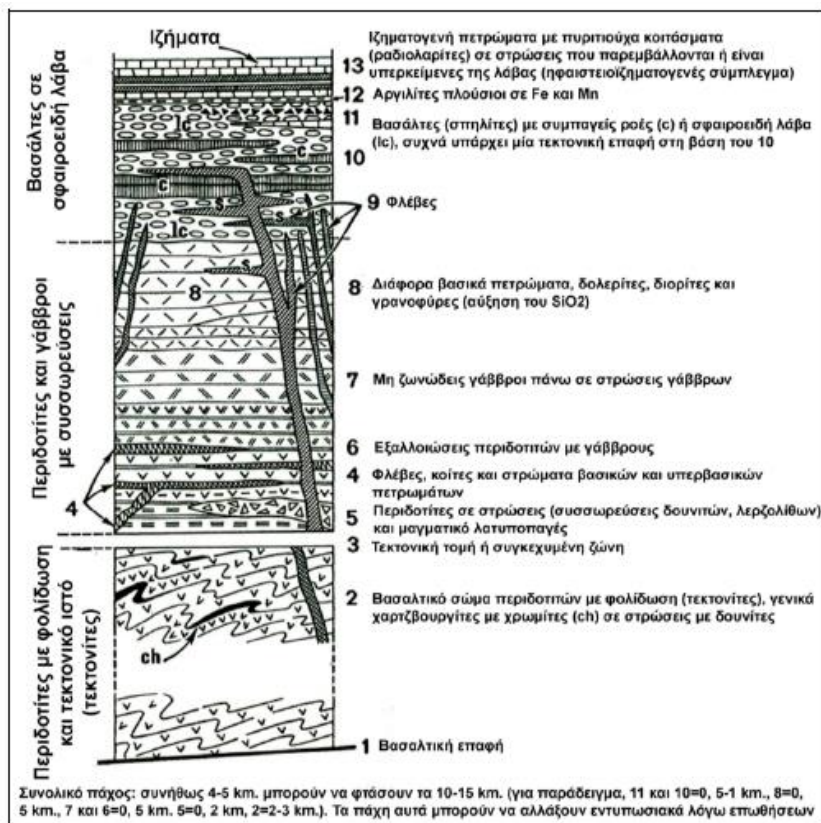
Ο όρος «οφιόλιθος» αποδόθηκε αρχικώς σε μία συνέχεια βασικών και υπερβασικών πυριγενών πετρωμάτων, σχετικώς σερπεντινωμένων ή μεταμορφωμένων, τα οποία απαντούν στις Αλπικές οροσειρές. Αρχικώς, αυτά τα συμπλέγματα θεωρούνται υπόγειες ηφαιστειακές εκχύσεις μέσα στις οποίες έλαβαν χώρα μαγματικές διαφοροποιήσεις, (προστατευμένες από ένα θώρακα σφαιροειδούς λάβας). Αν και κάτι τέτοιο μπορεί να συμβαίνει σε ορισμένες περιοχές, οι οφιόλιθοι πλέον θεωρούνται τμήματα του ωκεάνιου φλοιού, τα οποία δημιουργήθηκαν σε μία ωκεάνια ράχη και στον ανώτερο μανδύα ενός παλαιού ωκεανού και τα οποία στη συνέχεια επωθήθηκαν στον ηπειρωτικό φλοιό κατά τη διάρκεια της ορογένεσης (π.χ. κατά τη σύγκρουση μεταξύ δύο ηπείρων ή μεταξύ μιας ηπείρου και ενός νησιωτικού τόξου), όπως παρουσιάζονται στην ακόλουθη Εικόνα 46. Επειδή το πάχος τους ξεπερνά τα 10km, συμπεραίνεται ότι στη διαδικασία δημιουργίας τους δε συμμετείχε μόνο ο ωκεάνιος φλοιός (πάχους 6-7km) αλλά και ένα τμήμα του μανδύα (Debelmas and Mascle, 1997) (Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).*



Εικόνα 46: Τεκτονικό μοντέλο της εξέλιξης των οφιολίθων στους ορεινούς όγκους της Πίνδου και του Βούρινου στη Βόρεια Ελλάδα (προσαρμοσμένο από Jones et al, 1991, και Pe-Piper and Piper, 2002).

Ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα χαρακτηρίζεται από ποικιλία υλικών και συγκεκριμένα από υποκείμενα περιδοτικά πετρώματα, καλυμμένα από γαββικά πετρώματα, τα οποία με τη σειρά τους καλύπτονται από βασάλτες ή σπηλίτες. Οι περιδοτίτες της βάσης είναι φολιδωμένοι («τεκτονίτες»). Οι επακόλουθες εναλλαγές των περιδοτιτών και των γάββρων συχνά εμφανίζουν στρωματώδη δομή από συσσωρεύσεις των πετρωμάτων αυτών και ακολουθούνται από συμπαγείς (μαζώδεις) γάββρους, νορίτες και άλλα βασικά πετρώματα πλουσιότερα σε SiO_2 . Οι υπερκείμενοι βασάλτες είναι είτε συμπαγείς ή έχουν τη μορφή μαξιλαροειδούς λάβας. Ανάμεσα στη λάβα ενδέχεται να υπάρχουν αποθέσεις ιζηματογενών πετρωμάτων. Στην ακόλουθη Εικόνα 47 παρουσιάζεται μια συνθετική στήλη ενός οφιολιθικού συμπλέγματος. Η ακολουθία αυτή έχει εξιδανικευμένη μορφή και σε πολλές περιπτώσεις κάποια συστατικά μέρη της μπορεί να λείπουν, όπως για παράδειγμα η ηφαιστειακή λάβα στο επάνω μέρος.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 47: Οφιολίθιο: συνθετική και θεωρητική στήλη (από τους Fouchault και Raoult 1995 με απλοποιημένες περιγραφές).

Αυτή η γεωμετρία είναι διαταραγμένη σημαντικά, καθώς τα οφιολιθικά συμπλέγματα εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε τεκτονικές ζώνες με επαλληλία πολλαπλών επωθήσεων. Ο μεταμορφισμός, που επίσης συμμετέχει στη διαδικασία, αλλάζει την αρχική φύση των υλικών. Ο υψηλός βαθμός σερπεντινίωσης και οι έντονες διατμητικές κινήσεις συχνά δυσχεραίνουν την αναγνώριση της αρχικής σύστασης και υφής των συσσωρεύσεων (Skemp και McCaig, 1984).

Η σφαιροειδής λάβα, συνήθως βασαλτικής ή ανδεσιτικής σύνθεσης, εξωθήθηκε μέσα στο νερό του ωκεανού και δημιούργησε μία μάζα σχετικώς ελλειψοειδών σωμάτων με ελαφρώς κυματοειδή επιφάνεια. Τα σώματα αυτά έχουν διάμετρο από 10cm έως μερικά μέτρα και είναι ενωμένα μεταξύ τους, ομοιάζοντας με μία ανομοιογενή σειρά από «μαξιλάρια» (pillow lavas) (Visser, 1980). Ακτινωτές διακλάσεις είναι εμφανείς στις εγκάρσιες τομές και δημιουργούν ακτινωτά στηλοειδή τεμάχια (Pantazis, 1973).

Καθώς οι οφιολίθιοι σχετίζονται με επωθήσεις μεγάλης κλίμακας, τα τεκτονικά μίγματα δημιουργούνται στη βάση ή στο μέτωπο τέτοιων μεγαδομών. Τα οφιολιθικά αυτά τεκτονικά μίγματα περιέχουν οφιολιθικά πετρώματα καθώς και άλλα πετρώματα διαφόρων παλαιογεωγραφικών προελεύσεων. Το σύνολο αυτό εμφανίζει σημαντική τεκτονική αταξία με χαοτικές μάζες, όπου

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

ογκόλιθοι και «πακέτα» διαφόρων μεγεθών και κάθε είδους πετρωμάτων (ιζηματογενών ή ηφαιστειακών) «πλέουν» μέσα σε μία διατμημένη μάζα που μοιάζει με έδαφος.

Οι τεκτονίτες είναι ισχυρώς παραμορφωμένα, πτυχωμένα και διαρρηγμένα πετρώματα. Συχνά παρουσιάζουν στρωματώδη ως σχιστώδη δομή.

5.4.2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

Τα βασικά και υπερβασικά πετρώματα των οφιολίθων στην περίπτωση που είναι αδιατάρακτα παρουσιάζουν πολύ μικρή διαπερατότητα και πρακτικά μπορούν να χαρακτηρισθούν ως αδιαπέρατα.

Ο συντελεστής υδροπερατότητας σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης του 10^{-6} έως 10^{-7} m/sec.

Στην περίπτωση που παρουσιάζουν ασυνέχειες εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης και χαλάρωσης λόγω της επιφανειακής αποσάθρωσης στα ανώτερα στρώματά τους συναντάται κατά θέσεις αυξημένη διαπερατότητα, η οποία ελέγχεται από την ποιότητα και την κατάσταση των ασυνεχειών αυτών.

Πάντως κοντά στην επιφάνεια που οι ασυνέχειες σε γενικές γραμμές είναι περισσότερες, αυτές παρουσιάζονται όμως συχνά πληρωμένες με τα αργιλικά υλικά της αποσάθρωσης. Η δευτερογενής αυτή πλήρωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας του μανδύα αποσάθρωσης.

Η υπόγεια κίνηση του νερού ελέγχεται επομένως από την ανάπτυξη μέσα στη μάζα των βασικών και των υπερβασικών πετρωμάτων κερματισμένων ή αποσαθρωμένων ζωνών με ανοιχτές διακλάσεις που επιτρέπουν την κατείσδυση και σε βάθος κίνηση του νερού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Οι ζώνες κερματισμού, εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης, λειτουργούν και ως ζώνες αποστράγγισης της επιφανειακώς αναπτυσσόμενης ασθενούς υδροφορίας και είναι πολύ πιθανό να φέρνουν υπόγεια νερά τοπικά και στο βάθος. Ο συντελεστής υδροπερατότητας (k) σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι της τάξης του 10^{-3} έως 10^{-5} m/sec.

Οι ζώνες διάτμησης έχουν κυμαινόμενη περατότητα που εξαρτάται από το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος που περιέχουν.

Η παρουσία του νερού όμως ακόμα και με τη μορφή υγρασίας επιδρά αρνητικά στα μηχανικά χαρακτηριστικά των εξαλλοιωμένων ορυκτών των οφιολιθικών μαζών.

Στη σήραγγα Μετσόθου, από την κατασκευή του αριστερού κλάδου γνωρίζουμε ότι κατά τη διάνοιξη του παρατηρήθηκε υγρασία και στάγδην ροή νερού κατά θέσεις στο μέτωπο εκσκαφής. Οι εισροές ήταν συνεπώς μικρές, αλλά η παρουσία του νερού είχε αρνητική επίδραση στην κατασκευή διότι προκαλούσε περαιτέρω μείωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών. Επιπλέον,

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

λόγω της μικρής περατότητας, αυτή η παρουσία υποδηλώνει ότι στην ορεινή μάζα είναι εγκατεστημένο ένα υψηλό υδραυλικό φορτίο.

Όσον αφορά τη σήραγγα Κωσταράκου, ένα ιδιαίτερο στοιχείο της περιοχής που επιδρά σημαντικά στην παρουσία και ανάπτυξη υπόγειας υδροφορίας είναι και τα μεγάλα ύψη βροχής και χιονοπτώσεων που παρατηρούνται. Από τις μετρήσεις στάθμης που πραγματοποιήθηκαν στα υφιστάμενα πιεζόμετρα κατά το παρελθόν προκύπτει ότι η στάθμη της ασθενούς υπόγειας υδροφορίας παρακολουθεί γενικά την τοπογραφία. Στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας, στις ζώνες κερματισμού, εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης, που λειτουργούν ως ζώνες αποστράγγισης της επιφανειακώς αναπτυσσόμενης υδροφορίας, εκτιμήθηκε ότι θα συναντηθούν εισροές. Στο μεγαλύτερο υπόλοιπο τμήμα της δεν υπήρξαν ιδιαίτερα προβλήματα από την παρουσία υπόγειου νερού πέραν της αυξημένης υγρασίας που έχει ως αποτέλεσμα την τοπική μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας (Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).*

6. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

ΑΝΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων στατιστικής επεξεργασίας από δοκιμές περατότητας σε βραχώδεις σχηματισμούς: α) φλύσχη, β) μολάσσας, γ) γνευσίου και δ) οφιολίθου, από ερευνητικές γεωτρήσεις στον ελλαδικό χώρο (πχ. Εγνατία Οδός). Συνολικά αξιολογούνται **1054 αποτελέσματα δοκιμών περατότητας** στους προαναφερθέντες σχηματισμούς, εκ των οποίων οι 391 δοκιμές αφορούν τον σχηματισμό του φλύσχη, οι 357 το σχηματισμό της μολάσσας, οι 74 το σχηματισμό του γνεύσιου και οι 232 το σχηματισμό του οφιολίθου.

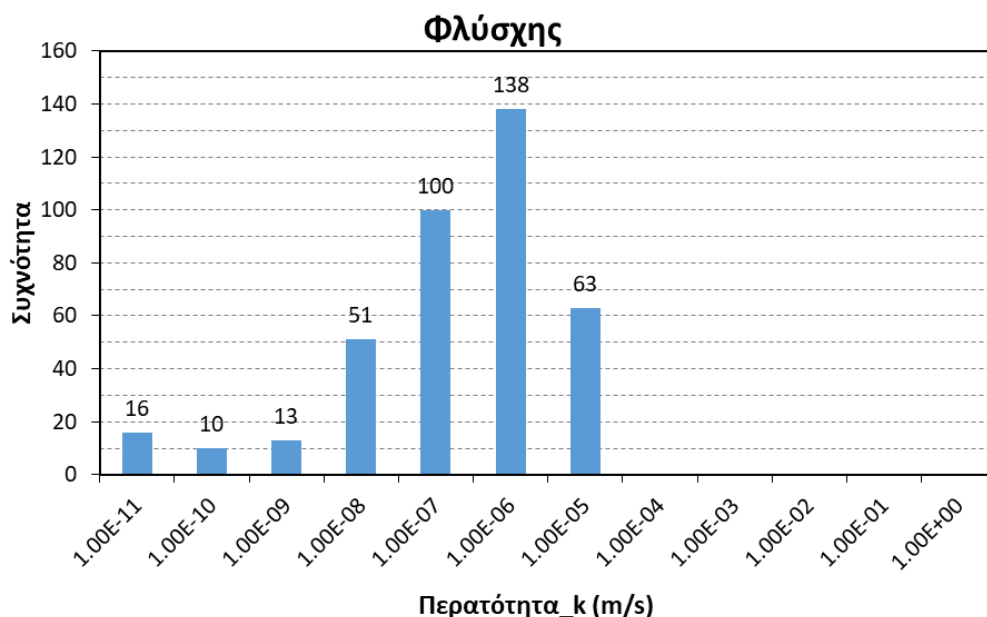
Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων δοκιμών περατότητας στους τέσσερις βραχώδεις σχηματισμούς, προκύπτουν διαγράμματα και αντίστοιχα συμπεράσματα σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης της περατότητας ανά σχηματισμό, ώστε να προκύψει η επικρατούσα περατότητα του κάθε σχηματισμού, προκύπτει η μέση τιμή της περατότητας κάθε σχηματισμού, καθώς προκύπτουν και αντίστοιχα συμπεράσματα σχετικά με την επικρατούσα τιμή της περατότητας, ανά λιθολογικό τύπο κάθε σχηματισμού (π.χ. ψαμμίτης στον φλύσχη). Τέλος, γίνεται συσχέτιση της περατότητας κάθε σχηματισμού με το βάθος και προκύπτουν αντίστοιχα συμπεράσματα.

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της στατιστικής επεξεργασίας για τη περατότητα κάθε σχηματισμού, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται γενικά συμπεράσματα για τη περατότητα των υπό εξέταση σχηματισμών.

6.1. ΦΛΥΣΧΗΣ

Για τη στατιστική επεξεργασία της περατότητας του φλύσχη, ελήφθησαν υπόψιν αποτελέσματα από 391 δοκιμές εντός του σχηματισμού και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν στους ακόλουθους λιθολογικούς τύπους: α) ιλυόλιθος, β) ψαμμίτης, γ) κροκαλοπαγές, δ) ιλυόλιθος-ψαμμίτης (50%-50%), ε) ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη, στ) ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου και ζ) κροκαλοπαγές με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη. Οι δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε βάθη από 3,5m έως 300m.

Στο ακόλουθο *Διάγραμμα 1*, παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης της περατότητας (k) του φλύσχη διαμοιρασμένη σε κλάση ανά 10^{-1} m/sec. Με βάση το διάγραμμα, προκύπτει ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για τον φλύσχη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec. Επιπρόσθετα, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι η περατότητα (k) στο φλύσχη, κυμαίνεται από 10^{-5} έως 10^{-11} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-5} έως 10^{-8} m/sec.



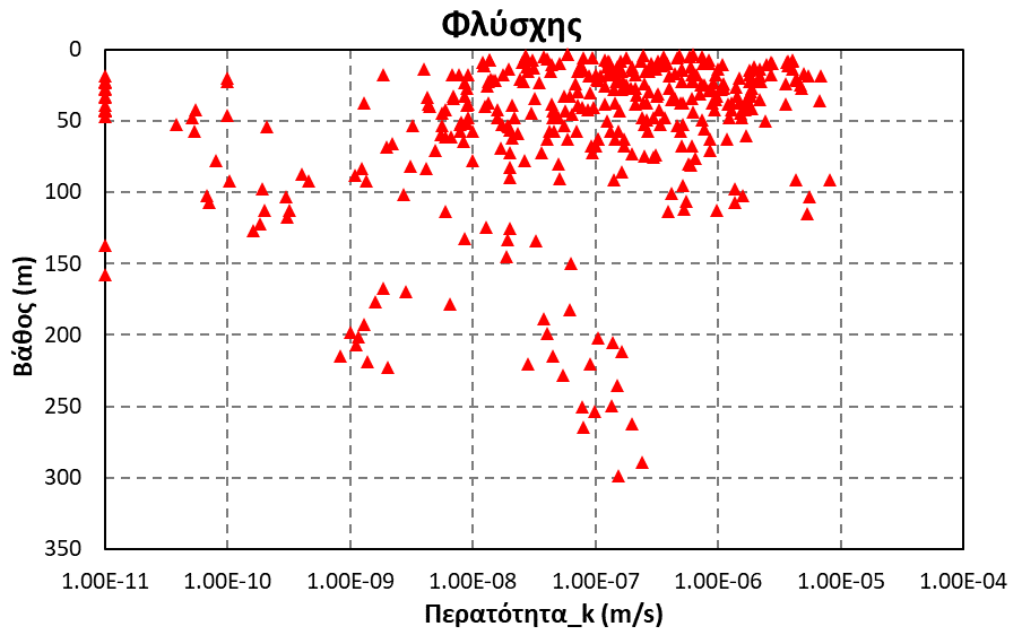
Διάγραμμα 1: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του φλύσχη.

Με βάση τη στατιστική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στις δοκιμές περατότητας του φλύσχη, προκύπτουν τα ακόλουθα δεδομένα από την επεξεργασία των στοιχείων, τα οποία αναφέρονται στο σύνολο του σχηματισμού του φλύσχη, όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 15.

Πίνακας 15: Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του φλύσχη.

Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
$5,83 \times 10^{-7}$ m/sec	10^{-11} m/sec	$8,15 \times 10^{-6}$ m/sec	-

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 2, παρατίθεται η συσχέτιση μεταξύ του βάθους του υπεδάφους και των τιμών περατότητας (k) του φλύσχη. Με βάση το ακόλουθο διάγραμμα, δεν είναι σαφής η εικόνα της μεταβολής της περατότητας του σχηματισμού με το βάθος, ενώ το μόνο βασικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει, είναι ότι η περατότητα του φλύσχη, μειώνεται ελάχιστα μετά το βάθος των 180-200m, χωρίς όμως να μπορεί να τεκμηριωθεί πλήρως αυτό το συμπέρασμα, καθώς μετά το βάθος των 200m δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία από δοκιμές περατότητας για αυτό τον σχηματισμό. Οι αβεβαιότητες οφείλονται στο γεγονός ότι οι λιθολογικοί τύποι και οι συνδυασμοί τους δημιουργούν διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες.



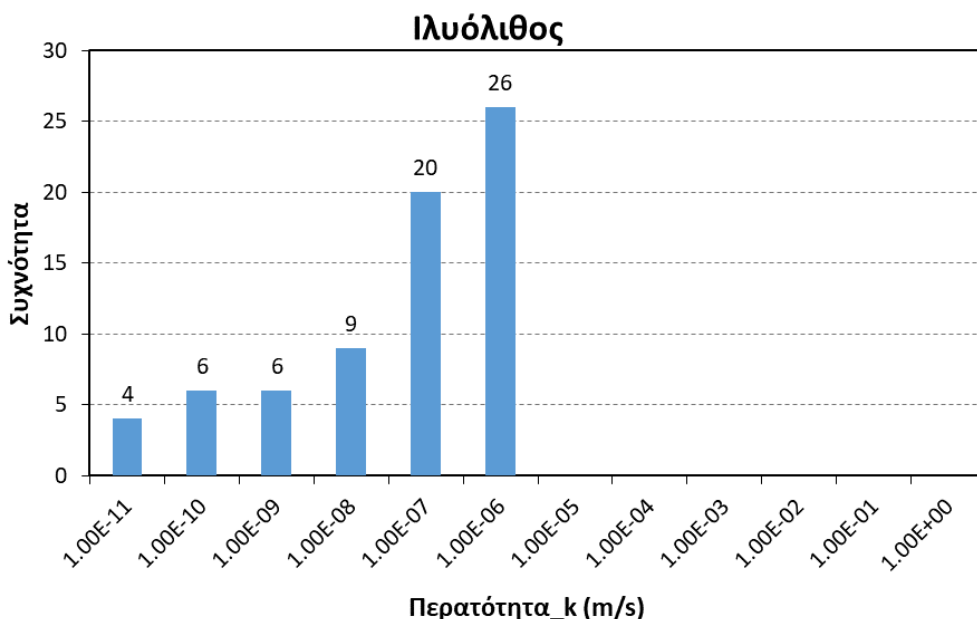
Διάγραμμα 2: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό του φλύσχη.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των δοκιμών περατότητας, ανά λιθολογικό τύπο του φλύσχη.

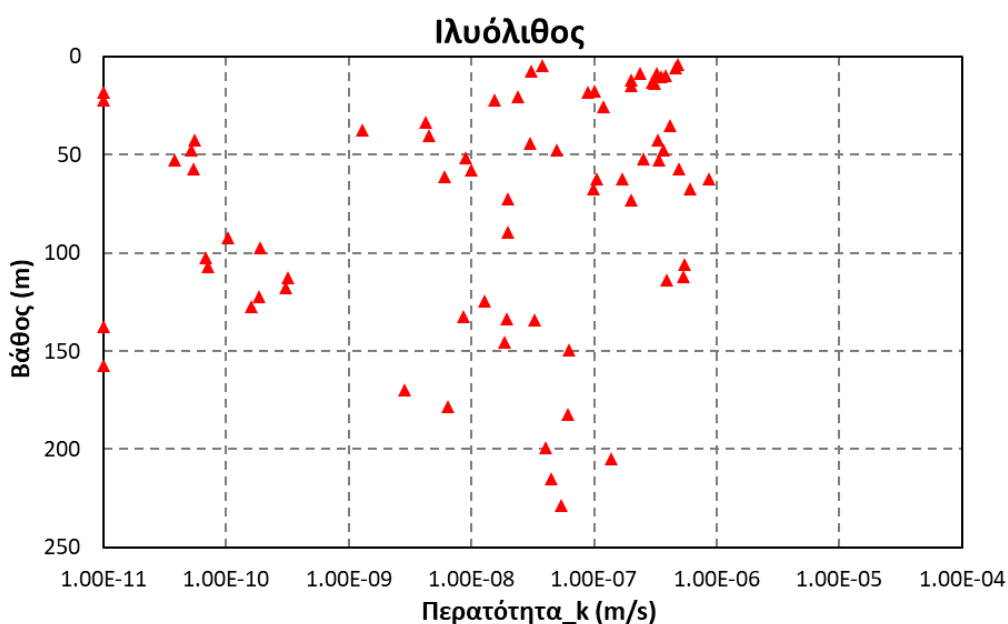
6.1.1. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου, που αφορά τις 71 από τις 391 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο *Διάγραμμα 3* προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-6}$ έως 10^{-7} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το *Διάγραμμα 4* παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη μείωση με το βάθος.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



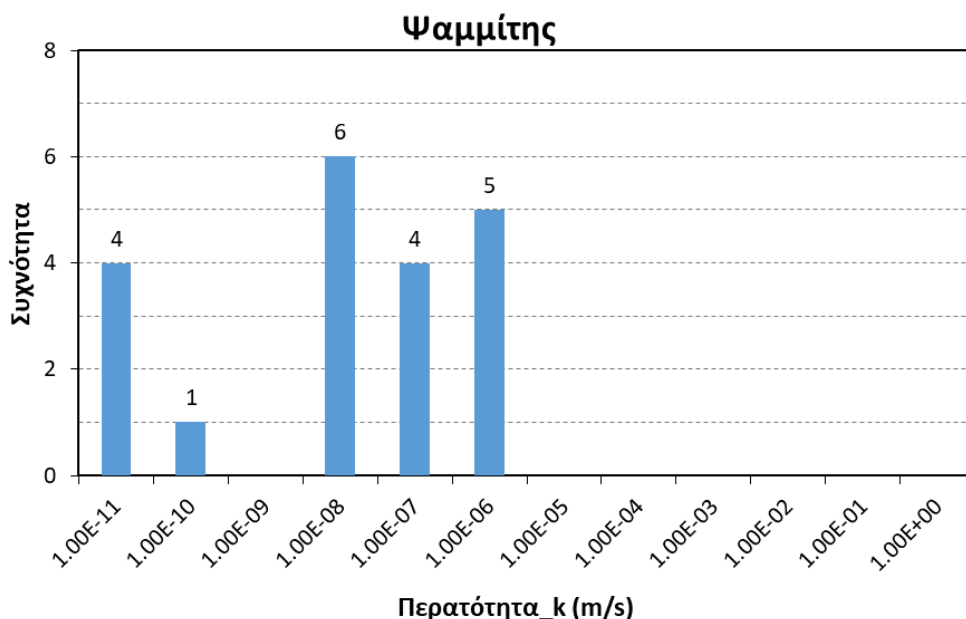
Διάγραμμα 3: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.



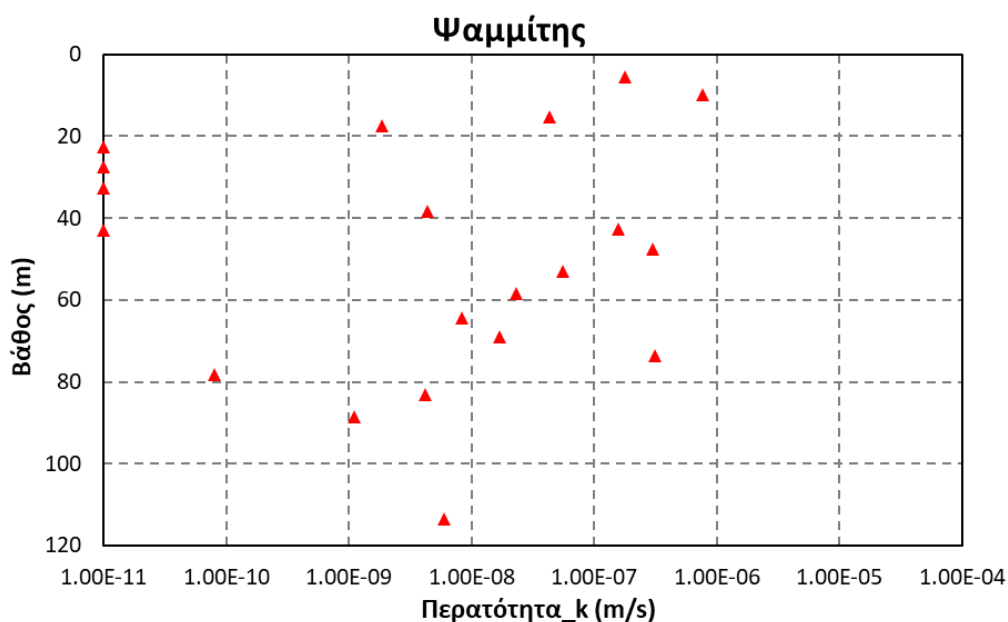
Διάγραμμα 4: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.

6.1.2. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη, που αφορά τις 20 από τις 391 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 5 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-6}$ έως 10^{-11} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 6 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη μείωση με το βάθος.



Διάγραμμα 5: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.



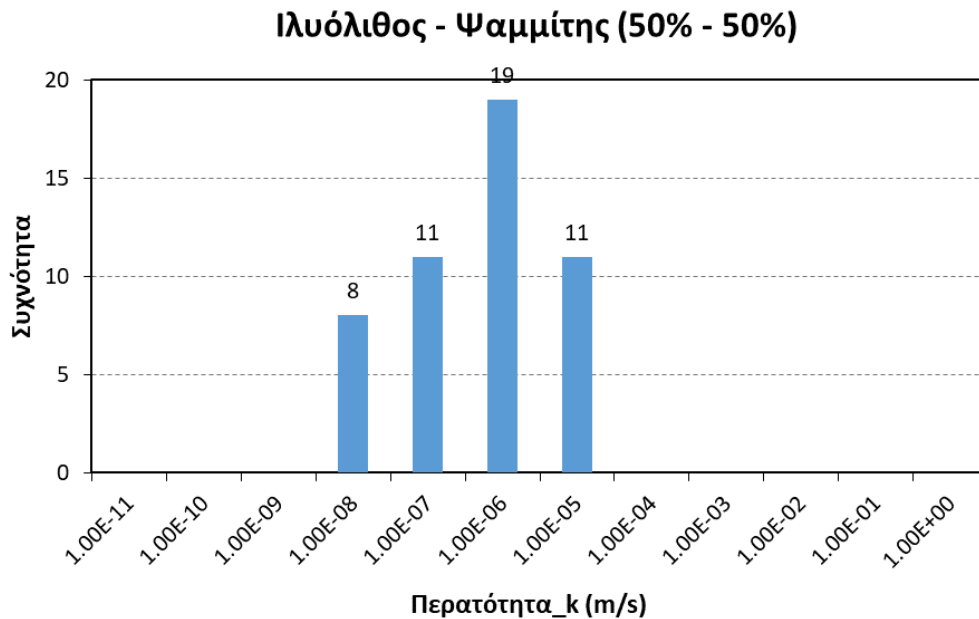
Διάγραμμα 6: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.

6.1.3. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ

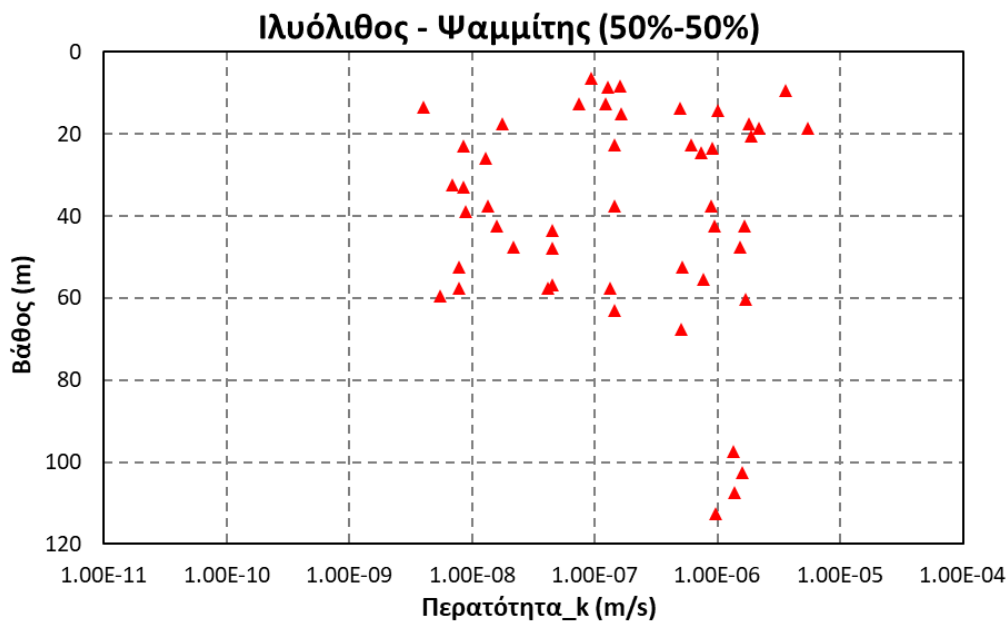
Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς, που αφορά τις 21 από τις 391 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 7 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-7}$ έως 10^{-8} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 8 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη μείωση με το βάθος.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-7} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 10 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη μείωση με το βάθος.



Διάγραμμα 9: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).



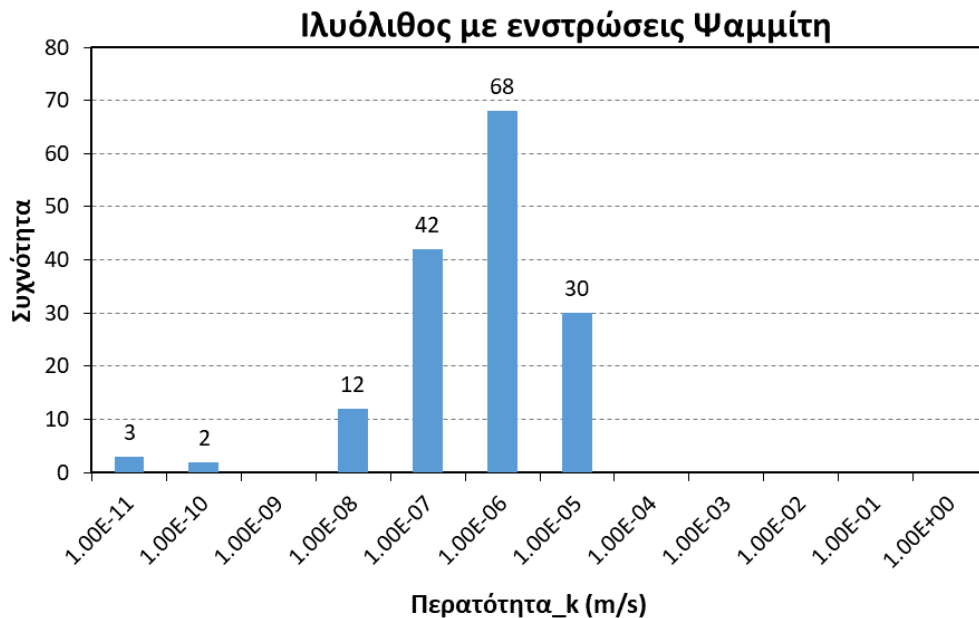
Διάγραμμα 10: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).

6.1.5. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΨΑΜΜΙΤΗ

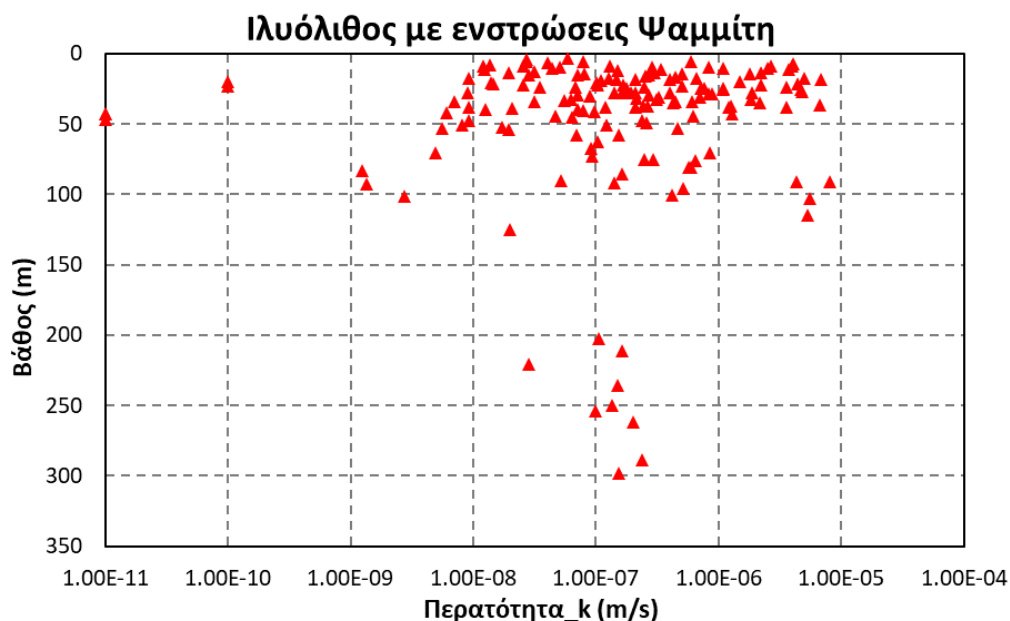
Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη, που αφορά τις 157 από τις 391 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

11 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-7} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 12 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη μείωση με το βάθος.



Διάγραμμα 11: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.



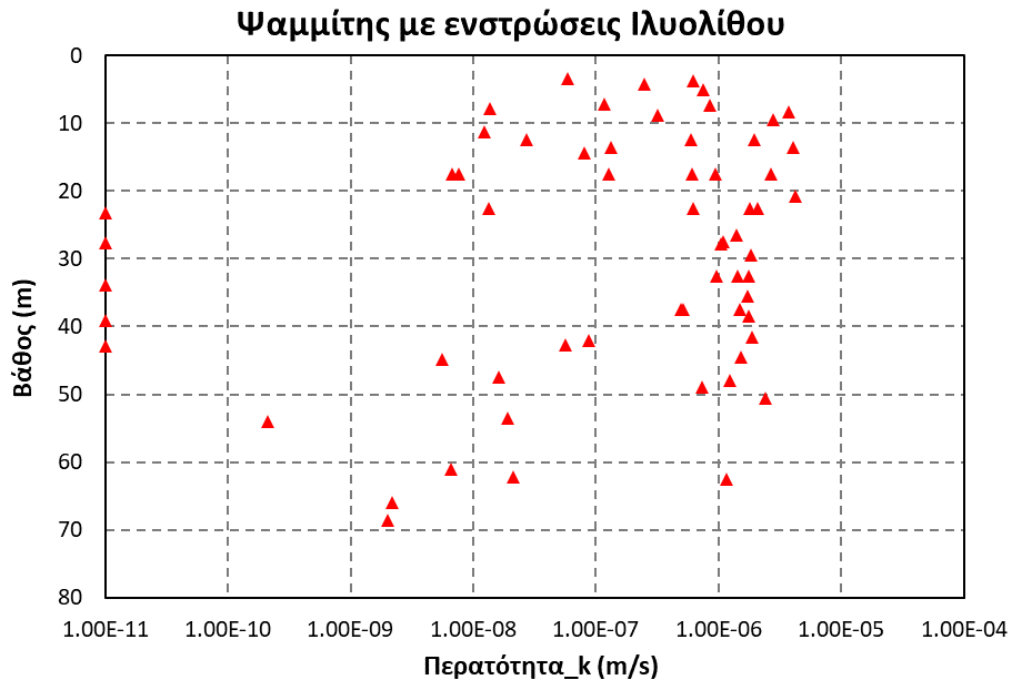
Διάγραμμα 12: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.

6.1.6. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου, που αφορά τις 61 από τις 391 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο *Διάγραμμα 13* προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-7} m/sec.. Αντίστοιχα με βάση το *Διάγραμμα 14* παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη μείωση με το βάθος.



Διάγραμμα 13: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.

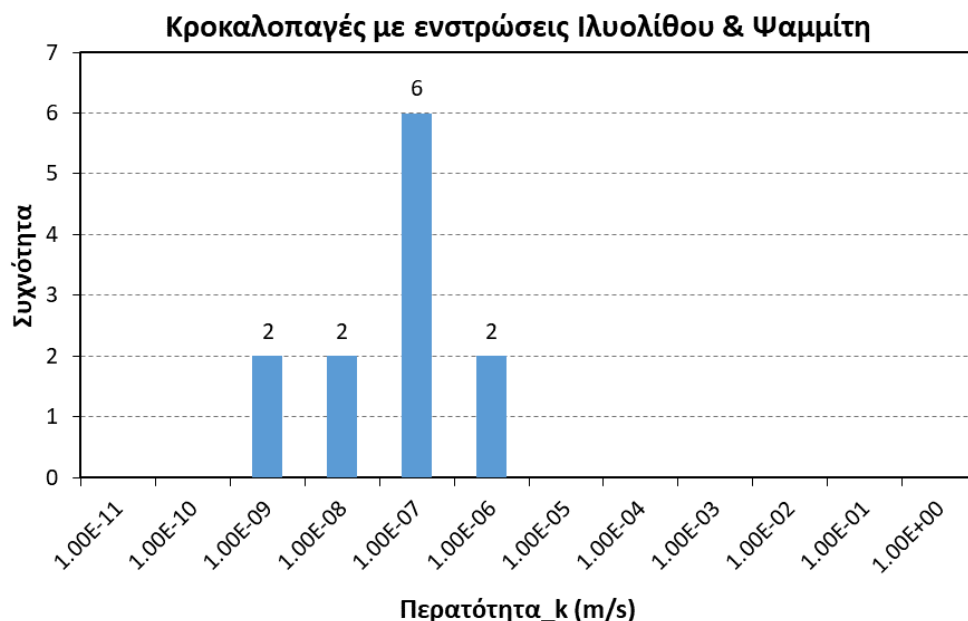


Διάγραμμα 14: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.

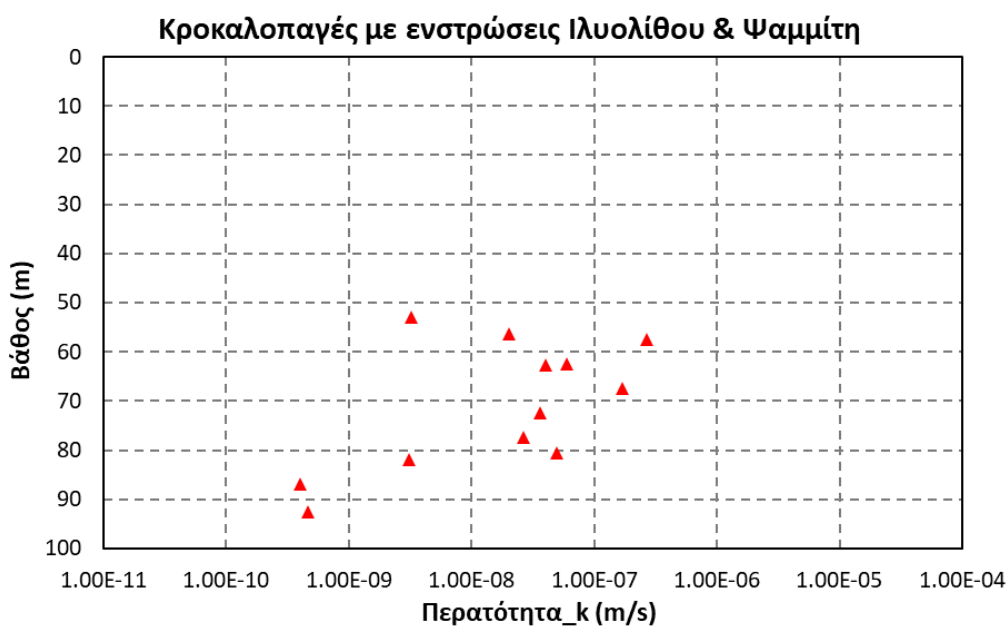
6.1.7. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΚΑΙ ΨΑΜΜΙΤΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη, που αφορά 12 από τις 391 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο **Διάγραμμα 15** προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-7} \text{ m/sec.}$ Αντίστοιχα με βάση το **Διάγραμμα 16** παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου διατηρείται σταθερή με το βάθος, συμπέρασμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Διάγραμμα 15: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη.



Διάγραμμα 16: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη.

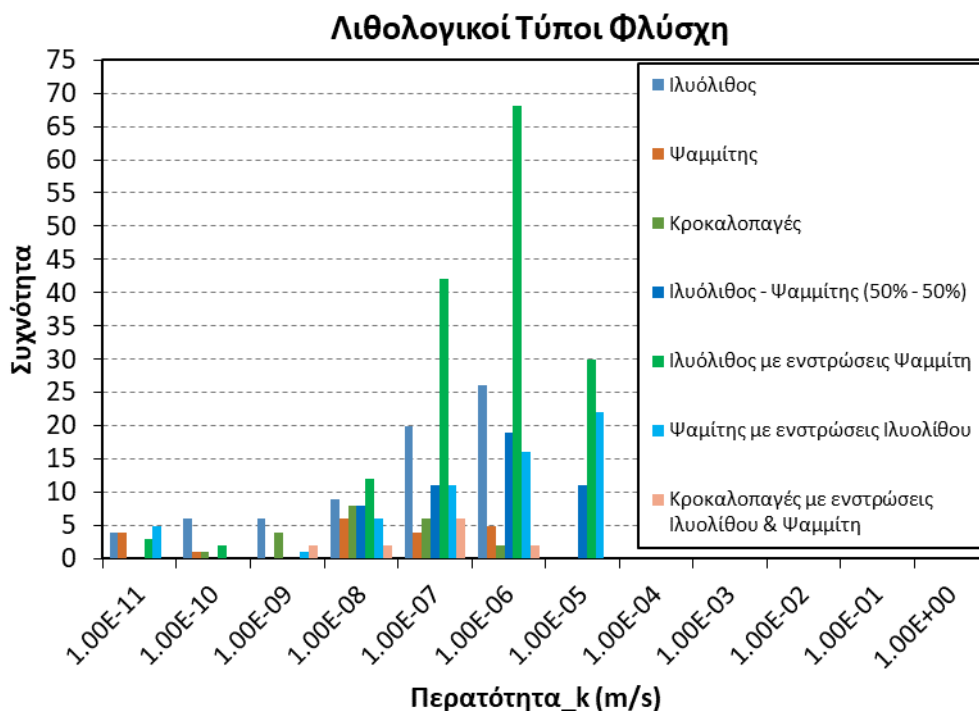
6.1.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τη στατιστική επεξεργασία σε 391 δοκιμές περατότητας (k) στο βραχώδη σχηματισμό του φλύσχη, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός του φλύσχη, χαρακτηρίζεται από περατότητα (k) της τάξης των 10^{-6} έως 10^{-7} m/sec ή 10^{-4} έως 10^{-5} cm/sec και συνεπώς ο φλύσχος με βάση τον Πίνακα 1/ Κεφάλαιο 2, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σχηματισμός χαμηλής υδατοπερατότητας.

Επιπρόσθετα, με βάση τα αναφερόμενα στο *Κεφάλαιο 5.1.2*, ο φλύσχη εμφανίζει στο σύνολό του χαμηλή διαπερατότητα και θεωρείται πρακτικά στεγανός σχηματισμός. Η περατότητα πάντως εξαρτάται και από το αν επικρατούν οι ψαμμίτες, οπότε λόγω της ψαθυρής τους θραύσης οι ρωγμές είναι σημαντικότερες, όχι όμως όσο σε άλλα ανθεκτικότερα πετρώματα.

Όσον αφορά του διάφορους λιθολογικούς τύπους του φλύσχη που διερευνήθηκαν, ο ιλυόλιθος θεωρείται πρακτικά αδιαπέρατος με πολύ μικρές τιμές του συντελεστή περατότητας, το οποίο επιβεβαιώνεται και στα αποτελέσματα των δοκιμών περατότητας. Οι μεσοστρωματώδεις-παχυστρωματώδεις ψαμμίτες ως σχηματισμός στην αδιατάρακτη του μορφή είναι πολύ μικρής περατότητας με συντελεστή κατείσδυσης ($k \approx 10^{-7}$ m/sec). Στην κερματισμένη μορφή του είναι πιο υδροπερατός σχηματισμός με χαμηλή έως μέτρια συνήθως περατότητα ($10^{-7} < k < 10^{-5}$ m/sec). Η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδους, δηλαδή μέσω των επίπεδων ασυνεχειών, διευκολύνει την κυκλοφορία του νερού. Η ανάπτυξη υδροφόρων οριζόντων εμποδίζεται όμως από τις αδιαπέρατες ιλυολιθικές ενστρώσεις, στις οποίες οφείλεται και η δημιουργία επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, μικρής όμως δυναμικότητας σε διάφορα βάθη του σχηματισμού. Στις εναλλαγές ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη, η κατείσδυση, η αποθήκευση και η κυκλοφορία νερού είναι δυνατή μόνο στα μεμονωμένα ψαμμιτικά στρώματα του σχηματισμού ανάλογα με την ρωγμάτωση. Είναι όμως γενικά στεγανός σχηματισμός, με πολύ μικρό συντελεστή κατείσδυσης, περιορισμένη ανάπτυξη, αποθηκευτικότητα και κυκλοφορία νερού λόγω των παρεμβαλλομένων στρωμάτων ιλυολίθου. Οι ψαμμίτες μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν μια μικρή περατότητα όταν είναι υγιείς εξαιτίας του δευτερογενούς πορώδους. Στην περίπτωση που είναι κερματισμένοι επιτρέπουν την κυκλοφορία ύδατος μέσω των ρωγμών. Από πλευράς περατότητας, ο φλύσχη είναι στεγανός σχηματισμός. Οι ρωγμές είναι δυνατόν να είναι λίγο πιο έντονες λόγω της παρουσίας αργιλικού υλικού. Μόνο όταν επικρατούν οι ψαμμίτες υπάρχει τάση ψαθυρής θραύσεως και οι ρωγμές είναι πιο σημαντικές. Ο ψαμμιτικός λιθότυπος είναι λίγο πιο περατός. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο ότι λόγω του τεκτονισμού, των μικροπτυχώσεων και των διατμήσεων, μπορεί να επέρχεται ένα είδος ομογενοποίησης των διαφόρων λιθοτύπων. Εν αντιθέσει με τη μολάσσα ο ψαμμιτικός τύπος παρατηρείται λιγότερο περατός, παρότι μπορεί να είναι τεκτονικά διαταραγμένος. Αιτία πιθανώς να είναι ότι λόγω των πτυχώσεων και διατμήσεων, ιλυόλιθος του φλύσχη παρεισφύει στις ασυνέχειες του ψαμμίτη μειώνοντας την περατότητά του, κάτι που δεν μπορεί να συμβεί στη μολάσσα.

Τα παραπάνω συμπεράσματα, σχετικά με τη μεταβολή της περατότητας του φλύσχη ανά λιθολογικό τύπο, αποτυπώνονται και στο ακόλουθο *Διάγραμμα 17*. Στον ακόλουθο *Πίνακα 16* δίνονται η μέγιστη, ελάχιστη, και μέση τιμή περατότητας καθώς και η τυπική απόκλιση που προέκυψε από τη στατιστική επεξεργασία στους λιθολογικούς τύπους του φλύσχη.



Διάγραμμα 17: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.

Πίνακας 16: Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.

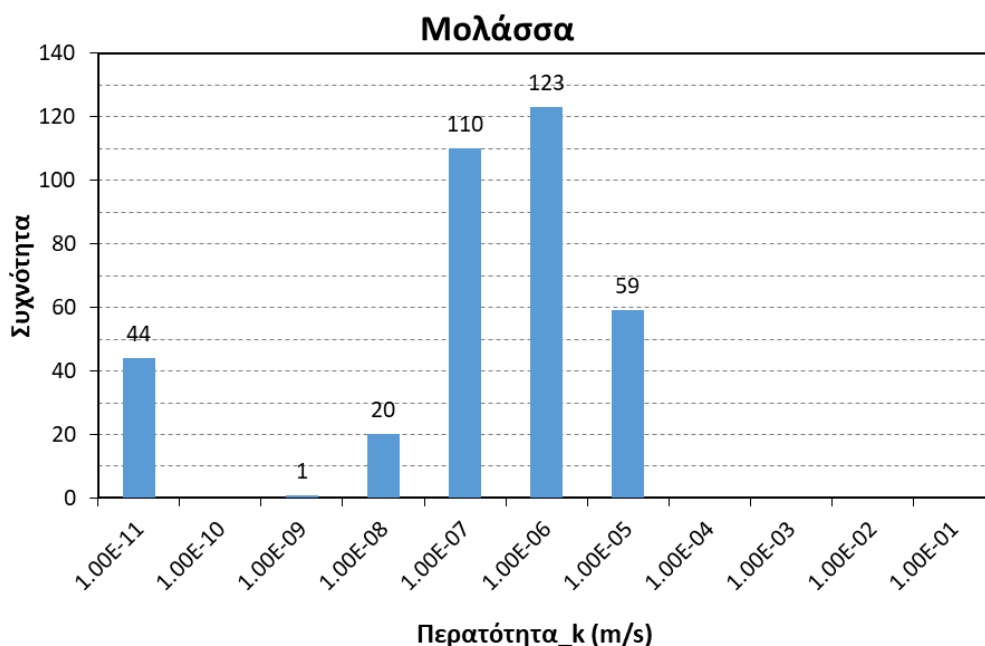
	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	Κροκαλοπαγές	Ιλυόλιθος - Ψαμμίτης (50%-50%)	Ιλυόλιθος με ενστρώσεις Ψαμμίτη	Ψαμμίτης με ενστρώσεις Ιλυολίθου	Κροκαλοπαγές με ενστρώσεις Ιλυολίθου & Ψαμμίτη
Μέγιστη τιμή k (m/s)	8.59E-07	7.60E-07	9.50E-07	5.40E-06	8.15E-06	4.26E-06	2.68E-07
Ελάχιστη τιμή k (m/s)	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-10	4.00E-09	1.00E-11	1.00E-11	4.00E-10
Μέση τιμή k (m/s)	1.41E-07	9.34E-08	8.01E-08	6.96E-07	7.99E-07	8.89E-07	5.64E-08

6.2. ΜΟΛΑΣΣΑ

Για τη στατιστική επεξεργασία της περατότητας της μολάσσης, ελήφθησαν υπόψιν αποτελέσματα από 357 δοκιμές εντός του σχηματισμού και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν στους ακόλουθους λιθολογικούς τύπους: α) ιλυόλιθος, β) ψαμμίτης, γ) ιλυόλιθος-ψαμμίτης (50%-50%), δ) ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη, ε) ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου, στ) κροκαλοπαγές, ζ) ψαμμίτης με ενστρώσεις κροκαλοπαγούς και ιλυολίθου και η) κροκαλοπαγές με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη. Οι δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε βάθη από 2,65m έως 113m και προέκυψαν από δοκιμές περατότητας Lugeon, Maag και Lefranc.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Στο ακόλουθο **Διάγραμμα 18**, παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης της περατότητας (k) της μολάσας διαμοιρασμένη σε κλάση ανά 10^{-1} m/sec. Με βάση το διάγραμμα, προκύπτει ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για τη μολάσσα, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec. Επιπρόσθετα, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι η περατότητα (k) στη μολάσσα, κυμαίνεται από 10^{-5} έως 10^{-11} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-6} έως 10^{-7} m/sec.



Διάγραμμα 18: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό της μολάσας.

Με βάση τη στατιστική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στις δοκιμές περατότητας της μολάσας, προκύπτουν τα ακόλουθα δεδομένα από την επεξεργασία των στοιχείων, τα οποία αναφέρονται στο σύνολο του σχηματισμού της μολάσας, όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 17.

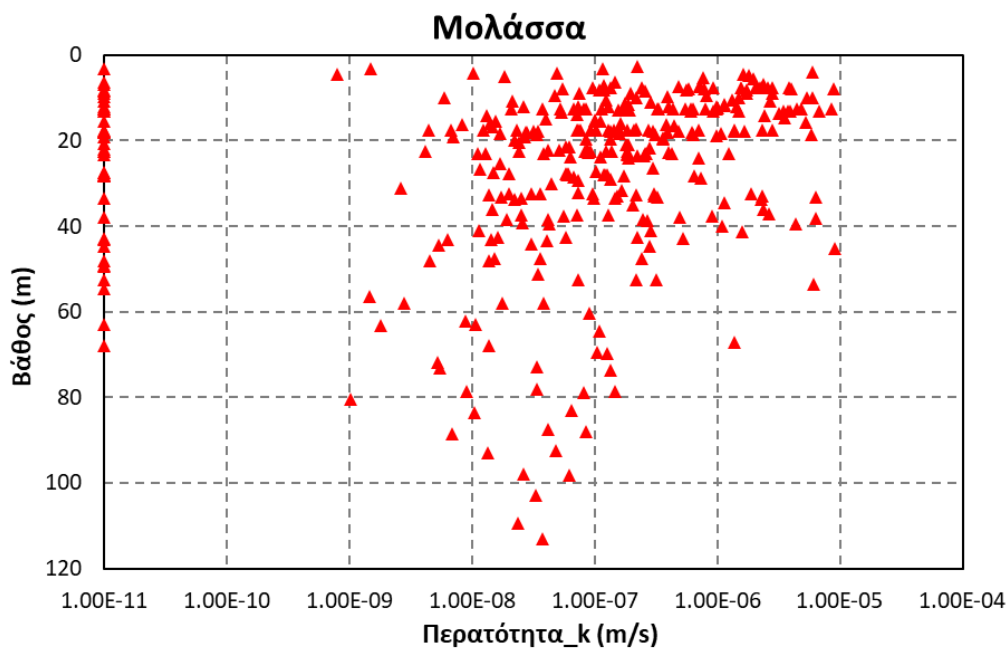
Πίνακας 17: Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό της μολάσας.

Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
$6,58 \times 10^{-7}$ m/sec	10^{-11} m/sec	$8,99 \times 10^{-6}$ m/sec	-

Στο ακόλουθο **Διάγραμμα 19**, παρατίθεται η συσχέτιση μεταξύ του βάθους του υπεδάφους και των τιμών περατότητας (k) της μολάσας. Με βάση το ακόλουθο διάγραμμα, δεν είναι σαφής η εικόνα της μεταβολής της περατότητας του σχηματισμού με το βάθος, ενώ το μόνο βασικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει, είναι ότι η περατότητα της μολάσας, μειώνεται ελάχιστα μετά το βάθος των 50-60m, χωρίς όμως να μπορεί να τεκμηριωθεί πλήρως αυτό το συμπέρασμα, καθώς μετά το βάθος των 60m δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία από δοκιμές περατότητας για αυτό τον σχηματισμό. Οι

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

αβεβαιότητες οφείλονται στο γεγονός ότι οι λιθολογικοί τύποι και οι συνδυασμοί τους δημιουργούν διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες.

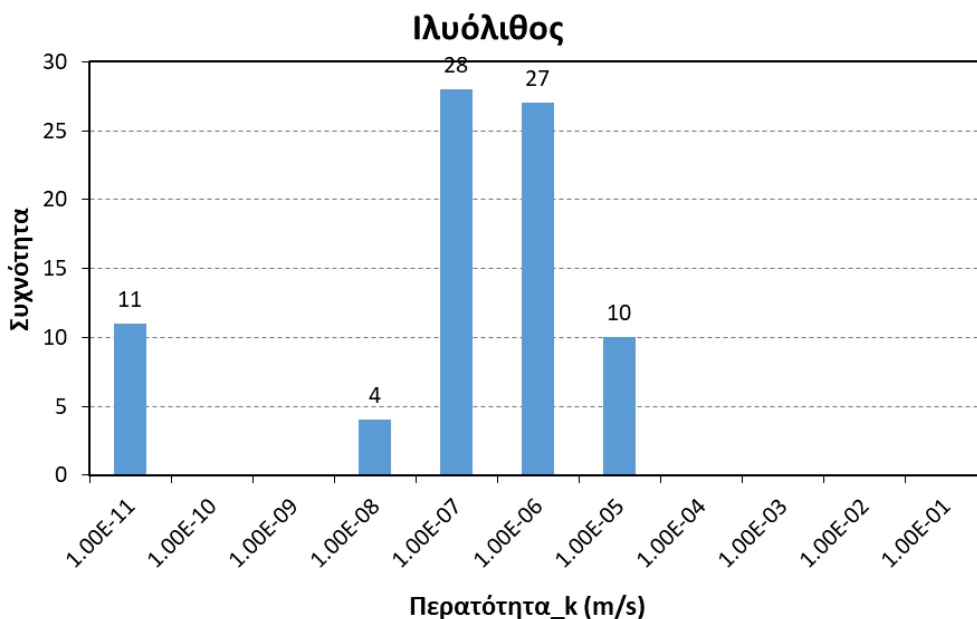


Διάγραμμα 19: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό της μολάσσας.

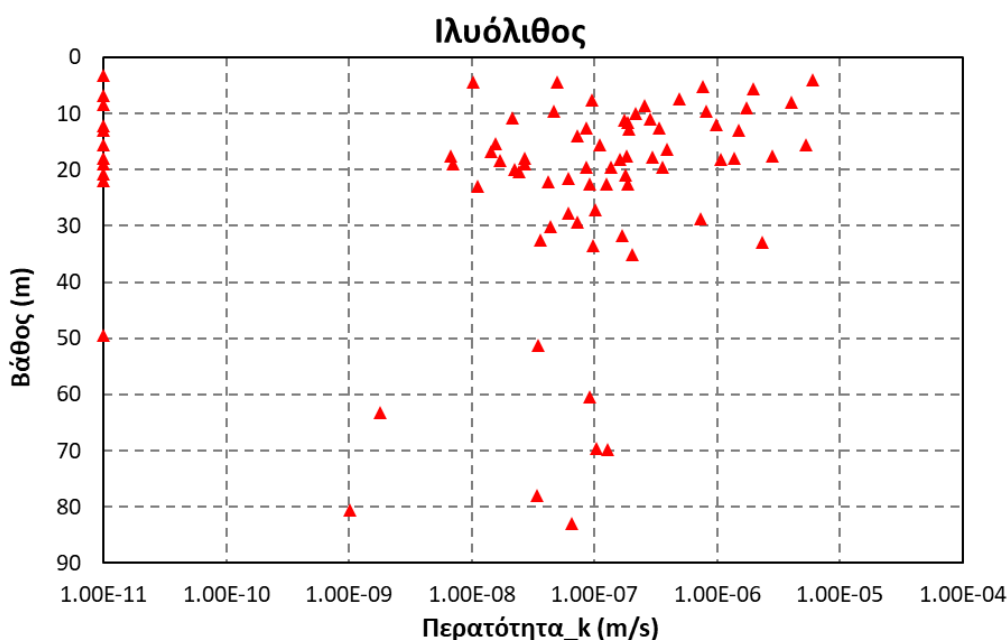
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των δοκιμών περατότητας, ανά λιθολογικό τύπο της μολάσσας.

6.2.1. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου, που αφορά τις 80 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 20 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-6}$ έως 10^{-7} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 21 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου μετά το βάθος των 35m εμφανίζει μια μικρή μείωση που δεν μπορεί να αιτιολογηθεί καθώς δεν υπήρχαν πολλά δεδομένα δοκιμών μετά το συγκεκριμένο βάθος.



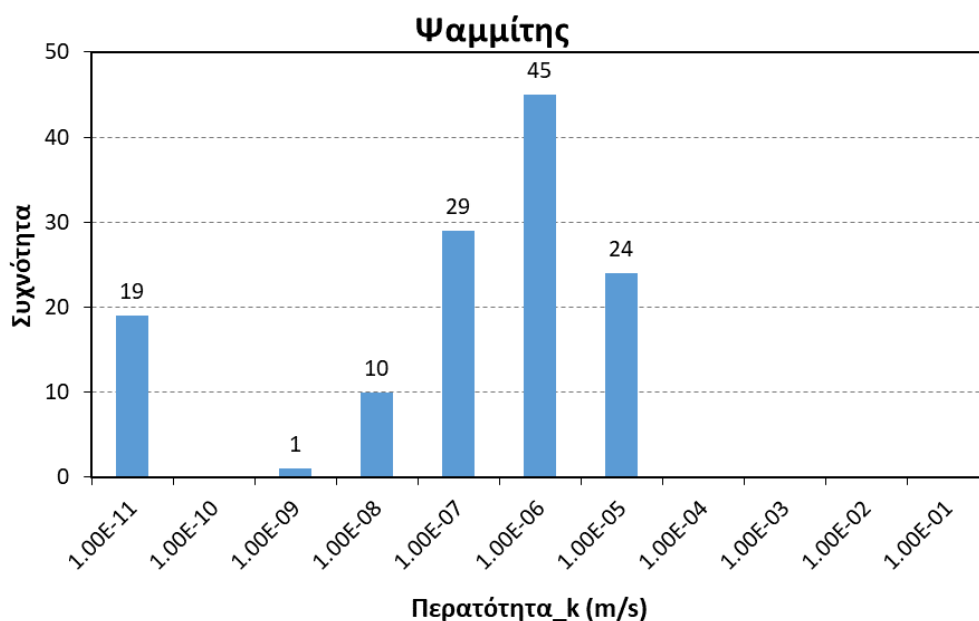
Διάγραμμα 20: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.



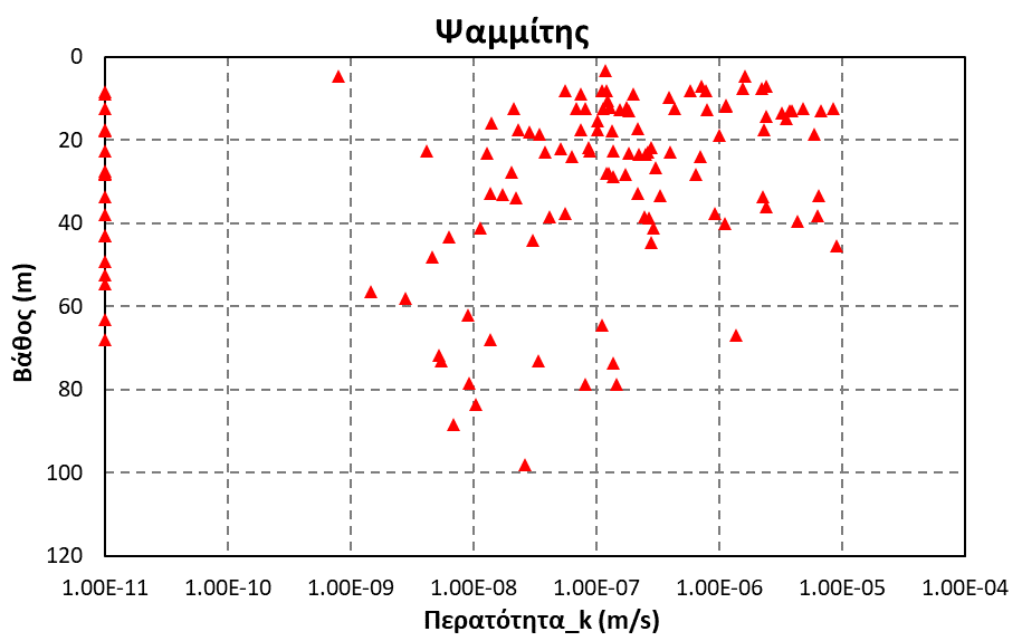
Διάγραμμα 21: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου.

6.2.2. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη, που αφορά τις 128 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 22 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6} \text{ m/sec}$. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 23 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου μετά το βάθος των 60m παρουσιάζει μικρή μείωση χωρίς όμως να μπορεί να τεκμηριωθεί λόγω μικρού ποσοστού δεδομένων δοκιμών.



Διάγραμμα 22: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.



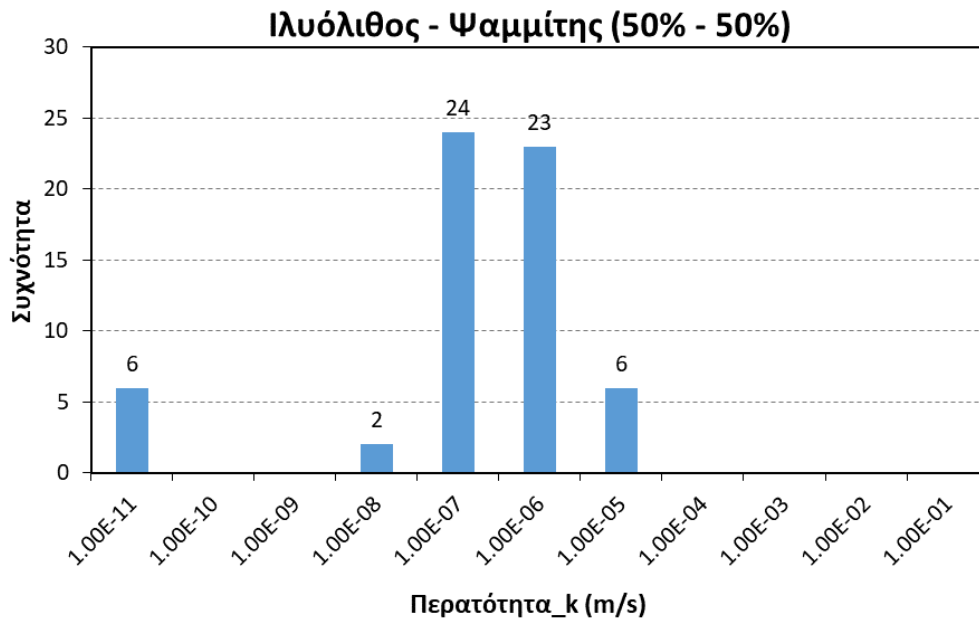
Διάγραμμα 23: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη.

6.2.3. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΕΝΑΛΛΑΓΩΝ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΨΑΜΜΙΤΗ (50%-50%)

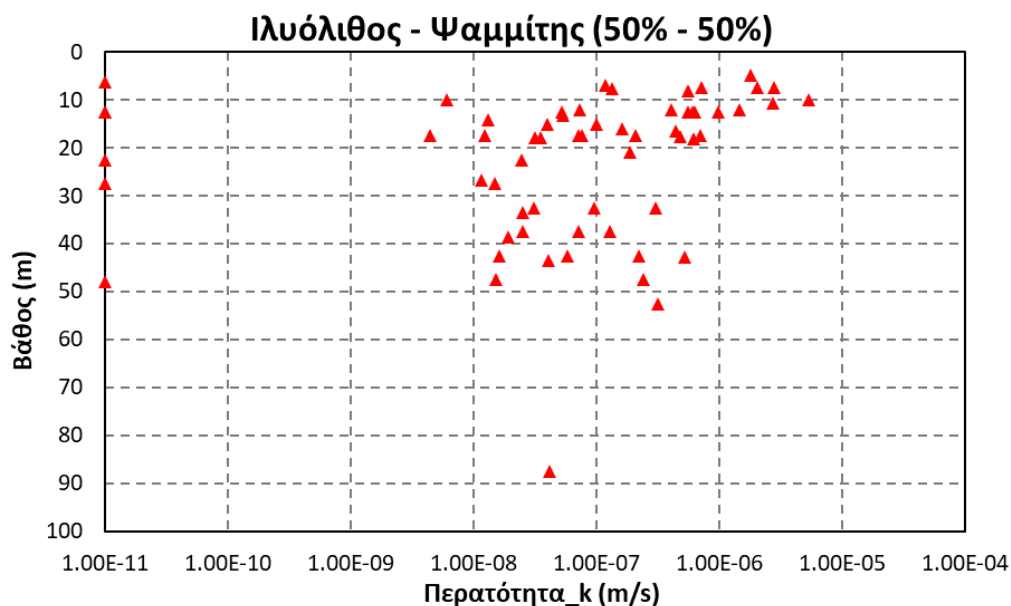
Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%), που αφορά τις 61 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 24 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%), λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

μεταξύ $k \approx 10^{-6}$ έως 10^{-7} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 25 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου μετά το βάθος των 30m σημειώνει μικρή μείωση.



Διάγραμμα 24: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).



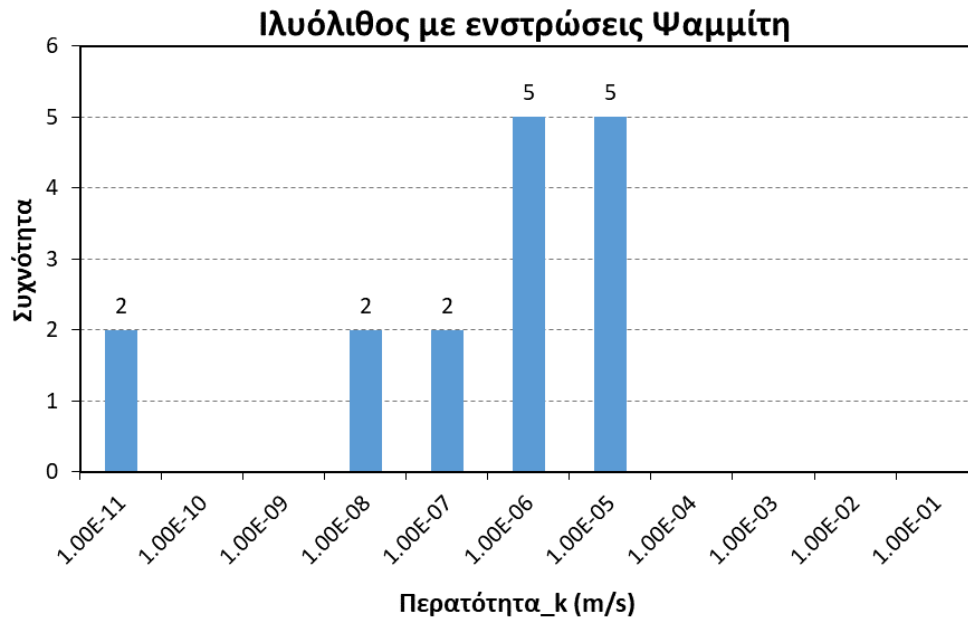
Διάγραμμα 25: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου με ψαμμίτη (50%-50%).

6.2.4. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΨΑΜΜΙΤΗ

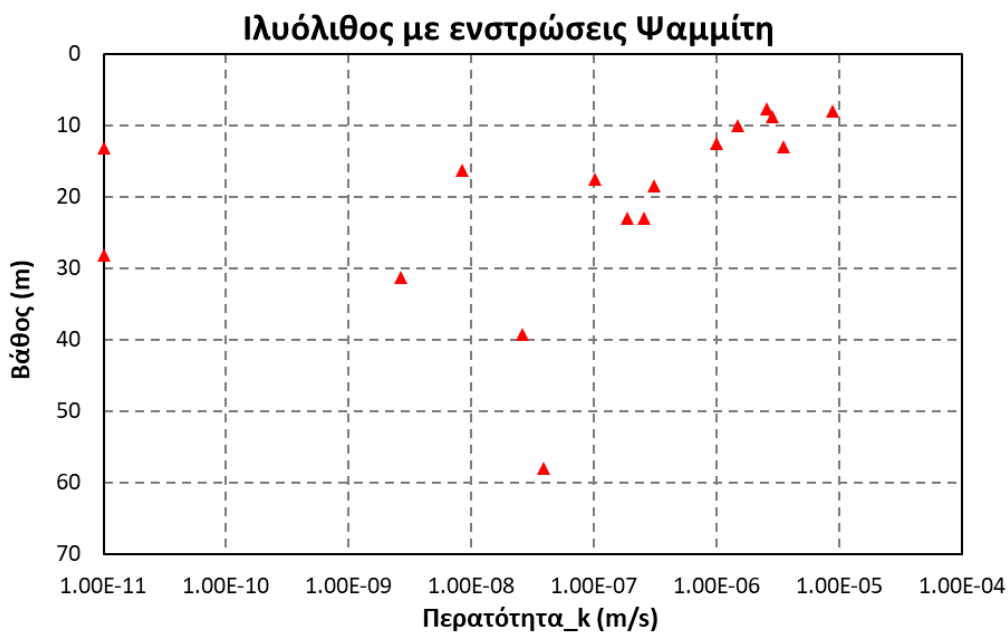
Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη, που αφορά τις 16 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

26 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-6} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 27 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού σημειώνει μικρή μείωση μετά το βάθος των 15m, συμπέρασμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.



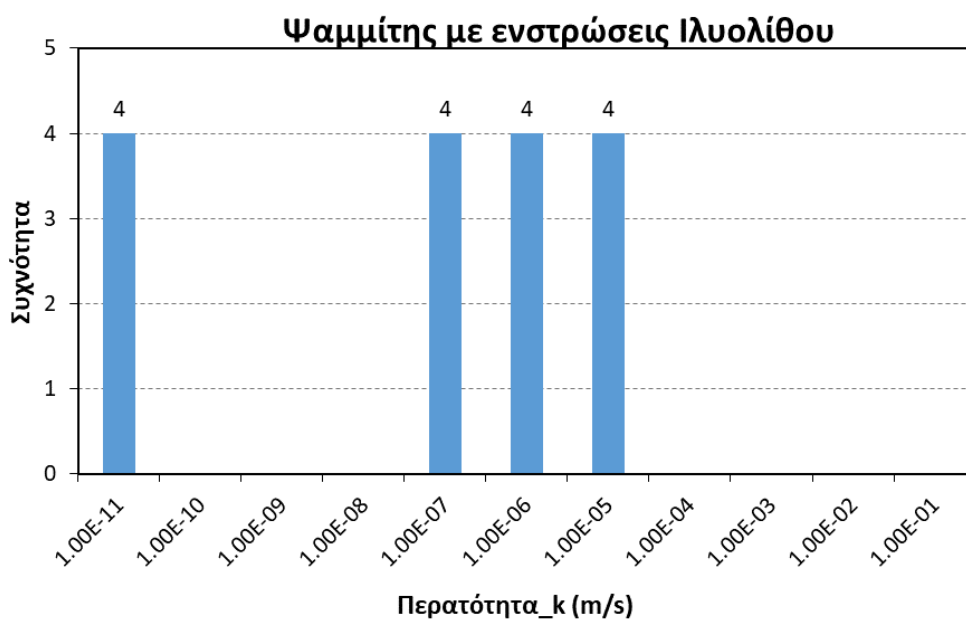
Διάγραμμα 26: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.



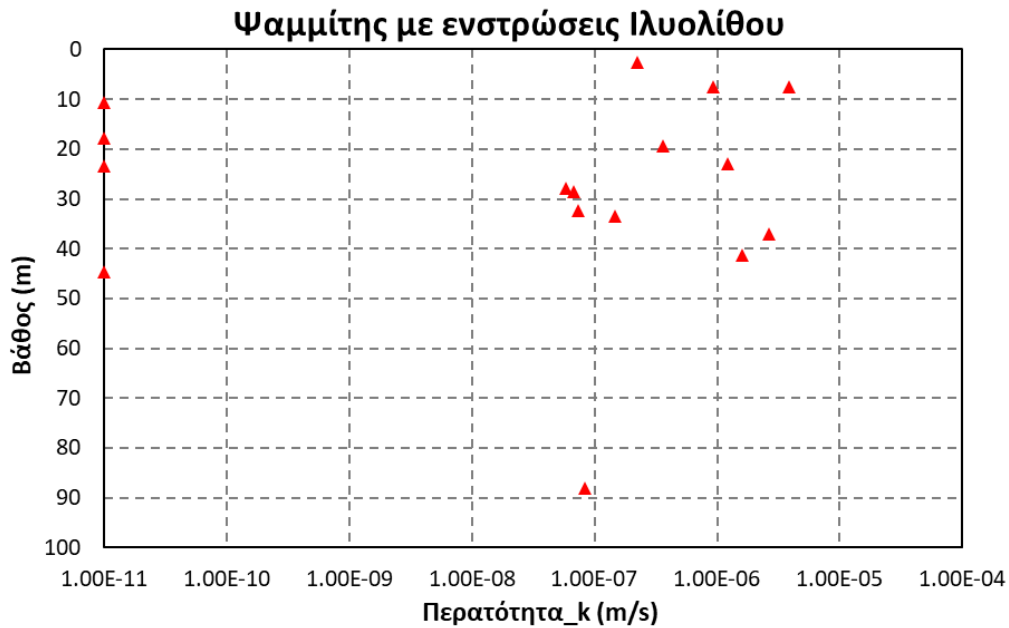
Διάγραμμα 27: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη.

6.2.5. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου, που αφορά τις 16 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 28 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-11} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 29 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου διατηρείται σταθερή με το βάθος, συμπέρασμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.



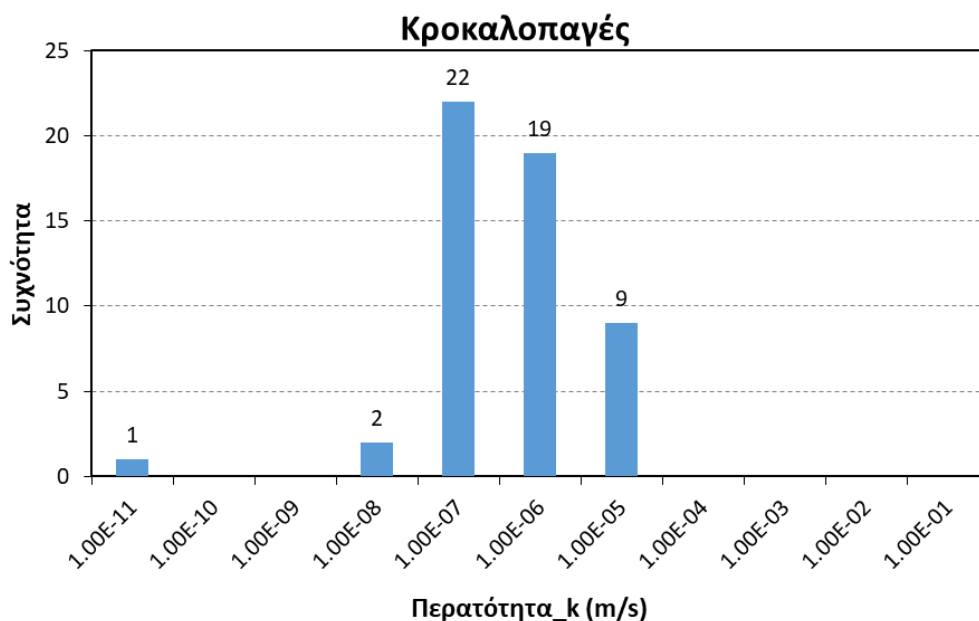
Διάγραμμα 28: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.



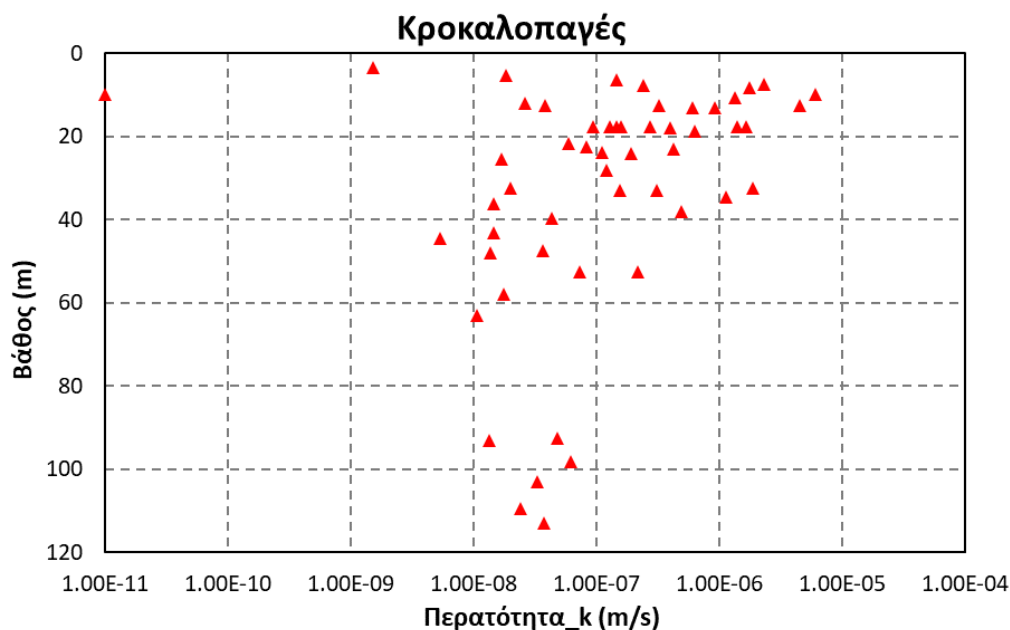
Διάγραμμα 29: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου.

6.2.6. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς, που αφορά τις 53 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο *Διάγραμμα 30* προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-6}$ έως 10^{-7} m/sec.. Αντίστοιχα με βάση το *Διάγραμμα 31* παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου μετά το βάθος των 40m εμφανίζει μικρή μείωση.



Διάγραμμα 30: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς.



Διάγραμμα 31: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς.

6.2.7. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ

ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ ΚΑΙ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις κροκαλοπαγούς και ιλυολίθου, που αφορά τις 2 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, δεν προκύπτει συμπέρασμα για την επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) και για το πώς μεταβάλλεται συναρτήσει του βάθους. Αναφορικά, οι τιμές περατότητας για τις εν λόγω δοκιμές είναι $k \approx 10^{-5}$ και 10^{-11} m/sec αντίστοιχα.

6.2.8. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ ΜΕ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ

ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ ΚΑΙ ΨΑΜΜΙΤΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη, που αφορά 1 από τις 357 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, δεν μπορεί να προκύψει συμπέρασμα για την επικρατέστερη τιμή της περατότητας και για το πώς μεταβάλλεται η περατότητα συναρτήσει του βάθους. Αναφορικά, η τιμή της περατότητας για την εν λόγω δοκιμή είναι $k \approx 10^{-7} \text{ m/sec.}$

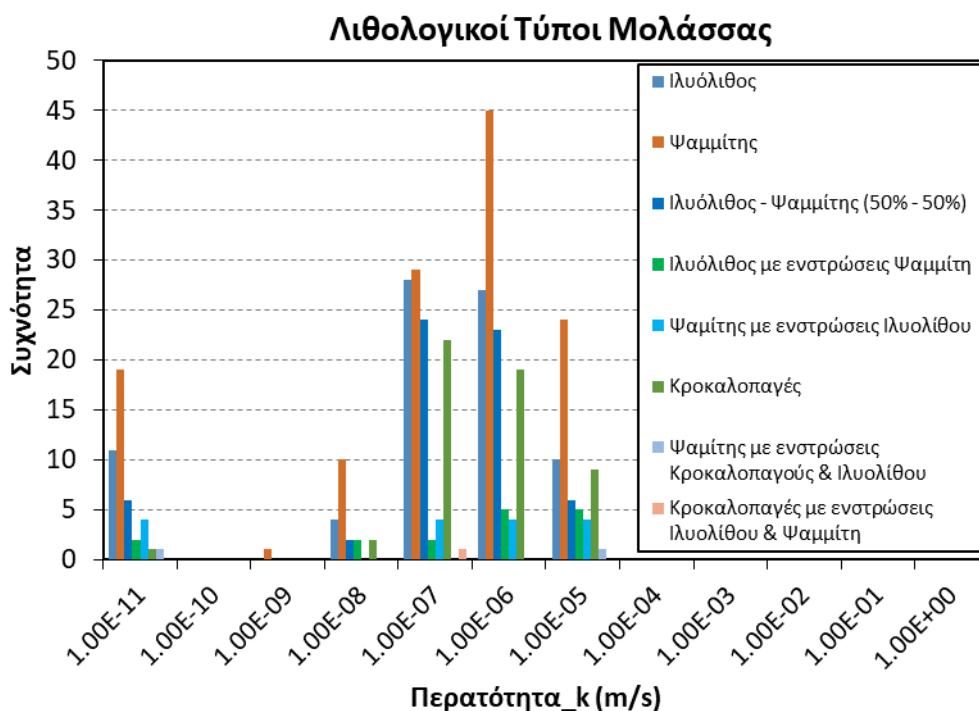
6.2.9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τη στατιστική επεξεργασία σε 357 δοκιμές περατότητας (k) στο βραχώδη σχηματισμό της μολάσσας, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός της μολάσσας, χαρακτηρίζεται από περατότητα (k) της τάξης των 10^{-6} έως 10^{-7} m/sec ή 10^{-4} έως 10^{-5} cm/sec και συνεπώς η μολάσσα με βάση τον Πίνακα 1/ Κεφάλαιο 2, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σχηματισμός χαμηλής υδατοπερατότητας.

Επιπρόσθετα, με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 5.2.2, οι υδρογεωλογικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από συνολική χαμηλή έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα, χαρακτηριστικό των ιλυολίθων που κυριαρχούν. Το μικρό πορώδες και οι κλειστές ασυνέχειες που χαρακτηρίζουν συνήθως τους ιλύολίθους δημιουργούν συνθήκες χαμηλής υδροπερατότητας έως πρακτικά αδιαπέρατης υδρογεωλογικής συμπεριφοράς. Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες κυρίως λόγω της παρουσίας περισσότερων ασυνεχειών με πιο ανοικτές διεπιφάνειες, κοντά στην επιφάνεια, παρουσιάζουν γενικά υψηλότερη υδροπερατότητα συγκριτικά με τους ιλύολίθους αλλά και αυτοί στο σύνολο, σε βάθος, έδειξαν από δοκιμές υδροπερατότητας ότι κυμαίνονται γενικά στην κατηγορία χαμηλής υδροπερατότητας. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χαρακτηριστική τιμή περατότητας (k) που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση για την μολάσσα, σύμφωνα με το Διάγραμμα 18. Η μολάσσα είναι ένας ιδιαίτερος σχηματισμός λόγω της ιδιαιτερότητας να μεταβάλλει τη δομή με το βάθος αλλά και των εναλλασσόμενων πετρωμάτων στο σύνολό της. Οι ψαμμιτικοί τύποι είναι λίγο αλλά όχι ιδιαίτερα πιο περατοί από τους ιλυολιθικούς, ενώ η παρουσία των ιλυολίθων στο λιθότυπο ισομερών εναλλαγών ψαμμίτη-ιλυολίθου στη μολάσσα ελέγχει απολύτως την περατότητα του λιθότυπου αυτού. Η διαφορά μεταξύ ψαμμιτικού και ιλυολιθικού τύπου είναι ότι ο ψαμμιτικός έχει μεγαλύτερη περατότητα. Η παρουσία ιλυολίθων στο αδιατάραχτο μολασσικό περιβάλλον ελέγχει την περατότητα μικτών λιθότυπων που παρουσιάζουν εναλλαγές ιλυολίθων με ψαμμίτη. Ο ιλύολίθος δηλαδή «σκεπάζει» την όποια επίδραση του ψαμμίτη στην τελική περατότητα του συνόλου. Η περατότητα είναι αυξημένη μόνο στο επιφανειακό χαλαρωμένο ή ρωγματωμένο τμήμα τους.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Τα παραπάνω συμπεράσματα, σχετικά με τη μεταβολή της περατότητας της μολάσσης ανά λιθολογικό τύπο, αποτυπώνονται και στο ακόλουθο Διάγραμμα 32. Όσον αφορά τη μείωση με το βάθος ανά λιθολογικό τύπο, παρατηρείται ελαφρά μείωση που δεν δύναται να τεκμηριωθεί πλήρως καθώς τα δεδομένα δοκιμών είναι λίγα. Σε αντίθεση με τον φλύσχη, η μείωση της περατότητας στη μολάσση είναι πιο έντονη. Στον ακόλουθο Πίνακα 18 δίνονται η μέγιστη, ελάχιστη, μέση τιμή περατότητας καθώς και η τυπική απόκλιση που προέκυψε από τη στατιστική επεξεργασία στους λιθολογικούς τύπους της μολάσσης.



Διάγραμμα 32: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο μολάσσης.

Πίνακας 18: Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο μολάσσης.

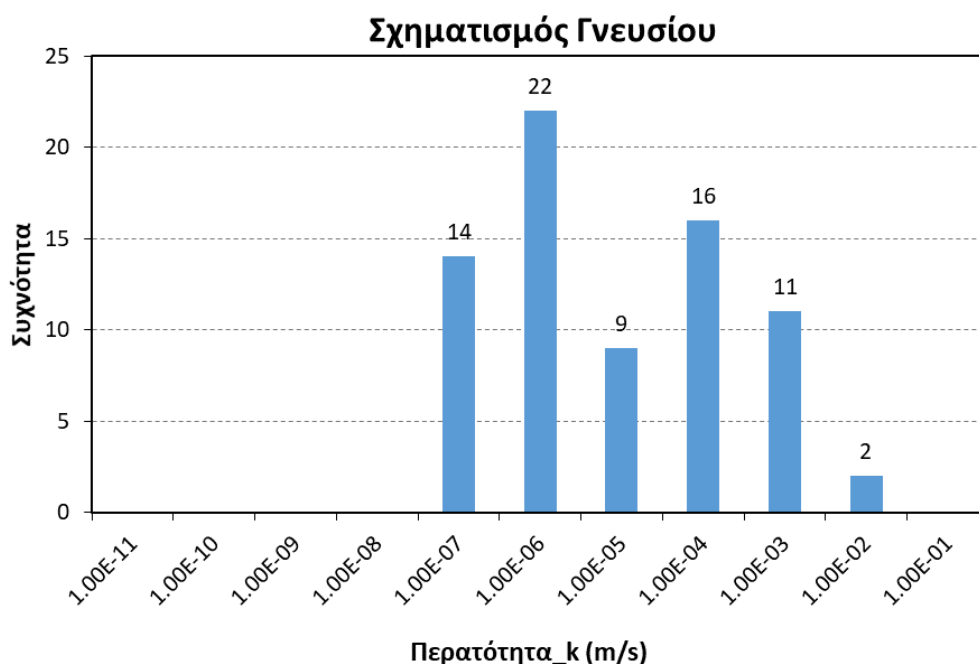
	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος - Ψαμμίτης (50%-50%)	Ιλυόλιθος με ενστρώσεις Ψαμμίτη	Ψαμμίτης με ενστρώσεις Ιλυολίθου	Κροκαλοπαγές	Ψαμμίτης με ενστρώσεις Κροκαλοπαγούς & Ιλυολίθου
Μέγιστη τιμή k (m/s)	6.03x10 ⁻⁶	8.99 x10 ⁻⁶	5.35 x10 ⁻⁶	8.81x10 ⁻⁶	3.82x10 ⁻⁶	6.00x10 ⁻⁶	6.16x10 ⁻⁶
Ελάχιστη τιμή k (m/s)	1.00x10 ⁻¹¹	1.00x10 ⁻¹¹	1.00x10 ⁻¹¹	1.00x10 ⁻¹¹	1.00x10 ⁻¹¹	1.00x10 ⁻¹¹	1.00x10 ⁻¹¹
Μέση τιμή k (m/s)	4.72x10 ⁻⁷	8.06x10 ⁻⁷	4.35x10 ⁻⁷	1.32x10 ⁻⁶	7.02x10 ⁻⁷	5.43x10 ⁻⁷	3.08x10 ⁻⁷

6.3. ΓΝΕΥΣΙΟΣ

Για τη στατιστική επεξεργασία της περατότητας του γνευσίου, ελήφθησαν υπόψιν αποτελέσματα από 74 δοκιμές περατότητας εντός του σχηματισμού και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν στους ακόλουθους λιθολογικούς τύπους: α) γνεύσιος, β) γνεύσιος με μάρμαρο και γ) πηγματίτης. Οι δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε βάθη από 2m έως 67m και προέκυψαν από δοκιμές περατότητας Lugeon και περιορισμένες από Maag και Lefranc στα επιφανειακά στρώματα.

Στο ακόλουθο *Διάγραμμα 33*, παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης της περατότητας (k) του γνευσίου, διαμοιρασμένη σε κλάση ανά 10^{-1} m/sec. Με βάση το διάγραμμα, προκύπτει ότι η περατότητα (k) στο γνεύσιο, κυμαίνεται από 10^{-2} έως 10^{-7} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-4} έως 10^{-7} m/sec.

Επιπρόσθετα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατούσα περατότητα (k) στο γνεύσιο, λόγω συχνότητας εμφάνισης είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec.



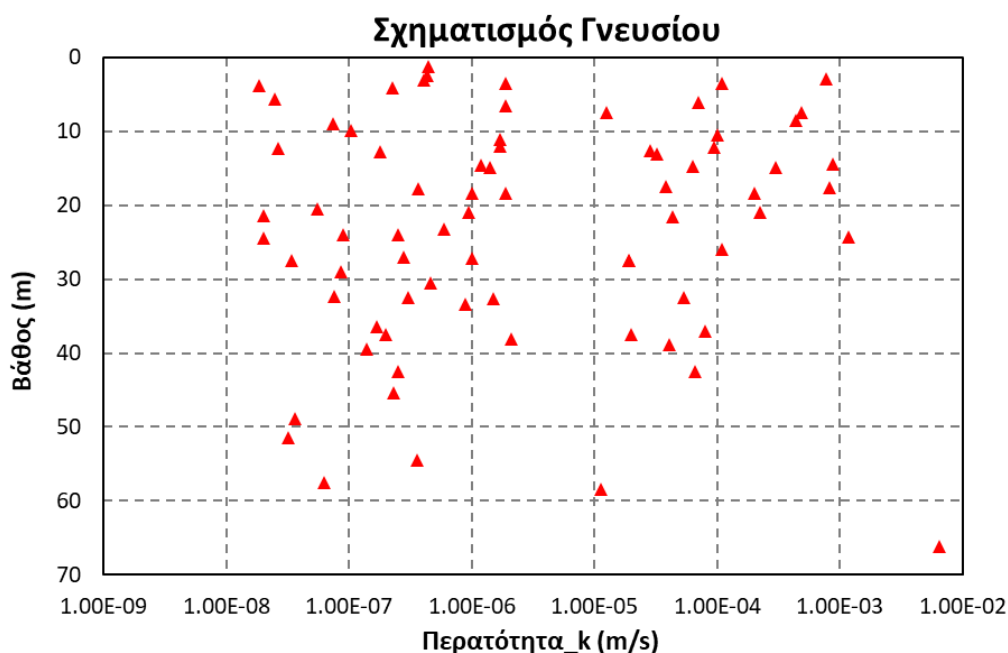
Διάγραμμα 33: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του γνευσίου.

Με βάση τη στατιστική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στις δοκιμές περατότητας του γνευσίου, προκύπτουν τα ακόλουθα δεδομένα από την επεξεργασία των στοιχείων, τα οποία αναφέρονται στο σύνολο του σχηματισμού του γνευσίου, όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο *Πίνακα 19*.

Πίνακας 19: Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του γνευσίου.

Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
$1,73 \times 10^{-4}$ m/sec	$1,85 \times 10^{-8}$ m/sec	$6,43 \times 10^{-3}$ m/sec	0,001 m/sec

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 34, παρατίθεται η συσχέτιση μεταξύ του βάθους του υπεδάφους και των τιμών περατότητας (k) του γνευσίου. Με βάση το ακόλουθο διάγραμμα, δεν είναι σαφής η εικόνα της μεταβολής της περατότητας του σχηματισμού με το βάθος, ενώ το μόνο βασικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει, είναι ότι η περατότητα του γνευσίου, μειώνεται ελάχιστα μετά το βάθος των 25 – 30m, χωρίς όμως να μπορεί να τεκμηριωθεί πλήρως αυτό το συμπέρασμα, καθώς μετά το βάθος των 30m δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία από δοκιμές περατότητας για αυτό τον σχηματισμό.

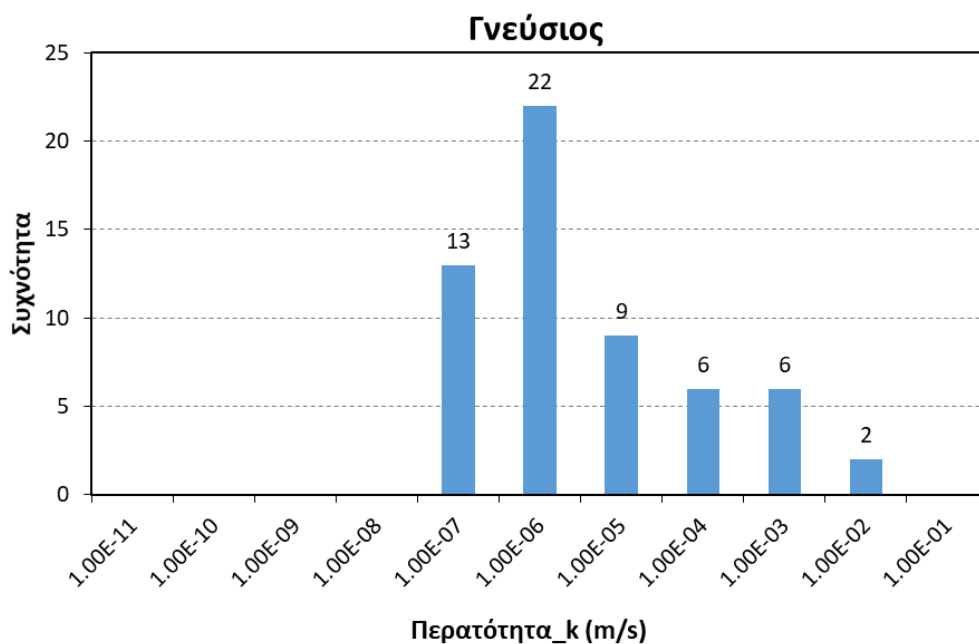


Διάγραμμα 34: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό του γνευσίου.

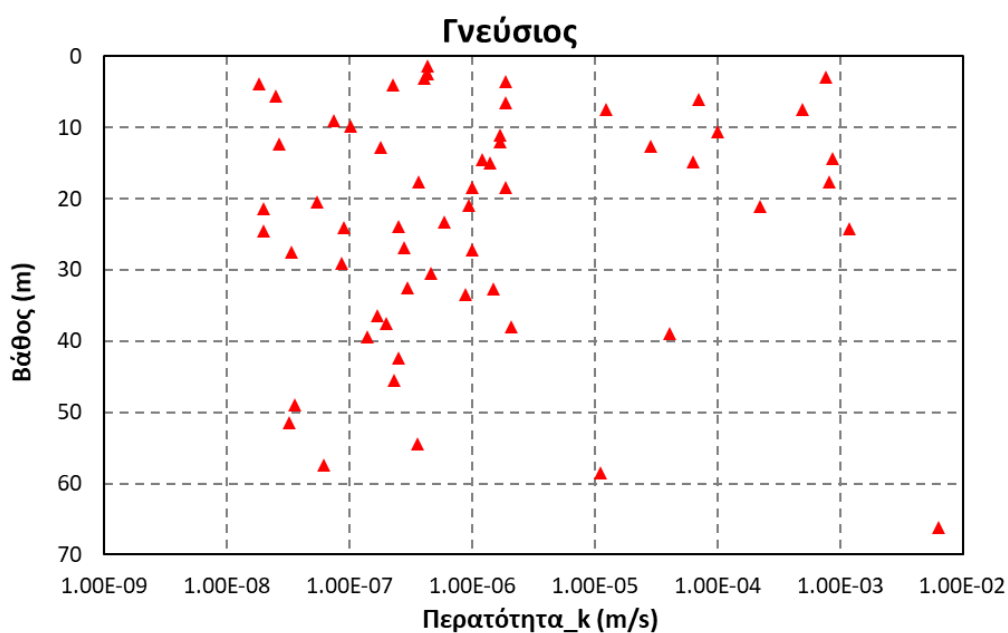
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των δοκιμών περατότητας, ανά λιθολογικό τύπο του γνευσίου.

6.3.1. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΓΝΕΥΣΙΟΥ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του γνευσίου, που αφορά τις 58 από τις 74 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 35, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του γνευσίου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6} \text{ m/sec}$. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 36, παρατηρείται ότι με το βάθος των 20 – 25m, υπάρχει μια μικρή μείωση ως προς τη τιμή της διαπερατότητας του σχηματισμού.



Διάγραμμα 35: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του γνευσίου.



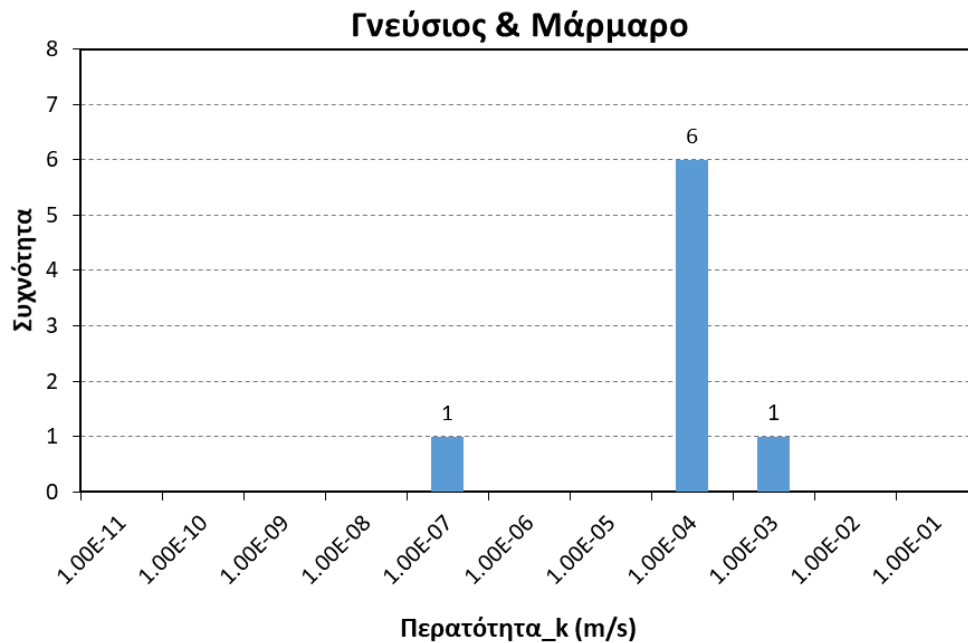
Διάγραμμα 36: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του γνευσίου.

6.3.2. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΕΝΑΛΛΑΓΩΝ ΓΝΕΥΣΙΟΥ ΜΕ ΜΑΡΜΑΡΟ

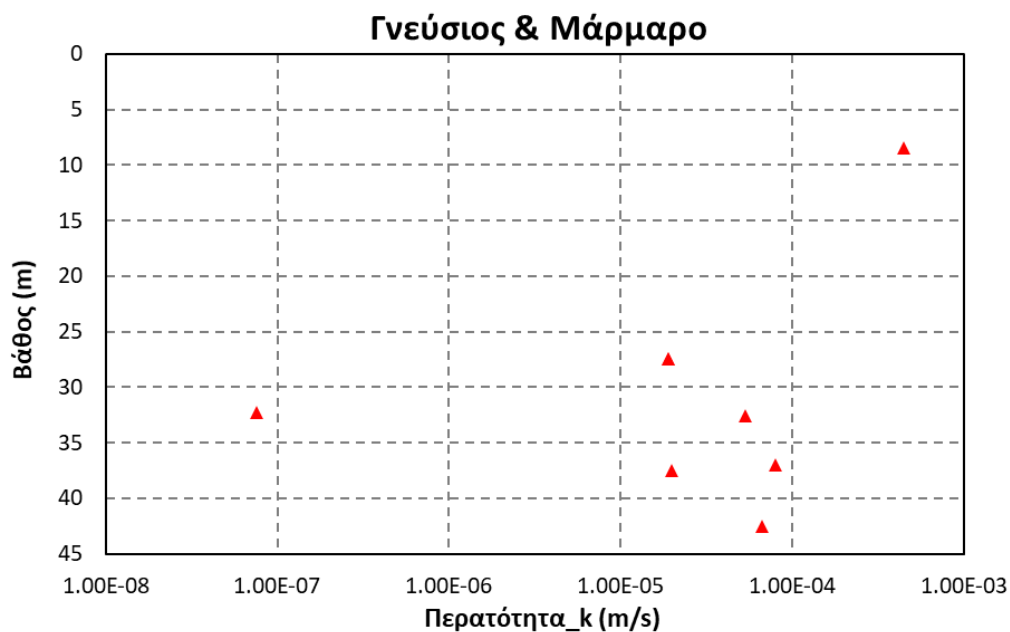
Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών γνευσίου με μάρμαρο, που αφορά τις 8 από τις 74 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 37 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο των εναλλαγών γνευσίου με μάρμαρο, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-4} \text{ m/sec}$. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 38, παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

διατηρείται σταθερή με το βάθος, συμπέρασμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.



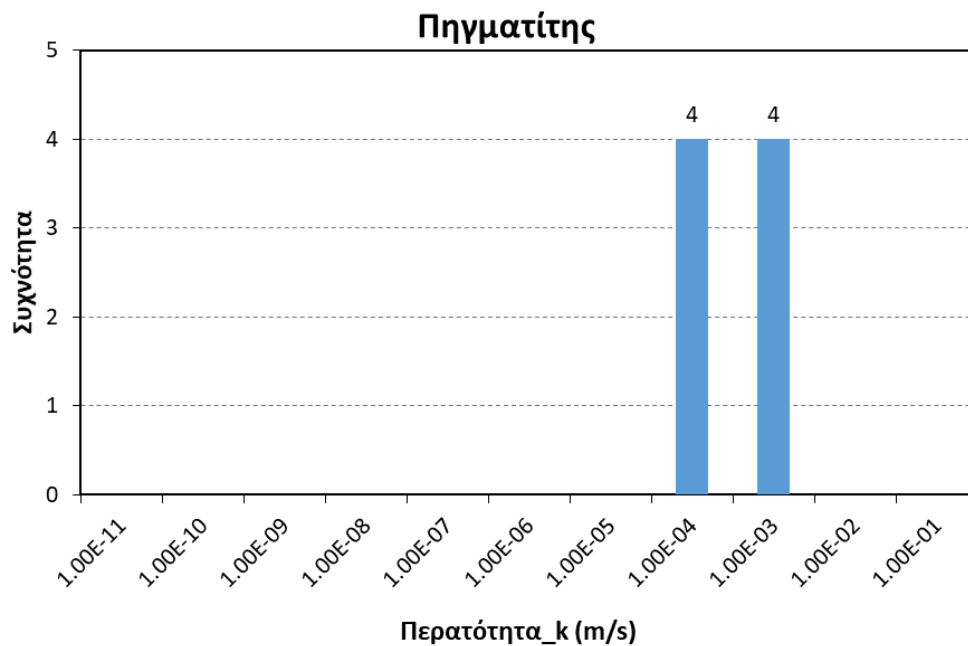
Διάγραμμα 37: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών γνευσίου με μάρμαρο.



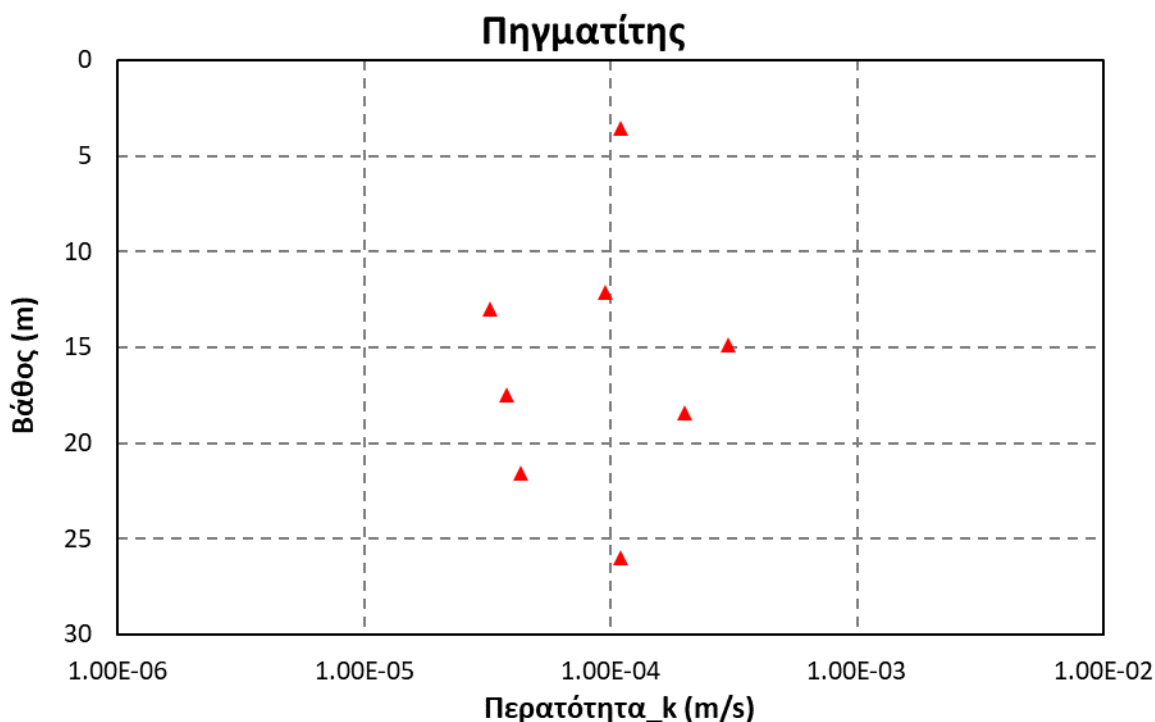
Διάγραμμα 38: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών γνευσίου με μάρμαρο.

6.3.3. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΗΓΜΑΤΙΤΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του πηγματίτη, που αφορά τις 8 από τις 74 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο *Διάγραμμα 39* προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του πηγματίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-3}$ έως 10^{-4} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το *Διάγραμμα 40* παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου διατηρείται σταθερή με το βάθος, συμπέρασμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.



Διάγραμμα 39: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του πηγματίτη.



Διάγραμμα 40: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του πηγματίτη.

6.3.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τη στατιστική επεξεργασία σε 74 δοκιμές περατότητας (k) στο βραχώδη σχηματισμό του γνευσίου, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός του γνευσίου, χαρακτηρίζεται από περατότητα (k) της τάξης των 10^{-6} m/sec ή 10^{-4} cm/sec και συνεπώς ο γνεύσιος με βάση τον Πίνακα 1/ Κεφάλαιο 2, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σχηματισμός χαμηλής υδατοπερατότητας.

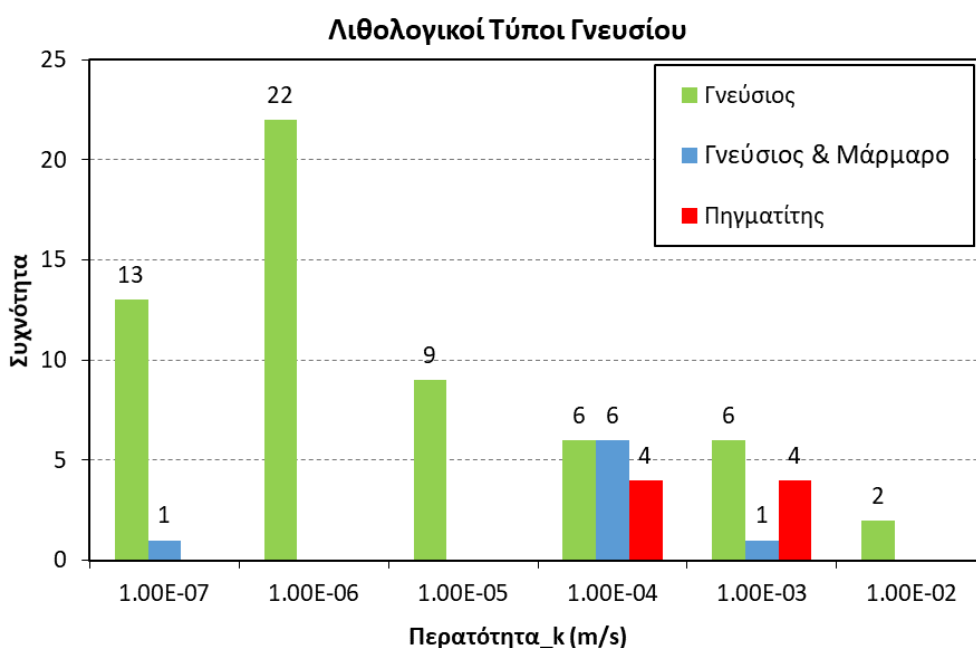
Επιπρόσθετα, με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 5.3.2, ο γεωλογικός σχηματισμός του γνευσίου, του γρανίτη και του σχιστόλιθου, κατατάσσονται στους σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας έως πρακτικά αδιαπέρατους και αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χαρακτηριστική τιμή περατότητας (k) που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση για το γνεύσιο. Παρατηρήθηκε, μόνο μία μικρή αύξηση της τιμής της περατότητας (k) του γνευσίου έως και 10^{-3} m/sec, με βάση το Διάγραμμα 34, που αφορούσε βάθη έως και 10 – 15m και μπορεί να ερμηνευθεί ως περατότητα στη ζώνη αποσάθρωσης του γνευσίου, όπου με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 5.3.2, στο μανδύα αποσάθρωσης των γνευσίων και των γρανιτών παρουσιάζεται κάποια διαπερατότητα όχι πάντως μεγάλη λόγω της παρουσίας αργιλικών υλικών.

Όσον αφορά του διάφορους λιθολογικούς τύπους του γνευσίου που διερευνήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι η παρουσία μαρμάρου στο γνεύσιο, θα προκαλέσει αύξηση της περατότητας (k) του σχηματισμού, με χαρακτηριστική τιμή της τάξης των 10^{-4} m/sec, έναντι των 10^{-6} m/sec, τιμή που έχει οριστεί παραπάνω, ως χαρακτηριστική τιμή περατότητας για το γνεύσιο. Αυτό οφείλεται στη παρουσία του

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

μαρμάρου, όπου παρουσιάζει καρστική διάβρωση και αυξάνει συνεπώς την περατότητα του σχηματισμού. Ίδια συμπεριφορά ως προς την αύξηση της περατότητας (k) του σχηματισμού, διαπιστώθηκε και στην εξέταση του πηγματίτη, με χαρακτηριστική τιμή της τάξης των 10^{-3} έως 10^{-4} m/sec, έναντι των 10^{-6} m/sec, τιμή που έχει οριστεί παραπάνω, ως χαρακτηριστική τιμή περατότητας για το γνεύσιο.

Τα παραπάνω συμπεράσματα, σχετικά με τη μεταβολή της περατότητας του γνευσίου ανά λιθολογικό τύπο, αποτυπώνονται και στο ακόλουθο Διάγραμμα 41. Στον ακόλουθο Πίνακα 20 δίνονται η μέγιστη, ελάχιστη, μέση τιμή περατότητας καθώς και η τυπική απόκλιση που προέκυψε από τη στατιστική επεξεργασία στους λιθολογικούς τύπους του γνευσίου.



Διάγραμμα 41: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.

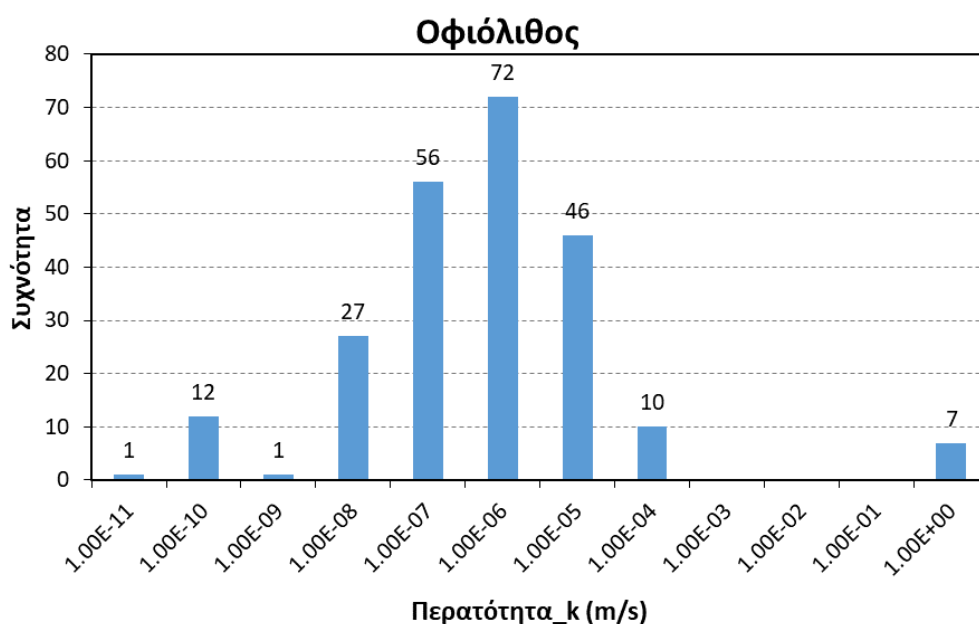
Πίνακας 20: Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.

	Γνεύσιος	Γνεύσιος & Μάρμαρο	Πηγματίτης
Μέγιστη τιμή k (m/s)	6.43×10^{-3}	4.42×10^{-4}	3.00×10^{-4}
Ελάχιστη τιμή k (m/s)	1.85×10^{-8}	7.57×10^{-8}	3.26×10^{-5}
Μέση τιμή k (m/s)	1.92×10^{-4}	8.73×10^{-5}	1.16×10^{-4}

6.4. ΟΦΙΟΛΙΘΟΣ

Για τη στατιστική επεξεργασία της περατότητας του οφιολίθου, ελήφθησαν υπόψιν αποτελέσματα από 232 δοκιμές εντός του σχηματισμού και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν στους ακόλουθους λιθολογικούς τύπους: α) σερπεντίνης, β) περιδοτίτης, γ) βασάλτης, δ) γάββρος και ε) οφιολιθικό σύμπλεγμα. Οι δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε βάθη από 4m έως 207m και προέκυψαν από δοκιμές περατότητας Lugeon, Maag και Lefranc.

Στο ακόλουθο *Διάγραμμα 42*, παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης της περατότητας (k) του οφιολίθου διαμοιρασμένη σε κλάση ανά 10^{-1} m/sec. Με βάση το διάγραμμα, προκύπτει ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για τον οφιολίθο, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec. Επιπρόσθετα, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι η περατότητα (k) στον οφιολίθο, κυμαίνεται από 10^{-4} έως 10^{-11} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-5} έως 10^{-7} m/sec.



Διάγραμμα 42: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του οφιολίθου.

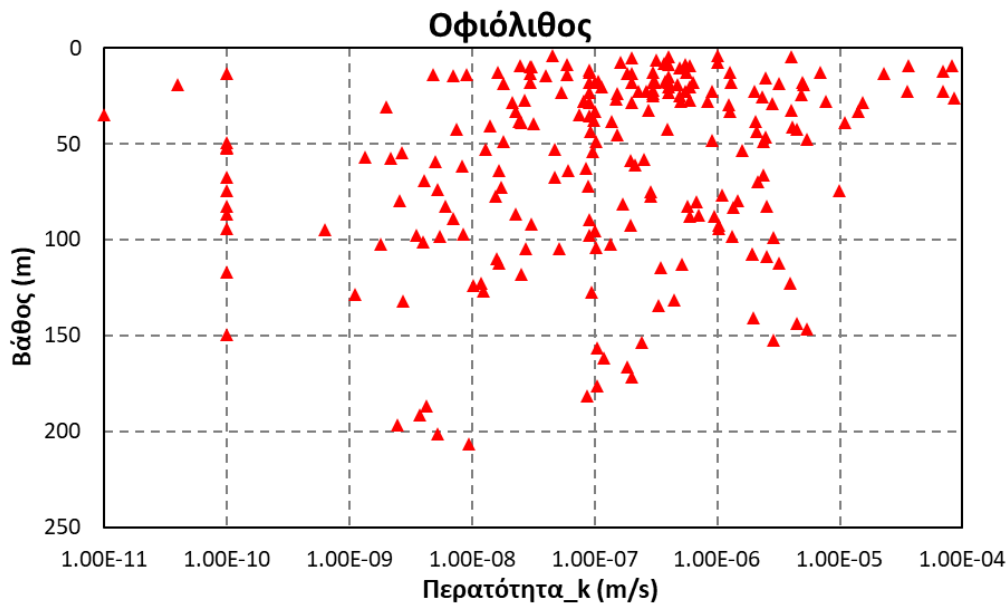
Με βάση τη στατιστική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στις δοκιμές περατότητας του οφιολίθου, προκύπτουν τα ακόλουθα δεδομένα από την επεξεργασία των στοιχείων, τα οποία αναφέρονται στο σύνολο του σχηματισμού του οφιολίθου, όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 21.

Πίνακας 21: Χαρακτηριστικές τιμές στατιστικής επεξεργασίας δοκιμών περατότητας (k) στο σχηματισμό του οφιολίθου.

Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
$3,02 \times 10^{-2}$ m/sec	10^{-11} m/sec	1 m/sec	0,171 m/sec

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 43, παρατίθεται η συσχέτιση μεταξύ του βάθους του υπεδάφους και των τιμών περατότητας (k) του οφιόλιθου. Με βάση το ακόλουθο διάγραμμα, δεν είναι σαφής η εικόνα της μεταβολής της περατότητας του σχηματισμού με το βάθος, ενώ το μόνο βασικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει, είναι ότι η περατότητα του οφιόλιθου, μειώνεται ελάχιστα μετά το βάθος των 100-150m, χωρίς όμως να μπορεί να τεκμηριωθεί πλήρως αυτό το συμπέρασμα, καθώς μετά το βάθος των 150m δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία από δοκιμές περατότητας για αυτό τον σχηματισμό.

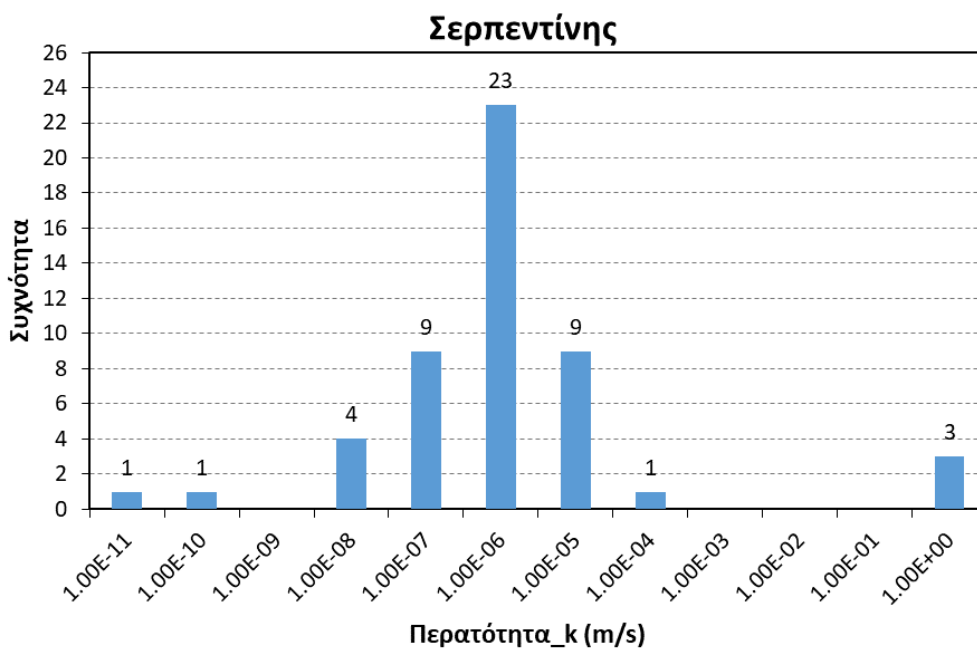


Διάγραμμα 43: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο σχηματισμό του οφιόλιθου.

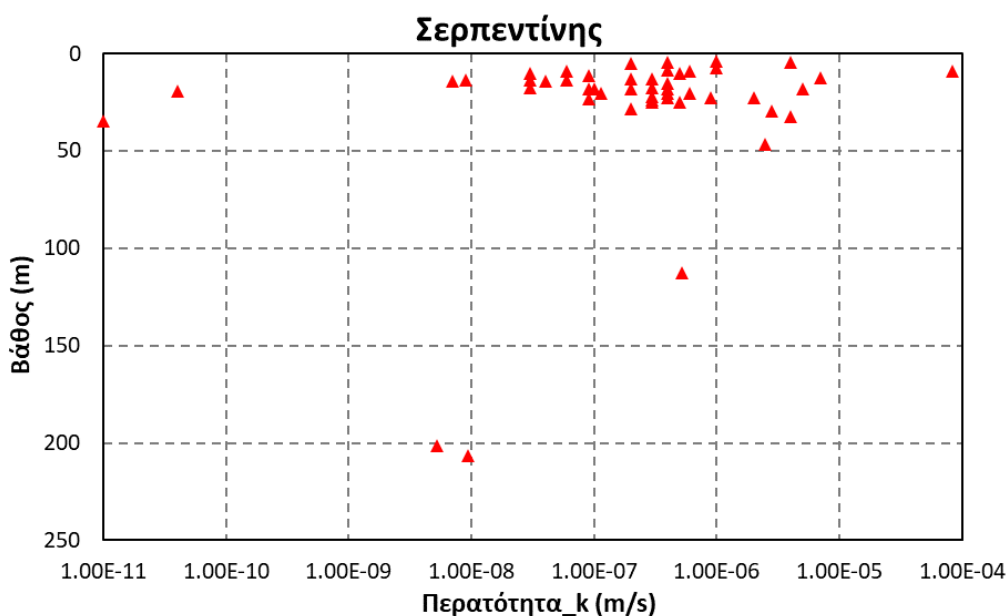
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των δοκιμών περατότητας, ανά λιθολογικό τύπο του οφιόλιθου.

6.4.1. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του σερπεντίνη, που αφορά τις 51 από τις 232 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 44, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του σερπεντίνη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6} \text{ m/sec}$. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 45 παρατηρείται ότι μετά το βάθος των 50m, υπάρχει μια μείωση ως προς τη τιμή της διαπερατότητας του σχηματισμού, με μικρή συχνότητα εμφάνισης.



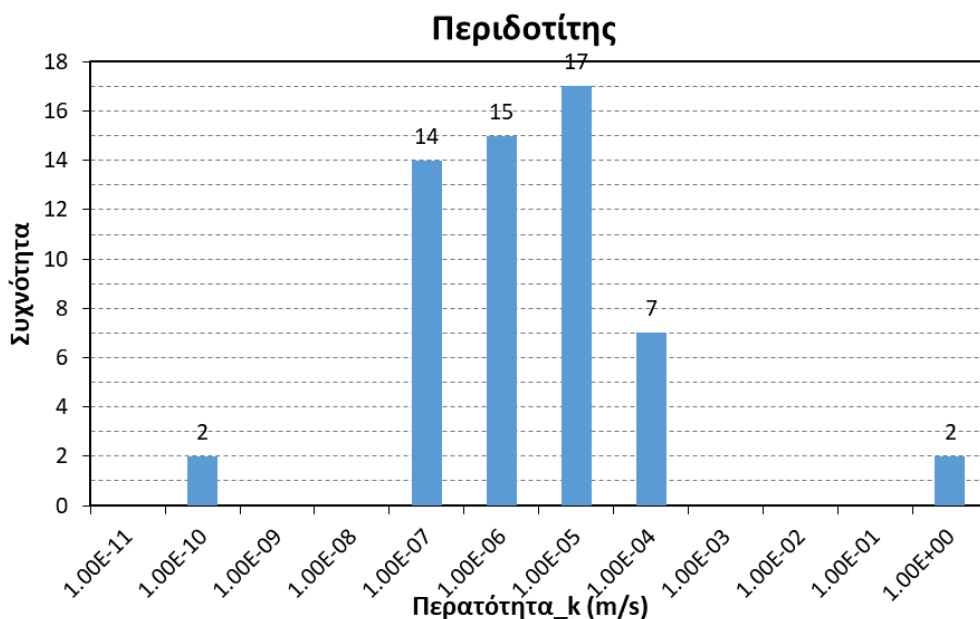
Διάγραμμα 44: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του σερπεντίνη.



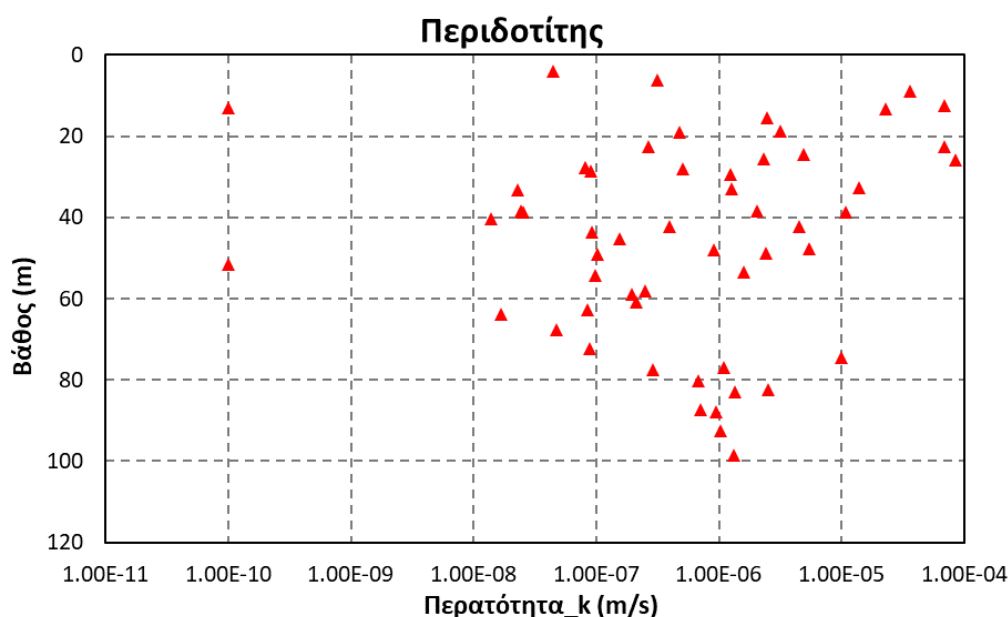
Διάγραμμα 45: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του σερπεντίνη.

6.4.2. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του περιδοτίτη, που αφορά τις 57 από τις 232 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 46, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι επικρατέστερες τιμές περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του περιδοτίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνονται από $k \approx 10^{-4}$ m/sec έως $k \approx 10^{-7}$ m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 47 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεγάλη μείωση της περατότητας σε σχέση με το βάθος.



Διάγραμμα 46: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του περιδοτιή.

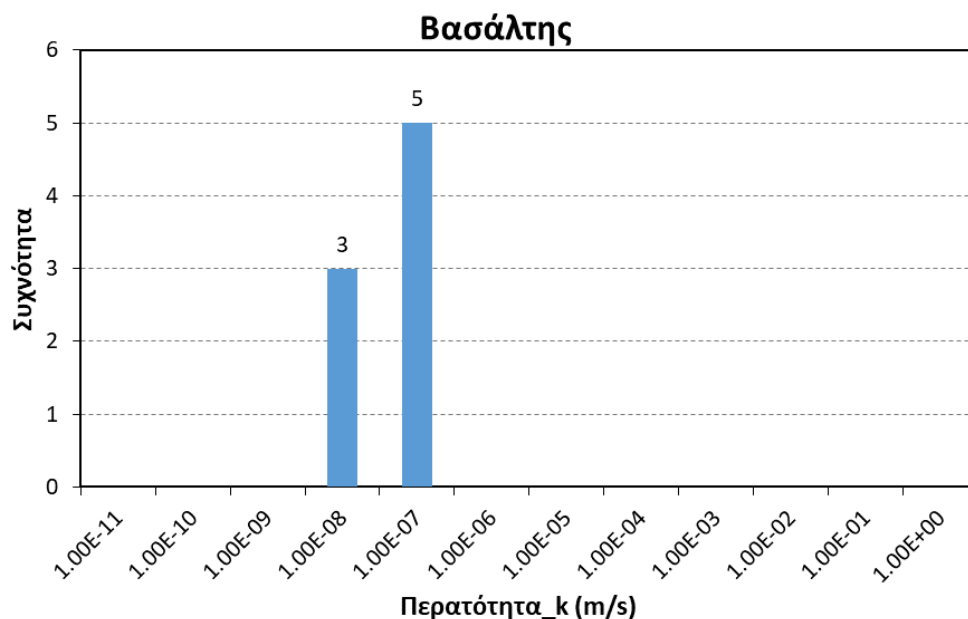


Διάγραμμα 47: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του περιδοτιή.

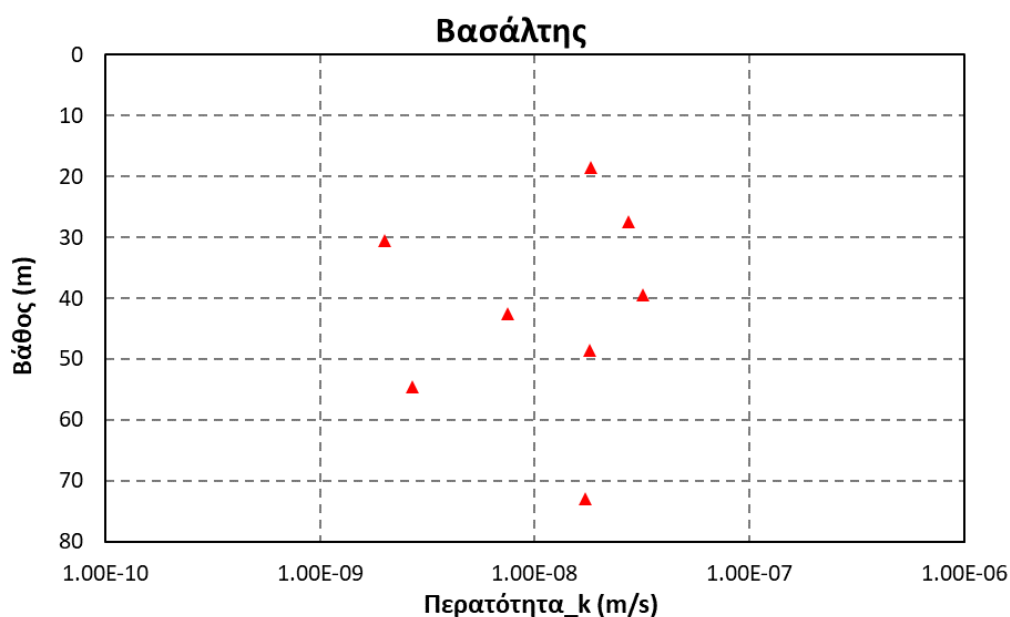
6.4.3. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΒΑΣΑΛΤΗ

Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του βασάλτη, που αφορά τις 8 από τις 232 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 48 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του βασάλτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-7}$ έως 10^{-8} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 49 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου διατηρείται σταθερή με το βάθος, συμπέρασμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Διάγραμμα 48: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του βασάλτη.



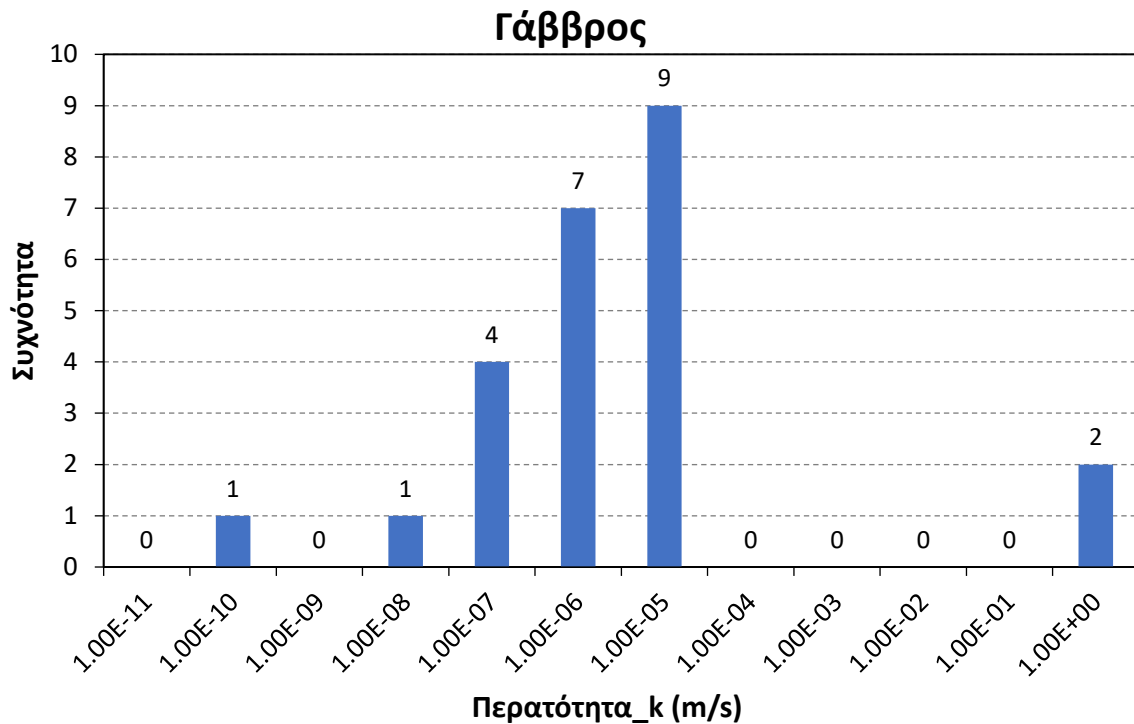
Διάγραμμα 49: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του βασάλτη.

6.4.4. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΓΑΒΒΡΟΥ

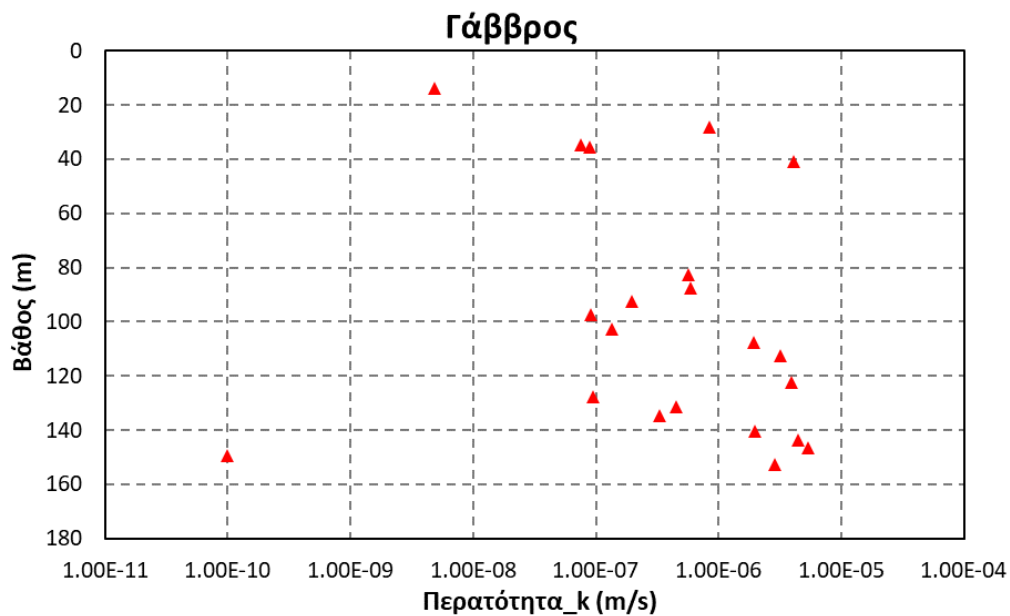
Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του γάββρου, που αφορά τις 24 από τις 232 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 50 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του γάββρου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-6} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 51 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

μείωση με το βάθος, συμπέρασμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.



Διάγραμμα 50: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του γάββρου.



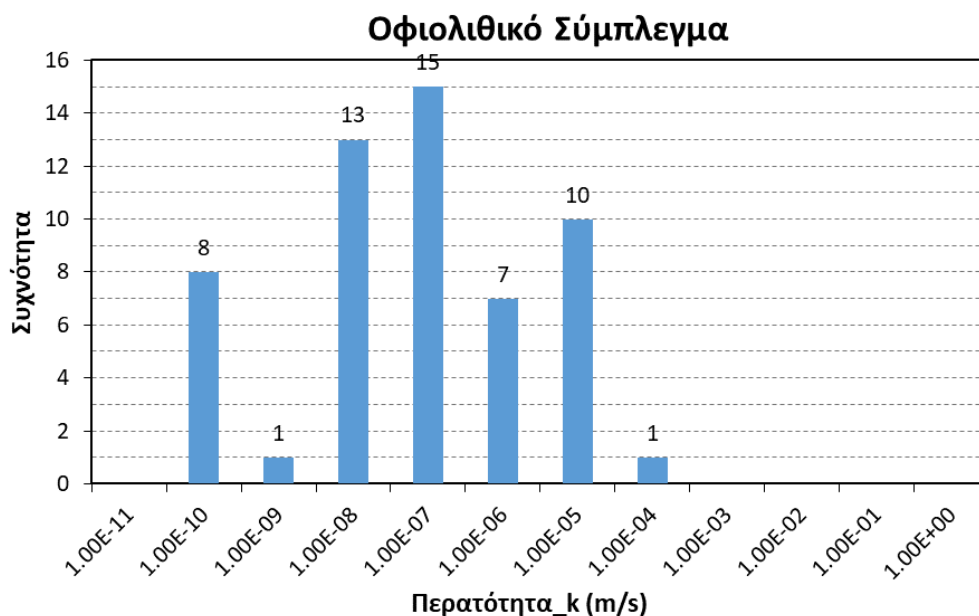
Διάγραμμα 51: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του γάββρου.

6.4.5. ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟΥ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

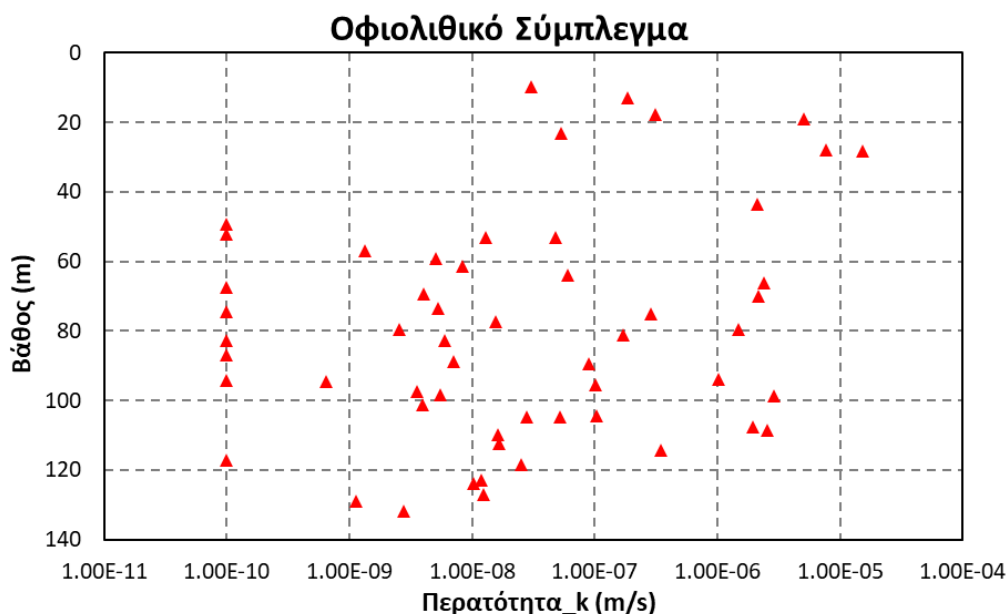
Από τη στατιστική επεξεργασία στο λιθολογικό τύπο του οφιολιθικού συμπλέγματος όπου αποτελεί μια γενική αξιολόγηση καθώς πιθανόν περιλαμβάνονται τα παραπάνω πετρώματα και αφορά τις 55

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

από τις 232 υπό εξέταση δοκιμές αυτής της ενότητας, με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 52 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του οφιολιθικού συμπλέγματος, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-10} m/sec. Αντίστοιχα με βάση το Διάγραμμα 53 παρατηρείται ότι η περατότητα (k) του υπό εξέταση λιθολογικού τύπου δεν σημειώνει ιδιαίτερη μείωση με το βάθος.



Διάγραμμα 52: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του οφιολιθικού συμπλέγματος.



Διάγραμμα 53: Μεταβολή περατότητας (k) με το βάθος, στο λιθολογικό τύπο του οφιολιθικού συμπλέγματος.

6.4.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

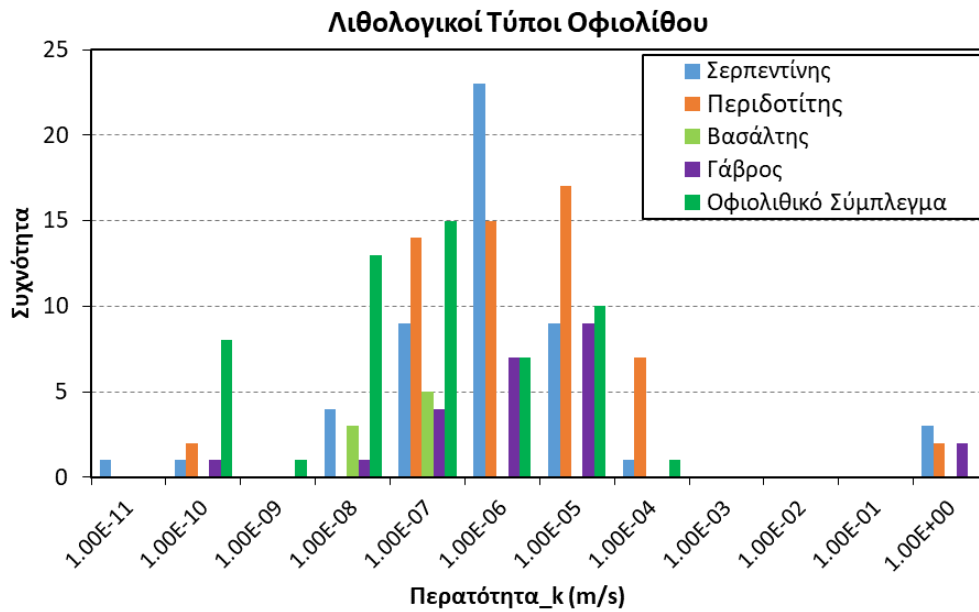
Με βάση τη στατιστική επεξεργασία σε 232 δοκιμές περατότητας (k) στο βραχώδη σχηματισμό του οφιολίθου, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός του οφιολίθου, χαρακτηρίζεται από περατότητα (k) της τάξης των 10^{-5} έως 10^{-7} m/sec ή 10^{-3} έως 10^{-5} cm/sec και συνεπώς ο οφιολίθος με βάση τον Πίνακα 1/ Κεφάλαιο 2, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σχηματισμός χαμηλής υδατοπερατότητας.

Επιπρόσθετα, με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 5.4.2, τα βασικά και υπερβασικά πετρώματα των οφιολίθων στην περίπτωση που είναι αδιατάρακτα παρουσιάζουν πολύ μικρή διαπερατότητα και πρακτικά μπορούν να χαρακτηρισθούν ως αδιαπέρατα. Ο συντελεστής υδροπερατότητας σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης του 10^{-6} έως 10^{-7} m/sec. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χαρακτηριστική τιμή περατότητας (k) που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση για τον οφιολίθο, σύμφωνα με το Διάγραμμα 42.

Όσον αφορά του διάφορους λιθολογικούς τύπους του οφιολίθου που διερευνήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι στο οφιολιθικό σύμπλεγμα και στον περιδοτίτη, υπήρχαν τιμές περατότητας της τάξης του 10^{-5} m/sec, με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης. Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 5.4.2, στην περίπτωση εμφάνισης ασυνεχειών εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης και χαλάρωσης λόγω της επιφανειακής αποσάθρωσης στα ανώτερα στρώματά τους συναντάται κατά θέσεις αυξημένη διαπερατότητα, η οποία ελέγχεται από την ποιότητα και την κατάσταση των ασυνεχειών αυτών. Πάντως κοντά στην επιφάνεια που οι ασυνέχειες σε γενικές γραμμές είναι περισσότερες, αυτές παρουσιάζονται όμως συχνά πληρωμένες με τα αργιλικά υλικά της αποσάθρωσης. Η δευτερογενής αυτή πλήρωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας του μανδύα αποσάθρωσης. Οι ζώνες κερματισμού, εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης, λειτουργούν και ως ζώνες αποστράγγισης της επιφανειακώς αναπτυσσόμενης ασθενούς υδροφορίας και είναι πολύ πιθανό να φέρνουν υπόγεια νερά τοπικά και στο βάθος. Ο συντελεστής υδροπερατότητας (k) σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι της τάξης του 10^{-3} έως 10^{-5} m/sec.

Τα παραπάνω συμπεράσματα, σχετικά με τη μεταβολή της περατότητας του οφιολίθου ανά λιθολογικό τύπο, αποτυπώνονται και στο ακόλουθο Διάγραμμα 54. Στον ακόλουθο Πίνακα 22 δίνονται η μέγιστη, ελάχιστη, μέση τιμή περατότητας καθώς και η τυπική απόκλιση που προέκυψε από τη στατιστική επεξεργασία στους λιθολογικούς τύπους του οφιολίθου.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Διάγραμμα 54: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο οφιολίθου.

Πίνακας 22: Μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο οφιολίθου.

	Οφιόλιθος	Σερπεντίνης	Περιδοτίτης	Βασάλτης	Γάβρος	Οφιολιθικό σύμπλεγμα
Μέγιστη τιμή k (m/s)	1.00×10^0	1.00×10^0	1.00×10^0	3.19×10^{-8}	1.00×10^0	1.52×10^{-5}
Ελάχιστη τιμή k (m/s)	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-10}	1.99×10^{-9}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}
Μέση τιμή k (m/s)	3.02×10^{-2}	5.88×10^{-2}	3.51×10^{-2}	1.56×10^{-8}	8.33×10^{-2}	8.46×10^{-7}

7. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αναλύσεις ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των λωρίδων, με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση του συντελεστή περατότητας (k) των σχηματισμών, στην ευστάθεια ορύγματος. Για τις αναλύσεις, γίνεται η θεώρηση πως το όρυγμα εκσκάπτεται σε έντονα κερματισμένη – διατμημένη βραχώμαζα, όπου ο μηχανισμός αστοχίας των πρανών, είναι αυτός της κυκλικής ολίσθησης (circular surface failure) και όχι της δομικής αστοχίας των πρανών, υπό τη μορφή αποκόλλησης βραχοσφηνών σε προκαθορισμένες επιφάνειες (διακλάσεις).

Στις αναλύσεις αυτές γίνεται έμμεση εισαγωγή του συντελεστή υδατοπερατότητας (k) για τους υπό εξέταση βραχώδεις σχηματισμούς της παρούσας εργασίας, όπου βάσει της στατιστικής επεξεργασίας του Κεφαλαίου 6, έχουν προκύψει χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας (k), για κάθε γεωλογικό σχηματισμό (Φλύσχη, Μολάσσα, Γνεύσιο & Οφιόλιθο), οι οποίες μεταβάλλονται ανά λιθολογικό τύπο για κάθε γεωλογικό σχηματισμό, αλλά και με το βάθος. Μέσω των αναλύσεων αυτών, γίνεται έλεγχος της επίδρασης που θα έχει ο συντελεστής υδατοπερατότητας (k) των σχηματισμών αυτών, στην ευστάθεια του ορύγματος, καθώς χαμηλές τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας (k), ισοδυναμούν με «εγκλωβισμό» των υπόγειων υδάτων εντός αυτού, την ανάπτυξη σημαντικών πιέσεων πόρων που θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής του σχηματισμού.

Στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση των βασικών παραδοχών που λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις, αλλά και παρουσίαση των επιτευχθέντων συντελεστών ασφαλείας (SF) της ευστάθειας των πρανών.

7.1. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

7.1.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αναλύσεις ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των λωρίδων, με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση του συντελεστή περατότητας (k) των σχηματισμών, στην ευστάθεια ορύγματος. Για τις αναλύσεις, γίνεται η θεώρηση πως το όρυγμα εκσκάπτεται σε έντονα κερματισμένη – διατμημένη βραχώμαζα, όπου ο μηχανισμός αστοχίας των πρανών, είναι αυτός της κυκλικής ολίσθησης (circular surface failure) και όχι της δομικής αστοχίας των πρανών, υπό τη μορφή αποκόλλησης βραχοσφηνών σε προκαθορισμένες επιφάνειες (διακλάσεις). Η ευστάθεια των πρανών μελετάται συνήθως με τη χρήση μεθόδων οριακής

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

ισορροπίας. Αποτέλεσμα της εφαρμογής τους είναι ο προσδιορισμός της τιμής του συντελεστή ασφαλείας, FS, για την δυσμενέστερη περίπτωση επιφάνειας ολίσθησης.

Η ιδέα της οριακής ισορροπίας χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη συμβατική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών. Η προσέγγιση αυτή θεωρεί μια συνεχή επιφάνεια ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας το έδαφος συμπεριφέρεται ως ένα συμπαγές σώμα που ικανοποιεί το κριτήριο του Mohr-Coulomb. Η μέθοδος αποδείχτηκε υψηλής πρακτικής σημασίας ειδικά σαν ένα σχεδιαστικό εργαλείο για εδαφικά πρανά που παρουσιάζουν τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Όταν εφαρμόζεται σε ψαθυρά εδάφη, η ίδια μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Με βάση τον Nash (1987), οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

A) Τις μεθόδους εκείνες στις οποίες η επίλυση γίνεται με εξισώσεις πρώτου βαθμού με μονοσήμαντη τιμή του αγνώστου και αναφέρονται ως γραμμικές μέθοδοι. Αυτές είναι:

- ✓ η ανάλυση πρανούς μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση,
- ✓ η ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους,
- ✓ η μέθοδος $\Phi_u = 0$ (αστράγγιστης αντοχής),
- ✓ η μέθοδος Fellenius.

B) Τις μεθόδους όπου η λύση προκύπτει από εξισώσεις με δύο αγνώστους και με διαδοχικές επαναλήψεις για διάφορες τιμές του β' αγνώστου, με σκοπό την προσέγγιση του συντελεστή ασφαλείας και αναφέρονται ως μη γραμμικές μέθοδοι. Αυτές είναι:

- ✓ η μέθοδος Bishop,
- ✓ η απλοποιημένη μέθοδος Janbu,
- ✓ η μέθοδος Spencer,
- ✓ η μέθοδος Morgenstern and Price.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι κατά την εφαρμογή των οποίων υπολογίζονται σε κρίσιμες θέσεις οι μέγιστες διατμητικές τάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αντοχές των γεωυλικών. Ευρύτατα διαδεδομένες είναι στις μέρες μας οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης για προβλήματα ελαστικότητας – πλαστικότητας σε ομογενή, ανομοιογενή, συνεχή, ασυνεχή, ισότροπα και ανισότροπα υλικά. Η πλέον εφαρμόσιμη είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002).

Η παρούσα εργασία, βασίζεται στη μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας Bishop.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Μέθοδος Bishop

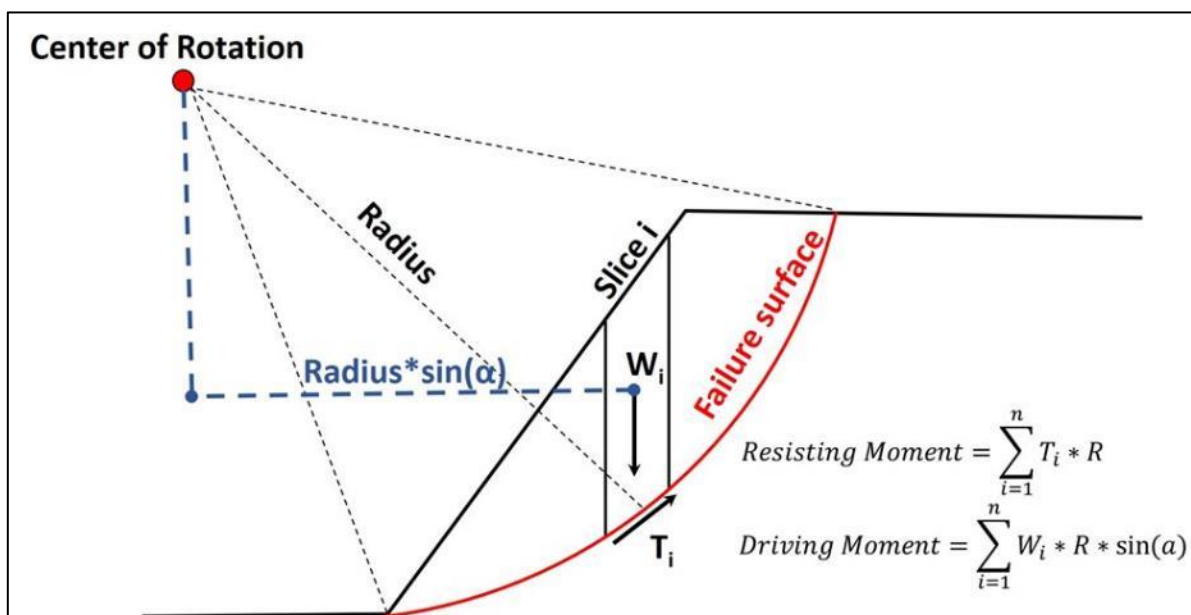
Ο συντελεστής ασφαλείας για δεδομένη κυκλική επιφάνεια είναι ίσος με:

$$FS = \frac{\sum_{k=1}^N X_k}{(1 + Y_k / FS) / \sum_{k=1}^N Z_k + Q}$$

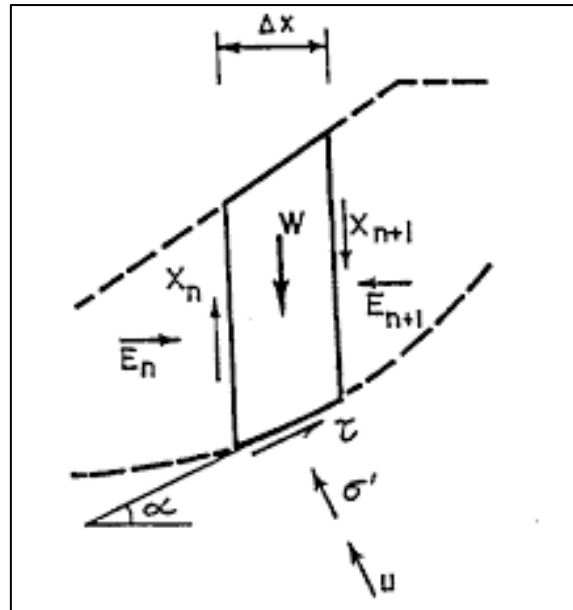
όπου:

- ✓ N: Ο αριθμός των λωρίδων,
- ✓ $X = (c' + (\gamma h - \gamma h' w) \tan \phi') \Delta x / \cos \alpha$,
- ✓ $Y = \tan \alpha \tan \phi'$,
- ✓ $Z = \gamma h \Delta x \sin \alpha$,
- ✓ $Q = 1/2 \gamma_w z^2 \alpha / R$.

Στις ακόλουθες Εικόνες 48 και 49, παρουσιάζεται η ανάλυση της ευστάθειας των πρανών, βάση της μεθόδου Bishop.



Εικόνα 48: Μέθοδος Bishop (Bishop, 1955).



Εικόνα 49: Λωρίδα μεθόδου Bishop (Bishop, 1955).

Ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$A) \sigma' = (\gamma h - \gamma_w h_w - c' \tan \alpha / FS) / (1 + Y / FS)$$

$$B) \cos \alpha (1 + Y / FS) > 0.2.$$

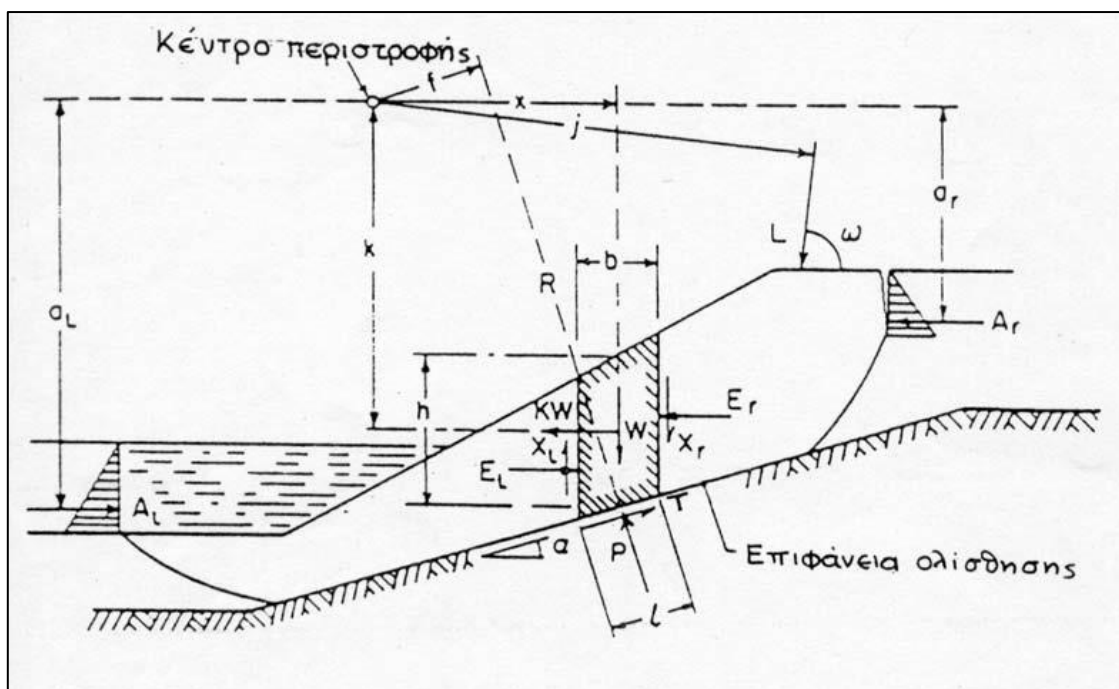
Οι πλευρικές διατμητικές δυνάμεις έχουν παραλειφθεί.

Η απλοποιημένη μέθοδος του Bishop είναι μία επαναληπτική μέθοδος όπου θέτοντας ως αρχική εκτίμηση τον συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1, υπολογίζεται η νέα εκτίμησή του. Από τον νέο συντελεστή υπολογίζεται εκ νέου μια καλύτερη εκτίμησή του. Η μέθοδος επαναλαμβάνεται μέχρι η διαφορά μιας τιμής του συντελεστή ασφαλείας με τη προηγούμενή της να είναι μικρότερη του 0.001.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται για διάφορες ακτίνες R και για διάφορα κέντρα. Η μικρότερη από όλες τις τιμές αποτελεί και τον συντελεστή ασφαλείας του πρηνούς ενώ το κέντρο του κύκλου και η ακτίνα του δίδουν την επιφάνεια αστοχίας. Η γενικευμένη έκφραση του συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από τη συνθήκη ροπών είναι (Εικόνα 50):

$$F_m = \frac{\sum (R [c'b + W (1 - r_u) \tan \phi'] / m_a)}{\sum (WR \sin \alpha) - (A_l \alpha_l - A_r \alpha_r) + K W k}$$

$$\text{με } m_a = \sec(\alpha) / (1 + (\tan \phi' \tan \alpha) / F) \text{ και } r_u = u / \gamma h_0$$



Εικόνα 50: Γενική προσέγγιση δυνάμεων στις μεθόδους λωρίδων (Τσόγκας και Τσόγκα, 2000).

Ξεκινώντας από μια αρχική τιμή F_0 για το συντελεστή ασφαλείας, προκύπτει μια νέα τιμή F_1 , επαναλαμβάνεται ο υπολογισμός και προκύπτει μια νέα τελική τιμή F_2 . Προσεγγίζεται η ορθή λύση όταν η προκύπτουσα τελική τιμή συμπίπτει με τη τιμή εκκίνησης.

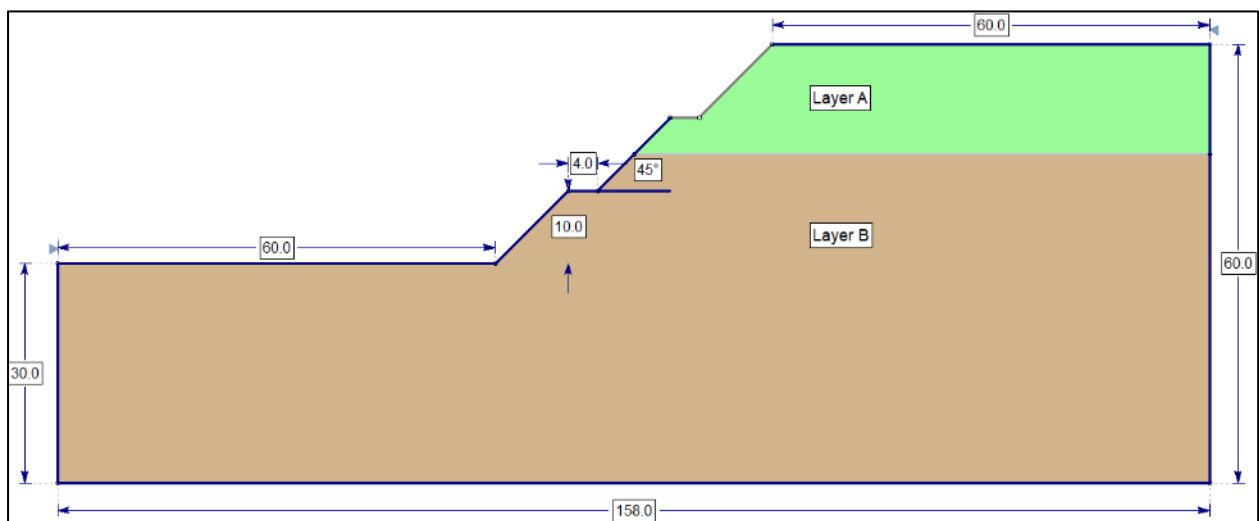
7.1.2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SLIDE2

Το λογισμικό Slide 2 της εταιρείας RocScience, αποτελεί ένα γεωτεχνικό λογισμικό για δισδιάστατες (2D) αναλύσεις ισορροπίας της ευστάθειας των πρανών με τη μέθοδο των λωρίδων. Δίνει τη δυνατότητα εξέτασης, τόσο κυκλικής (circular) όσο και πολυγωνικής (polygonal) επιφάνειας ολίσθησης του πρανού, τόσο σε στατικές όσο και σε σεισμικές συνθήκες φόρτισης. Η γεωμετρία του πρανού, μπορεί να εισαχθεί εύκολα υπό τη μορφή σχεδίου CAD στο λογισμικό, ενώ υπάρχει επίσης η δυνατότητα εισαγωγής διαφορετικής στρωματογραφίας στο μοντέλο ανάλυσης αλλά και η προσθήκη μέτρων αντιστήριξης πρανών (πχ. αγκυρώσεις, πάσσαλοι κλπ.). Όσον αφορά την προσομοίωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, στις αναλύσεις αυτή μπορεί να εισαχθεί είτε υπό τη μορφή πιεζομετρικής στάθμης (groundwater level), είτε υπό τη μορφή του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εφαρμόζεται η μέθοδος του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u), όπως αυτή αναλύεται στην ακόλουθη Ενότητα 7.2.

Στην παρούσα εργασία, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για στατικές συνθήκες φόρτισης και με θεώρηση κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης (circular surface).

7.1.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Για τις αναλύσεις, επιλέγεται η παρομοίωση ενός μέσω έως υψηλού ορύγματος οδοποιίας, συνολικού ύψους $H = 30\text{m}$. Το πρηνές υποδιαιρείται σε τρία (3) επιμέρους πρηνή, έκαστο ύψους $h = 10\text{m}$, με την εφαρμογή ενδιάμεσου αναβαθμού πλάτους $L = 4\text{m}$, ανά 10m ύψος πρηνούς. Η κλίση των πρηνών επιλέχθηκε ίση με 1:1 (κ:ο) ή 45° , βάσει των συστάσεων των ΠΕΤΕΠ 02-02-01-00, 1/Παρ.3.2.2., Πίνακα 3-1, όπου για συνεκτικά γαιώδη – ημιβραχώδη και για πολύ συνεκτικά ημιβραχώδη εδάφη, προτείνεται η παραπάνω κλίση. Να σημειωθεί ότι η παραπάνω γεωμετρία με την εφαρμογή ενδιάμεσων αναβαθμών, είναι συνήθης γεωμετρία διαμόρφωσης εκσκαφής ορυγμάτων σε αυτοκινητοδρόμους του ελλαδικού χώρου (πχ. Εγνατία Οδός, Αυτ/μος Ε65 κλπ.). Όσον αφορά τα όρια του μοντέλου προσομοίωσης, αυτά ορίζονται ίσα με 30m ($3 \times h$) εκατέρωθεν της βάσης αλλά και της στέψης του ορύγματος, αλλά και αντίστοιχα της βάσης του ορύγματος (κάτω όριο). Επίσης, στις αναλύσεις λαμβάνεται υπόψιν ως στρωματογραφία ένα ανώτερο στρώμα (Layer A) για τα ανώτερα 15m του ορύγματος που αντιστοιχεί στο μανδύα αποσάθρωσης του βραχώδους υποβάθρου και το κατώτερο τμήμα του ορύγματος, αποτελεί το βραχώδες υπόβαθρο (Layer B). Στην ακόλουθη Εικόνα 51, παρουσιάζεται η γεωμετρία του μοντέλου παρομοίωσης του ορύγματος στο λογισμικό Slide 2.



Εικόνα 51: Γεωμετρία μοντέλου προσομοίωσης ορύγματος στο λογισμικό Slide 2.

7.1.4. ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 7.1.2, η προσομοίωση του συντελεστή υδατοπερατότητας των σχηματισμών (k), στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εισάγεται στο λογισμικό Slide 2, εμμέσως μέσω του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u).

Η επίδραση των υπόγειων υδάτων στη σταθερότητα ενός πρηνούς είναι κρίσιμη. Η συσσώρευση πίεσης πόρων-νερού τείνει να μειώνει την κανονική αποτελεσματική αντοχή του εδάφους,

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

μειώνοντας τις ενεργές τάσεις. Οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων λαμβάνονται συνήθως υπόψη: *i)* με την ανάθεση υδροφόρου ορίζοντα ή *ii)* με την παραδοχή R_u . Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι η επιφάνεια που διακρίνει την κορεσμένη ζώνη (όπου όλα τα κενά του εδάφους γεμίζουν με νερό) και την ακόρεστη ζώνη. Η τιμή R_u είναι ο λόγος της πίεσης πόρων-νερού προς την κανονική (ή υπερφορτωμένη) τάση, δηλαδή η χρήση της είναι μια έμμεση μέθοδος για να ληφθεί υπόψη η παρουσία νερού. Η τιμή R_u κυμαίνεται από 0 έως 1.

Από την στατιστική επεξεργασία του *Κεφαλαίου 6*, γίνεται παράθεση των τιμών του συντελεστή υδατοπερατότητας (k) στον ακόλουθο Πίνακα 23, ανά γεωλογικό σχηματισμό αλλά και ανά λιθολογικό τύπο, για τα πρώτα επιφανειακά 15m και για το κατώτερο τμήμα (15m – 30m).

Πίνακας 23: Συγκεντρωτικός πίνακας του συντελεστή υδατοπερατότητας (k) των γεωλογικών σχηματισμών, ανά λιθολογικό τύπο και ανά βάθος.

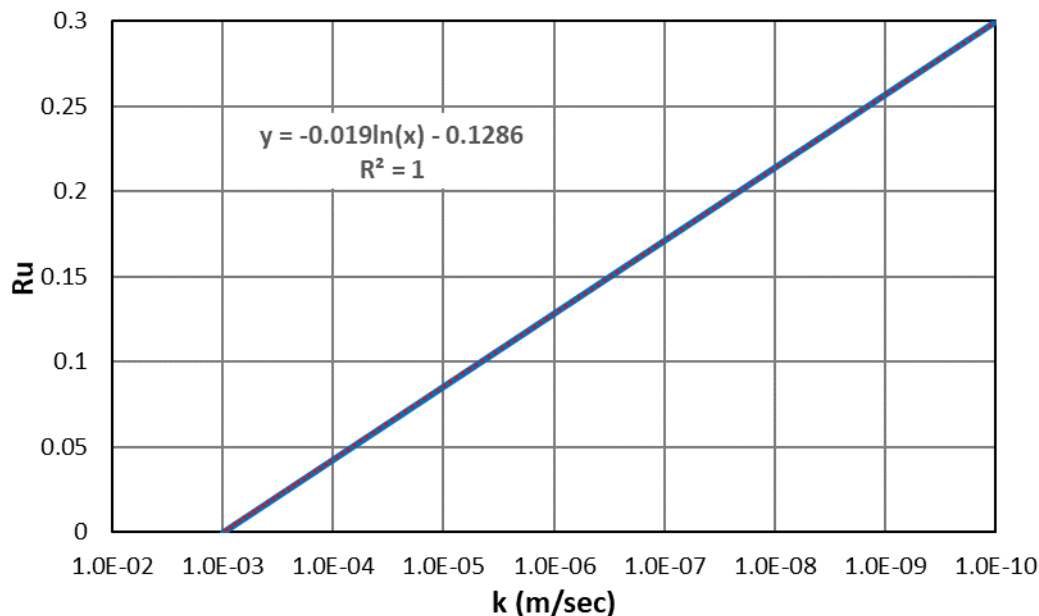
Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	k (m/sec)	
		0m – 15m	> 15m
Φλύσχος	Ιλυόλιθος	1×10^{-7}	1×10^{-10}
	Ψαμμίτης	1×10^{-7}	1×10^{-8}
	Κροκαλοπαγές	1×10^{-6}	1×10^{-8}
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	1×10^{-6}	1×10^{-8}
Μολάσσα	Ιλυόλιθος	1×10^{-6}	1×10^{-8}
	Ψαμμίτης	1×10^{-5}	1×10^{-8}
	Κροκαλοπαγές	1×10^{-5}	1×10^{-8}
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	1×10^{-6}	1×10^{-8}
Γνεύσιος	Γνεύσιος	1×10^{-4}	1×10^{-7}
Οφιόλιθος	Σερπεντίνης	1×10^{-6}	1×10^{-7}
	Περιδοτίτης	1×10^{-5}	1×10^{-8}
	Γάββρος	1×10^{-6}	1×10^{-7}

Για την εκτίμηση και συσχέτιση του ισοδύναμου συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u), για κάθε σχηματισμό αλλά και για κάθε λιθολογικό τύπο και βάθος εμφάνισης, αρχικά γίνεται η θεώρηση ότι η μικρότερη τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας (k) του ανωτέρου Πίνακα 23 που είναι 1×10^{-10} m/sec, θα αντιστοιχηθεί με τιμή $R_u = 0.3$, που είναι γενικά υψηλή τιμή για το συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u). Αντίστοιχα και με βάση το Πίνακα 1 του Κεφαλαίου 2, σύμφωνα με τους Terzaghi & Peck (1967), για $k < 10^{-1}$ cm/sec ή $k < 10^{-3}$ cm/sec, θεωρείται ότι η περατότητα του σχηματισμού είναι υψηλή και συνεπώς θα γίνεται στράγγιση. Συνεπώς, η τιμή $k = 1 \times 10^{-3}$ m/sec, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα αντιστοιχηθεί με τιμή $R_u = 0$. Με βάση την προηγούμενη θεώρηση, αποτυπώνεται στο

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

ακόλουθο Διάγραμμα 55, η συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (Ru) και του συντελεστή υδατοπερατότητας (k), καθώς και η λογαριθμική σχέση που συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη:

$$Ru = -0.019 \times \ln(k) - 0.1286, k(\text{m/sec}) \quad [\text{Εξ. 1}]$$



Διάγραμμα 55: Συσχέτιση του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (Ru), με το συντελεστή υδατοπερατότητας (k).

Με βάση τη προαναφερθείσα [Εξ. 1], παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα 24 η αντιστοίχιση μεταξύ του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (Ru), με το συντελεστή υδατοπερατότητας (k) για κάθε σχηματισμό, ανά λιθολογικό τύπο και βάθος.

Πίνακας 24: Συγκεντρωτικός πίνακας του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (Ru) των γεωλογικών σχηματισμών, ανά λιθολογικό τύπο και ανά βάθος.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	k (m/sec)		Ru	
		0m – 15m	> 15m	0m – 15m	> 15m
Φλύσσης	Ιλυόλιθος	1×10^{-7}	1×10^{-10}	0.18	0.30
	Ψαμμίτης	1×10^{-7}	1×10^{-8}	0.18	0.22
	Κροκαλοπαγές	1×10^{-6}	1×10^{-8}	0.13	0.22
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	1×10^{-6}	1×10^{-8}	0.13	0.22
Μολάσσα	Ιλυόλιθος	1×10^{-6}	1×10^{-8}	0.13	0.22
	Ψαμμίτης	1×10^{-5}	1×10^{-8}	0.09	0.22
	Κροκαλοπαγές	1×10^{-5}	1×10^{-8}	0.09	0.22
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	1×10^{-6}	1×10^{-8}	0.13	0.22
Γνεύσιος	Γνεύσιος	1×10^{-4}	1×10^{-7}	0.05	0.18
Οφιόλιθος	Σερπεντίνης	1×10^{-6}	1×10^{-7}	0.13	0.18

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	k (m/sec)		Ru	
		0m – 15m	> 15m	0m – 15m	> 15m
	Περιδοτίτης	1×10^{-5}	1×10^{-8}	0.09	0.18
	Γάββρος	1×10^{-6}	1×10^{-7}	0.13	0.18

7.1.5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ – ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Για τις αναλύσεις, επιλέγεται η εφαρμογή του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, το οποίο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις εκσκαφών σε βραχώμαζας, καθώς λαμβάνει υπόψιν την ταξινόμηση της βραχώμαζας μέσω του δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI. Οι παράμετροι που εισάγονται στο λογισμικό, είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Ειδικό βάρος βραχώμαζας (γ),
- ✓ Αντοχή σε θλίψη άρρηκτου βράχου (UCS),
- ✓ Δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI),
- ✓ Παράμετρος (m_i),
- ✓ Βαθμός διαταραχής βραχώμαζας λόγω εκσκαφής (D).

Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική παράθεση της επιλογής των τιμών αντοχής αλλά και του δείκτη γεωλογικής αντοχής ανά γεωλογικό σχηματισμό και λιθολογικό τύπο. Όσον αφορά την παράμετρο βαθμού διαταραχής βραχώμαζας λόγω εκσκαφής (D), αυτή σε όλες τις αναλύσεις λαμβάνεται D= 0.

7.1.5.1. ΦΛΥΣΧΗΣ

Για το σχηματισμό του φλύσχη, εξετάζονται οι ακόλουθοι λιθολογικοί τύποι:

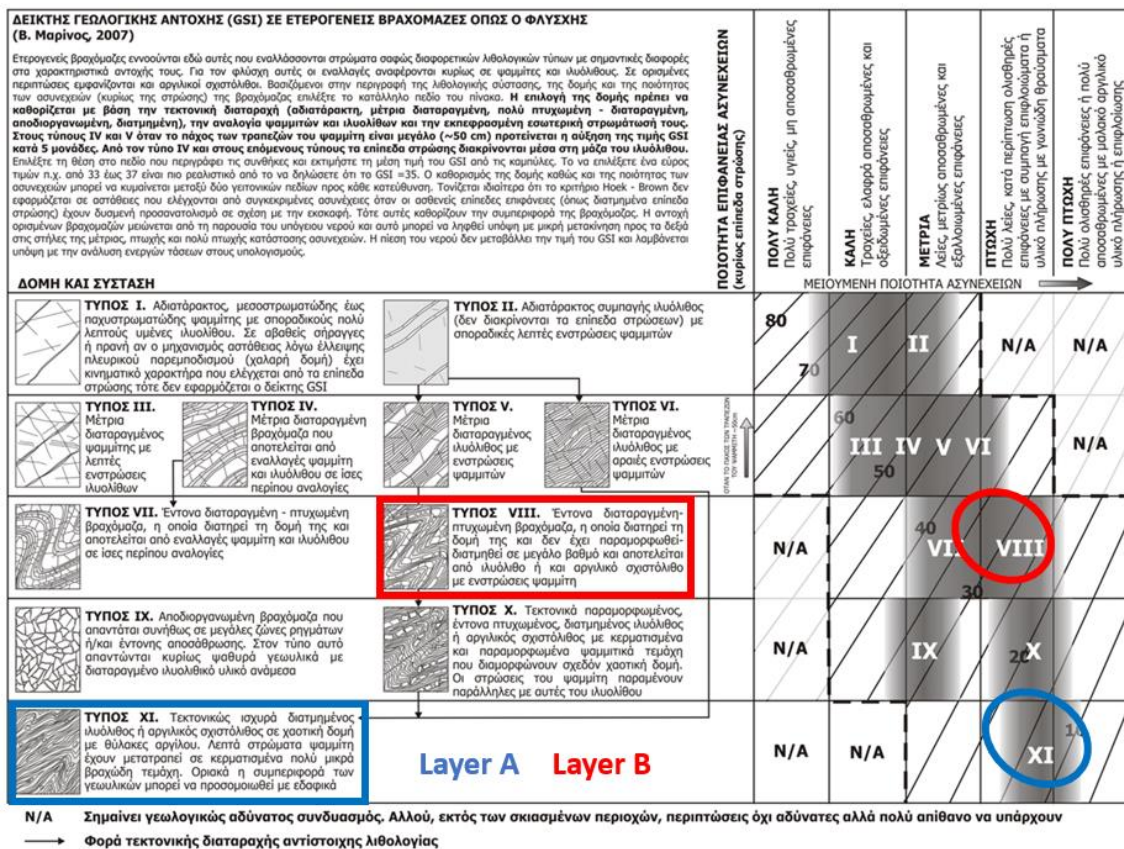
- ✓ Ιλυόλιθος,
- ✓ Ψαμμίτης,
- ✓ Κροκαλοπαγές,
- ✓ Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες.

Ιλυόλιθος

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του ιλυολιθικού Φλύσχη και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του ιλυολιθικού Φλύσχη. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Ιλυόλιθο αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 5 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 5$.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο Φλύσχη (B. Μαρίνος, 2007), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο XI, με τιμή **GSI= 10 – 15** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο VIII, με τιμή **GSI= 30 – 35**. Στην ακόλουθη Εικόνα 52 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 25, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις και έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα ανάλογα τον τύπο βραχώμαζας, με βάση τις συστάσεις του B. Μαρίνος, 2007. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 25, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.



Εικόνα 52: Επιλογή τιμών GSI για τον ιλυόλιθο του Φλύσχη.

Πίνακας 25: Επιλογή παραμέτρων για τον ιλυόλιθο του Φλύσχη.

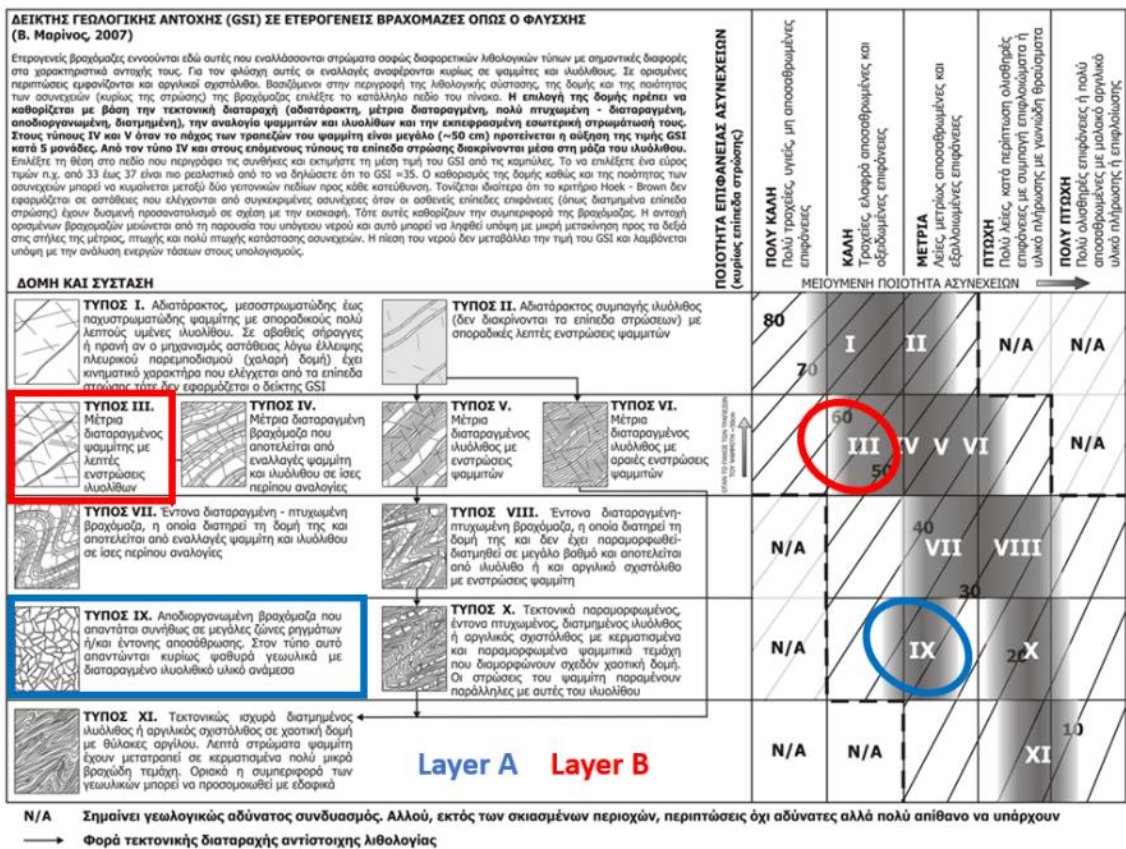
Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	XI	10 - 15	10	5	5	26	0.18
B	VIII	30 - 35	30	5	5	26	0.30

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Ψαμμίτης

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του ψαμμιτικού φλύσχη και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του ψαμμιτικού Φλύσχη. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Ψαμμίτη αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 25 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου ασοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 13$.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο Φλύσχος (*B. Marinos, 2007*), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο IX, με τιμή **GSI= 30 – 35** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο III, με τιμή **GSI= 50 – 55**. Στην ακόλουθη Εικόνα 53 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 26, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις και έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα ανάλογα τον τύπο βραχώμαζας, με βάσει τις συστάσεις του *B. Marinos, 2007*. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 26, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (R_u) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.



Εικόνα 53: Επιλογή τιμών GSI για τον Ψαμμίτη του Φλύσχη.

Πίνακας 26: Επιλογή παραμέτρων για τον Ψαμμίτη του Φλύσχη.

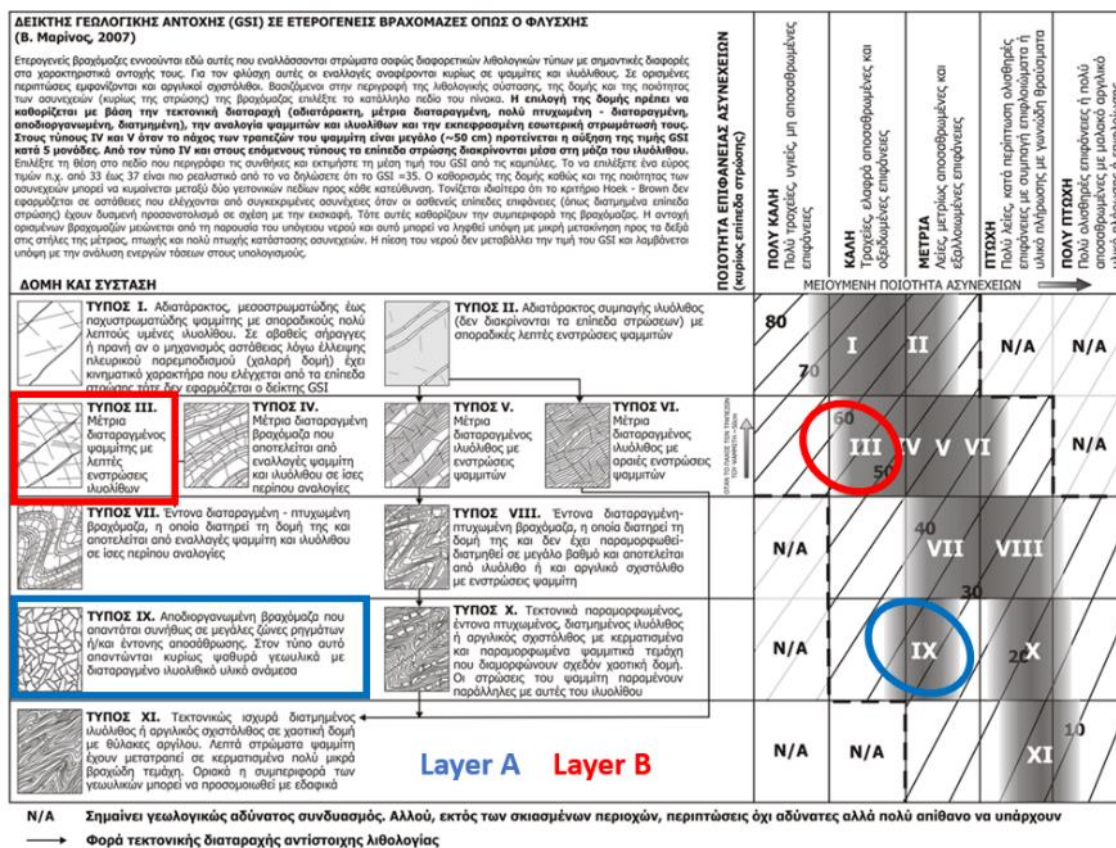
Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	IX	30 - 35	30	25	13	27	0.18
B	III	50 - 55	50	25	13	27	0.22

Κροκαλοπαγές

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του Κροκαλοπαγούς και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του Κροκαλοπαγούς. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για το Κροκαλοπαγές αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 15 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 18$.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο Φλύσχος (*B. Μαρίνος, 2007*), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο IX, με τιμή **GSI= 30 – 35** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο III, με τιμή **GSI= 50 – 55**. Στην ακόλουθη Εικόνα 54 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 27, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις και έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα ανάλογα τον τύπο βραχώμαζας, με βάσει τις συστάσεις του *B. Μαρίνος, 2007*. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 27, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 54: Επιλογή τιμών GSI για το Κροκαλοπαγές του Φλύσχη.

Πίνακας 27: Επιλογή παραμέτρων για το Κροκαλοπαγές του Φλύσχη.

Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	IX	30 - 35	30	15	18	27	0.13
B	III	50 - 55	50	15	18	27	0.22

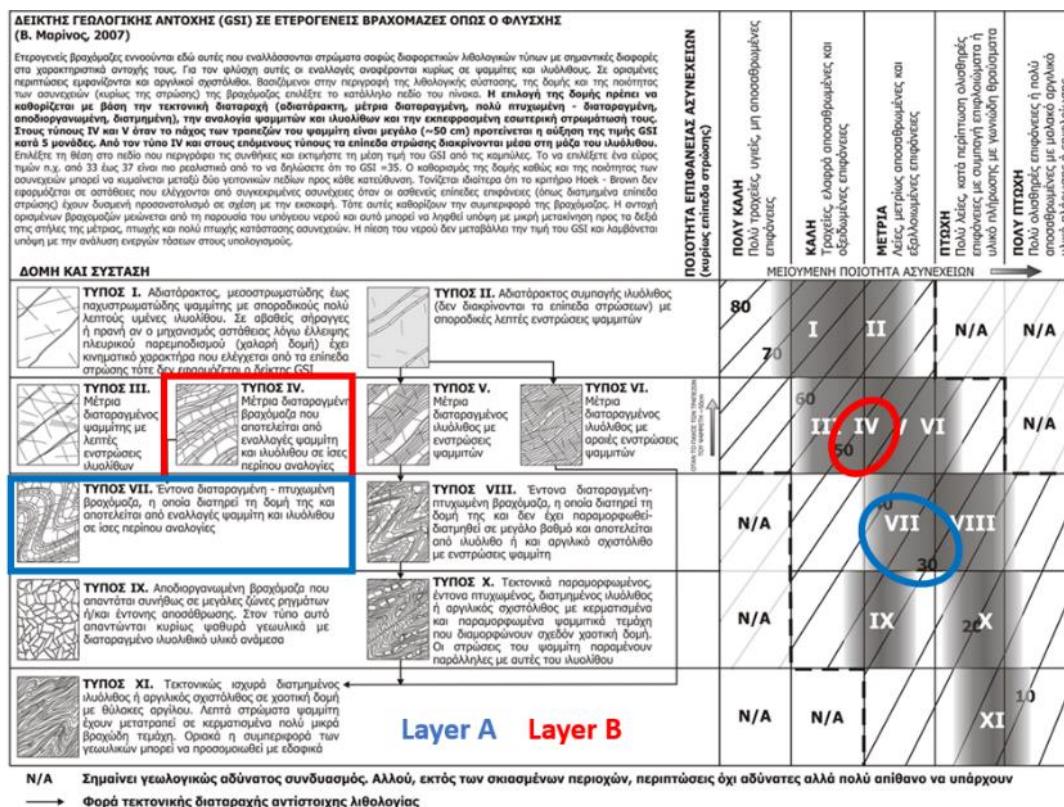
Ιλυολίθος – Ψαμμίτης σε ίσες αναλογίες

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης των εναλλαγών Ιλυολίθου-Ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο των εναλλαγών Ιλυολίθου-Ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2011)*, λαμβάνονται για τα ανώτερο τμήμα οι ψαμμιτικές τιμές απομειωμένες κατά 20% μαζί με τις αντίστοιχες ιλυολιθικές εξ ολοκλήρου, ενώ για το κατώτερο τμήμα οι ψαμμιτικές τιμές απομειωμένες κατά 10% μαζί με τις αντίστοιχες ιλυολιθικές εξ ολοκλήρου.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε ετερογενείς βραχώδεις όπως ο Φλύσχος (*B. Μαρίνος, 2007*), όπου για την επιφανειακή στρώση

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

(Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο VII, με τιμή $GSI = 30 - 35$ και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο IV, με τιμή $GSI = 45 - 50$. Στην ακόλουθη Εικόνα 55 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 28, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις και έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα ανάλογα τον τύπο βραχώδους, με βάσει τις συστάσεις του *B. Μαρίνος, 2007*. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 28, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (R_u) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.



Εικόνα 55: Επιλογή τιμών GSI για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυολίθου του Φλύσχη σε ίσες αναλογίες.

Πίνακας 28: Επιλογή παραμέτρων για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυολίθου του Φλύσχη σε ίσες αναλογίες.

Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	R _u
A	VII	30 - 35	30	12.5	8	23.8	0.13
B	IV	45 - 50	45	13.8	8	24.7	0.22

7.1.5.2. ΜΟΛΑΣΣΑ

Για το σχηματισμό της μολάσσης, εξετάζονται οι ακόλουθοι λιθολογικοί τύποι:

- ✓ Ιλυόλιθος,

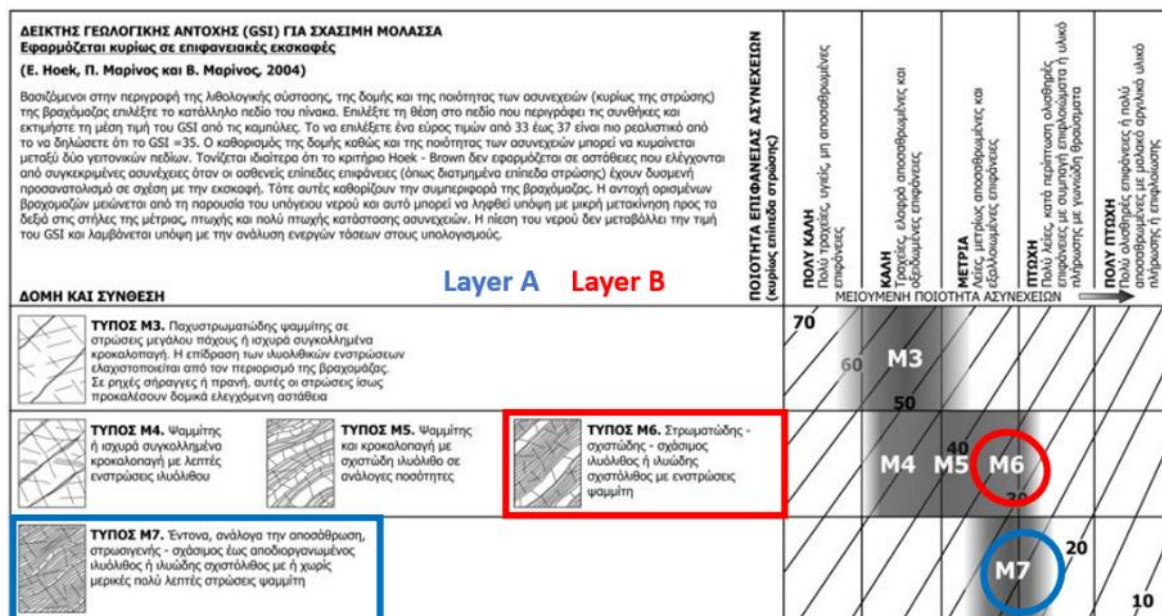
Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

- ✓ Ψαμμίτης,
- ✓ Κροκαλοπαγές,
- ✓ Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες.

Ιλυόλιθος

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης της Ιλυολιθικής Μολάσσας και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο της Ιλυολιθικής Μολάσσας. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Ιλυόλιθο αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 5 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 5$.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) για Σχάσιμη Μολάσσα, το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές (E. Hoek, Π. Μαρίνος, B. Μαρίνος, 2004), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M7, με τιμή **GSI= 20 – 25** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M6, με τιμή **GSI= 35 – 40**. Στην ακόλουθη Εικόνα 56 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 29, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 29, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (R_u) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.



Εικόνα 56: Επιλογή τιμών GSI για τον Ιλυόλιθο της Μολάσσας.

Πίνακας 29: Επιλογή παραμέτρων για τον Ιλυόλιθο της Μολάσσας.

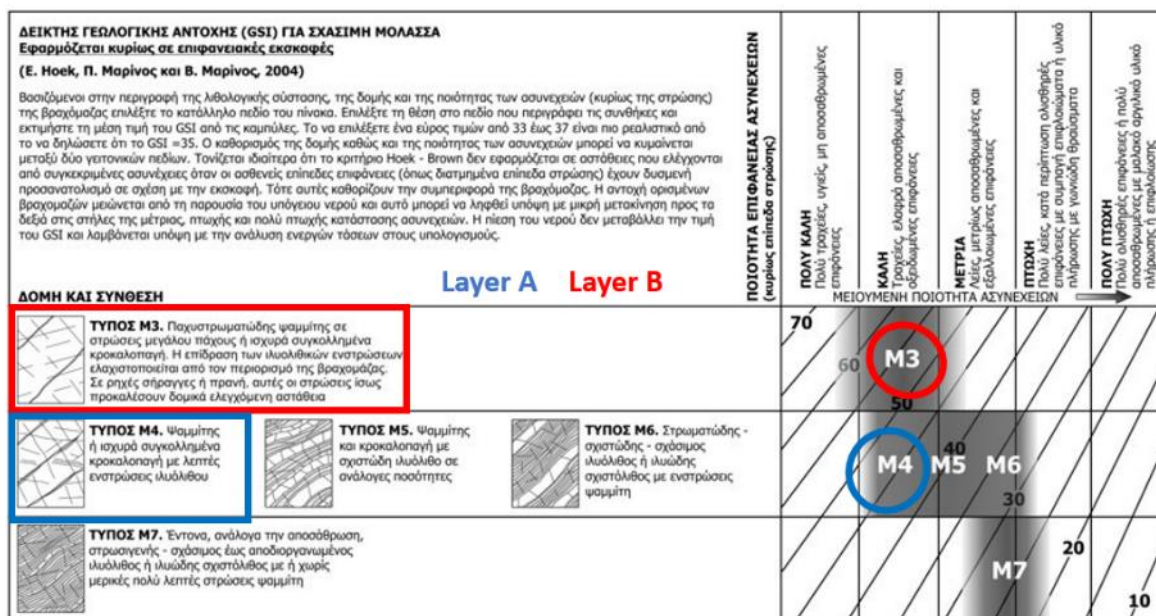
Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	M7	20 - 25	20	5	5	26	0.13
B	M6	35 - 40	35	5	5	26	0.22

Ψαμμίτης

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης της ψαμμιτικής Μολάσσας και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο της ψαμμιτικής Μολάσσας. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Ψαμμίτη αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 25 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i, βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται m_i= 13.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) για Σχάσιμη Μολάσσα, το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές (E. Hoek, Π. Μαρίνος, B. Μαρίνος, 2004), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M4, με τιμή **GSI= 40 – 45** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M3, με τιμή **GSI= 55 – 60**. Στην ακόλουθη Εικόνα 57 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 30, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 30, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 57: Επιλογή τιμών GSI για τον Ψαμμίτη της Μολάσσης.

Πίνακας 30: Επιλογή παραμέτρων για τον Ψαμμίτη της Μολάσσης.

Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	M4	40 - 45	40	25	13	27	0.09
B	M3	55 - 60	55	25	13	27	0.22

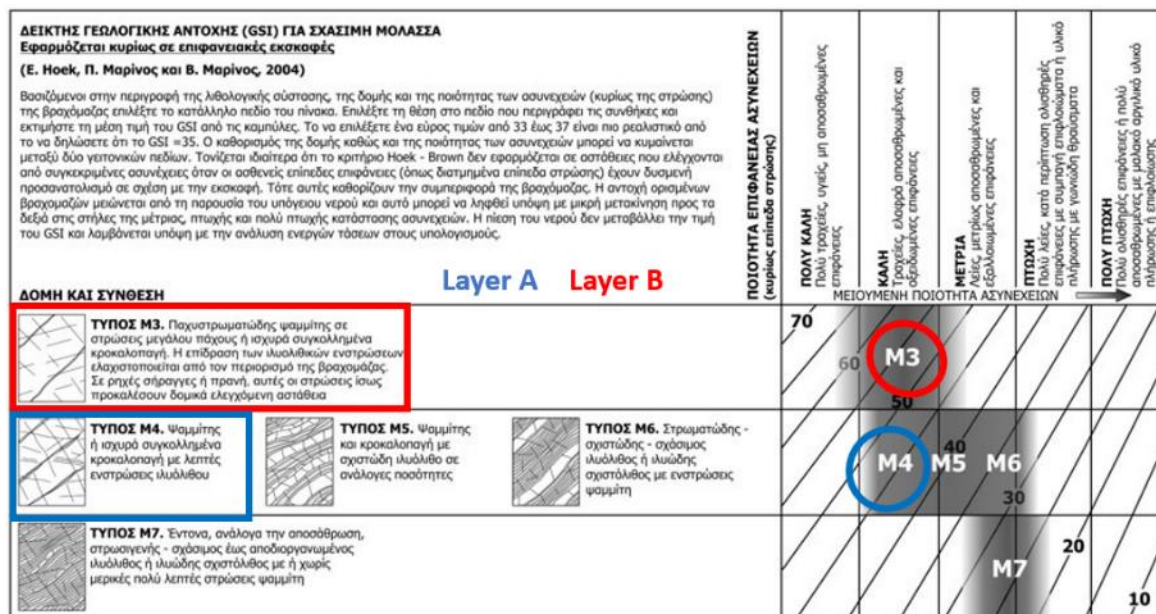
Κροκαλοπαγές

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του Κροκαλοπαγούς και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του Κροκαλοπαγούς. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για το Κροκαλοπαγές αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 15 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώδους βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 18$.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) για Σχάσιμη Μολάσση, το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές (E. Hoek, Π. Μαρίνος, Β. Μαρίνος, 2004), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M4, με τιμή **GSI= 40 – 45** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M3, με τιμή **GSI= 55 – 60**. Στην ακόλουθη Εικόνα 58 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 31, παρουσιάζονται οι παράμετροι που

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 31, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.



Εικόνα 58: Επιλογή τιμών GSI για το Κροκαλοπαγές της Μολάσας.

Πίνακας 31: Επιλογή παραμέτρων για το Κροκαλοπαγές της Μολάσας.

Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	M4	40 - 45	40	15	18	27	0.09
B	M3	55 - 60	55	15	18	27	0.22

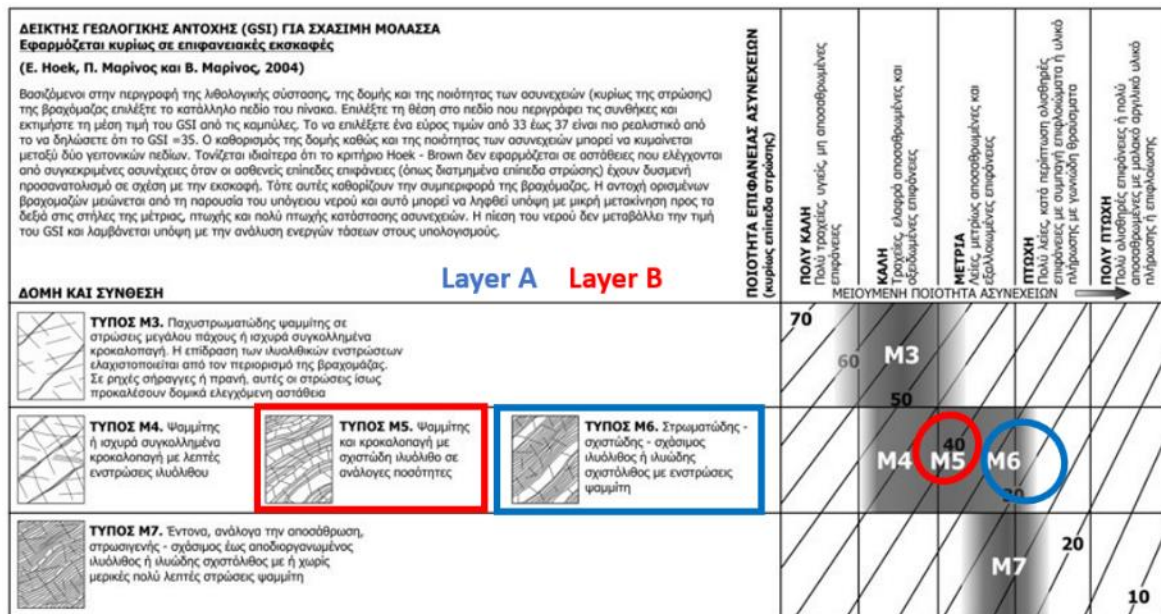
Ιλυολίθος – Ψαμμίτης σε ίσες αναλογίες

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης των εναλλαγών Ιλυολίθου-Ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο των εναλλαγών Ιλυολίθου-Ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνονται και για τα 2 στρώματα οι ψαμμιτικές τιμές απομειωμένες κατά 50% μαζί με τις αντίστοιχες ιλυολιθικές απομειωμένες κατά 50%.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) για Σχάσιμη Μολάσσα, το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές (Ε. Ηοεκ, Π. Μαρίνος, Β. Μαρίνος, 2004), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M6, με τιμή **GSI= 35 – 40** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο M5, με τιμή **GSI= 40 – 45**. Στην ακόλουθη Εικόνα 59 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 32, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 32, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.



Εικόνα 59: Επιλογή τιμών GSI για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυολίθου της Μολάσσης σε ίσες αναλογίες.

Πίνακας 32: Επιλογή παραμέτρων για τις εναλλαγές Ψαμμίτη και Ιλυολίθου της Μολάσσης σε ίσες αναλογίες.

Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	M6	35 - 40	35	15	9	26.5	0.13
B	M5	40 - 45	40	15	9	26.5	0.22

7.1.5.3. ΓΝΕΥΣΙΟΣ

Για το σχηματισμό του γνευσίου, εξετάζεται ο ακόλουθος λιθολογικός τύπος:

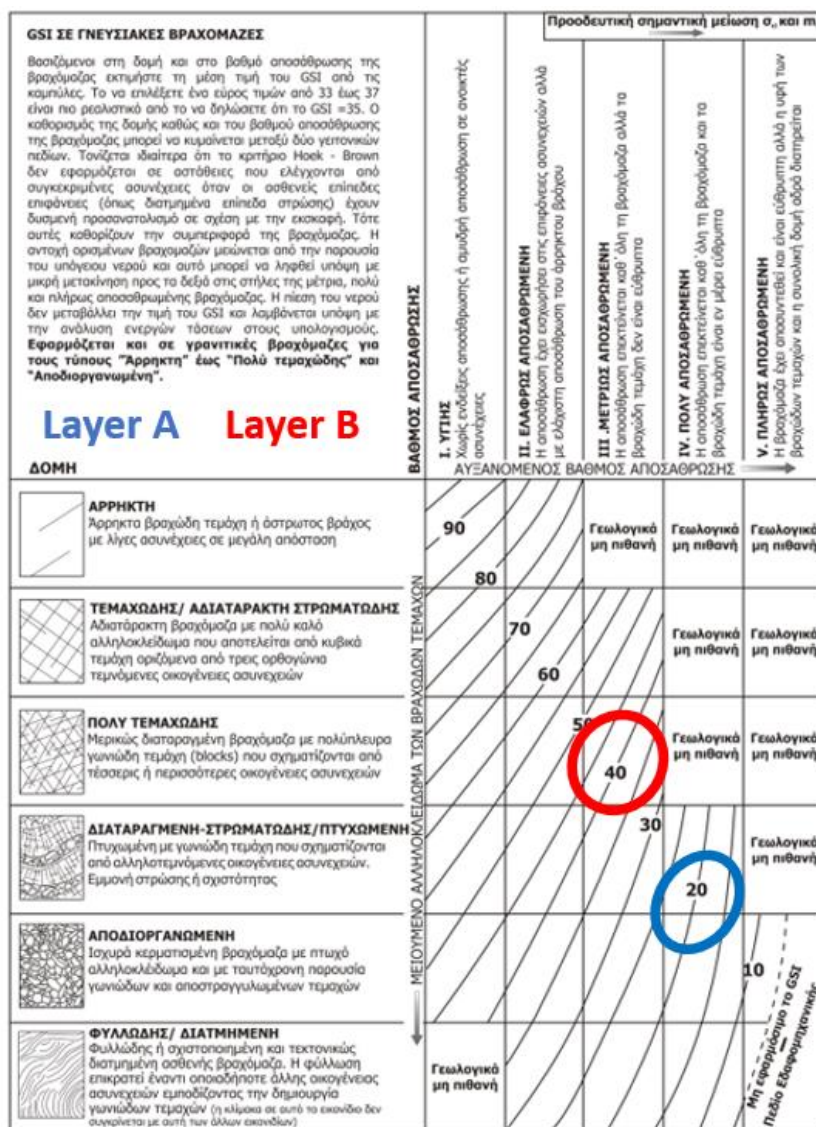
- ✓ Γνεύσιος.

Γνεύσιος

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του Γνευσίου και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του Γνευσίου. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Γνεύσιο αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 65 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώδους βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 23$.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε γνευσιακές βραχώμαξες (V. Marinos, 2007), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο IV, με τιμή **GSI= 15 – 20** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο III, με τιμή **GSI= 40 – 45**. Στην ακόλουθη Εικόνα 60 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 33, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 33, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.



Εικόνα 60: Επιλογή τιμών GSI για το Γνεύσιο.

Πίνακας 33: Επιλογή παραμέτρων για τον Γνεύσιο.

Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	IV	15 - 20	15	65	23	27	0.05
B	III	40 - 45	40	65	23	27	0.18

7.1.5.4. ΟΦΙΟΛΙΘΟΣ

Για το σχηματισμό του οφιολίθου, εξετάζονται οι ακόλουθοι λιθολογικοί τύποι:

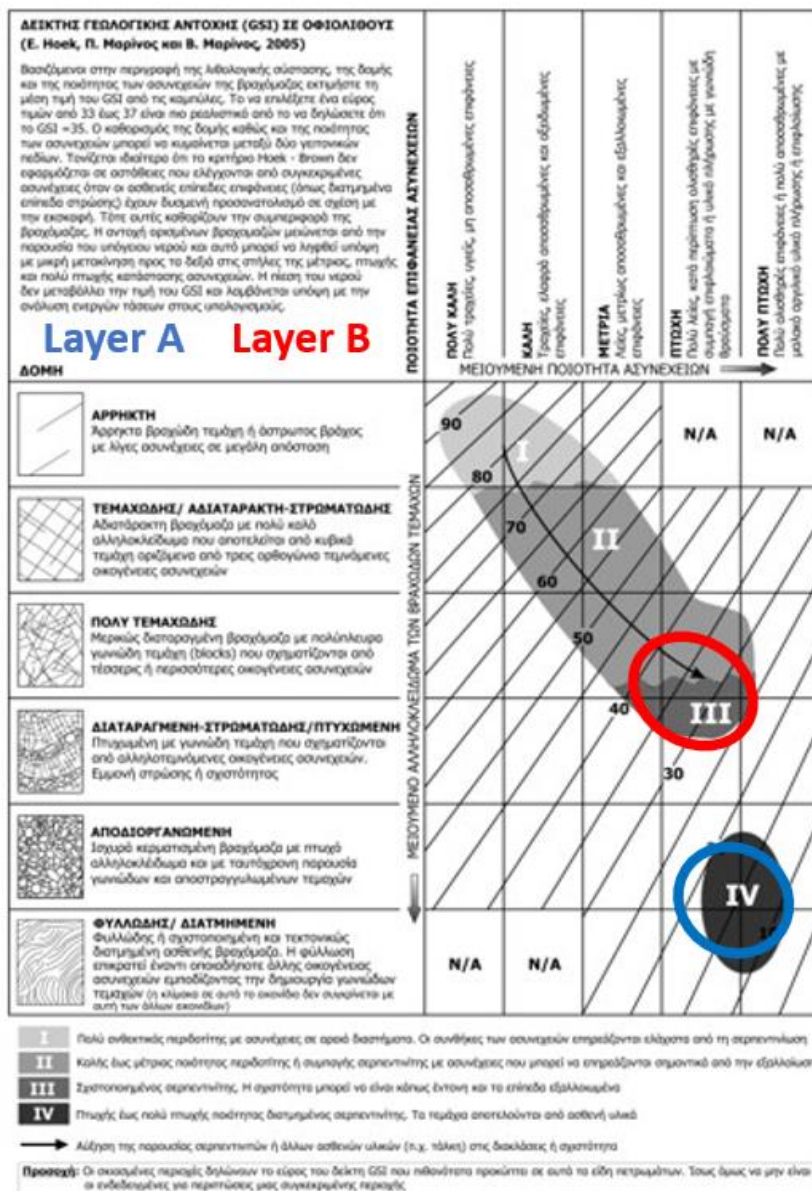
- ✓ Σερπεντίνης,
- ✓ Περιδοτίτης,
- ✓ Γάββρος.

Σερπεντίνης

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του Σερπεντίνη και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του Σερπεντίνη. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Σερπεντίνη αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 40 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 12$.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε οφιολίθους (E. Hoek, Π. Μαρίνος, *B. Μαρίνος, 2005*), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο IV, με τιμή **GSI= 15 – 20** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο III, με τιμή **GSI= 35 – 40**. Στην ακόλουθη Εικόνα 61 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 34, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 34, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 61: Επιλογή τιμών GSI για τον Σερπεντίνη.

Πίνακας 34: Επιλογή παραμέτρων για τον Σερπεντίνη.

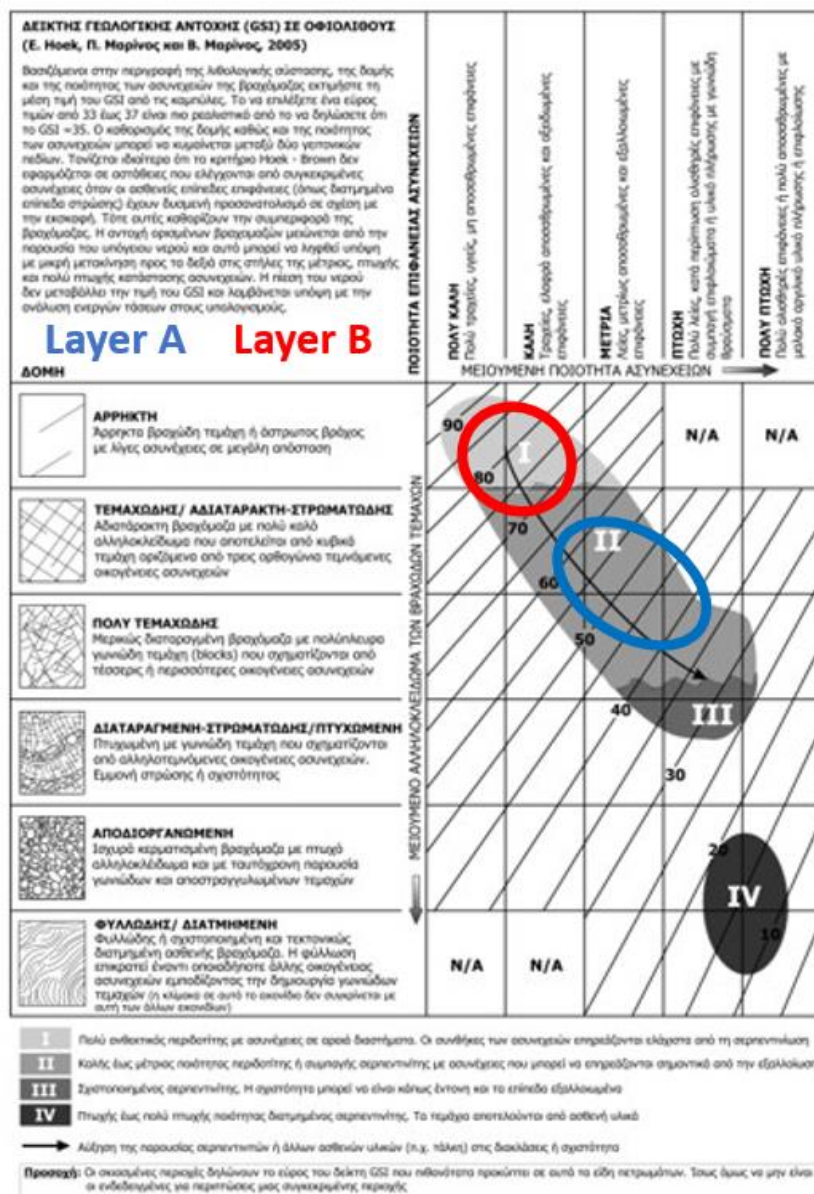
Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	IV	15 - 20	15	40	12	26	0.13
B	III	35 - 40	35	40	12	26	0.18

Περιδοτικότητα

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του Περιδοτική και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του Περιδοτική. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Περιδοτική αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 50 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma= 24 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i= 20$.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε οφιόλιθους (E. Hoek, Π. Μαρίνος, *B. Μαρίνος, 2005*), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο II, με τιμή **GSI= 45 – 50** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο I, με τιμή **GSI= 75 – 80**. Στην ακόλουθη Εικόνα 62 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 35, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 35, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 62: Επιλογή τιμών GSI για τον Περιδοτικότητα.

Πίνακας 35: Επιλογή παραμέτρων για τον Περιδοτικότητα.

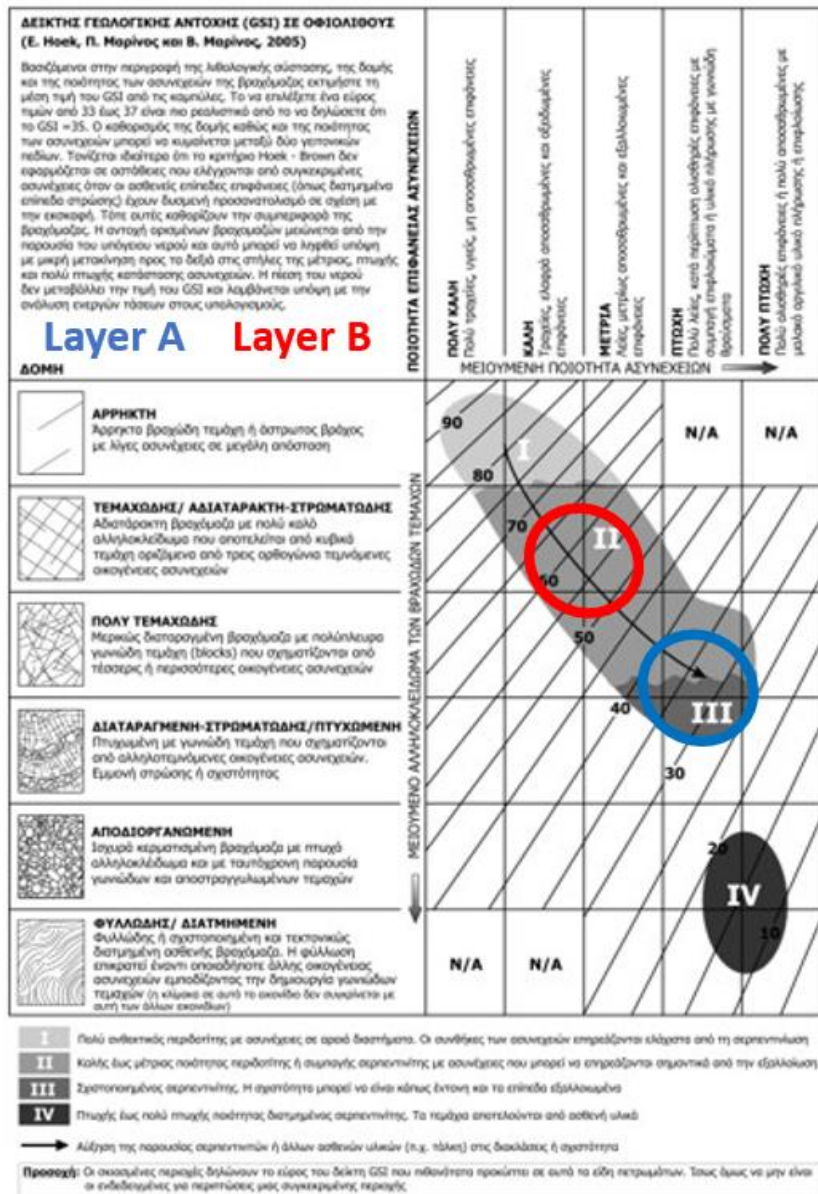
Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	II	45 - 50	45	50	20	24	0.09
B	I	75 - 80	75	50	20	24	0.18

Γάββρος

Για τις αναλύσεις λαμβάνονται δύο στρώσεις, όπου τα ανώτερα 15m (Layer A) αφορούν το μανδύα αποσάθρωσης του Γάββρου και το κατώτερο τμήμα (Layer B), αφορά το βραχώδες αλλά κερματισμένο υπόβαθρο του Γάββρου. Σύμφωνα με τον *Marinos V., (2007)*, λαμβάνεται για τον Γάββρο αντοχή άρρηκτου βράχου σε θλίψη, **UCS= 90 MPa**, ενώ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας βάσει βιβλιογραφίας, λαμβάνεται $\gamma = 28 \text{ kN/m}^3$. Αντίστοιχα η παράμετρος m_i , βάσει του κριτηρίου αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*, λαμβάνεται $m_i = 24$.

Όσον αφορά το δείκτη γεωλογικής αντοχής – GSI, γίνεται χρήση του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) σε οφιόλιθους (E. Hoek, Π. Μαρίνος, *B. Μαρίνος, 2005*), όπου για την επιφανειακή στρώση (Layer A), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο III, με τιμή **GSI= 30 – 35** και για την βαθύτερη στρώση (Layer B), εκτιμάται ότι ανήκει στον τύπο III, με τιμή **GSI= 60 – 65**. Στην ακόλουθη Εικόνα 63 εμφανίζονται οι θέσεις των δύο στρώσεων (Layer A & B), στο διάγραμμα του GSI, ενώ στον ακόλουθο Πίνακα 36, παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις. Επίσης στον ακόλουθο Πίνακα 36, παρουσιάζεται και ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (Ru) ανά στρώση, βάσει του Πίνακα 24.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Εικόνα 63: Επιλογή τιμών GSI για τον Γάββρο.

Πίνακας 36: Επιλογή παραμέτρων για τον Γάββρο.

Στρώση	Τύπος	GSI	GSI _{design}	UCS (MPa)	m _i	γ (kN/m ³)	Ru
A	III	30 - 35	30	90	24	28	0.13
B	II	60 - 65	60	90	24	28	0.18

7.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

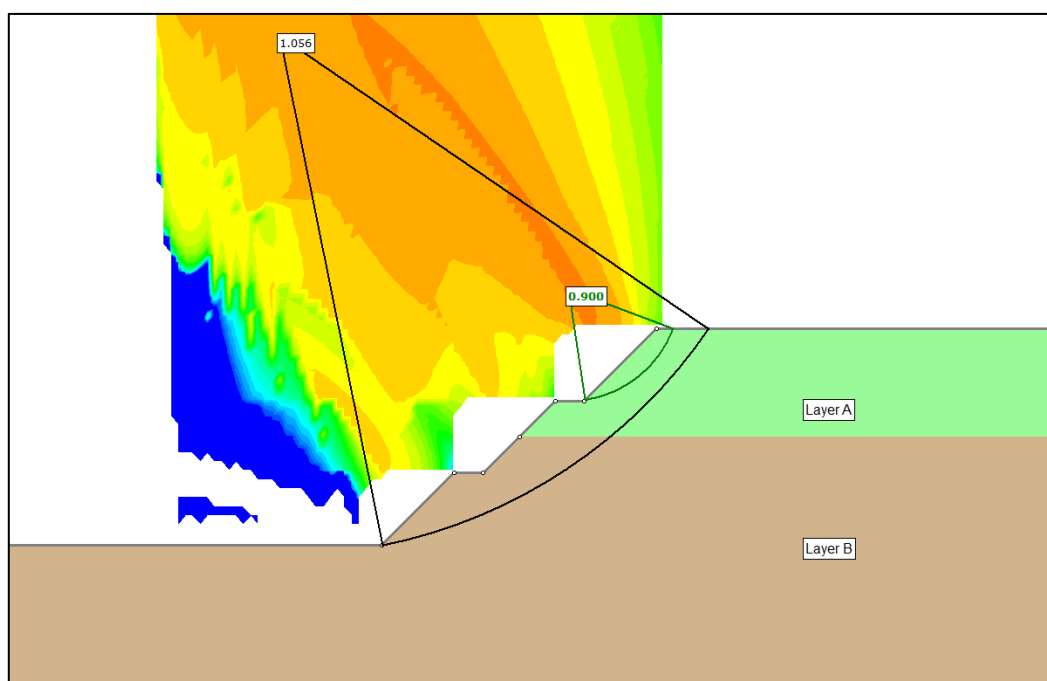
7.2.1. ΦΛΥΣΧΗΣ

Στον ακόλουθο Πίνακα 37, παρουσιάζονται οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας (SF) για καθεστώς στατικής φόρτισης και με εφαρμογή της μεθόδου Bishop, για το γεωλογικό σχηματισμό του Φλύσχη, ανά λιθολογικό τύπο.

Πίνακας 37: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό του Φλύσχη.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	Συντελεστής ασφαλείας (SF)	Ru (Στρώση A)	Ru (Στρώση B)
Φλύσχη	Ιλυόλιθος	0,90	0.18	0.30
	Ψαμμίτης	3,53	0.18	0.22
	Κροκαλοπαγές	3,27	0.13	0.22
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	2,76	0.13	0.22

Με βάση το προηγούμενο Πίνακα 37, παρατηρείται ότι μόνο για το λιθολογικό τύπου του Ιλυολίθου, υπάρχει ολίσθηση πρσανούς, δεδομένου ότι έχουμε $SF < 1$. Η ολίσθηση, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη Εικόνα 64, καταγράφεται στο ανώτερο πρσανές με τη ασθενή στρώση (Layer A), όπου έχει ληφθεί υπόψιν συντελεστής υπερπίεσης πόρων $Ru = 0.18$ ή συντελεστής υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-7}$ m/sec. Για το συνολικό όρυγμα, ο συντελεστής ασφαλείας κρίνεται οριακός και είναι $SF = 1.056$.

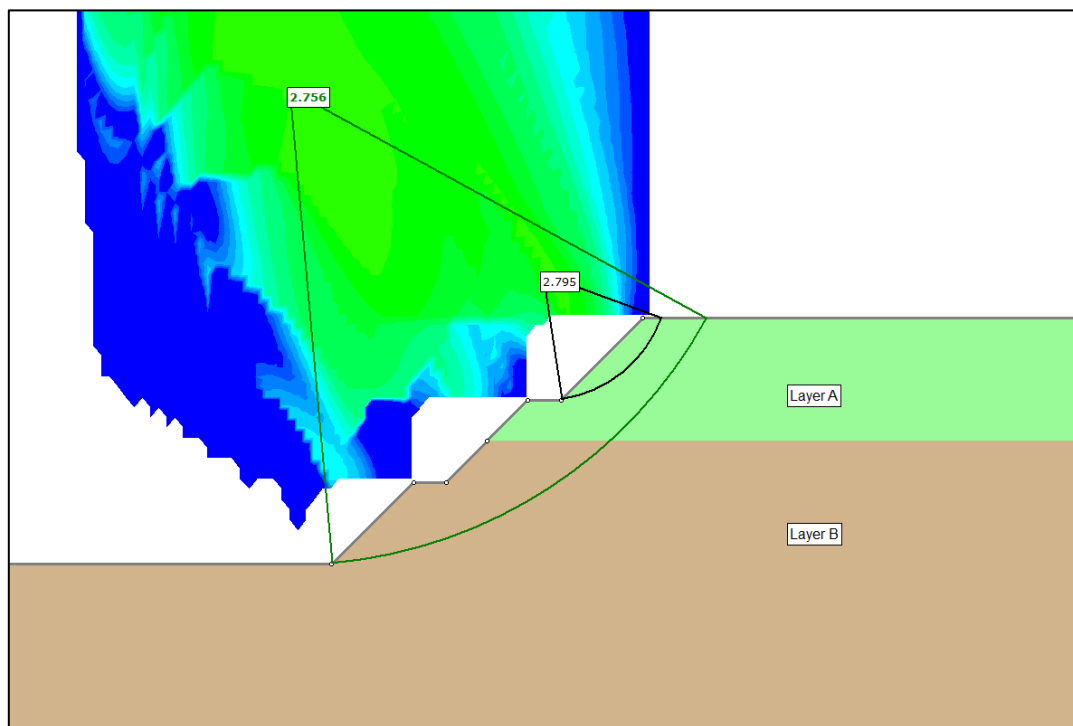


Εικόνα 64: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο του Ιλυολίθου του Φλύσχη.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Όσον αφορά τις αναλύσεις στους υπόλοιπους λιθολογικούς τύπους του Φλύσχη, οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας είναι υψηλοί με $SF > 2,5$ και συνεπώς προκύπτει το βασικό συμπέρασμα πως σε αυτούς τους λιθολογικούς τύπους του Φλύσχη, δεν αποτελεί κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας η περιστροφική ολίσθηση, αλλά οι δομητικού τύπου αστοχίες λόγω ασυνεχειών, όπως σφηνοειδείς ολισθήσεις, επίπεδες ολισθήσεις κλπ.

Επίσης από τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι για τη περίπτωση των εναλλαγών Ψαμμίτη και Ιλυολίθου του Φλύσχη σε ίσες αναλογίες, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη Εικόνα 65, διαπιστώθηκε ότι ο κρίσιμος συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης (SF) αφορά το συνολικό όρυγμα, ενώ ο συντελεστής για το ανώτερο τμήμα του ορύγματος που αφορά την ασθενή βραχώδη στρώση (Layer A), είναι υψηλότερος.



Εικόνα 65: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο των εναλλαγών Ψαμμίτη και Ιλυολίθου του Φλύσχη, σε ίσες αναλογίες.

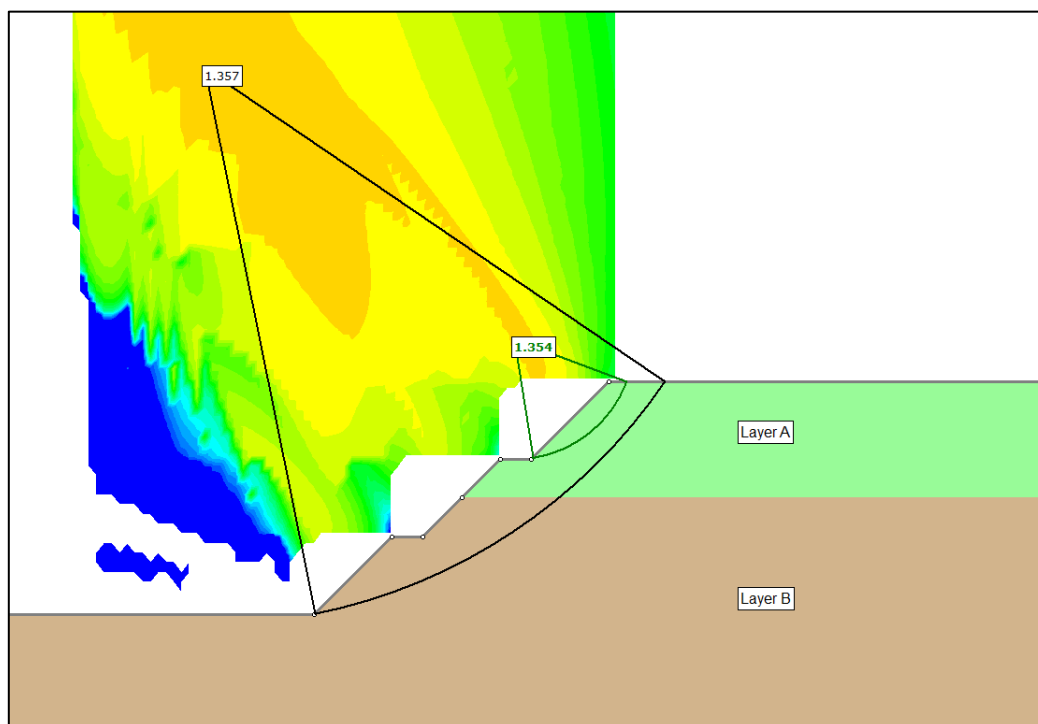
7.2.2. ΜΟΛΑΣΣΑ

Στον ακόλουθο Πίνακα 38, παρουσιάζονται οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας (SF) για καθεστώς στατικής φόρτισης και με εφαρμογή της μεθόδου Bishop, για το γεωλογικό σχηματισμό της Μολάσσας, ανά λιθολογικό τύπο.

Πίνακας 38: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό της Μολάσας.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	Συντελεστής ασφαλείας (SF)	Ru (Στρώση A)	Ru (Στρώση B)
Μολάσσα	Ιλυόλιθος	1,35	0.13	0.22
	Ψαμμίτης	4,62	0.09	0.22
	Κροκαλοπαγές	3,85	0.09	0.22
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	2,64	0.13	0.22

Με βάση το προηγούμενο Πίνακα 38, παρατηρείται ότι σε κανένα λιθολογικό τύπο της Μολάσας, δεν υπάρχει ολίσθηση πρανούς, δεδομένου ότι έχουμε $SF > 1$. Όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη Εικόνα 66, ο κρίσιμος συντελεστής ασφαλείας (SF) καταγράφεται στο ανώτερο πρανές με τη ασθενή στρώση (Layer A) για τον λιθολογικό τύπο του Ιλυολίθου της Μολάσας, όπου έχει ληφθεί υπόψιν συντελεστής υπερπίεσης πόρων $Ru = 0.13$ ή συντελεστής υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-6}$ m/sec, ενώ για το συνολικό όρυγμα προκύπτει περίπου ίσος συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης με αυτόν που είναι κρίσιμος και αφορά τον ανώτερο αναβαθμό, με τιμή $SF = 1.357$.

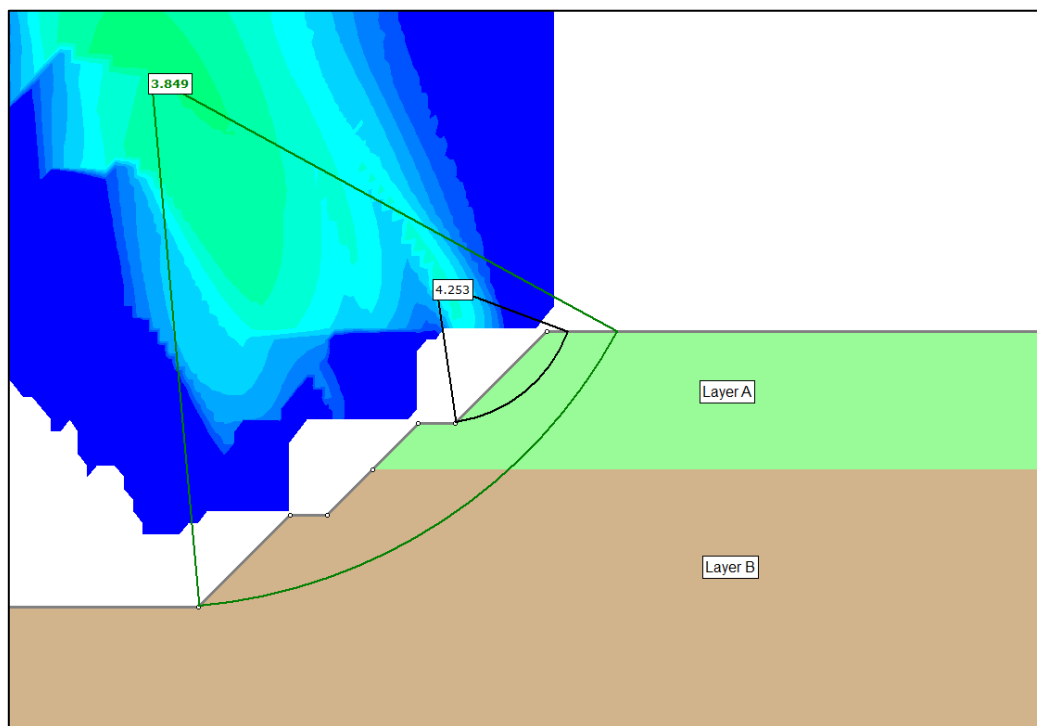


Εικόνα 66: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο του Ιλυολίθου της Μολάσας.

Επιπρόσθετα, από τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι σε όλους τους λιθολογικούς τύπους της Μολάσας, πέραν από αυτόν του Ιλυολίθου, ο κρίσιμότερος συντελεστής ασφαλείας (SF), αφορά το σύνολο του ορύγματος και όχι την ανώτερη ασθενή βραχώδη στρώση (Layer A). Ενδεικτικά στην ακόλουθη Εικόνα 67, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ανάλυσης για τον λιθολογικό τύπο του

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Κροκαλοπαγούς της Μολάσσας, όπου ο κρισιμότερος κύκλος ολίσθησης, τέμνει το σύνολο του ορύγματος. Για τον λιθολογικό τύπο του Ιλυολίθου της Μολάσσας, μελετήθηκε και η περίπτωση ενός αποσαθρωμένου Ιλυολίθου, όπου στην ασθενή στρώση (Layer A) λήφθηκαν τιμές UCS= 1MPa, GSI= 15 και Ru=0.2 ή συντελεστής υδατοπερατότητας $k= 1 \times 10^{-8}$ m/sec. Ο συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε είναι SF=0.64 που υποδηλώνει ότι έχουμε στην περίπτωση αυτή ολίσθηση πρανούς.



Εικόνα 67: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπο του Κροκαλοπαγούς της Μολάσσας.

Στους λιθολογικούς τύπους της Μολάσσας, όπου οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας είναι υψηλοί με $SF > 2,5$ (πέραν του Ιλυολίθου), προκύπτει το βασικό συμπέρασμα πως σε αυτούς τους λιθολογικούς τύπους της Μολάσσας, δεν αποτελεί κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας η περιστροφική ολίσθηση, αλλά οι δομητικού τύπου αστοχίες λόγω ασυνεχειών, όπως σφηνοειδείς ολισθήσεις, επίπεδες ολισθήσεις κλπ.

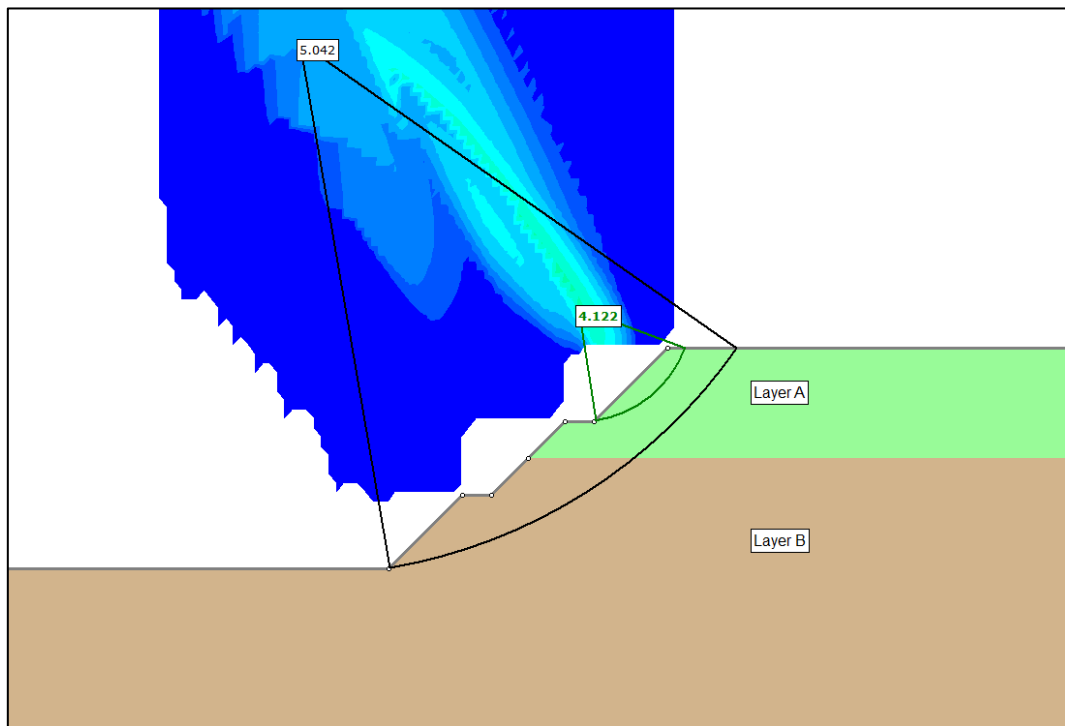
7.2.3. ΓΝΕΥΣΙΟΣ

Στον ακόλουθο Πίνακα 39, παρουσιάζεται ο επιτευχθέν συντελεστής ασφαλείας (SF) για καθεστώς στατικής φόρτισης και με εφαρμογή της μεθόδου Bishop, για το γεωλογικό σχηματισμό του Γνευσίου, ανά λιθολογικό τύπο.

Πίνακας 39: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό του Γνευσίου.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	Συντελεστής ασφαλείας (SF)	Ru (Στρώση A)	Ru (Στρώση B)
Γνεύσιος	Γνεύσιος	4,12	0.05	0.18

Με βάση το προηγούμενο Πίνακα 39, παρατηρείται ότι για το λιθολογικό τύπο του Γνευσίου, δεν υπάρχει ολίσθηση πρηνούς, δεδομένου ότι έχουμε $SF > 1$. Όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη Εικόνα 68, ο κρίσιμος συντελεστής ασφαλείας (SF) καταγράφεται στο ανώτερο πρηνές με τη ασθενή στρώση (Layer A), όπου έχει ληφθεί υπόψιν συντελεστής υπερπίεσης πόρων $Ru = 0.05$ ή συντελεστής υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-4}$ m/sec, ενώ για το συνολικό όρυγμα προκύπτει εξίσου πολύ υψηλός συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης, με $SF = 5.042$.



Εικόνα 68: Ανάλυση ευστάθειας στο σχηματισμό του Γνευσίου.

Όσον αφορά τον επιτευχθέντα συντελεστή ασφαλείας, είναι υψηλός, $SF > 4$ και συνεπώς προκύπτει το βασικό συμπέρασμα πως στο λιθολογικό τύπο του Γνευσίου, δεν αποτελεί κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας η περιστροφική ολίσθηση, αλλά οι δομητικού τύπου αστοχίες λόγω ασυνεχειών, όπως σφηνοειδείς ολισθήσεις, επίπεδες ολισθήσεις κλπ. Πραγματοποιήθηκε επίσης και μία ανάλυση για την περίπτωση ενός πολύ αποσαθρωμένου Γνευσίου, όπου στην ασθενή στρώση (Layer A) λήφθηκαν τιμές $GSI=20$, $UCS=5\text{MPa}$ και $Ru=0.20$ ή συντελεστής υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-8}$ m/sec. Ο συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε είναι $SF=1.87$ και καταγράφεται στον ανώτερο αναβαθμό του πρηνούς.

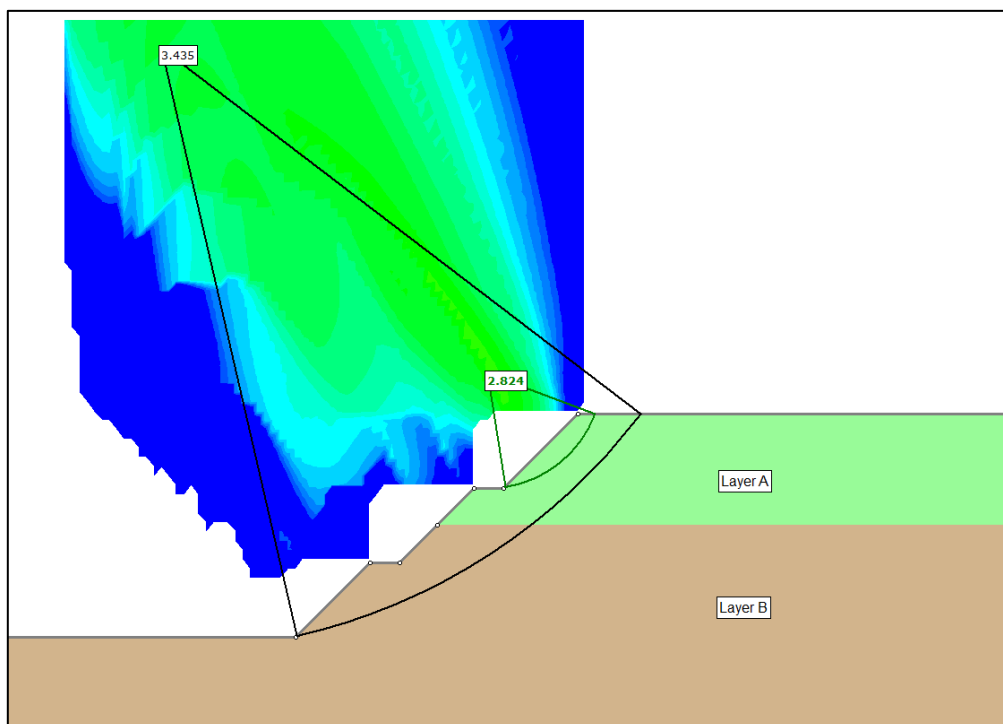
7.2.4. ΟΦΙΟΛΙΘΟΣ

Στον ακόλουθο Πίνακα 40, παρουσιάζονται οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας (SF) για καθεστώς στατικής φόρτισης και με εφαρμογή της μεθόδου Bishop, για το γεωλογικό σχηματισμό του Οφιολίθου, ανά λιθολογικό τύπο.

Πίνακας 40: Αποτελέσματα αναλύσεων για το σχηματισμό του Οφιολίθου.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	Συντελεστής ασφαλείας (SF)	Ru (Στρώση A)	Ru (Στρώση B)
Οφιολίθος	Σερπεντίνης	2,82	0.13	0.18
	Περιδοτίτης	8,98	0.09	0.18
	Γάββρος	6,87	0.13	0.18

Με βάση το προηγούμενο Πίνακα 40, παρατηρείται ότι σε κανένα λιθολογικό τύπο του Οφιολίθου, δεν υπάρχει ολίσθηση πρηνούς, δεδομένου ότι έχουμε $SF > 1$. Όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη Εικόνα 69, ο κρίσιμος συντελεστής ασφαλείας (SF) καταγράφεται στο ανώτερο πρηνές με τη ασθενή στρώση (Layer A) για το λιθολογικό τύπο του Σερπεντίνη, όπου έχει ληφθεί υπόψιν συντελεστής υπερπίεσης πόρων $Ru = 0.13$ ή συντελεστής υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-6}$ m/sec, ενώ για το συνολικό όρυγμα προκύπτει εξίσου υψηλός συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης, με $SF = 3.435$.



Εικόνα 69: Ανάλυση ευστάθειας στο λιθολογικό τύπου του Σερπεντίνη του σχηματισμού του Οφιολίθου.

Οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας είναι υψηλοί με $SF > 2,8$ και συνεπώς προκύπτει το βασικό συμπέρασμα πως σε αυτούς τους λιθολογικούς τύπους του Οφιολίθου, δεν αποτελεί κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας η περιστροφική ολίσθηση, αλλά οι δομητικού τύπου αστοχίες λόγω ασυνεχειών, όπως σφηνοειδείς ολισθήσεις, επίπεδες ολισθήσεις κλπ. Πραγματοποιήθηκε επίσης και μία ανάλυση για την περίπτωση ενός φυλλοποιημένου Σερπεντίνη, όπου στην ασθενή στρώση (Layer A) λήφθηκαν τιμές $GSI=15$, $UCS=10$ MPa και $Ru=0.20$ ή συντελεστής υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-8}$ m/sec. Ο

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε είναι $SF=1.67$ και καταγράφεται στον ανώτερο αναβαθμό του πρσανούς.

7.3. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Στα πλαίσια διερεύνησης της επίδρασης του συντελεστή υδατοπερατότητας (k), ως προς την ευστάθεια των βραχωδών πρσανών, εξετάζεται η επίδραση που θα έχει η κατασκευή μέτρων αποστράγγισης υπό τη μορφή αποστραγγιστικών οπών, με σκοπό να ταπεινωθεί η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και έτσι να μειωθεί σημαντικά η πίεση πόρων (u), εντός του πρσανούς.

Για τις αναλύσεις στη παρούσα εργασία, γίνεται η θεώρηση ότι με τη κατασκευή των αποστραγγιστικών οπών, θα μειωθεί στο μισό ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (R_u), δηλαδή $0.5 \times R_u$. Οι αναλύσεις που επιλέγονται να αναλυθούν εκ νέου, με τη θεώρηση εφαρμογής μέτρων αποστράγγισης, είναι αυτές στις οποίες με βάση το Κεφάλαιο 7.2, επετεύχθη συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης, $SF < 3$, και οι περιπτώσεις του αποσαθρωμένου Ιλυολίθου της Μολάσσας, του αποσαθρωμένου Γνευσίου και του φυλλοποιημένου Σερπεντίνης του Οφιολίθου. Να σημειωθεί ότι λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της αποστράγγισης στο σύνολο του ορύγματος, δηλαδή στις στρώσεις Α και Β. Οι αναλύσεις που επιλέγονται για αναλύσεις με εφαρμογή μέτρων αποστράγγισης, παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 41.

Πίνακας 41: Αναλύσεις ευστάθειας με εφαρμογή μέτρων αποστράγγισης.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	Ru (χωρίς αποστράγγιση)		Ru (με αποστράγγιση)	
		0m – 15m	> 15m	0m – 15m	> 15m
Φλύσχος	Ιλυόλιθος	0.18	0.30	0.09	0.15
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	0.13	0.22	0.07	0.11
Μολάσσα	Ιλυόλιθος	0.13	0.22	0.07	0.11
	Αποσαθρωμένος Ιλυόλιθος	0.20	0.22	0.10	0.11
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	0.13	0.22	0.07	0.11
Γνεύσιος	Αποσαθρωμένος Γνεύσιος	0.20	0.22	0.10	0.11
Οφιόλιθος	Σερπεντίνης	0.13	0.18	0.07	0.09
	Φυλλοποιημένος Σερπεντίνης	0.20	0.22	0.10	0.11

7.3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, ένας από τους πιο επιδραστικούς παράγοντες στην ευστάθεια των πρανών είναι η παρουσία του νερού. Η πίεση που ασκεί το νερό στο εδαφικό υλικό μειώνει τη διατμητική αντοχή του, αυξάνοντας τις πιέσεις των πόρων στην περίπτωση της υπόγειας ροής.

Οι αποστραγγίσεις εδαφών γίνονται, στα πλαίσια βελτίωσης των συνθηκών θεμελίωσης των κατασκευών και διατήρησης της ευστάθειας των πρανών. Σε όλες τις περιπτώσεις, η ενδεχόμενη παρουσία υπόγειου νερού εγκυμονεί κινδύνους και επομένως απαιτείται ο υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου νερού κάτω από το επίπεδο της προβλεπόμενης εκσκαφής. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζονται καλύτερες συνθήκες ευστάθειας για τα πρανή της εκσκαφής. Συνέπεια των αποστραγγίσεων είναι η εμφάνιση ενδεχόμενα καθιζήσεων.

Ο υποβιβασμός της υπόγειας στάθμης συμβάλει με επιτυχία στην αύξηση του φαινομένου βάρους του εδάφους, προκαλεί μείωση της δύναμης της άνωσης και τη στερεοποίηση, τόσο του αποστραγγιζόμενου εδαφικού στρώματος, όσο και του υποκειμένου, το οποίο φέρει το πρόσθετο φορτίο, που οφείλεται στην αποστράγγιση του υπερκειμένου. Θεωρείται αυτονόητο ότι η επιλογή και εφαρμογή ενός συστήματος εδαφικής αποστράγγισης θα πρέπει να ξεκινά από τη σωστή εικόνα των μεταβολών του εδάφους με το βάθος και τη μεταβολή των υδραυλικών του παραμέτρων.

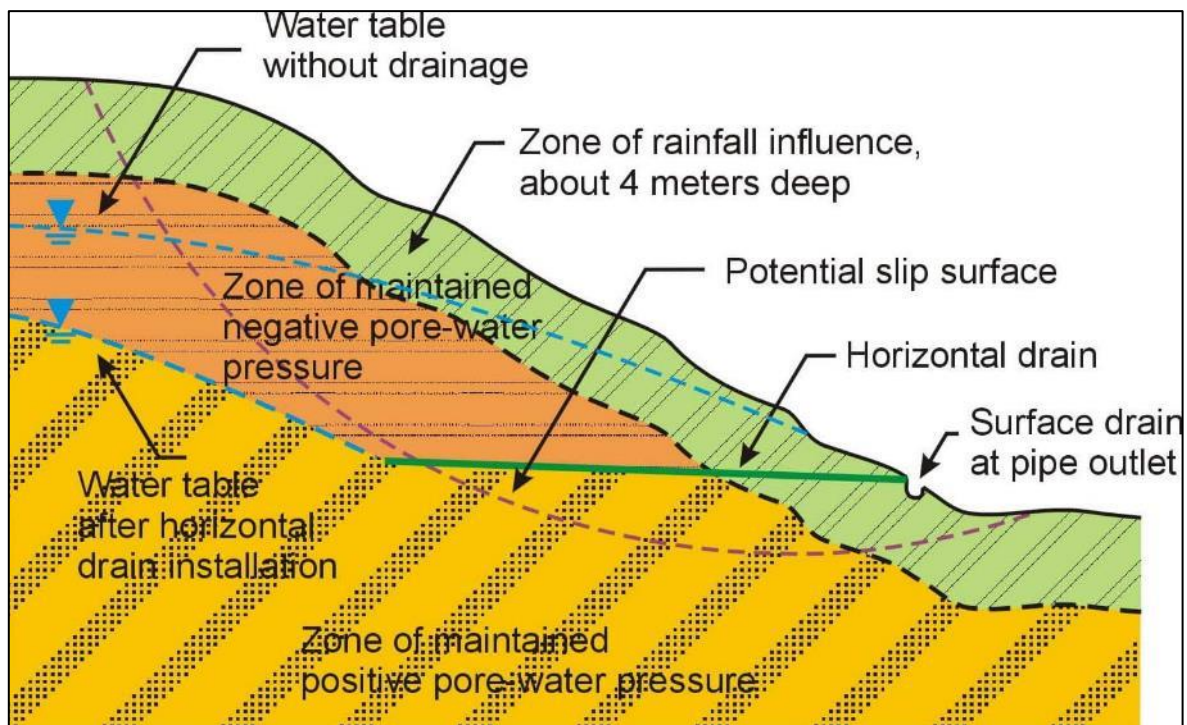
Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποστράγγισης πρέπει να βασίζεται σε μια σειρά από συνθήκες και κριτήρια, που σε γενική επισκόπηση, είναι τα εξής (Τζαρούχη, Σ. (2013)):

1. Γεωλογικές και εδαφικές συνθήκες του κυρίου και του περιβάλλοντος χώρου.
2. Προβλεπόμενες διαστάσεις και βάθος εκσκαφής.
3. Απαιτούμενος χρόνος για αποστράγγιση.
4. Τιμές του συντελεστή περατότητας και μεταβολές του κατά την κατακόρυφο.
5. Εδαφικό προφίλ και πάχος του περατού στρώματος που θα αποστραγγιστεί.
6. Είδος υδροφορίας και αναμενόμενες μέγιστες πιέσεις στον πυθμένα της εκσκαφής.
7. Εποχιακές μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα.
8. Ενδεχομένη παρουσία γειτονικού ποταμού που επηρεάζει το σύστημα.
9. Επιτρεπόμενη μορφή υδροφόρου ορίζοντα και πιέσεων στη διάρκεια της εκσκαφής.
10. Επιπτώσεις του υποβιβασμού του υδροφόρου ορίζοντα σε γειτονικές κατασκευές.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

11. Προστασία από κατάκλιση στη διάρκεια της εκσκαφής.
12. Τεχνικές δυνατότητες.
13. Χημισμός και θερμοκρασία του υπόγειου νερού.

Στα κορεσμένα εδάφη, το νερό των κενών παραλαμβάνει σημαντικό μέρος των ολικών τάσεων σ , με συνέπεια να αναπτύσσονται προς όλες τις διευθύνσεις, ουδέτερες τάσεις ή πιέσεις του νερού των πόρων, τάσεις u . Το υπόλοιπο των ασκούμενων τάσεων παραλαμβάνεται από το στερεό σκελετό, δηλαδή την ενεργό ορθή τάση σ' δια μέσου των σημείων επαφής των στερεών κόκκων, οπότε $\sigma' = \sigma - u$. Οπότε με οποιαδήποτε αύξηση των υδροστατικών πιέσεων μειώνεται η διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού. Συμπεραίνουμε έτσι ότι η αποστράγγιση αυτών των περιοχών αποτελεί την καταλληλότερη λύση για την ανάσχεση των κατολισθητικών φαινομένων. Στην ακόλουθη Εικόνα 70 απεικονίζεται η θετική επίδραση της αποστράγγισης στην ευστάθεια των πρανών.



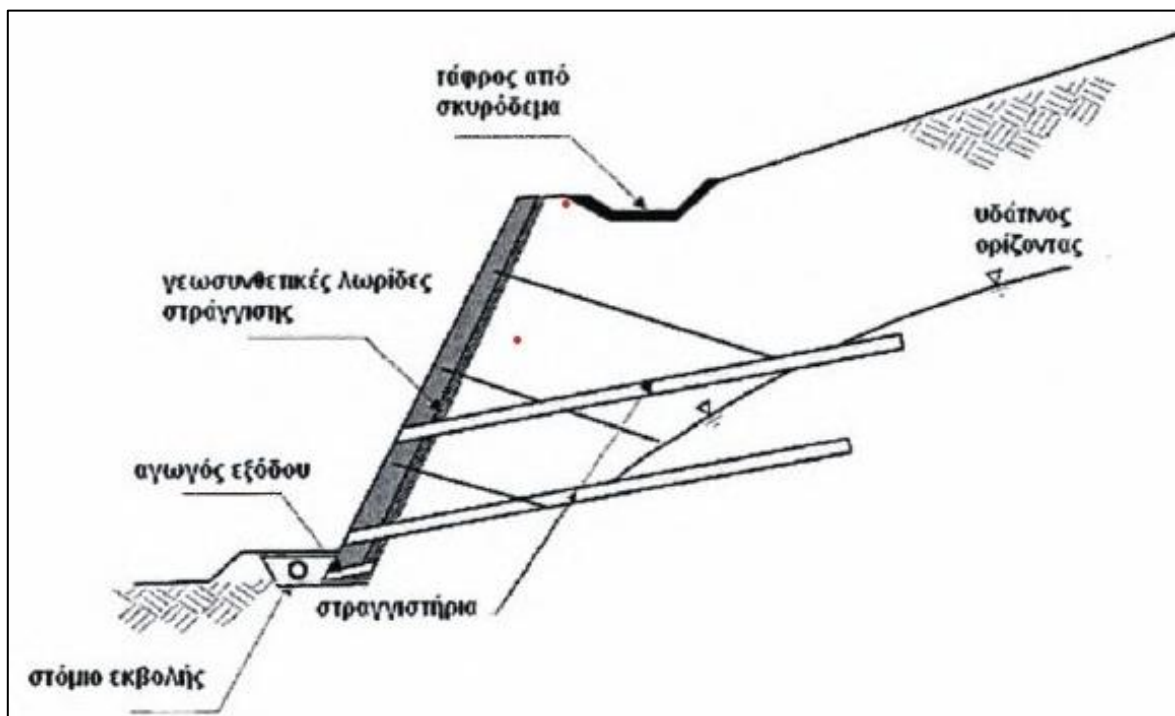
Εικόνα 70: Επίδραση των αποστραγγιστικών οπών (*horizontal drain*) στη μεταβολή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (Rahardjo & Leong, 2002).

Όταν είναι απαραίτητη η αποστράγγιση του εδάφους (ιδίως στα λεπτόκοκκα εδάφη) αυτή πραγματοποιείται με ελαφρώς κεκλιμένα στραγγιστήρια (Εικόνα 71), δηλαδή διατρήματα εξοπλισμένα με στραγγιστικούς σωλήνες, που καλύπτονται με ένα γεωύφασμα το οποίο πληροί τις συνθήκες διήθησης. Η μελέτη της διάταξης αποστράγγισης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του έργου η πρόσβαση στο στραγγιστήριο προς επιθεώρηση και επισκευή του. Το μήκος και η πυκνότητα των στραγγιστηρίων καθορίζονται αναλόγως των γεωτεχνικών δεδομένων. Οι επιλογές που πραγματοποιούνται πρέπει να επαληθεύονται ή να

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

διορθώνονται κατά τη διάρκεια της προόδου των έργων με βάση την παρακολούθηση της εξέλιξης των πιέσεων πόρων. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως η κατασκευαστική αλληλουχία και η θέση των στραγγιστηρίων πρέπει να καθορισθούν έτσι ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο ο κίνδυνος εμφραξης των στοιχείων αποστράγγισης και των στομιών εκβολής από το ένεμα που χρησιμοποιείται για την ενεμάτωση των ήλων.

Η προστασία της επιφάνειας στην κεφαλή του έργου επιτυγχάνεται με την κατασκευή τάφρων ανάντη της επένδυσης παρειάς και δίπλα της. Η αποτελεσματικότητά τους σε διάρκεια χρόνου εξαρτάται από την κλίση της μηκοτομής τους και από τη συντήρησή τους. Για να αποφευχθεί η δημιουργία πιέσεων πόρων στο έδαφος είναι γενικά προτιμότερο να επιλέγονται τάφροι με έντονη κλίση (γεγονός που θα προκαλέσει τον πολλαπλασιασμό των αναβαθμών), εξοπλισμένες με εύκαμπτη πορώδη προστασία κατά της διάβρωσης, αντί για τάφρους σκυροδετημένες οι οποίες παρακάμπτονται πολύ εύκολα από τις επιφανειακές ροές των υδάτων μόλις εμφανιστεί οποιαδήποτε τοπική παραμόρφωση στο εκ σκυροδέματος σώμα τους.



Εικόνα 71: Εσωτερική αποστράγγιση με τη χρήση στραγγιστηρίων.

7.3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στον ακόλουθο Πίνακα 42, παρουσιάζονται οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας (SF), για τις αναλύσεις που γίνεται θεώρηση εφαρμογής μέτρων αποστράγγισης, βάσει των θεωρήσεων στην τιμή του συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u), όπως έχει περιγράψει στον Πίνακα 41.

Πίνακας 42: Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας με εφαρμογή μέτρων αποστράγγισης.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	SF		Διαφορά
		Χωρίς αποστράγγιση	Με αποστράγγιση	
Φλύσχη	Ιλυόλιθος	0.90	1.02	13.3%
	Εναλλαγές Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	2.76	2.99	8.3%
Μολάσσα	Ιλυόλιθος	1.35	1.46	8.1%
	Αποσαθρωμένος Ιλυόλιθος	0.64	0.73	14.1%
	Εναλλαγές Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	2.65	2.94	10.9%
Γνεύσιος	Αποσαθρωμένος Γνεύσιος	1.87	2.17	16%
Οφιόλιθος	Σερπεντίνης	2,82	3,04	7.8%
	Φυλλοποιημένος Σερπεντίνης	1.67	1.94	16.2%
Μέση τιμή				11.8%

Με βάση τον προηγούμενο Πίνακα 42, είναι σαφές ότι η εφαρμογή των μέτρων αποστράγγισης είναι ευεργετική ως προς την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης (SF) στην ευστάθεια των πρानών, καθώς επετεύχθη μια αύξηση του συντελεστή ασφαλείας (SF), περί το 12%.

Η αύξηση αυτή είναι μεγάλη (~13%) στον Ιλυόλιθο του Φλύσχη, όπου ως λεπτόκοκκος σχηματισμός με πολύ μικρή τιμή υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-10}$ m/sec, τώρα με την εφαρμογή αποστράγγισης, εξασφαλίστηκε σταθερότητα του πρानού, έστω και οριακή, καθώς SF= 1.02. Για να εξασφαλιστεί περαιτέρω αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης (SF), θα πρέπει για τη συγκεκριμένη περίπτωση (Ιλυόλιθος του Φλύσχη), όπου χαρακτηρίζεται από πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, να γίνει εκσκαφή με ηπιότερες κλίσεις 2:3 (κ:ο) ή 34°, ώστε να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας. Με κλίση πρानών 2:3 (κ:ο) και θεώρηση αποστράγγισης, για το σχηματισμό του Ιλυόλιθου του Φλύσχη, ο συντελεστής ασφαλείας, διαμορφώνεται σε SF= 1.37, δηλαδή αύξηση 52.5%, σε σχέση με την αρχική κατάσταση και χωρίς αποστράγγιση. Συνεπώς, για αυτές τις περιπτώσεις όπου ναι μεν υπάρχουν ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά και αφετέρου μικρές τιμές υδατοπερατότητας (k), προτείνεται να εφαρμόζονται ηπιότερες κλίσεις πρανών και εφαρμογή μέτρων αποστράγγισης, όπου θα συμβάλουν σημαντικά στην αύξηση του συντελεστή ασφαλείας (SF).

Όσον αφορά τον αποσαθρωμένο Ιλυόλιθο της Μολάσσας, παρατηρείται αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης (SF), όμως εξακολουθεί να προκύπτει SF<1 που υποδηλώνει ότι υπάρχει

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

ολίσθηση πρανούς, λόγω των πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών. Με ηπιότερη κλίση πρανών και θεώρηση αποστράγγισης για τον αποσαθρωμένο Ιλυόλιθο της Μολάσσας, ο συντελεστής ασφαλείας διαμορφώνεται οριακά σε $SF=1.11$.

Σημαντική βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας παρατηρείται και στις περιπτώσεις αποσαθρωμένου Γνευσίου και Φυλλοποιημένου Σερπεντίνη του Οφιολίθου.

Επίσης, από το σύνολο των αναλύσεων διαπιστώθηκε ότι δεν μεταβάλλεται η θέση του κρίσιμου κύκλου ολίσθησης με την εφαρμογή ή μη μέτρων αποστράγγισης, με την έννοια διέλευσης μόνο από τη μία στρώση ή από το σύνολο του ορύγματος.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της περατότητας τεσσάρων γεωλογικών περιβαλλόντων (φλύσχη, μολάσσας, γνεύσιου, οφιόλιθου) και η επίδρασή της στην ευστάθεια των πρανών. Ο προσδιορισμός της περατότητας, η οποία εκφράζεται μέσω του συντελεστή υδροπερατότητας, αποτελεί βασικό στοιχείο υπολογισμού που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση της ευστάθειας ενός πρανούς.

Για την εκπόνηση της εργασίας αξιολογήθηκε η βιβλιογραφία που αφορά την εκτίμηση της περατότητας από τις εργαστηριακές δοκιμές (σταθερού και μεταβλητού φορτίου), τις επί τόπου δοκιμές (Maag, Lefranc, Lugeon) και ο προσδιορισμός της μέσα από εμπειρικές σχέσεις (Hazen, Casagrande).

Έπειτα, από τα δεδομένα των επί τόπου δοκιμών περατότητας που πραγματοποιήθηκαν στους σχηματισμούς του φλύσχη, της μολάσσας, του γνευσίου και του οφιολίθου, έγιναν τα διαγράμματα συχνότητας εμφάνισης τιμών περατότητας και μεταβολής της περατότητας με το βάθος, καθώς και σε κάθε λιθολογικό τύπο κάθε σχηματισμού. Στον φλύσχη μελετήθηκαν: α) ιλυόλιθος, β) ψαμμίτης, γ) κροκαλοπαγές, δ) ιλυόλιθος-ψαμμίτης (50%-50%), ε) ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη, στ) ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου και ζ) κροκαλοπαγές με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη. Στη μολάσσα μελετήθηκαν: α) ιλυόλιθος, β) ψαμμίτης, γ) ιλυόλιθος-ψαμμίτης (50%-50%), δ) ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη, ε) ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου, στ) κροκαλοπαγές, ζ) ψαμμίτης με ενστρώσεις κροκαλοπαγούς και ιλυολίθου και η) κροκαλοπαγές με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη. Στον γνεύσιο μελετήθηκαν: α) γνεύσιος, β) γνεύσιος με μάρμαρο και γ) πηγματίτης. Στον οφιόλιθο μελετήθηκαν: α) σερπεντίνης, β) περιδοτίτης, γ) βασάλτης, δ) γάββρος και ε) οφιολιθικό σύμπλεγμα.

Στη συνέχεια, μέσω του λογισμικού Slide2 της εταιρείας Rocscience, έγιναν αναλύσεις ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο λωρίδων και ειδικότερα με την μέθοδο Bishop. Χρησιμοποιήθηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας (k), για κάθε γεωλογικό σχηματισμό (Φλύσχη, Μολάσσα, Γνεύσιο & Οφιόλιθο), οι οποίες μεταβάλλονται ανά λιθολογικό τύπο για κάθε γεωλογικό σχηματισμό, αλλά και με το βάθος ώστε να προκύψουν αντίστοιχες τιμές συντελεστή υπερπίεσης πόρων (R_u). Η τιμή R_u είναι ο λόγος της πίεσης πόρων-νερού προς την κανονική (ή υπερφορτωμένη) τάση, δηλαδή η χρήση της είναι μια έμμεση μέθοδος για να ληφθεί υπόψη η παρουσία νερού. Μέσω των αναλύσεων αυτών, έγινε έλεγχος της επίδρασης που θα έχει ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (R_u) των σχηματισμών αυτών στην ευστάθεια καθώς υψηλές τιμές ισοδυναμούν με χαμηλή περατότητα του σχηματισμού και συνεπώς «εγκλωβισμό» των υπόγειων υδάτων εντός αυτού, που θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής του

σχηματισμού. Από τις αναλύσεις προέκυψαν οι επιτευχθέντες συντελεστές ασφαλείας (SF) της ευστάθειας των πρανών και για περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του νερού στην ευστάθεια των πρανών εξετάστηκε η επίδραση της κατασκευής αποστραγγιστικών οπών και έγινε σύγκριση μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας πριν και μετά την αποστράγγιση.

Παρακάτω αναλύονται τα βασικά συμπεράσματα που διεξήχθησαν κατά το στάδιο εκπόνησης της εργασίας αυτής:

Είναι γνωστό ότι η υδροπερατότητα της βραχομάζας εξαρτάται κυρίως από την ύπαρξη ασυνεχειών ενώ αυτή που μετριέται στο ακέραιο πέτρωμα είναι η πρωτογενής υδροπερατότητα. Η παρουσία υπόγειου νερού επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, ιδίως σε βραχομάζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Αύξηση της πίεσης πόρων οδηγεί σε μείωση των ενεργών τάσεων και κατά συνέπεια και αντοχής. Καθοριστικό παράγοντα για την περατότητα των σχηματισμών θα παίξει το πρωτογενές πορώδες αυτών. Η παρουσία τεκτονικών δομών (ρήγματα, πτυχές, επωθήσεις κλπ.), επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα της βραχομάζας, όπου πλέον ο συμπαγής και άρρηκτος βράχος καταπονείται και μετατρέπεται σε μία κερματισμένη βραχομάζα με σημαντική παρουσία διακλάσεων. Η αύξηση του μεγέθους της καταπόνησης αυτής, οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κερματισμού της βραχομάζας με ταυτόχρονη μείωση του δείκτη RQD και πλέον το κερματισμένο υλικό λόγω των διακλάσεων θα αναπτύξει περατότητα, υπό τη μορφή δευτερογενούς περατότητας (περατότητα λόγω ρωγμάτωσης). Με βάση τα προαναφερθέντα, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι ο κερματισμός της βραχομάζας έχει σημαντική επιρροή στην περατότητα των βραχωδών σχηματισμών, καθώς σχηματισμοί που έχουν πολύ μικρή περατότητα, μπορεί λόγω του κερματισμού τους να αναπτύξουν περατότητα (δευτερογενές πορώδες). Επίσης η ανάπτυξη δευτερογενούς περατότητας σε αυτούς τους σχηματισμούς, θα έχει άμεση επιρροή στις παραμέτρους αντοχής της βραχομάζας, όπου η αύξηση της περατότητας θα τις υποβαθμίσει.

Η τεκτονική συνιστά ένα σημαντικό παράγοντα στον καθορισμό της τεχνικής (μηχανικής και υδραυλικής) συμπεριφοράς των γεωολικών. Από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς, η καταπόνηση, η θραύση, ο κερματισμός, κ.λπ. του πετρώματος υποβαθμίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας στη ζώνη επιρροής του επεισοδίου. Από την «καρδιά» του τεκτονικού επεισοδίου, όπου εμφανίζεται το ελάχιστο της μηχανικής συμπεριφοράς, αυτή βαίνει βελτιούμενη ένθεν και ένθεν του άξονα του τεκτονισμού, μέχρι την ανέπαφη συνέχεια του πετρώματος. Από πλευράς υδραυλικής συμπεριφοράς, η περατότητα αυξάνεται πρωτογενώς για τους ίδιους λόγους για τους οποίους μειώνεται η μηχανική συμπεριφορά. Δεν είναι, όμως, λίγες οι φορές που οι ζώνες αυτές αποκτούν μια δευτερογενή στεγανότητα λόγω πλήρους κονιοποίησης και αργιλοποίησης (μυλωνιτοποίησης) του υλικού. Η στεγανότητα αυτή μπορεί, τριτογενώς, να μετατραπεί σε

περατότητα μέσου ασυνεχειών, με τη δημιουργία εκλεκτικών οδών διακινήσεως του νερού, από τη δική του δράση.

Ο φλύσχη εμφανίζει στο σύνολό του χαμηλή διαπερατότητα και θεωρείται πρακτικά στεγανός σχηματισμός. Οι ρωγμές δεν είναι έντονες ούτε συνεχείς λόγω της παρουσίας πετρωμάτων με ιλυο-αργιλικό υλικό, είτε συνεχώς είτε με παρεμβολές. Η περατότητα πάντως εξαρτάται και από το αν επικρατούν οι ψαμμίτες, οπότε λόγω της ψαθυρής τους θραύσης οι ρωγμές είναι σημαντικότερες, όχι όμως όσο σε άλλα ανθεκτικότερα πετρώματα. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στη μολάσσα χαρακτηρίζονται από συνολική χαμηλή έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα, χαρακτηριστικό των ιλυολίθων που κυριαρχούν. Ο μανδύας αποσάθρωσης των γνευσίων και των γρανιτών παρουσιάζει κάποια διαπερατότητα όχι πάντως μεγάλη λόγω της παρουσίας αργιλικών υλικών. Επιτρέπει την διακίνηση μικρών μόνο ποσοτήτων νερού. Τα βασικά και υπερβασικά πετρώματα των οφιολίθων στην περίπτωση που είναι αδιατάρακτα παρουσιάζουν πολύ μικρή διαπερατότητα και πρακτικά μπορούν να χαρακτηρισθούν ως αδιαπέρατα.

Από τα διαγράμματα εμφάνισης συχνότητας τιμών περατότητας στους τέσσερις βραχώδεις σχηματισμούς α) φλύσχη, β) μολάσσας, γ) γνεύσιου και δ) οφιολίθου προέκυψαν διαγράμματα και αντίστοιχα συμπεράσματα σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης της περατότητας ανά σχηματισμό, ώστε να προκύψει η επικρατούσα περατότητα του κάθε σχηματισμού, και προκύπτει η μέση τιμή της περατότητας κάθε σχηματισμού.

Στο σχηματισμό του φλύσχη παρατηρήθηκε ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για τον φλύσχη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec. Επιπρόσθετα, προέκυψε το βασικό συμπέρασμα ότι η περατότητα (k) στο φλύσχη, κυμαίνεται από 10^{-5} έως 10^{-11} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-5} έως 10^{-8} m/sec.

Στο σχηματισμό της μολάσσας παρατηρήθηκε ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για τη μολάσσα, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec. Επιπρόσθετα, προέκυψε το βασικό συμπέρασμα ότι η περατότητα (k) στη μολάσσα, κυμαίνεται από 10^{-5} έως 10^{-11} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-6} έως 10^{-7} m/sec.

Η περατότητα (k) στο σχηματισμό του γνευσίου, κυμαίνεται από 10^{-2} έως 10^{-7} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-4} έως 10^{-7} m/sec. Επιπρόσθετα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επικρατούσα περατότητα (k) στο γνεύσιο, λόγω συχνότητας εμφάνισης είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Τέλος, στο σχηματισμό του οφιόλιθου προέκυψε ότι η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για τον οφιόλιθο, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec. Επιπρόσθετα, προέκυψε το βασικό συμπέρασμα ότι η περατότητα (k) στον οφιόλιθο, κυμαίνεται από 10^{-4} έως 10^{-11} m/sec, με τις επικρατούσες τιμές περατότητας που εμφανίζουν και μεγαλύτερη εμφάνιση, να περιορίζονται μεταξύ 10^{-5} έως 10^{-7} m/sec.

Συνεπώς, και οι 4 σχηματισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν ως σχηματισμοί χαμηλής υδατοπερατότητας.

Από τα διαγράμματα μεταβολής της περατότητας (k) σε κάθε σχηματισμό δεν ήταν σαφής η εικόνα της μεταβολής της περατότητας κάθε σχηματισμού με το βάθος. Παρατηρήθηκε ελάχιστη μείωση της περατότητας μετά από ένα ορισμένο βάθος σε κάθε σχηματισμό, στον φλύσχη από το βάθος των 200m, στη μολλάσσα από το βάθος των 60m, στον γνεύσιο από το βάθος των 30m και τέλος στον οφιόλιθο από το βάθος των 150m. Τα συμπεράσματα δεν είναι σαφή καθώς σε κάθε σχηματισμό δεν υπήρχαν πολλά στοιχεία από δεδομένα δοκιμών περατότητας μετά από αυτά τα βάθη αντίστοιχα για κάθε σχηματισμό. Επίσης, η ασάφεια στην αξιολόγηση κάθε σχηματισμού οφείλεται στο ότι οι αντίστοιχοι λιθότυποι και οι συνδυασμοί τους δημιουργούν διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες.

Λιθολογικοί Τύποι Φλύσχη

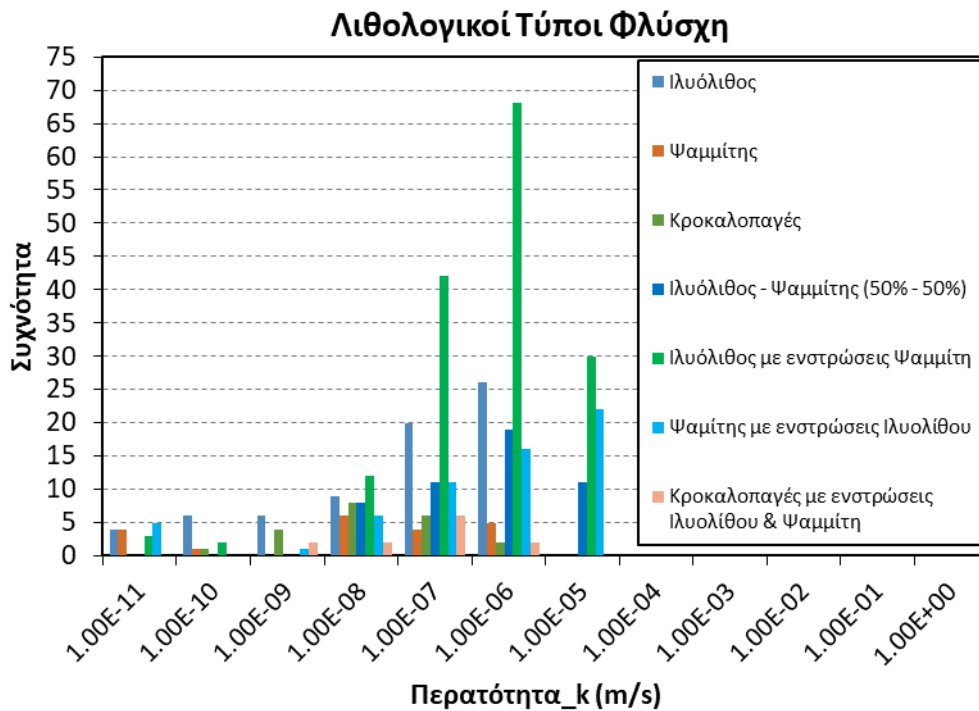
Από τα διαγράμματα μεταβολής της περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο του φλύσχη (ιλυόλιθος, ψαμμίτης, κροκαλοπαγές, εναλλαγές ιλυολίθου – ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες, ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου, ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη, κροκαλοπαγές με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη) παρατηρήθηκε πολύ μικρή μείωση της περατότητας με το βάθος. Στην περίπτωση του λιθολογικού τύπου του κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη δεν παρατηρήθηκε μεταβολή, η οποία όμως δεν μπορεί να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.

Όσον αφορά του διάφορους λιθολογικούς τύπους του φλύσχη που διερευνήθηκαν, ο ιλυόλιθος θεωρείται πρακτικά αδιαπέρατος με πολύ μικρές τιμές του συντελεστή περατότητας. Η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-6}$ έως 10^{-7} m/sec.

Οι μεσοστρωματώδεις-παχυστρωματώδεις ψαμμίτες ως σχηματισμός στην αδιατάρακτη του μορφή είναι πολύ μικρής περατότητας με συντελεστή κατείδυσης ($k \approx 10^{-7}$ m/sec). Στην κερματισμένη μορφή του είναι πιο υδροπερατός σχηματισμός με χαμηλή έως μέτρια συνήθως περατότητα ($10^{-7} < k < 10^{-5}$ m/sec). Στις εναλλαγές ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη, η κατείδυση, η αποθήκευση και η κυκλοφορία νερού είναι δυνατή μόνο στα μεμονωμένα ψαμμιτικά στρώματα του σχηματισμού ανάλογα με την ρωγμάτωση. Είναι όμως γενικά στεγανός σχηματισμός, με πολύ μικρό συντελεστή

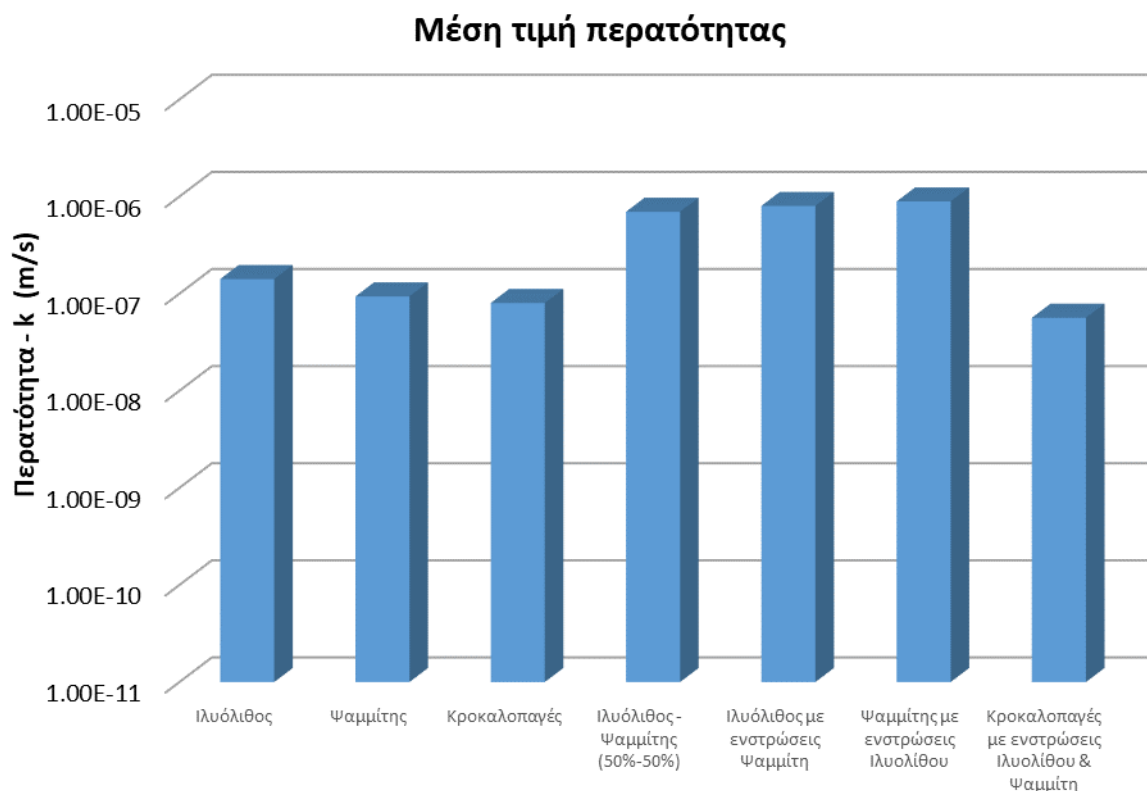
Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

κατείσδυσης, περιορισμένη ανάπτυξη, αποθηκευτικότητα και κυκλοφορία νερού λόγω των παρεμβαλλομένων στρωμάτων ιλυολίθου. Οι ψαμμίτες μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν μια μικρή περατότητα όταν είναι υγιείς εξαιτίας του δευτερογενούς πορώδους. Στην περίπτωση που είναι κερματισμένοι επιτρέπουν την κυκλοφορία ύδατος μέσω των ρωγμών. Η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο των εναλλαγών ιλυολίθου-ψαμμίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-7} m/sec.



Διάγραμμα 56: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 57 παρουσιάζεται και η μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.



Διάγραμμα 57: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο φλύσχη.

Λιθολογικοί Τύποι Μολάσσας

Από τα διαγράμματα μεταβολής της περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπου της μολάσσας (ιλυόλιθος, ψαμμίτης, εναλλαγές ιλυολίθου – ψαμμίτη σε ίσες αναλογίες, ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη, ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου, κροκαλοπαγές, ψαμμίτης με ενστρώσεις κροκαλοπαγούς και ιλυολίθου, κροκαλοπαγές με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη) σημειώθηκε μικρή μείωση της περατότητας με το βάθος της τάξης του 10^{-1} m/sec που δεν μπορεί να τεκμηριωθεί με σαφήνεια καθώς πιο βαθιά τα δεδομένα από δοκιμές ήταν λίγα. Για τον λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη με ενστρώσεις ιλυολίθου η περατότητα παρέμενε σταθερή με το βάθος, αυτό όμως δεν μπορεί να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων. Για τους λιθολογικούς τύπους ψαμμίτη με ενστρώσεις κροκαλοπαγούς και ιλυολίθου, κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου και ψαμμίτη τα αντίστοιχα δεδομένα ήταν πιο λίγα και δεν προέκυψαν σαφή συμπεράσματα.

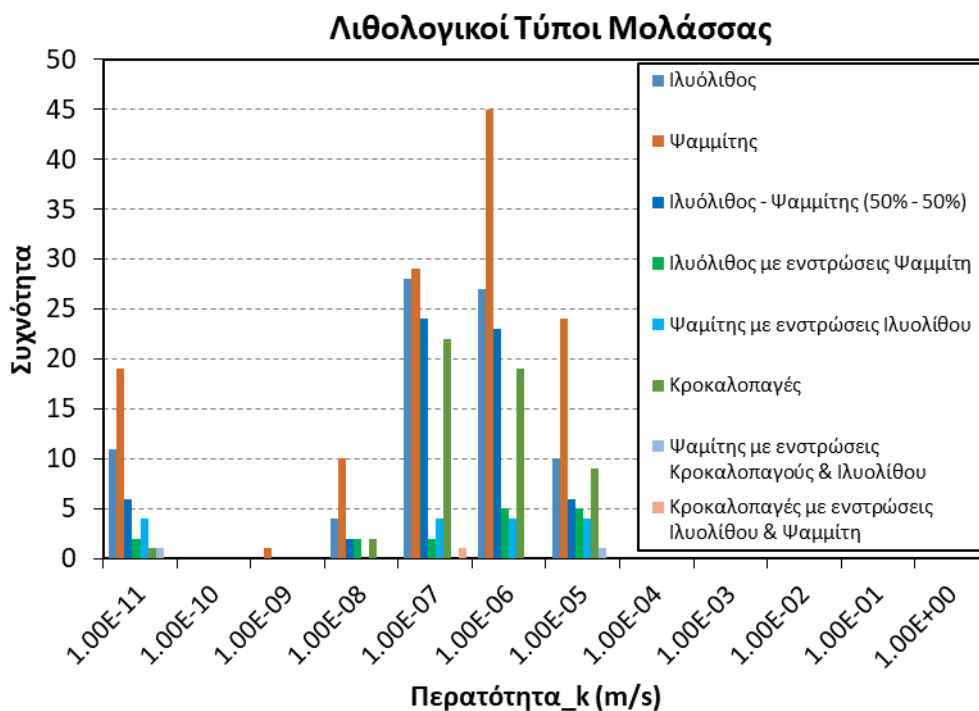
Όσον αφορά τους διάφορους λιθολογικούς τύπους της μολάσσας που διερευνήθηκαν, οι υδρογεωλογικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από συνολική χαμηλή έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα, χαρακτηριστικό των ιλυολίθων που κυριαρχούν. Το μικρό πορώδες και οι κλειστές ασυνέχειες που χαρακτηρίζουν συνήθως τους ιλυόλιθους δημιουργούν συνθήκες χαμηλής

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

υδροπερατότητας έως πρακτικά αδιαπερατής υδρογεωλογικής συμπεριφοράς. Πράγματι, η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ιλυολίθου, λόγω συχνότητας εμφάνισης, κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-6}$ έως 10^{-7} m/sec.

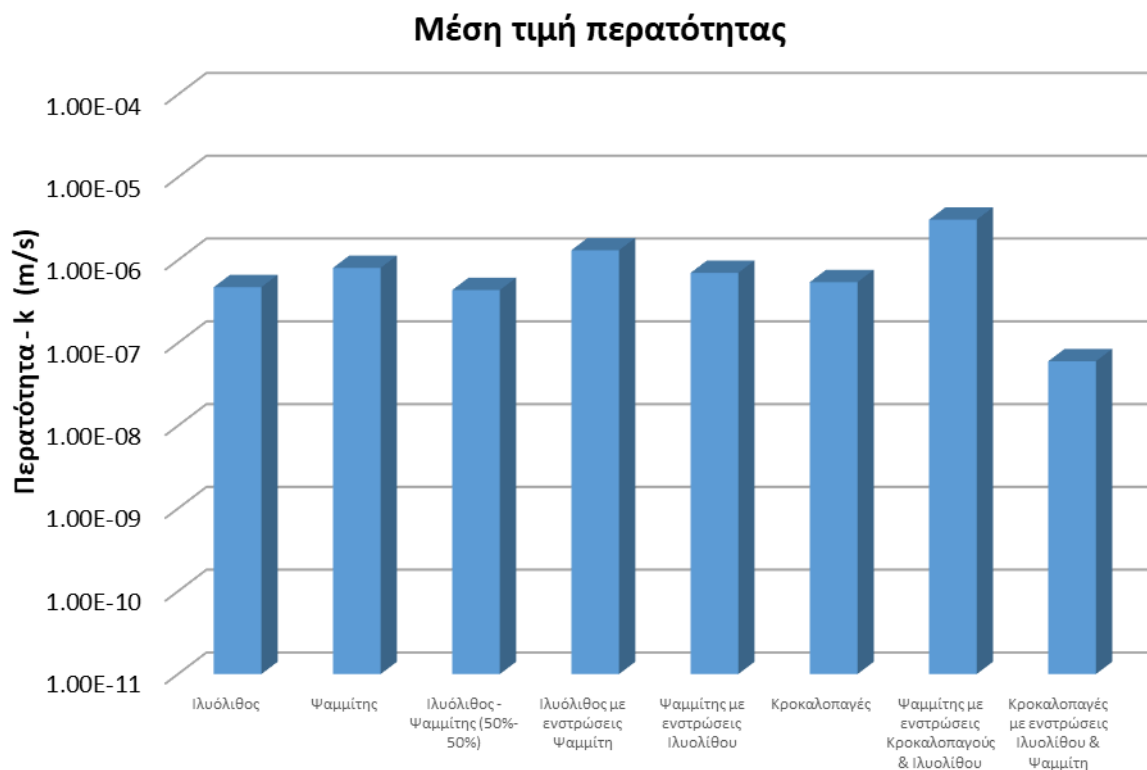
Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες κυρίως λόγω της παρουσίας περισσότερων ασυνεχειών με πιο ανοικτές διεπιφάνειες, κοντά στην επιφάνεια, παρουσιάζουν γενικά υψηλότερη υδροπερατότητα συγκριτικά με τους ιλυολίθους αλλά και αυτοί στο σύνολο, σε βάθος, έδειξαν από δοκιμές υδροπερατότητας ότι κυμαίνονται γενικά στην κατηγορία χαμηλής υδροπερατότητας. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χαρακτηριστική τιμή περατότητας (k) που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση για τον ψαμμίτη. Η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k) για το λιθολογικό τύπο του ψαμμίτη, λόγω συχνότητας εμφάνισης, είναι $k \approx 10^{-6}$ m/sec.

Η παρουσία των ιλυολίθων στο λιθότυπο ισομερών εναλλαγών ψαμμίτη-ιλυολίθου στη μολάσσα ελέγχει απολύτως την περατότητα του λιθότυπου αυτού. Η διαφορά μεταξύ ψαμμιτικού και ιλυολιθικού τύπου είναι ότι ο ψαμμιτικός έχει μεγαλύτερη περατότητα. Η παρουσία ιλυολίθων στο αδιατάραχτο μολασσικό περιβάλλον ελέγχει την περατότητα μικτών λιθότυπων που παρουσιάζουν εναλλαγές ιλυολίθων με ψαμμίτη. Ο ιλυολίθος δηλαδή «σκεπάζει» την όποια επίδραση του ψαμμίτη στην τελική περατότητα του συνόλου. Η περατότητα είναι αυξημένη μόνο στο επιφανειακό χαλαρωμένο ή ρωγματωμένο τμήμα τους. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χαρακτηριστική τιμή περατότητας (k) που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση μιας και η επικρατέστερη τιμή περατότητας (k), λόγω συχνότητας εμφάνισης, , κυμαίνεται μεταξύ $k \approx 10^{-5}$ έως 10^{-7} m/sec.



Διάγραμμα 58: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο μολάσσας.

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 59 παρουσιάζεται και η μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο μολάσσας.



Διάγραμμα 59: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο μολάσσας.

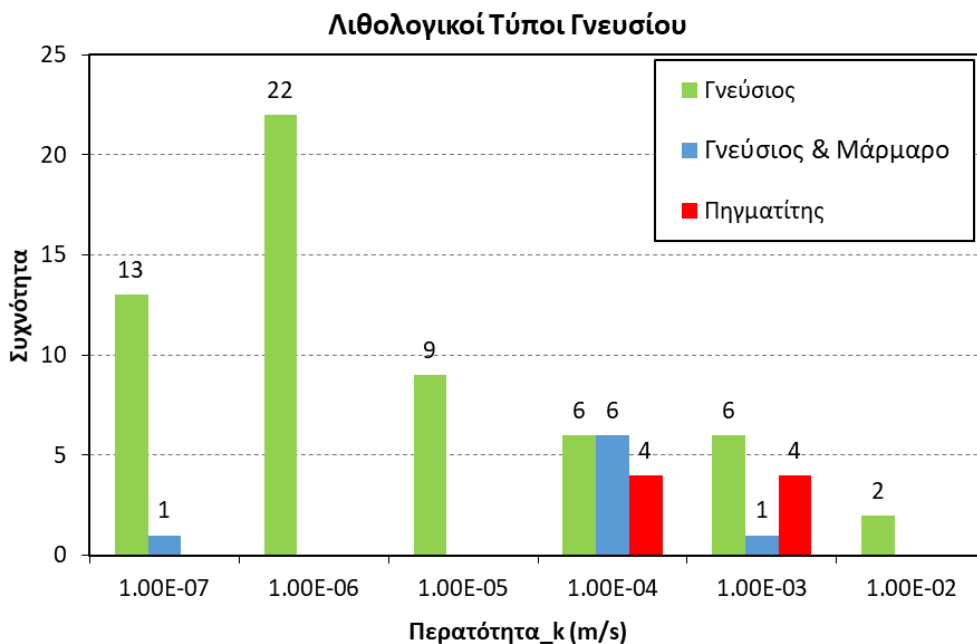
Λιθολογικοί Τύποι Γνευσίου

Από το διάγραμμα μεταβολής της περατότητας (k) στο λιθολογικό τύπο του γνευσίου παρατηρήθηκε μικρή μείωση της περατότητας με το βάθος της τάξης του 10^{-1} m/sec, που δεν μπορεί να τεκμηριωθεί σαφώς λόγω εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων πιο βαθιά. Στους λιθολογικούς τύπους γνευσίου & μαρμάρου και πηγματίτη η περατότητα παρέμενε σταθερή συμπεράσμα όμως που δεν μπορεί πλήρως να τεκμηριωθεί λόγω της εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων.

Όσον αφορά του διάφορους λιθολογικούς τύπους του γνευσίου που διερευνήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι η παρουσία μαρμάρου στο γνεύσιο, θα προκαλέσει αύξηση της περατότητας (k) του σχηματισμού, με χαρακτηριστική τιμή της τάξης των 10^{-4} m/sec, έναντι των 10^{-6} m/sec, τιμή που έχει οριστεί παραπάνω, ως χαρακτηριστική τιμή περατότητας για το γνεύσιο. Αυτό οφείλεται στη παρουσία του μαρμάρου, όπου παρουσιάζει καρστική διάβρωση και αυξάνει συνεπώς την περατότητα του σχηματισμού. Ίδια συμπεριφορά ως προς την αύξηση της περατότητας (k) του σχηματισμού, διαπιστώθηκε και στην εξέταση του πηγματίτη, με χαρακτηριστική τιμή της τάξης των 10^{-3} έως 10^{-4}

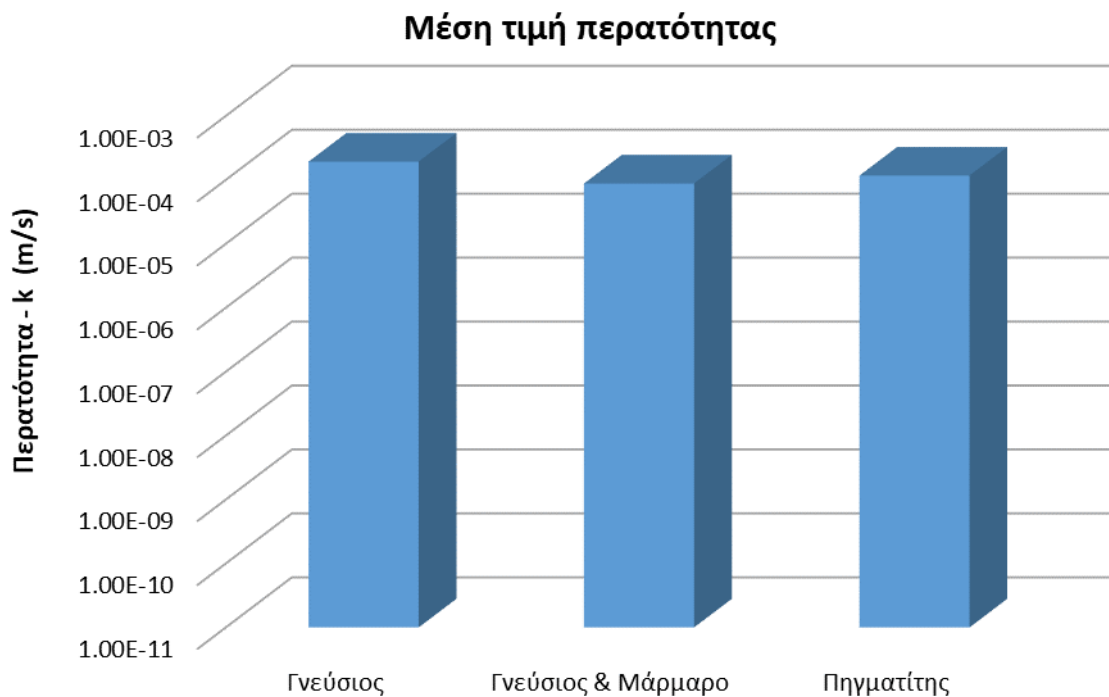
Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

m/sec , έναντι των $10^{-6} m/sec$, τιμή που έχει οριστεί παραπάνω, ως χαρακτηριστική τιμή περατότητας για το γνεύσιο.



Διάγραμμα 60: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 61 παρουσιάζεται και η μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.



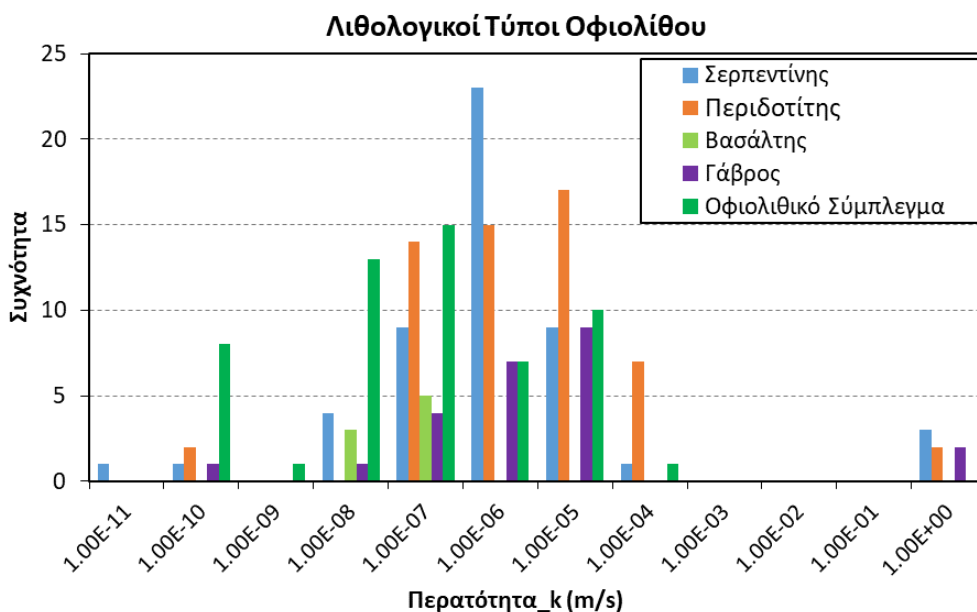
Διάγραμμα 61: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο γνευσίου.

Λιθολογικοί Τύποι Οφιολίθου

Από τα διαγράμματα μεταβολής της περατότητας (k) στους λιθολογικούς τύπου του σερπεντίνη και του περιδοτίτη παρατηρήθηκε μια μικρή μείωση ως προς το βάθος, που δεν μπορεί να τεκμηριωθεί σαφώς λόγω εξέτασης μικρού ποσοστού δεδομένων πιο βαθιά. Για τους λιθολογικούς τύπους του βασάλτη και του γάββρου η εξέταση μικρού ποσοστού δεδομένων δεν βοήθησε στο να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα. Για το λιθολογικού τύπου του οφιολιθικού συμπλέγματος που αποτελεί μια γενική αξιολόγηση καθώς πιθανόν να περιλαμβάνονται οι ανώτεροι λιθολογικοί τύποι, η περατότητα παρέμενε σταθερή με το βάθος.

Όσον αφορά του διάφορους λιθολογικούς τύπους του οφιολίθου που διερευνήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι στο οφιολιθικό σύμπλεγμα και στον περιδοτίτη, υπήρχαν τιμές περατότητας της τάξης του 10^{-5} m/sec, με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης. Στην περίπτωση εμφάνισης ασυνεχειών εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης και χαλάρωσης λόγω της επιφανειακής αποσάθρωσης στα ανώτερα στρώματά τους συναντάται κατά θέσεις αυξημένη διαπερατότητα, η οποία ελέγχεται από την ποιότητα και την κατάσταση των ασυνεχειών αυτών. Πάντως κοντά στην επιφάνεια που οι ασυνέχειες σε γενικές γραμμές είναι περισσότερες, αυτές παρουσιάζονται όμως συχνά πληρωμένες με τα αργιλικά υλικά της αποσάθρωσης. Η δευτερογενής αυτή πλήρωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας του μανδύα αποσάθρωσης. Οι ζώνες κερματισμού, εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης, λειτουργούν και ως ζώνες αποστράγγισης της επιφανειακώς αναπτυσσόμενη ασθενούς υδροφορίας και είναι πολύ πιθανό να φέρνουν υπόγεια νερά τοπικά και στο βάθος. Ο συντελεστής υδροπερατότητας (k) σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι της τάξης του 10^{-3} έως 10^{-5} m/sec.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων



Διάγραμμα 62: Συχνότητα εμφάνισης τιμών περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο οφιολίθου.

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 63 παρουσιάζεται η μέση τιμή περατότητας ανά λιθολογικό τύπο οφιολίθου.



Διάγραμμα 63: Μέση τιμή περατότητας (k) ανά λιθολογικό τύπο οφιολίθου..

Αναλύσεις Ευστάθειας σε τεχνητά ορύγματα

Από τις αναλύσεις ευστάθειας πρηνών υπό την επίδραση της περατότητας των σχηματισμών προέκυψαν για κάθε σχηματισμό, ανά λιθολογικό τύπο, ψηλοί συντελεστές ασφαλείας (>2.5).

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Εξάιρεση αποτέλεσαν ο λιθολογικός τύπος του ιλυολίθου του φλύσχη με επιτευχθέντα συντελεστή ασφαλείας 0,9 και ο λιθολογικός τύπος της μολάσσας με επιτευχθέντα συντελεστή ασφαλείας 1,35. Στη μολάσσα εξετάστηκε και η περίπτωση ενός αποσαθρωμένου ιλυολίθου, με επιτευχθέντα συντελεστή ασφαλείας 0.64. Στο γνεύσιο εξετάστηκε και η περίπτωση ενός αποσαθρωμένου γνευσίου, όπου ο επιτευχθέν συντελεστής ασφαλείας προέκυψε 1.87. Τέλος, στον οφιόλιθο εξετάστηκε και η περίπτωση ενός φυλλοποιημένου σερπεντίνη, με επιτευχθέντα συντελεστή ασφαλείας 1.67.

Για επίτευξη βελτίωσης της ευστάθειας εξετάστηκε η λύση μέτρων αποστράγγισης και πιο συγκεκριμένα η κατασκευή αποστραγγιστικών οπών. Για τις αναλύσεις στην παρούσα εργασία, έγινε η θεώρηση ότι με τη κατασκευή των αποστραγγιστικών οπών, θα μειωθεί στο μισό ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων (R_u), δηλαδή $0.5 \times R_u$. Οι αναλύσεις που επιλέχθηκαν να αναλυθούν εκ νέου, με τη θεώρηση εφαρμογής μέτρων αποστράγγισης, είναι αυτές στις οποίες επετεύχθη συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης, $SF < 3$, και οι περιπτώσεις του αποσαθρωμένου ιλυολίθου της μολάσσας, του αποσαθρωμένου γνευσίου και του φυλλοποιημένου σερπεντίνη του οφιολίθου.

Πίνακας 43: Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας με εφαρμογή μέσω αποστράγγισης.

Σχηματισμός	Λιθολογικός τύπος	SF		Διαφορά
		Χωρίς αποστράγγιση	Με αποστράγγιση	
Φλύσχος	Ιλυόλιθος	0.90	1.02	13.3%
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	2.76	2.99	8.3%
Μολάσσα	Ιλυόλιθος	1.35	1.46	8.1%
	Αποσαθρωμένος Ιλυόλιθος	0.64	0.73	14.1%
	Εναλλαγές Ιλυολίθου – Ψαμμίτη (50% - 50%)	2.65	2.94	10.9%
Γνεύσιος	Αποσαθρωμένος Γνεύσιος	1.87	2.17	16%
Οφιόλιθος	Σερπεντίνης	2,82	3,04	7.8%
	Φυλλοποιημένος Σερπεντίνης	1.67	1.94	16.2%
Μέση τιμή				11.8%

Με βάση τον προηγούμενο Πίνακα 43, είναι σαφές ότι η εφαρμογή των μέτρων αποστράγγισης είναι ευεργετική ως προς την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης (SF) στην ευστάθεια των πρανών, καθώς επετεύχθη μια αύξηση του συντελεστή ασφαλείας (SF), περί το 12%.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της διαπερατότητας ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών και η επίδρασή της στην ευστάθεια τεχνητών ορυγμάτων

Η αύξηση αυτή είναι μεγάλη (~13%) στον Ιλυόλιθο του Φλύσχη, όπου ως λεπτόκοκκος σχηματισμός με πολύ μικρή τιμή υδατοπερατότητας $k = 1 \times 10^{-10}$ m/sec, τώρα με την εφαρμογή αποστράγγισης, εξασφαλίστηκε σταθερότητα του πρανούς, έστω και οριακή, καθώς $SF = 1.02$. Για να εξασφαλιστεί περαιτέρω αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης (SF), θα πρέπει για τη συγκεκριμένη περίπτωση (Ιλυόλιθος του Φλύσχη), όπου χαρακτηρίζεται από πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, να γίνει εκσκαφή με ηπιότερες κλίσεις 2:3 (κ:ο) ή 34° , ώστε να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας. Με κλίση πρανών 2:3 (κ:ο) και θεώρηση αποστράγγισης, για το σχηματισμό του Ιλυόλιθου του Φλύσχη, ο συντελεστής ασφαλείας, διαμορφώνεται σε $SF = 1.37$, δηλαδή αύξηση 52.5%, σε σχέση με την αρχική κατάσταση και χωρίς αποστράγγιση. Συνεπώς, για αυτές τις περιπτώσεις όπου ναι μεν υπάρχουν ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά και αφετέρου μικρές τιμές υδατοπερατότητας (k), προτείνεται να εφαρμόζονται ηπιότερες κλίσεις πρανών και εφαρμογή μέτρων αποστράγγισης, όπου θα συμβάλουν σημαντικά στην αύξηση του συντελεστή ασφαλείας (SF).

Όσον αφορά τον αποσαθρωμένο Ιλυόλιθο της Μολάσσας, παρατηρείται αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης (SF), όμως εξακολουθεί να προκύπτει $SF < 1$ που υποδηλώνει ότι υπάρχει ολίσθηση πρανούς, λόγω των πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών. Με ηπιότερη κλίση πρανών και θεώρηση αποστράγγισης για τον αποσαθρωμένο Ιλυόλιθο της Μολάσσας, ο συντελεστής ασφαλείας διαμορφώνεται οριακά σε $SF = 1.11$.

Σημαντική βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας παρατηρείται και στις περιπτώσεις αποσαθρωμένου Γνευσίου και Φυλλοποιημένου Σερπεντίνη του Οφιολίθου.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βότσιος, Ν. (2023). Αναλυτική και αριθμητική εκτίμηση κινδύνου αστάθειας πρανών υπό τη δράση υπόγειων υδάτων.
- Δίπλα, Μ. Ι. (2016). Εκτίμηση της περατότητας ποικίλων βραχομαζών του Ελληνικού χώρου και εισροών σε υπόγεια έργα (MSc dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).
- Καββαδάς Μ. (2010), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2007), Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Κουκής Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2019), Τεχνική Γεωλογία (2^η Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Λοΐζος Α. (1964), Διαλέξεις Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων – Κατολισθήσεις Πρανών, Τ.Ε.Ε., Αθήνα
- Μαρίνος, Β. (2007). Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).
- Μαρίνος, Π. Β., & Τσιαμπάος, Γ. (2010). Strength and deformability of specific sedimentary and orphiolitic rocks. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 43(3), 1259-1266.
- Στουρνάρας Γ., & Σταυροπούλου Μ. (2010). Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα.
- Τζαρός, Χ. (2004). Σχεδιασμός εδαφοηλώσεων: παραδοχές-μεθοδολογία-ανάλυση (Bachelor's thesis).
- Τζαρούχη, Σ. (2013). Επίδραση του νερού στην ευστάθεια των πρανών και διερεύνηση νέων τεχνικών αποστράγγισης. Εφαρμογή σε τμήματα της Εγνατίας Οδού. (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Marinos, P., & Hoek, E. (2000, November). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In ISRM international symposium (pp. ISRM-IS). ISRM.
- Marinos, V., Fortsakis, P., Proutzopoulos, G., & Marinos, P. (2011). Permeability in flysch—distribution decrease with depth and grout curtains under dams. Journal of Mountain Science, 8, 234-238.

- Marinos, V. (2019). A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 899-912.
- Marinos V., Papouli D., Permeability of Flysch and Mollasic formations and their impact in major infrastructure projects: distribution, comparison and decrease with depth (under published)
- Normal variation of compressive strength and the factor m in Hoek-Brown failure criterion for some rocks (rockmass.net)
- Qureshi, M. U., Khan, K. M., Bessaih, N., Al-Mawali, K., & Al-Sadrani, K. (2014). An empirical relationship between in-situ permeability and RQD of discontinuous sedimentary rocks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 4781-4790.
- Waltham, T. (2002). *Foundations of engineering geology*. CRC press.