

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ**  
**ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**  
**ΓΑΛΟΥΡΑ ΡΟΔΟΥ**

**Χρήστος Χ. Γαμβρούδης**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Αγιουτάντης Ζαχαρίας (Καθηγητής, Επιβλέπων)**

**Εξαδάκτυλος Γεώργιος (Καθηγητής)**

**Στειακάκης Εμμανουήλ (Δρ. Μηχ. Γεωλόγος)**

Χανιά, Οκτώβριος 2006

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας σημαντική βοήθεια αποτέλεσε η συνεργασία πολλών προσώπων του Ιδρύματος, καθώς και η συνεργασία με την Διοίκηση και τους Τεχνικούς της κατασκευάστριας εταιρείας του φράγματος Γαδουρά Ρόδου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της και ιδιαίτερα

- Τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της εργασίας.
- Τον κ. Στειακάκη Εμμανουήλ για την πολύπλευρη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η καθοδήγηση του, οι συμβουλές του και η εποικοδομητική κριτική του, υπήρξαν ιδιαίτερα πολύτιμες.
- Τον Καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο, μέλος της Εξεταστικής Επιτροπής.
- Τον κ. Βαβαδάκη Διονύσιο για την συνεχή υποστήριξή του και την πολύπλευρη βοήθειά του.
- Σημαντική υπήρξε η βοήθεια του προπτυχιακού φοιτητή του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων κ. Παρασκευαΐδη Παναγιώτη, στην επεξεργασία και επιμέλεια του κειμένου, και των σχημάτων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Στρίκο Δημήτρη, Διευθυντή και εκπρόσωπο της εταιρείας Κ/Ξ ΜΕΤΩΝ-ΑΕΓΕΚ, τον κ. Ουζούνη Σταύρο Μηχανικό Κατασκευής και όλους τους συνεργάτες τεχνικούς και μη, για την συνεισφορά τους στην διάθεση των απαιτούμενων στοιχείων για την ολοκλήρωση της εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την παραμετρική ανάλυση σχεδιασμού με βάση τις υδραυλικές και εδαφικές ιδιότητες που αφορούν στα υλικά κατασκευής και τους υποκείμενους γεωλογικούς σχηματισμούς του φράγματος Γαδουρά Ρόδου.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων των επί τόπου δοκιμών εισπίεσης κατά Lugeon, για την εκτίμηση της διαπερατότητας στους υποκείμενους σχηματισμούς του σώματος του φράγματος. Μέχρι βάθους 5 m κυριαρχεί εδαφικός μανδύας με μεσαίες τιμές διαπερατότητας ( $10^{-5}$  έως  $10^{-6}$  m/sec). Από τα 5 m έως τα 16 m βάθος συναντάται ισχυρά αποσθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος με μικρές τιμές διαπερατότητας ( $10^{-7}$  m/sec) ενώ κάτω από το βάθος των 16 m και μέχρι το πέρας των γεωτρήσεων απαντάται ένας μέτρια αποσθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος, ο οποίος εμφανίζει πολύ μικρές τιμές διαπερατότητας ( $10^{-8}$  έως  $10^{-9}$  m/sec).

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετήθηκε η κίνηση του νερού μέσα από το σώμα του σχεδιαζόμενου φράγματος σε συνθήκες σταθερής κατάστασης ροής με το λογισμικό **SEEP/W**. Η πιεζομετρία και τα ανύσματα ροής υποδεικνύουν σχεδόν αποκλειστική κίνηση του νερού προς τα φίλτρα αποστράγγισης, όπως είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα, κατά την λειτουργία του φράγματος. Οι εκτιμούμενες διαφυγές κυμαίνονται στο κεντρικό τμήμα του σώματος του φράγματος σε πολύ μικρές τιμές, από  $1.28 \times 10^{-8}$  έως  $1.52 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/sec, γεγονός που υποδηλώνει την πολύ μικρή διαπερατότητα του πυρήνα και τη σωστή λειτουργία του φράγματος.

Στο τρίτο μέρος της εργασίας εξετάστηκε η ευστάθεια του φράγματος στην ανάντη και κατάντη πλευρά του, μέσω του λογισμικού **SLOPE/W**, χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη μέθοδο Bishop για κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης. Οι πιέσεις πόρων εκτιμήθηκαν μέσω του λογισμικού **SEEP/W**, όπως προαναφέρθηκε. Οι συντελεστές ασφαλείας για κατάσταση σταθερής ροής στο ανάντη, αλλά και στο κατάντη πρηνές του σώματος του φράγματος κρίθηκαν ικανοποιητικοί, δεδομένου ότι τα μεγέθη τους δεν ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια.

# Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:</b>	1
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	1
1.1. Γενικά στοιχεία του έργου	1
1.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος	2
1.3. Υλικά κατασκευής φράγματος	4
1.4. Κύρια τμήματα του έργου	5
1.4.1. Σήραγγα εκτροπής	5
1.4.2. Πρόφραγμα	8
1.4.3. Κυρίως φράγμα	10
1.4.3.1. Τύπος φράγματος και χάραξη άξονα	10
1.4.3.2. Πυρήνας φράγματος	10
1.4.3.3. Κελύφη	14
1.4.3.4. Φίλτρα και στραγγιστήρια	15
1.4.3.5. Λιθορριπή προστασίας	16
1.4.4. Αυχενικό φράγμα	16
1.4.5. Σύστημα υπερχειλίσης	17
1.4.6. Σήραγγες Αποστράγγισης	18
1.4.7. Οδοποιία	19
1.5. Συστήματα οργάνων	20
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:</b>	22
<b>ΓΕΝΙΚΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ</b>	22
2.1. Γεωμορφολογία	22
2.2. Γεωλογία	23
2.3. Στρωματογραφία	25
2.4. Τεκτονική	28
2.5. Υδρογεωλογία	29
2.6. Γεωλογία στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος	30
2.7. Σεισμικότητα περιοχής	31
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:</b>	32
<b>ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΔΟΚΙΜΕΣ LUGEON</b>	32
3.1. Γενικές αρχές	32
3.2. Υδατική ροή μέσω του εδάφους	33
3.3. Δοκιμές εισπίεσης νερού	35
3.3.1. Δοκιμή Maag	36
3.3.2. Δοκιμή Lefranc	39
3.3.3. Δοκιμή Lugeon	40
3.4. Επεξεργασία δεδομένων δοκιμών Lugeon	49
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:</b>	58
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΡΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΩΜΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ</b>	58
4.1. Προσδιορισμός του προβλήματος-παραδοχές	58
4.2. Σχεδιασμός της γεωμετρίας και εισαγωγή των δεδομένων	59
4.2.1. Σχεδιασμός τυπικής διατομής εγκάρσια στο σώμα του φράγματος	59
4.2.2. Υδραυλικές παράμετροι των γεωυλικών κατασκευής του φράγματος και των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών	60
4.3. Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων	71
4.5. Σχεδιασμός τομών για την εκτίμηση διαφυγών λόγω διήθησης	76
4.6. Επίλυση και αποτελέσματα	76

4.7. Διερεύνηση της διαπερατότητας μέσω παραμετρικής ανάλυσης.....	83
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:</b> .....	85
<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ</b> .....	85
5.1. Προσδιορισμός του προβλήματος-παραδοχές.....	85
5.2. Εισαγωγή δεδομένων.....	86
5.3. Ανάλυση ευστάθειας πρανών .....	87
5.3.1. Προσδιορισμός ελάχιστου συντελεστή ευστάθειας .....	87
5.3.2. Μέθοδος των λωρίδων κατά Bishop.....	89
5.3.3 Καθορισμός παραμέτρων ανάλυσης.....	90
5.4. Επίλυση και αποτελέσματα μοντέλων.....	91
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	97
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	99
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	100

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Είσοδος σήραγγας εκτροπής.....	6
Εικόνα 1.2: Εκσκαφή σήραγγας εκτροπής.....	7
Εικόνα 1.3: Στόμιο εκκένωσης και υδροληψίες.....	8
Εικόνα 1.4: Βοηθητικό – κύριο ανάντη πρόφραγμα.....	9
Εικόνα 1.5: Τσιμεντενέσεις τάπητα.....	13
Εικόνα 1.6: Γενική άποψη φράγματος στο στάδιο κατασκευής.....	14
Εικόνα 1.7: Ζώνες φίλτρων – στραγγιστηρίων .....	15
Εικόνα 1.8: Λιθορριπή προστασίας .....	16
Εικόνα 1.9: Αυχενικό φράγμα.....	17
Εικόνα 1.10: Σύστημα υπερχειλίσης.....	18
Εικόνα 1.11: Αποστραγγιστική σήραγγα στο αριστερό αντέρεισμα (ΑΕΓΕΚ, 2003). 19	

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Τυπική διατομή κυρίως φράγματος.....	3
Σχήμα 1.2: Κάτοψη περιοχής κυρίως φράγματος.....	5
Σχήμα 1.3: Κοκκομετρικές καμπύλες υλικού Ζώνης 1.....	11
Σχήμα 1.4: Θέσεις οργάνων φράγματος.....	21
Σχήμα 2.1: Θέση φράγματος Γαδουρά.....	22
Σχήμα 2.2: Γεωλογική τομή που περιλαμβάνει την περιοχή του φράγματος.....	24
Σχήμα 2.3: Στρωματογραφία περιοχής φράγματος.....	27
Σχήμα 3.1: Υδροδυναμικό καθεστώς υπόγειου νερού.....	33
Σχήμα 3.2: Τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού φορτίου (δοκιμή Maag).....	37
Σχήμα 3.3: Τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου (δοκιμή Lefranc).....	40
Σχήμα 3.4: Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon με τη χρήση μονού και διπλού παρεμβύσματος.....	41
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα απωλειών για τις βαθμίδες πίεσης που εφαρμόστηκαν σε δοκιμή Lugeon.....	42
Σχήμα 3.6: Τυπικές μορφές ροής που προκύπτουν από την εκτέλεση της δοκιμής Lugeon κατά Klopp.....	45
Σχήμα 3.7: Διαγράμματα επιβαλλόμενης πίεσης - απορρόφησης.....	47

Σχήμα 3.8: Διάγραμμα διαπερατότητας $k$ σε συνάρτηση με την πιθανότητα απόκλισης από την ονομαστική τιμή της $k$ .	48
Σχήμα 3.9: Κάτοψη κατά μήκος του σώματος του φράγματος με τις θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.	52
Σχήμα 3.10: Τομή κατά μήκος του σώματος του φράγματος με τις σχετικές θέσεις των γεωτρήσεων.	53
Σχήμα 3.11: Εκτιμώμενη διαπερατότητα στον άξονα θεμελίωσης του φράγματος.	55
Σχήμα 4.1: Τυπική διατομή κυρίως φράγματος.	59
Σχήμα 4.3: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 1.	63
Σχήμα 4.4: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2.	63
Σχήμα 4.5: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2α.	63
Σχήμα 4.6: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2β.	64
Σχήμα 4.7: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2&2β.	64
Σχήμα 4.8: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 3.	64
Σχήμα 4.9: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 3α.	65
Σχήμα 4.10: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 3&3α.	65
Σχήμα 4.12: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 6.	66
Σχήμα 4.13: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 7.	66
Σχήμα 4.14: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τον εδαφικό μανδύα.	66
Σχήμα 4.15: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τον ισχυρά αποσαθρωμένο αργιλικό σχιστόλιθο.	67
Σχήμα 4.16: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τον μέτρια αποσαθρωμένο αργιλικό σχιστόλιθο.	67
Σχήμα 4.17: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη ζώνη τσιμεντενέσεων.	67
Σχήμα 4.18: Κατάλογος ιδιοτήτων υλικών.	68
Σχήμα 4.19: Ζώνες διαφορετικών ιδιοτήτων υλικών φράγματος και υποκείμενων σχηματισμών – Μοντέλο Α.	69
Σχήμα 4.20: Ζώνες διαφορετικών ιδιοτήτων υλικών φράγματος και υποκείμενων σχηματισμών – Μοντέλο Β.	70
Σχήμα 4.21: Διακριτοποίηση με μη δομημένα στοιχεία.	72
Σχήμα 4.22: Ορισμός αρχικών οριακών συνθηκών – Μοντέλο Α.	74
Σχήμα 4.23: Ορισμός αρχικών οριακών συνθηκών – Μοντέλο Β.	75
Σχήμα 4.24: Διατομές υπολογισμού παροχής νερού.	76
Σχήμα 4.25: Υδραυλικό φορτίο μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Α).	77
Σχήμα 4.26: Πίεση πόρων μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Α).	78
Σχήμα 4.27: Ανύσματα ροής μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Α).	79
Σχήμα 4.28: Υδραυλικό φορτίο μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Β).	80
Σχήμα 4.29: Πίεση πόρων μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Β).	81
Σχήμα 4.30: Ανύσματα ροής μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Β).	82
Σχήμα 5.1: Δυνάμεις που ενεργούν σε κυλινδρικές επιφάνειες αστοχίας.	88
Σχήμα 5.2: Η μέθοδος των λωρίδων.	89
Σχήμα 5.3: Συντελεστής ευστάθειας ανάντη πρανούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη λειτουργίας 117.5 m – Μοντέλο Α.	93
Σχήμα 5.4: Συντελεστής ευστάθειας κατόντη πρανούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη λειτουργίας 117.5 m – Μοντέλο Α.	94
Σχήμα 5.5: Συντελεστής ευστάθειας ανάντη πρανούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη πλημμύρας 122.1 m – Μοντέλο Β.	95
Σχήμα 5.6: Συντελεστής ευστάθειας κατόντη πρανούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη πλημμύρας 122.1 m – Μοντέλο Β.	96

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Στάδια και πιέσεις μανομέτρου.....	12
Πίνακας 3.1: Χαρακτηρισμός εδαφών με βάση τον συντελεστή $k$ .....	47
Πίνακας 3.2: Διακύμανση του συντελεστή υδροπερατότητας για διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών. ....	48
Πίνακας 3.3: Πίνακας δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.....	49
Πίνακας 3.4: Εφαρμοζόμενες βαθμίδες πίεσης και μετρούμενες απώλειες της γεώτρησης GAD103. ....	50
Πίνακας 3.5: Συγκεντρωτικός πίνακας δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εκτίμηση των απωλειών και της διαπερατότητας. ....	50
Πίνακας 3.6: Πίνακας τομέων κύριου άξονα σε συνάρτηση με την διαπερατότητα. .	54
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα διαγραμμάτων πραγματικής πίεσης – απορρόφησης. ...	56
Πίνακας 4.1: Εκτιμώμενες τιμές υδροπερατότητας στην κορεσμένη φάση κάθε υλικού. ....	61
Πίνακας 4.2: Θεώρηση υδραυλικών παραμέτρων με βάση τυπικές τιμές που προτείνονται από το λογισμικό.....	62
Πίνακας 4.3: Παραμετρική ανάλυση υδροπερατότητας.....	83
Πίνακας 4.4: Εκτιμώμενες διαφυγές. ....	84
Πίνακας 5.1: Τιμές εδαφικών παραμέτρων κάθε υλικού. ....	87
Πίνακας 5.2: Επιτρεπόμενοι συντελεστές ασφαλείας για τα πρηνή των χωμάτων φραγμάτων.....	89
Πίνακας 5.3: Σχεδιασμός μοντέλων. ....	91
Πίνακας 5.4: Εκτιμώμενοι συντελεστές ευστάθειας. ....	92
Πίνακας 5.5: Εκτιμώμενοι ελάχιστοι συντελεστές ευστάθειας.....	92

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της Ρόδου υδρεύεται κυρίως από γεωτρήσεις, και λόγω της υπερβολικής εκμετάλλευσης του υδροφόρου ορίζοντα έχει αρχίσει να παρουσιάζεται υφαλμύρωσή του σε πολλές περιοχές, αλλά και μεγάλη πτώση της στάθμης του υπογείου νερού. Άμεση συνέπεια των φαινομένων αυτών αποτελούν η μείωση της παροχής των γεωτρήσεων, αλλά και η αύξηση του βάθους στις νέες γεωτρήσεις. Τη λύση στο πρόβλημα υδροδότησης έρχεται να δώσει ο χείμαρρος Γαδουρά, που εκβάλλει στην ανατολική πλευρά του νησιού, και το φράγμα που κατασκευάζεται.

Η κατασκευή του φράγματος Γαδουρά πρόκειται να λύσει τα σημαντικά και καίρια προβλήματα υδροδότησης της ευρύτερης περιοχής της πόλης της Ρόδου, όλων των παράκτιων οικισμών της ανατολικής και βορειοδυτικής πλευράς του νησιού αλλά και των γειτονικών άνυδρων νησιών όπως η Χάλκη, η Σύμη, το Καστελόριζο, κ.α

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ορισμένα τεχνικά στοιχεία του φράγματος, τα υλικά κατασκευής του σώματός του, καθώς και τα κυριότερα τμήματα του.

### **1.1. Γενικά στοιχεία του έργου**

Το Χωμάτινο Φράγμα Γαδουρά Ρόδου κατασκευάζεται από το ΥΠΕΧΩΔΕ και συγχρηματοδοτείται κατά 75% από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Ο συμβατικός προϋπολογισμός μελέτης ανέρχεται σε 34.600.000 Ευρώ. Δεδομένων των αλλαγών και τροποποιήσεων στις εργασίες που προέβλεπε η αρχική μελέτη καθώς και των νέων εργασιών, που δεν προβλέπονταν και κρίθηκαν αναγκαίες κατά τις διάφορες φάσεις κατασκευής, το κόστος αυξήθηκε σε 43.300.000 Ευρώ.



## 1.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος

Τα βασικά στοιχεία του ταμιευτήρα είναι:

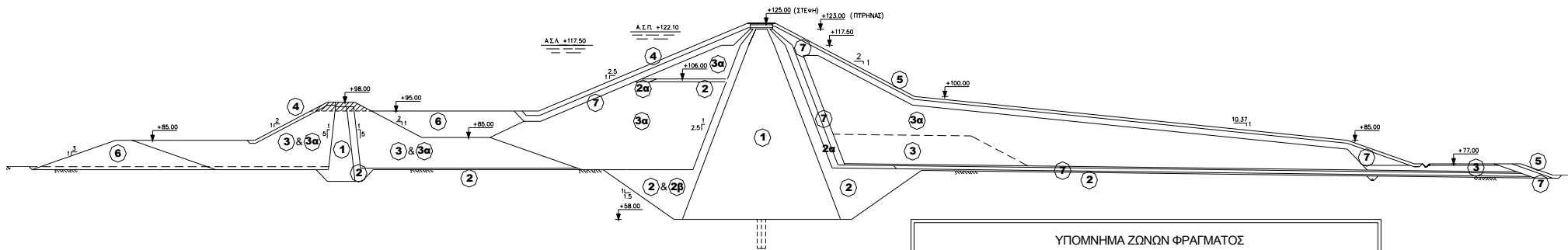
- Συνολική χωρητικότητα:  $67.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Ωφέλιμη χωρητικότητα:  $60 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Μέγιστη επιφάνεια:  $5.2 \text{ km}^2$
- Λεκάνη απορροής:  $148 \text{ km}^2$   
(11% της συνολικής έκτασης του νησιού)
- Στέψη φράγματος: +125 m
- Μέγιστη παροχή πλημμύρας:  $1.500 \text{ m}^3/\text{sec}$
- Παροχή υπερχειλιστή:  $890 \text{ m}^3/\text{sec}$
- Μέση ετήσια απορροή:  $32.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$
- Απόληψη νερού:  $18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$   
(με πιθανότητα 98,5%)

Το φράγμα αποτελείται από αργιλικό πυρήνα, σώματα στήριξης και αναβαθμίδες σταθεροποίησης ανάντη και κατόντη.

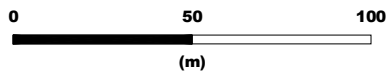
Τα βασικά στοιχεία του φράγματος είναι:

- Ύψος φράγματος: 67 m
- Μήκος στέψης: 550 m
- Πλάτος στέψης: 10 m
- Όγκος φράγματος / προφράγματος:  $315 \times 10^6 \text{ m}^3$

Τυπική διατομή του σώματος του φράγματος, όπου φαίνονται οι διάφορες ζώνες αναχωμάτων, παρατίθεται στο **Σχήμα 1.1**.



**ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**



ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΖΩΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΖΩΝΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΥΛΙΚΑ
①	ΠΥΡΗΝΑΣ	ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΥΛΙΚΑ ΔΙΑΛΟΓΗΣ
②	ΦΙΛΤΡΟ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ
②α	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗΡΙ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ
②β	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ ΦΙΛΤΡΟ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ
③	ΚΕΛΥΦΗ	ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΑ ΠΟΤΑΜΟΥ
③α	ΚΕΛΥΦΗ	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΗ ΥΛΙΚΑ
④	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΝΑΝΤΗ ΠΡΑΝΩΝ	ΛΙΘΟΡΡΙΠΗ - ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ
⑤	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΤΑΝΤΗ ΠΡΑΝΩΝ	ΚΡΟΚΑΛΕΣ - ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΔΙΑΛΟΓΗΣ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΝ
⑥	ΑΝΑΒΑΘΜΙΔΕΣ	ΤΥΧΑΙΑ ΥΛΙΚΑ
⑦	ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗΡΙΟ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ

**Σχήμα 1.1: Τυπική διατομή κυρίως φράγματος.**

### 1.3. Υλικά κατασκευής φράγματος

Οι ζώνες αναχώματος καθορίζονται ως εξής (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Τεχνική έκθεση):

Ζώνη 1: Πυρήνας πάχους στρώσης 20 cm από αδιαπέρατα υλικά που λαμβάνονται από δανειοθαλάμους της γύρω περιοχής.

Ζώνη 2: Φίλτρο – μεταβατική ζώνη πάχους 40 cm από λεπτοκοκκώδη αμμοχάλικα επεξεργασμένα με ανάμιξη, πλύσιμο ή και κοσκίνισμα.

Ζώνη 2α: Λεπτόκοκκο στραγγιστήρι πάχους 40 cm από λεπτοκοκκώδη αμμοχάλικα με μέγιστο μέγεθος κόκκου 25 mm που λαμβάνονται από εγκεκριμένους δανειοθαλάμους της γύρω περιοχής.

Ζώνη 2β: Λεπτόκοκκο φίλτρο πάχους 40 cm από λεπτοκοκκώδη αμμοχάλικα με μέγιστο μέγεθος κόκκου 6.35 mm.

Ζώνη 3: Σώμα στήριξης (κέλυφος) πάχους 40 cm από αποθέσεις ποταμού (άμμος, χαλίκια, κροκάλες) μέγιστου κόκκου ή λίθου 40 cm, που λαμβάνονται από καθορισμένους δανειοθαλάμους καθώς και υποπροϊόντα επεξεργασίας των φίλτρων και των αδρανών του σκυροδέματος.

Ζώνη 4: Λιθορριπή προστασίας ανάντη πρανούς, υλικά διαστάσεως 100 cm, από λατομημένο ασβεστόλιθο και ψαμμίτη.

Ζώνη 5: Στρώση προστασίας κατόντη πρανούς, από κροκάλες και λίθους διάστασης 20 cm, που λαμβάνονται από επεξεργασμένα υλικά εγκεκριμένων δανειοθαλάμων ή και λατομείων.

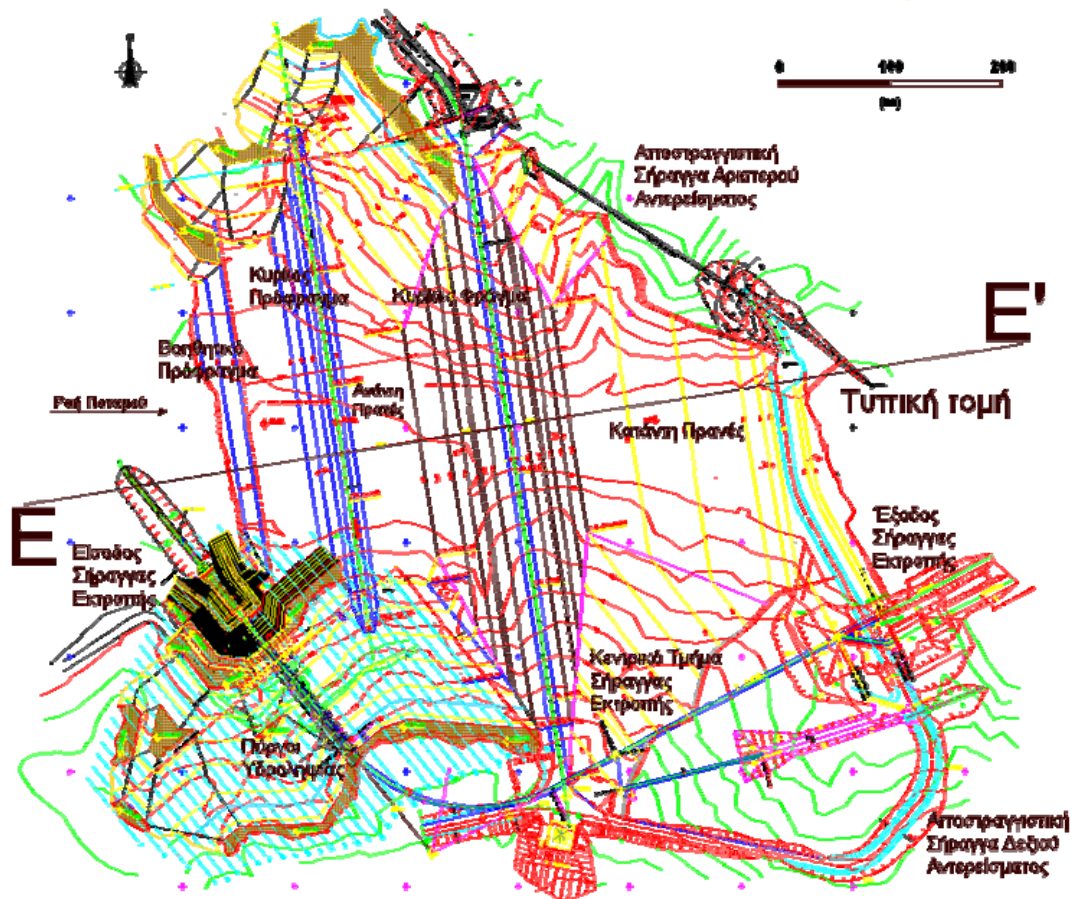
Ζώνη 6: Ζώνη αναχώματος από τυχαία υλικά, που λαμβάνονται από εκσκαφές αποθέσεων ποταμού ή δανειοθαλάμους.

Ζώνη 7: Στραγγιστήριο από διαβαθμισμένο αμμοχάλικο πάχους στρώσης 40 cm με μέγεθος κόκκων 76 mm από εγκεκριμένους δανειοθαλάμους ή από υποπροϊόντα παραγωγής αδρανών και Ζώνης 2.

Ζώνη 8: Στρώση βάσεως οδοποιίας διαβαθμισμένων και επεξεργασμένων χαλικιών.

## 1.4. Κύρια τμήματα του έργου

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται μια κάτοψη της ευρύτερης περιοχής του φράγματος, όπου εμφανίζονται τα κυριότερα τμήματα του έργου (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Τεχνική έκθεση).



Σχήμα 1.2: Κάτοψη περιοχής κυρίως φράγματος.

### 1.4.1. Σήραγγα εκτροπής

Η σήραγγα εκτροπής κατασκευάστηκε στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος και διέρχεται έξω από το πεδίο φόρτισης του αναχώματος, με σκοπό την αποφυγή παραμορφώσεων λόγω των πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων του ισχυρά αποσθρωμένου αργιλικού σχιστόλιθου, που αποτελεί γεωλογικό σχηματισμό του υποβάθρου.

Η σήραγγα εκτροπής έχει μήκος 688.48 m. Η μέθοδος διάνοιξης της σήραγγας έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου NATM (New Austrian Tunneling Method). Έχει άνοιγμα εκσκαφής 4.2 m και η μόνιμη επένδυσή της γίνεται από

οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25, πάχους 35 cm στο θόλο και στις παρειές και 1 m στο δάπεδο αυτής.



**Εικόνα 1.1: Είσοδος σήραγγας εκτροπής.**

Η σήραγγα αποτελείται από 3 τμήματα όπως φαίνονται και στο Σχήμα 1.2:

- Το τμήμα εισόδου (**Εικόνα 1.1**), μήκους 47.50 m, αποτελείται από αγωγό σκυροδέματος ο οποίος επανεπιχώνεται έως την αρχική επιφάνεια του εδάφους.
- Το τμήμα εξόδου, μήκους 44.25 m που αποτελείται επίσης από αγωγό από σκυρόδεμα.
- Το κυρίως και μεγαλύτερο τμήμα, μήκους 596.73 m.

Στα στόμια εισόδου και εξόδου διατρήθηκε αργιλικός σχιστόλιθος μέτριας έως υψηλής αποσάθρωσης αντίστοιχα, ενώ στο μεσαίο τμήμα της σήραγγας ο αργιλικός σχιστόλιθος εμφανίζεται με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κρίθηκε επιβεβλημένη η προενίσχυση της διάτρησης των στομίων με τη χρήση δοκών προπορείας (**Εικόνα 1.2**), για την αποφυγή πιθανών αστοχιών, αλλά και προβλημάτων ευστάθειας στα μέτωπα, κατά τα πρώτα στάδια της διάτρησης. Η χρήση των δοκών προπορείας κρίθηκε επιβεβλημένη και στο υπόλοιπο τμήμα της σήραγγας, δεδομένου ότι στο μεσαίο τμήμα της σήραγγας διατρήθηκε αργιλικός σχιστόλιθος με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με το δυσμενέστερο ύψος υπερκειμένων ( $H=47$  m).

Για τον υπολογισμό της μόνιμης επένδυσης από οπλισμένο σκυρόδεμα θεωρείται ότι, παράλληλα με την ανάληψη των εξωτερικών φορτίων νερού, η επένδυση παραλαμβάνει εξ ολοκλήρου και τα φορτία της περιβάλλουσας

βραχομάζας, δεδομένου ότι τα προσωρινά μέτρα προστασίας αδρανούν με την πάροδο του χρόνου.



**Εικόνα 1.2: Εκσκαφή σήραγγας εκτροπής (ΑΕΓΕΚ, 2001).**

Για να εξασφαλιστεί η επαφή βραχομάζας – επένδυσης, ιδιαίτερα στην οροφή της σήραγγας όπου συνήθως παρατηρούνται κενά μετά την σκυροδέτηση, προβλέφθηκε να εκτελεστούν τσιμεντενέσεις επαφής στην οροφή.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος η σήραγγα εκτροπής θα χρησιμοποιηθεί για υδροληψία και εκκένωση του ταμιευτήρα.

Οι υδροληψίες συνίστανται σε 4 ανεξάρτητα στόμια υδροληψίας – εκκένωσης **(Εικόνα 1.3)**:

- Το στόμιο εκκένωσης και παροχέτευσης φερτών (αλλά και υδροληψίας) ΥΕ, που βρίσκεται σε στάθμη στέψης +90.00 m.
- Τα στόμια υδροληψίας (αλλά και εκκένωσης όταν απαιτείται) Υ<sub>1</sub>, Υ<sub>2</sub> και Υ<sub>3</sub>, με αντίστοιχες στάθμες στέψης +99.00, +104.50 και +111.50 m.

Τα στόμια αυτά είναι μικροί κατακόρυφοι χαλύβδινοι πύργοι επενδυμένοι με οπλισμένο σκυρόδεμα, οι οποίοι στη στέψη τους φέρουν κατάλληλη διαμόρφωση για τοποθέτηση εσχάρων συγκράτησης αλλά και κατάλληλου κινητού χαλύβδινου πώματος έμφραξης του στομίου, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.



**Εικόνα 1.3: Στόμιο εκκένωσης και υδροληψίες.**

### **1.4.2. Πρόφραγμα**

Η εκτροπή του ποταμού μέσα από τη σήραγγα εκτροπής και η προστασία του χώρου κατασκευής του φράγματος από τα νερά του ποταμού, ώστε η κατασκευή του έργου να πραγματοποιηθεί "εν ξηρώ", έγινε με την κατασκευή του προφράγματος, του οποίου ο άξονας είναι παράλληλος με τον άξονα του φράγματος και σε απόσταση 150 m από αυτόν.

Το κυρίως και το βοηθητικό πρόφραγμα φαίνονται στην **Εικόνα 1.4**:

- Το βοηθητικό ανάντη πρόφραγμα (ΒΑΠ) έχει στέψη στο υψόμετρο +85.00 m και πλάτος στέψης 6 m από τυχαία υλικά με κλίση πρανών 3:1. Το βοηθητικό πρόφραγμα εξυπηρέτησε την προσωρινή ανάσχεση του ποταμού, μέχρι την ολοκλήρωση του προφράγματος στο οποίο και ενσωματώθηκε.
- Το κυρίως ανάντη πρόφραγμα (ΚΑΠ) έχει στέψη στο υψόμετρο +98.00 m, και πλάτος στέψης 10 m από αμμοχάλικα ποταμού με κλίση πρανών 3:1 από τη θεμελίωση μέχρι το υψόμετρο +85.00 m και 2:1 πάνω από το υψόμετρο +85.00 μέχρι τη στέψη +125.00 m.

Το πρόφραγμα, εκτός από την προστασία των έργων κατά την φάση κατασκευής, χρησιμοποιήθηκε και ως δοκιμαστικό ανάχωμα για μέτρηση της πίεσης των πόρων και των καθιζήσεων στη θεμελίωση του, λόγω της επιβολής του φορτίου από τα υπερκείμενα υλικά του αναχώματος. Οι μετρήσεις γίνονταν στο σώμα του

προφράγματος, με την εγκατάσταση οργάνων μέτρησης καθιζήσεων, μετακινήσεων και πίεσης πόρων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι δεν υπάρχει σοβαρός λόγος ανησυχίας για την ευστάθεια του έργου, με την προϋπόθεση διατήρησης της πίεσης των πόρων σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

Για τους παραπάνω λόγους, το πρόφραγμα προβλέφθηκε και κατασκευάστηκε σε τρεις φάσεις που ανέρχονται μέχρι το υψόμετρο +85.00, +95.00 και +98.00 m, αντίστοιχα. Με αυτήν τη διαδικασία καθίσταται δυνατή η συλλογή και αξιολόγηση των μετρήσεων και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατασκευή του φράγματος.

Τμήμα του προφράγματος ενσωματώθηκε στο σώμα του φράγματος, ενώ το υπόλοιπο σχηματίζει σταθεροποιητικό αναβαθμό, που βελτιώνει την ευστάθεια του αναχώματος.



**Εικόνα 1.4: Βοηθητικό – κύριο ανάντη πρόφραγμα.**

Λαμβάνοντας υπόψη ότι, τα προϊόντα εκσκαφής για την κατασκευή των επιμέρους τεχνικών έργων είναι κατά κανόνα ακατάλληλα για το ανάχωμα του προφράγματος, και δεδομένου ότι ο χρόνος ανέγερσης του προφράγματος δεν συμπίπτει με αυτόν των άλλων έργων, θεωρήθηκε ότι το πρόφραγμα έπρεπε να κατασκευαστεί από υλικά παρόμοια με αυτά του φράγματος.

Η στεγανότητα του προφράγματος εξασφαλίστηκε με κεντρική ζώνη πυρήνα από αδιαπέρατο υλικό. Η θεμελίωση του προφράγματος έγινε σε τάφρο βάθους 5 m, που εκσκάφτηκε εγκάρσια στην κοίτη του χειμάρρου. Εκτιμήθηκε πως δεν ήταν απαραίτητη η εκτέλεση τσιμεντενέσεων στεγανοποίησης στη θεμελίωση του προφράγματος.



### 1.4.3. Κυρίως φράγμα

#### 1.4.3.1. Τύπος φράγματος και χάραξη άξονα

Η παρουσία σχετικά μαλακών πετρωμάτων στην ευρύτερη περιοχή θεμελίωσης του σώματος του φράγματος, απέκλεισε τη δυνατότητα κατασκευής φράγματος από σκυρόδεμα και περιόρισε τις επιλογές σε διάφορους άλλους τύπους φραγμάτων.

Ο εντοπισμός ποταμοχειμάρριων αποθέσεων (αμμοχάλικα κοίτης και παλαιών αναβαθμίδων, καθώς και λεπτόκοκκα υλικά) επέβαλλε την κατασκευή χωμάτινου φράγματος με πυρήνα από αδιαπέρατο υλικό και κελύφη φράγματος από αμμοχάλικα.

Η θέση του φράγματος προσδιορίστηκε με στόχο:

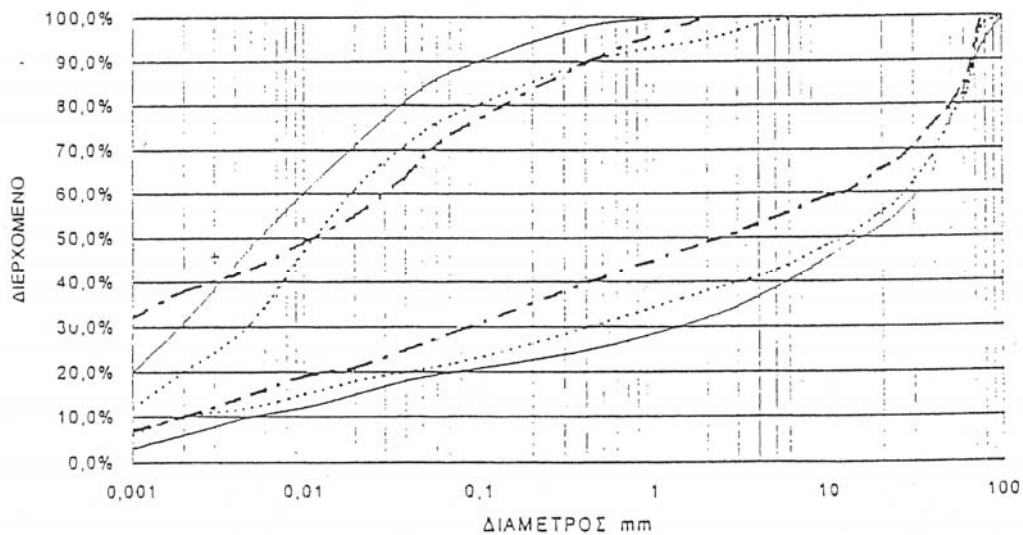
- Την ελαχιστοποίηση του όγκου του αναχώματος.
- Τη μεγιστοποίηση του όγκου του ταμιευτήρα.
- Την καλύτερη διάταξη των επιμέρους τεχνικών έργων.

Στις επόμενες ενότητες γίνεται μια απλή περιγραφή των επιμέρους ζωνών του σώματος του φράγματος, των βασικών ιδιοτήτων τους, του τρόπου δειγματοληψίας, διαλογής, παρασκευής, μεταφοράς, διάστρωσης και συμπύκνωσης των υλικών στο σώμα του φράγματος και των απαιτήσεων σε υγρασία ή διαβροχή των υλικών, κατά περίπτωση.

#### 1.4.3.2. Πυρήνας φράγματος

Το υλικό για τον πυρήνα του φράγματος προέρχεται από δανειοθαλάμους αδιαπέρατου υλικού, που βρίσκονται κοντά στη θέση του φράγματος και μέσα στη ζώνη κατάκλυσης του ταμιευτήρα. Η διερεύνηση για καταλληλότητα και επάρκεια του υλικού έγινε με την εκσκαφή σκαμμάτων, για προσδιορισμό αφενός του βάθους στο οποίο απαντάται και αφετέρου της μακροσκοπικής του σύστασης. Στα σκάμματα έγινε δειγματοληψία υλικού από διάφορα βάθη, για εργαστηριακούς ελέγχους και δοκιμές.

Τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων σε δείγματα υλικού από ερευνητικά φρέατα, σχεδιάστηκαν σε ενιαίο διάγραμμα, από το οποίο προέκυψαν οι καμπύλες των κοκκομετρικών αναλύσεων που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.3** (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Τεχνική έκθεση).



**Σχήμα 1.3: Κοκκομετρικές καμπύλες υλικού Ζώνης 1 (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Τεχνική έκθεση).**

Στα υλικά των δανειοθαλάμων, έγιναν εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των χαρακτηριστικών τους ιδιοτήτων και θεωρήθηκαν κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος (Ζώνη 1). Υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο από κόσκινο No.200), σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% κατά βάρος και κλάσμα (διερχόμενο από κόσκινο No.4) μεγαλύτερο του 40%, ταξινομούνται στην ομάδα CL (άργιοι χαμηλής πλαστικότητας), στο χάρτη πλαστικότητας, και δεν περιέχουν οργανικές ουσίες. Οι έρευνες έδειξαν επάρκεια του αδιαπέρατου υλικού για τις ανάγκες κατασκευής του πυρήνα του φράγματος, του προφράγματος και του αυχενικού φράγματος.

Λαμβάνοντας υπόψιν τη σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής και την ποιότητα των πετρωμάτων στην περιοχή θεμελίωσης του σώματος, εφαρμόστηκαν κλίσεις πρανών πυρήνα 1:2.5. Η στέψη του πυρήνα πρέπει να βρίσκεται πάνω από την ανώτατη στάθμη πλημμύρας και επομένως λήφθηκε στο υψόμετρο +123.00 m, δηλαδή δύο μέτρα κάτω από την ονομαστική στέψη του φράγματος. Το πλάτος του πυρήνα στη στέψη ορίστηκε στα 4 m, για κατασκευαστικούς λόγους, ώστε να είναι δυνατή η διακίνηση των χωματουργικών μηχανημάτων κατά μήκος του φράγματος.

Ο πυρήνας θεμελιώθηκε σε τάφρο, ώστε η θεμελίωση να γίνει σε καλύτερης ποιότητας πέτρωμα. Η εκσκαφή της τάφρου του πυρήνα σχεδιάστηκε έτσι ώστε η κατά μήκος κλίση της τάφρου να είναι κατά το δυνατόν ενιαία και ίση με 1:1.5 σε κάθε αντέρισμα.

Ο αργιλικός σχιστόλιθος που εμφανίζεται στον πυθμένα της τάφρου πυρήνα είναι γενικά κατάλληλος για θεμελίωση του φράγματος. Για να αποφευχθεί πιθανή

διάβρωση και διασωλήνωση κάτω και σε επαφή με τη βάση του πυρήνα έπρεπε να εκτελεστούν τσιμεντενέσεις επαφής (τάπητα) στην κεντρική ζώνη της θεμελίωσης του πυρήνα, σε κάναβο 2.00×1.50 m.

Μετά την ομαλοποίηση της επιφάνειας και τον καθαρισμό με υπό πίεση νερό, οι κοιλότητες της επιφάνειας θεμελίωσης πληρώθηκαν με σκυρόδεμα και οι όποιες ρωγμές υπήρχαν στις βραχώδεις μεμονωμένες μάζες πληρώθηκαν με υδαρές τσιμεντένεμα. Μάζες γύψου που εντοπίστηκαν απομακρύνθηκαν από την περιοχή θεμελίωσης.

Οι διατρήσεις των οπών τσιμεντενέσεων και η εργασία τσιμεντενέσεων εκτελέστηκαν μετά τη διάστρωση του τάπητα από σκυρόδεμα πλάτους 8 m. Η τσιμεντένεση των οπών γινόταν σε δύο στάδια εισπίεσης (από 0–5 m και 5–10 m αντίστοιχα) και με πιέσεις όπως αυτές αναφέρονται στον **Πίνακα 1.1**.

**Πίνακας 1.1: Στάδια και πιέσεις μανομέτρου.**

Στάδιο (m)	Πίεση (kPa)
0–5	50–100
5–10	150–400

Η σύνθεση του ενέματος είναι νερό–τσιμέντο σε αναλογία 1:1 κατά βάρος. Το τσιμέντο είναι κατηγορίας Π 32.5 με ειδική επιφάνεια μεγαλύτερη από 4500 cm<sup>2</sup>/g. Σε περιπτώσεις που απαιτήθηκε προσθήκη μπετονίτη στο μίγμα του τσιμεντένεματος, αυτός προστέθηκε σε αναλογία με το νερό ίση με 2% κατά βάρος. Η ενεργοποίηση του μπετονίτη γινόταν βαθμιαία και ο χρόνος ανάμιξης δεν ήταν μικρότερος των 15 min. Η ανάμιξη έπρεπε να γίνει τουλάχιστον έξι ώρες πριν από τη χρήση του αιωρήματος.

Σε κάθε σειρά γινόταν διάτρηση των οπών και τσιμεντένεση ανά 6.00 m και ακολουθήθηκε, σε δεύτερη φάση, η εκτέλεση τσιμεντενέσεων στις υπόλοιπες οπές της σειράς. Κατά κανόνα, για την κατασκευή των τσιμεντενέσεων τάπητα εφαρμόστηκε η μέθοδος κατά ανιόντα στάδια (packer grouting). Αμέσως μετά την τσιμεντένεση του δεύτερου σταδίου (5–10 m) και μετά από τον μηδενισμό της πίεσης στο μανόμετρο, το παρέμβυσμα (packer) μετατοπιζόταν στο πρώτο στάδιο για να γίνει τσιμεντένεση χωρίς να μεσολαβεί άλλος χρόνος αναμονής.

Κατά την εκτέλεση των τσιμεντενέσεων στον τάπητα της τάφρου πυρήνα (**Εικόνα 1.5**) δεν υπήρχαν ιδιαίτερες απορροφήσεις, πλην του αριστερού

αντερείσματος, με αποτέλεσμα να απαιτηθεί περαιτέρω γεωλογική έρευνα με την εκτέλεση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και δοκιμών εισπίεσης (Lugeon). Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης της διαπερατότητας στους υποκείμενους σχηματισμούς του σώματος του φράγματος, μετά από επεξεργασία των επί τόπου δοκιμών εισπίεσης κατά Lugeon.



**Εικόνα 1.5: Τσιμεντενέσεις τάπητα (ΑΕΓΕΚ, 2001).**

Πριν την έναρξη θεμελίωσης του πυρήνα και προκειμένου να εξεταστεί το υλικό της Ζώνης 1 (αργίλος), καθώς επίσης και ο τρόπος διάστρωσης, διαβροχής και επεξεργασίας, όπως και τα χρησιμοποιούμενα μέσα (δισκόσβαρνα, κατσκοπόδαρο CAT-825), αριθμός διελεύσεων, πραγματοποιήθηκε κατασκευή δοκιμαστικού αναχώματος. Μετά από εργαστηριακό έλεγχο της επιτυγχανόμενης συμπίκνωσης και της υγρασίας της αργίλου του δοκιμαστικού αναχώματος, εγκρίθηκε η χρήση του αργιλικού υλικού, των μέσων καθώς και της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην κατασκευή του δοκιμαστικού αναχώματος.

Η παραπάνω διαδικασία (**Εικόνα 1.6**) περιλαμβάνει:

- Άνοιγμα της υπάρχουσας στρώσης αργίλου με διέλευση κατσκοπόδαρου.
- Απόθεση αργιλικού υλικού με ταυτόχρονο υδροψεκασμό.
- Διάστρωση της σφουρ αργιλικού υλικού σε στρώσεις πάχους 20 cm, με ταυτόχρονο υδροψεκασμό από προωθητή CAT-D8R.
- Άνοιγμα της νεοδιαστρωμένης αργίλου με μία διέλευση δισκόσβαρνας.
- Διαβροχή της νεοδιαστρωμένης αργίλου με διελεύσεις του βυτίου νερού (ο αριθμός διελεύσεων εξαρτάται από την φυσική υγρασία της αργίλου, σε σχέση με την βέλτιστη που έχει εξακριβωθεί εργαστηριακά).

- Συμπύκνωση με 12 διελεύσεις κατσικοπόδαρου CAT-825.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται από την αρχή όταν ολοκληρωθεί η στρώση της αργίλου σε όλη την επιφάνεια της εκάστοτε στέψης του πυρήνα.

Το υλικό στο δανειοθάλαμο έχει φυσική υγρασία κοντά στη βέλτιστη. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτήθηκε ελαφρά ύγρανση στο δανειοθάλαμο και στο ανάχωμα του φράγματος, κατά την διάστρωση. Η υγρασία κατά τη συμπύκνωση πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 2% και 3% της βέλτιστης.

#### 1.4.3.3. Κελύφη

Το υλικό για τα κελύφη (σώματα στήριξης) του φράγματος προήλθε από δανειοθαλάμους αμμοχάλικων που βρίσκονται κοντά στη θέση του φράγματος. Η διερεύνηση για καταλληλότητα και επάρκεια του υλικού έγινε με την εκσκαφή σκαμμάτων. Διερευνήθηκε αφενός το βάθος του κατάλληλου υλικού και αφετέρου η μακροσκοπική του σύσταση. Στα σκάμματα έγινε δειγματοληψία υλικού από διάφορα βάθη για εργαστηριακούς ελέγχους και δοκιμές.

Η μέγιστη διάσταση κροκάλας που ενσωματώθηκε στα κελύφη του φράγματος είναι 0.40 m ίση με το πάχος της στρώσης μετά τη συμπύκνωση της.



**Εικόνα 1.6: Γενική άποψη φράγματος στο στάδιο κατασκευής (ΑΕΓΕΚ, 2002).**

Το υλικό στα σώματα στήριξης του φράγματος διαστρώνεται και συμπυκνώνεται σε οριζόντιες στρώσεις, πάχους μικρότερου ή ίσου με 0.40 m (μετά τη συμπύκνωση), με τέσσερις τουλάχιστον διελεύσεις δονητικού κυλινδροσυμπυκνωτή (υπό πλήρη δόνηση), ώστε να επιτυγχάνεται ο βαθμός

συμπύκνωσης που προβλέπεται στη σχετική μελέτη (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Τεχνική Έκθεση).

Η θεμελίωση του σώματος του φράγματος έγινε στην επιφάνεια του πετρώματος, το οποίο αποκαλύφθηκε μετά από μικρού βάθους (της τάξης του 1.0 m) επιφανειακό καθαρισμό των χαλαρών, αποσαθρωμένων και οργανικών υλικών. Τοπικά απαιτήθηκε ελαφρά εξομάλυνση της επιφάνειας, ώστε να μην υπάρχουν τμήματα με απότομες κλίσεις.

#### *1.4.3.4. Φίλτρα και στραγγιστήρια*

Σκοπός των φίλτρων είναι να επιτρέπουν στο νερό των πόρων να διαφεύγει από τις ζώνες μικρής διαπερατότητας (αργιλικός πυρήνας) χωρίς να μεταφέρει εδαφικούς κόκκους.

Οι ζώνες φίλτρων και στραγγιστηρίων (**Εικόνα 1.7**) κατασκευάστηκαν από υλικά με κοκκομετρική διαβάθμιση που δεν θα μεταβληθεί με την επιβολή φορτίων από το ίδιο βάρος του αναχώματος ή με την πάροδο του χρόνου. Τα υλικά των ζωνών αυτών προήλθαν από επεξεργασία (κοσκίνισμα, πλύσιμο, ανάμιξη κλπ) προϊόντων εκσκαφής δανειοθαλάμου με αμμοχάλικα ποταμού.

Η διάστρωση και συμπύκνωση των υλικών έγινε σε οριζόντιες στρώσεις, πάχους 0.4 m. Σύμφωνα με την μελέτη, το υλικό του φίλτρου πρέπει να είναι ελαφρώς υγρό κατά τη μεταφορά, εκφόρτωση και διάστρωση, ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση μεγάλων κόκκων στις παρυφές των σωρών εκφόρτωσης.



**Εικόνα 1.7: Ζώνες φίλτρων – στραγγιστηρίων (ΑΕΓΕΚ, 2002).**

#### 1.4.3.5. Λιθορριπή προστασίας

Η προστασία του ανάντη πρανούς του αναχώματος από τους κυματισμούς του νερού στον ταμιευτήρα επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μιας ζώνης από φυσικούς λίθους, κατάλληλων διαστάσεων (**Εικόνα 1.8**).

Ο προσδιορισμός του μεγέθους των τεμαχών βράχου βασίζεται στον προσδιορισμό του ύψους κύματος που αναπτύσσεται στον ταμιευτήρα. Η μέγιστη διάσταση τεμαχών που τοποθετήθηκαν είναι  $D_{max}=0.70$  m. Το πάχος της λιθορριπής προστασίας ορίζεται σε 1 m, προκειμένου τα μεγαλύτερα τεμάχια βράχου να ενσωματώνονται πλήρως.

Το κατάντη πρανές του σώματος του φράγματος προστατεύεται από τη διαβρωτική επίδραση των βροχοπτώσεων και κυρίως από την επιφανειακή ροή του νερού, με την επικάλυψη του από κροκάλες ποταμού (Ζώνη 5). Η μέγιστη διάσταση κροκάλας είναι 20 cm.



**Εικόνα 1.8: Λιθορριπή προστασίας (ΑΕΓΕΚ, 2003).**

#### 1.4.4. Αυχενικό φράγμα

Το αυχενικό φράγμα (**Εικόνα 1.9**) τοποθετείται 700 m περίπου νοτιοδυτικά από το κυρίως φράγμα και μαζί με τη στέψη του υπερχειλιστή κλείνουν την ισοϋψή των +117.5 m, που είναι η ανώτατη στάθμη λειτουργίας της λεκάνης κατάκλυσης. Το καθαρό μήκος του αυχενικού φράγματος είναι περίπου 140 m και η στέψη του στο +125.00 m.

Η κλίση των πρανών του αυχενικού φράγματος είναι 2:1, ενώ στο επίπεδο +115.00 m του ανάντη πρανούς δημιουργήθηκε σταθεροποιητικός αναβαθμός

πλάτους 10 m με κλίση πρανών 2.5:1. Η στέψη του κεντρικού πυρήνα τοποθετείται στο +123.00 m με πλάτος 3.00 m και κλίση πρανών 1:2.5.

Προκειμένου να βελτιωθεί η στεγανότητα της θεμελίωσης του αυχενικού φράγματος, χωρίς την κατασκευή πετάσματος τσιμεντενέσεων, προβλέφθηκε η κατασκευή αδιαπέρατου τάπητα ανάντη του πυρήνα, πάχους 1.00 m που θα εκτείνεται μέχρι 20.00 m από τον άξονα του σώματός του. Στην κατάντη παρειά του πυρήνα τοποθετείται ζώνη φίλτρου πάχους 2 m με στέψη στα +121.00 m.



**Εικόνα 1.9: Αυχενικό φράγμα.**

#### **1.4.5. Σύστημα υπερχείλισης**

Το σύστημα υπερχείλισης (**Εικόνα 1.10**) του έργου αποτελείται από την διώρυγα προσαγωγής, τον υπερχειλιστή, την διώρυγα πτώσης, την λεκάνη ηρεμίας και την διώρυγα φυγής.

Η διώρυγα προσαγωγής καθοδηγεί ομαλά τη ροή του νερού προς το έργο υπερχείλισης. Ο πυθμένας της διώρυγας κατασκευάστηκε στο υψόμετρο +115.00 m. Το τμήμα της διώρυγας πλησίον του έργου υπερχείλισης επενδύεται με οπλισμένο σκυρόδεμα, αγκυρωμένο στο πέτρωμα με ράβδους αγκύρωσης. Το νερό καθοδηγείται στο έργο υπερχείλισης με δύο πλευρικούς τοίχους από σκυρόδεμα.

Ο υπερχειλιστής είναι μετωπικός, πλάτους 36.60 m και ύψους σχεδιασμού 4.50 m. Η στέψη του υπερχειλιστή τοποθετήθηκε στο +117.50 m, ενώ η θεμελίωση του στο υψόμετρο +111.00 m. Το μήκος του σώματος του υπερχειλιστή είναι 17.95 m.



Η διώρυγα πτώσης προβλέπεται όταν ολοκληρωθεί, να έχει μήκος 111.00 m, με πλάτος κυμαινόμενο μεταξύ 31.00 και 15.00 m. Η διώρυγα θα έχει κλίση 8% και μετά μια συναρμογή μήκους 7 m θα περνάει σε κλίση 20%.

Η διατομή θα αποτελείται από πλάκες με εγκάρσιες και διαμήκεις οδοντώσεις και κατακόρυφους πλευρικούς τοίχους αντιστήριξης, με αρμούς περίπου ανά 10 m. Η διώρυγα θα εδράζεται σε στρώση διαπερατής επίχωσης πάχους 1.50 m.

Η λεκάνη ηρεμίας θα κατασκευασθεί ως ανάποδο Π, πλάτους 15.00 m και θα έχει συνολικό μήκος 96.50 m.

Κατάντη του έργου εξόδου της λεκάνης ηρεμίας, τα νερά θα οδηγούνται μέσω της διώρυγας φυγής σε φυσικό χείμαρρο που εκβάλει στον ποταμό Γαδουρά. Το μήκος του χείμαρρου μεταξύ του έργου εξόδου και της συμβολής του με τον ποταμό Γαδουρά θα είναι 950 m. Λόγω των δυσμενέστερων επιπτώσεων από πιθανή διάβρωση του εδάφους στη περιοχή του έργου εξόδου από τη λεκάνη ηρεμίας, κρίθηκε σκόπιμη η προστασία της κοίτης της διώρυγας φυγής και επί μήκους 200 m με συρματοκιβώτια.



**Εικόνα 1.10: Σύστημα υπερχειλίσης.**

#### **1.4.6. Σήραγγες Αποστράγγισης**

Για την αποστράγγιση των αντερείσμάτων κατάντη του άξονα του φράγματος κατασκευάστηκε σύστημα σήραγγων αποστράγγισης και στα δύο αντερείσματα. Οι σήραγγες έχουν κυκλικό θόλο και ορθογωνικό δάπεδο, εσωτερικού πλάτους 2.5 m.

Στο αριστερό αντέρεισμα κατασκευάστηκε σήραγγα συνολικού μήκους 380 m (**Εικόνα 1.11**), από τα οποία τα 230 m είναι για προσπέλαση και τα υπόλοιπα 150 m για αποστράγγιση.

Στο δεξιό αντέρεισμα η σήραγγα έχει μήκος 330 m (130 m προσπέλασης και 200 m αποστράγγισης) και θα παροχετεύει τα νερά της αποστράγγισης στη σήραγγα υδροληψίας – εκκένωσης.

Στις σήραγγες αποστράγγισης ο σχεδιασμός προέβλεπε τοποθέτηση χαλύβδινων πλαισίων σε αποστάσεις 1.0 m μεταξύ τους και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες ελάχιστου πάχους 5 cm στο θόλο και στις παρειές. Απαιτήθηκε πύκνωση των πλαισίων και νέες στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο θόλο, τις παρειές και το δάπεδο, πάχους 15 cm. Η μόνιμη επένδυση της σήραγγας έγινε από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 και πάχους 10 cm στο θόλο, ενώ στο δάπεδο κατασκευάστηκε μικρό κανάλι για την απορροή των υδάτων αποστράγγισης.



**Εικόνα 1.11: Αποστραγγιστική σήραγγα στο αριστερό αντέρεισμα (ΑΕΓΕΚ, 2003).**

#### **1.4.7. Οδοποιία**

Στη στέγη του φράγματος προβλέπεται η κατασκευή οδού, με ασφαλτικό τάπητα για διέλευση οχημάτων και πεζών. Δεξιά και αριστερά της οδού θα τοποθετηθούν περιφράγματα ασφαλείας, καθώς και στύλοι φωτισμού.

Κατασκευάστηκε (βάση – υπόβαση, όχι ασφαλτικά) οδός για προσπέλαση στο έργο, από την υπάρχουσα εθνική οδοποιία, πάνω από τη γέφυρα του υπερχειλιστή προς τη στέγη του φράγματος, το κτίριο διοίκησης και στη συνέχεια προς τον πόδα

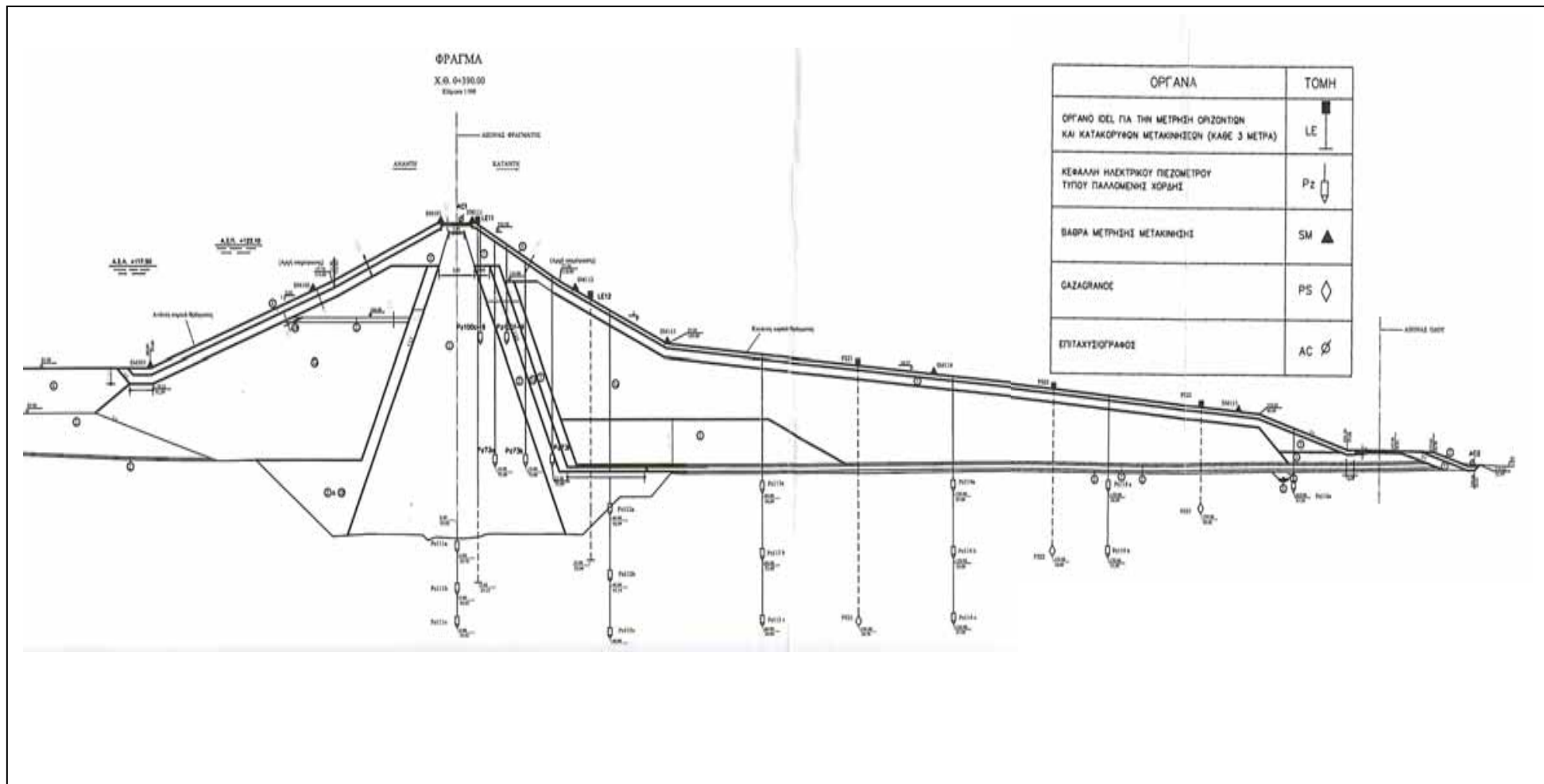
του φράγματος και την είσοδο της αριστερής αποστραγγιστικής σήραγγας. Ο δρόμος στον πόδα του φράγματος προβλέπεται στο υψόμετρο +77.00 m.

## 1.5. Συστήματα οργάνων

Τα συστήματα οργάνων που εγκαταστάθηκαν πάνω στην κατασκευή του σώματος του φράγματος για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της συμπεριφοράς του φράγματος είναι τα εξής:

- Πέντε κλισιόμετρα για τη μέτρηση των πλευρικών μετακινήσεων.
- Δεκατέσσερα όργανα για συνδυασμένη μέτρηση πλευρικών μετακινήσεων και καθιζήσεων.
- Δώδεκα πιεζομετρικά φρέατα, πλήρη με σωλήνες και εξαρτήματα συμπεριλαμβανομένου ηλεκτρικού σταθμημέτρου.
- Έξι πιεζομετρικά φρέατα τύπου Casagrande, πλήρη με σωλήνες και εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένου ηλεκτρικού σταθμημέτρου.
- Σύστημα μέτρησης της πίεσης των πόρων με 40 ηλεκτρικά πιεζόμετρα τύπου δονούμενης χορδής, το οποίο περιλαμβάνει πιεζομετρικά κύτταρα, καλώδια, εξαρτήματα και συσκευή ανάγνωσης μετρήσεων.
- Έξι βάθρα τριγωνομετρικών σημείων, πλήρη με όλα τα εξαρτήματα.
- Δεκαοκτώ βάθρα για μετρήσεις κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων.

Μια τυπική διατομή του κυρίως φράγματος όπου φαίνονται οι θέσεις τοποθέτησης των διαφόρων οργάνων παρατίθεται στο **Σχήμα 1.4**.



Σχήμα 1.4 : Θέσεις οργάνων φράγματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

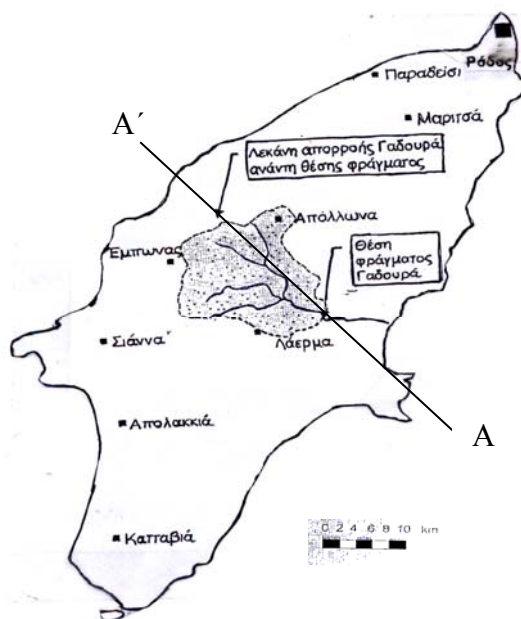
# ΓΕΝΙΚΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

### 2.1. Γεωμορφολογία

Η περιοχή κατασκευής του φράγματος Γαδουρά βρίσκεται στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της νήσου (Σχήμα 2.1). Η οριστική θέση του φράγματος και των παράλληλων με αυτό έργων τοποθετείται περίπου 10 km ανάντη της εκβολής του ποταμού Γαδουρά.

Η λεκάνη απορροής του φράγματος καλύπτει μία έκταση 147,7 km<sup>2</sup>. Η μορφολογία χαρακτηρίζεται ως λοφώδης έως ημιορεινή εκτεινόμενη σε υψόμετρα από +72.25 (στάθμη κοίτης φράγματος) έως +650.00 m περίπου.

Σύμφωνα με την οριστική μελέτη του φράγματος Γαδουρά, η περιοχή κατασκευής του φράγματος εκτιμάται ότι βρίσκεται σε στάδιο προχωρημένης νεότητας με διαμορφωμένες ομαλές κλιτύες και αναβαθμίδες, με αρκετά ανεπτυγμένο υδρολογικό δίκτυο, χωρίς ανάπτυξη εκτεταμένου και μόνιμου μαιανδρικού συστήματος. Στις περιοχές αντρευσμάτων του φράγματος, τα φυσικά πρηνή αναπτύσσονται με κλίσεις 10 – 20°, με ομαλή δηλαδή διαμόρφωση.



Σχήμα 2.1: Θέση φράγματος Γαδουρά.

## 2.2. Γεωλογία

Από γεωτεκτονική άποψη, η νήσος Ρόδος αποτελεί τμήμα του νοτιοανατολικού τόξου του Αιγαίου, το οποίο με την σειρά του αποτελεί τμήμα του ευρύτερου ενεργού γεωτεκτονικού τόξου των Εξωτερικών Ελληνίδων Ζωνών. Το τόξο αυτό εκτείνεται από τη νήσο Ζάκυνθο έως τις νοτιοδυτικές παρυφές των ακτών της Μικράς Ασίας, περιβάλλοντας τον ελληνικό νότιο θαλάσσιο χώρο και οριοθετώντας στην ουσία την περιοχή σύγκλισης, σύγκρουσης και καταβύθισης της αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από την αντίστοιχη ευρασιατική (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Γεωλογική Περιγραφή).

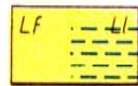
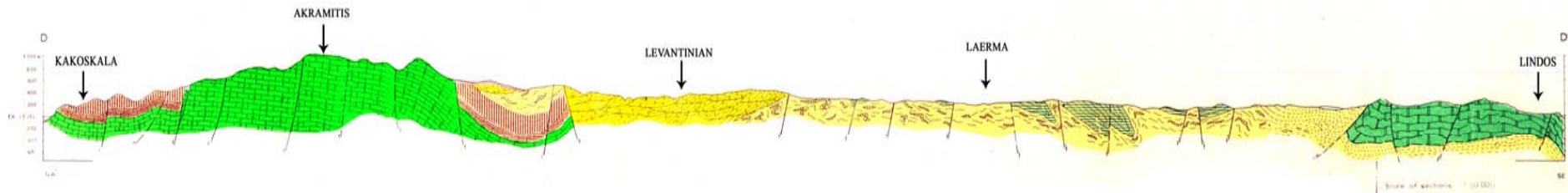
Σύμφωνα με τις πλέον σύγχρονες γεωλογικές αντιλήψεις, το δυτικό άκρο των Εξωτερικών Ελληνίδων Ζωνών αποτελεί η Ιόνιος γεωτεκτονική ζώνη, η οποία σηματοδοτεί την πλέον πρόσφατη κίνηση στον ελλαδικό χώρο, ηλικίας Ολιγόκαινου με την ανάδυση του "συνορογενετικού" σχηματισμού του φλύσχη και των "μεταορογενετικών" μολαστικών αποθέσεων.

Η ανάπτυξη των θλιπτικών τάσεων από την αφρικανική προς την ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα αποτελεί γεγονός τουλάχιστον από την εποχή των πρόσφατων αυτών ορογενετικών κινήσεων έως και σήμερα, καθιστώντας τον χώρο του νότιου και νοτιοανατολικού Αιγαίου, πεδίο θλιπτικών τάσεων στην νότια παρειά του και εφελκυστικών στην περιοχή του κεντρικού Αιγαίου. Αυτό είχε ως συνέπεια την ανάπτυξη μορφολογικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών τυπικού γεωτεκτονικού τόξου (τάφος καταβύθισης νότια της Κρήτης και της Ρόδου, ηφαιστειακό τόξο Θήρας κ.λπ.) και την αυξημένη σεισμική δραστηριότητα του Ελλαδικού χώρου.

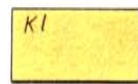
Με βάση τα παραπάνω και επικεντρώνοντας στην περιοχή του έργου, η νήσος Ρόδος αποτελεί το τελευταίο τμήμα των Εξωτερικών Ζωνών πριν από την συναρμογή τους με τις Ταυρίδες οροσειρές στην ενδοχώρα της Τουρκίας.

Η πρόσφατη τεκτονική δράση, όσο και η συνεχής υψηλή σεισμικότητα της νήσου είναι οι βασικοί παράγοντες διαμόρφωσης περίπλοκων στην ανάλυση γεωλογικών δομών. Σ' αυτές τις δομές στρωματογραφικά μέλη της Ιονίου ζώνης συμπλέκονται με παλαιές και πρόσφατες ιζηματογενείς δομές με ένα πλήθος τεκτονικών και στρωματογραφικών αλληλουχιών.

Στο **Σχήμα 2.2** απεικονίζεται η γεωλογική τομή ΑΑ' της ευρύτερης περιοχής του φράγματος (βλέπε Σχήμα 2.1).



« Levantian »; (Lf): fluvial conglomerate, gravel, sand, and pink and grey silty marl, with *Helix*, *Planorbis*, *Unio*; (Ll): lacustrine grey marl, sand and gravel with *Viviparus*, *Melanoides*, *Melanopsis*, *Theodorus*, *Corymbina*, *Unio* and fossil leaves. Travertine. Lignite. (? Pontian to Middle-Upper Pliocene).



Laerma Member (Kl): olive-grey calcareous shale, alternating with thin bedded, lithic, turbidite sandstone and thin to massive beds of light-grey to very light-grey micritic limestone, with detrital and skeletal grains at the base, and often characterized by parallel to wavy lamination. Dark reddish-brown shale is common at the base of this unit. (? Lower Oligocene).



Kakoskala Marly Limestone (Km): well bedded, red, marly limestone and marl, with red chert nodules and with a massive Nummulitic calcirudite intercalation. Fossils: *Globorotalia*, *Globigerina*, *Nummulites* and other reworked macroforaminifera. (Middle-Upper Eocene).



Akramitis Limestone (Ak): well bedded, grey, cherty, graded calcirudite and calcarenite, alternating with light-brown calcilutite. Well bedded, yellow-brown pelagic limestone in a thick intercalation (Ataviros). Mermika Member (Am): well bedded, light - brown cherty calcilutite (Alimnià). Microfossils: *Globotruncana lapparenti lapparenti* Brotzen, *G. lapparenti coronata* Bolli, *G. lapparenti angusticarinata* Gandolfi, in the lower beds; *Orbitoides media* (d'Archiac) and its typical Maastrichtian assemblage, in the middle beds; *Globorotalia*, *Globigerina*, and *Nummulites* in the upper beds. (Turonian to Middle Eocene).



Lindos Limestone (L): thick-bedded, dark blue-grey and white fetid marble. One intercalation of micritic limestone, with *Nezzazata simplex* Omara, *Nummotoculina heimi* Bonet, *Cuneolina cf. pavonia parva* Henson, *Chrysalidina* sp. (Cenomanian).

Σχήμα 2.2: Γεωλογική τομή στην περιοχή του φράγματος (Mutti, Orombelli, Pozzi, 1960 - 1965)

### 2.3. Στρωματογραφία

Από στρωματογραφικής άποψης, τόσο στην λεκάνη απορροής όσο και ειδικότερα στην λεκάνη κατάκλισης του φράγματος, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται (Σχήμα 2.3), περιγράφονται από τους νεότερους προς τους παλαιότερους ως εξής (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Γεωλογική Περιγραφή):

#### Τεταρτογενές

➤ Ενότητα E1 (Πρόσφατες αποθέσεις)

Αλλούβια και κολλούβια πρόσφατων αποθέσεων, αποτελούμενα από άμμους, χαλίκια και κροκάλες της κοίτης του ποταμού, αποθέσεις αναβαθμίδων, και πλευρικά κορήματα. Εμφανίζουν χαλαρή δομή και μικρό σχετικά πάχος.

➤ Ενότητα E2 (Σχηματισμός περιοχής Σγούρου)

Πλειστοκαινικά αδιαβάθμητα ιζήματα με ευρύ κοκκομετρικό φάσμα (μάργες, ίλυες, άμμοι και χαλίκια), παράκτιας φάσης, που συναντώνται στο ανατολικότερο τμήμα της λεκάνης του φράγματος.

#### Πλειόκαινο

➤ Ενότητα E3 (Λεβαντίνιοι σχηματισμοί)

Ποταμοχειμμάρια κροκαλοπαγή και μάργες λιμναίας προέλευσης, άστρωτα έως διασταυρωτής στρώσης. Επικάθονται ασύμφωνα στους σχηματισμούς του υποβάθρου.

#### Κάτω Ολιγόκαινο – Μειόκαινο

➤ Ενότητα E4 (Μολασσικοί σχηματισμοί ομάδας Βάτι)

Πολύμικτα κροκαλοπαγή στη βάση που μεταβαίνουν σε εναλλαγές ιλυολίθων – ψαμμιτών στα νεότερα μέλη. Παρατηρείται μετάβαση από αδρόκοκκη σε μεσόκοκκη φάση και γωνιώδης ασυμφωνία με τους σχηματισμούς του υποβάθρου.



## Ηώκαινο – Κάτω Ολιγόκαινο

- Ενότητα E5 (Συνορογεννητικός φλύσχης *Καταβιάς*)
  - Υποενότητα E5.1 (Ψαμμίτες περιοχής *Σταφυλιά*)

Τουρβιδιτικοί ψαμμίτες, λεπτοπλακώδεις έως παχυπλακώδεις, με λεπτές ενστρώσεις αργιλικού σχιστόλιθου. Αντιστοιχεί στην αδρομερή φάση του φλύσχη.
  - Υποενότητα E5.2 (Εναλλαγές ιλυολίθων – ψαμμιτών)

Σύστημα εναλλαγών ιλυολίθου – ψαμμίτη, με ποικιλία στρώσεων, έντονα πτυχωμένο και τεκτονισμένο.
  - Υποενότητα E5.3 (Ιλυόλιθοι περιοχής *Σιάνα*)

Ασβεστιτικοί ιλυόλιθοι με ψαμμιτικές στρώσεις και φακούς κλαστικού ασβεστολίθου.
  - Υποενότητα E5.4 (Αργιλικό σχιστόλιθοι περιοχής *Λάερμα*)

Ασβεστιτικοί αργιλικό σχιστόλιθοι με λεπτές ενστρώσεις και σποραδικούς φακούς μικριτικού ασβεστόλιθου και γύψου. Αναφέρεται ως η πλέον επικρατούσα φάση του φλύσχη και αποτελεί το υπέδαφος θεμελίωσης του φράγματος.

## Κρητιδικό – Ηώκαινο

- Ενότητα E6 (Επωθημένα ασβεστολιθικά καλύμματα)

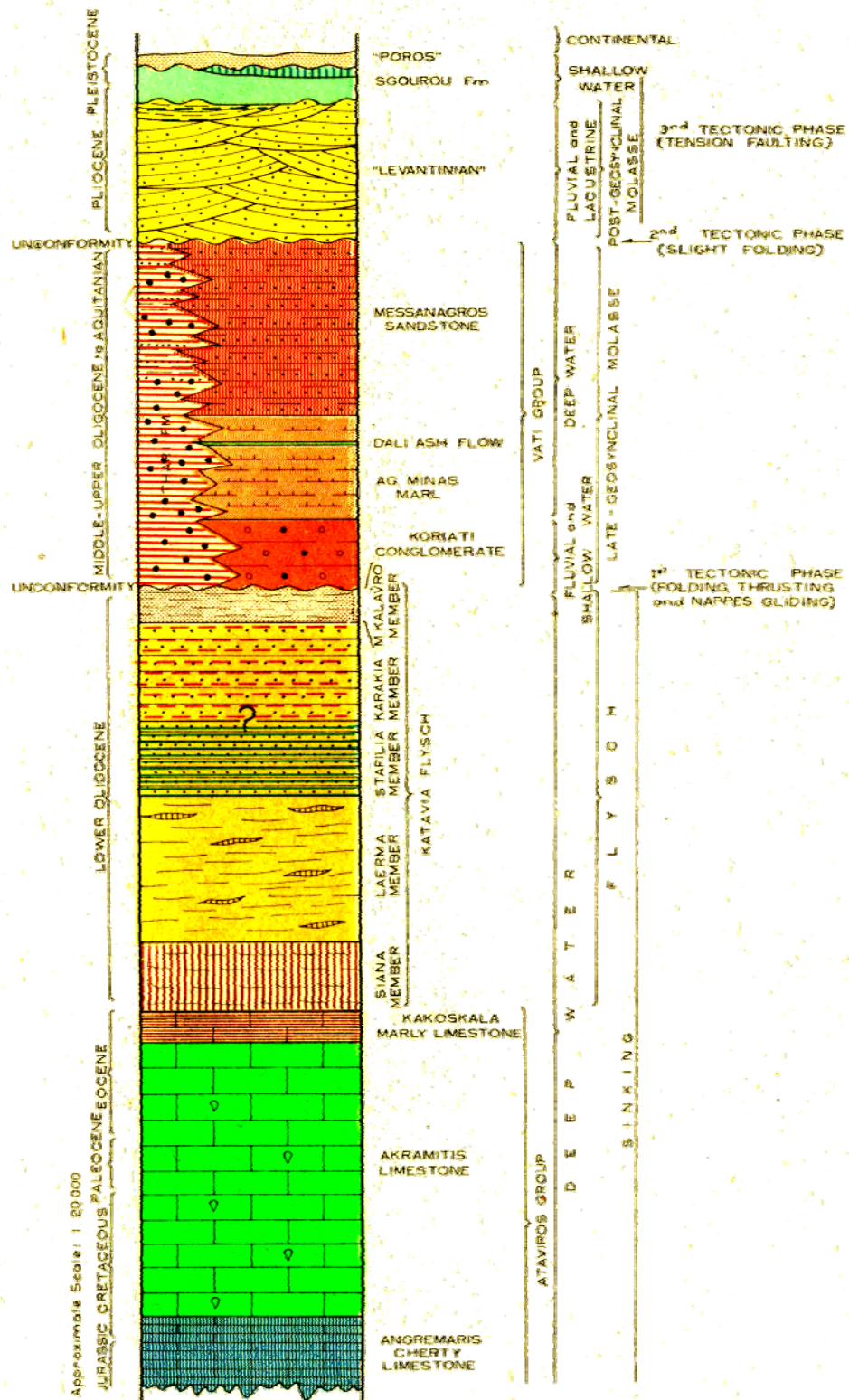
Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες έως λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι με πυριτικούς κονδύλους, με χαρακτηριστική μετάβαση από την ανθρακική στην πυριτική φάση ιζηματογένεσης.
- Ενότητα E7 (Αυτόχθονη ασβεστολιθική σειρά *Αταβύρου*)

Ασβεστόλιθοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι έως μάργες, λεπτοπλακώδεις έως μεσοπλακώδεις, με λίγους πυριτικούς κονδύλους και με εμφανή μετάβαση από την ανθρακική στην αργιλοπυριτική ιζηματογενή φάση. Εμφανίζονται στα δυτικά όρια της λεκάνης απορροής.

# STRATIGRAPHIC and TECTONIC RELATIONSHIP

(AUTOCHTHON and NEOAUTOCHTHON)

CHRONOSTRATIGRAPHY      LITHOSTRATIGRAPHY      ENVIRONMENT      TECTONICS



Σχήμα 2.3: Στρωματογραφία περιοχής φράγματος (Mutti, Orombelli, Pozzi, 1960-1965).

## 2.4. Τεκτονική

Η γενική τεκτονική εικόνα της περιοχής κατασκευής του έργου έχει διαχωριστεί στις ακόλουθες τεκτονικές ακολουθίες γεγονότων (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Γεωλογική Περιγραφή):

### Ολιγόκαινο

➤ Τεκτονική Ακολουθία T1 (Αυτόχθονο σύστημα)

Πτύχωση, κλειστή, ανεστραμμένη και αποκομμένη με επιπεύσεις και επωθήσεις, γενικής παράταξης BA – NΔ και κλίσης NA. Επηρεάζει όλα τα μέλη του υποβάθρου με χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση και τεκτονικές μετακινήσεις, ειδικά όμως η πλαστική παραμόρφωση της φάσης αποτυπώνεται στους αργιλικούς σχιστολίθους της υποενότητας.

➤ Τεκτονική Ακολουθία T2 (Αυτόχθονο σύστημα)

Επίπλευση ευρείας κλίμακας, σε μεγάλες αποστάσεις και πιθανόν οριζοντίου χαρακτήρα με χαρακτηριστικές εμφανίσεις τοπικής κλίμακας.

### Ανώτερο Μειόκαινο

➤ Τεκτονική Ακολουθία T3 (Νεοαυτόχθονο σύστημα)

Πτύχωση, ανοιχτή, γενικής παράταξης BA – NΔ και κλίσης NA

### Τεταρτογενές

➤ Τεκτονική Ακολουθία T4 (Νεοτεκτονικό σύστημα)

Ρωγμάτωση, με μεταπτώσεις κατακόρυφου χαρακτήρα και ανάπτυξη δύο οικογενειών κανονικών ρηγμάτων με προσανατολισμό BBA – NNΔ και BBD – NNA χαρακτηριστική δημιουργία νεοτεκτονικών ανυψώσεων και ταπεινώσεων του φυσικού αναγλύφου.

## 2.5. Υδρογεωλογία

Η υδρογεωλογική εικόνα της περιοχής καθορίζεται κυρίως με βάση την επιμέρους σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών και την τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών και είναι η εξής (Οριστική μελέτη φράγματος Γαδουρά, 2000. Γεωλογική Περιγραφή):

➤ Ενότητα ΥΔΡ1 (Σχηματισμοί μεγάλης περατότητας)

Στην ενότητα αυτή κατατάσσονται όλες οι πρόσφατες τεταρτογενείς αποθέσεις του ποταμού, όπως αποθέσεις κοίτης, αποθέσεις αναβαθμίδας και τα πλευρικά κορήματα αδρομερούς σύστασης και χαλαρής δομής που εμφανίζουν πρωτογενές πορώδες και υψηλή διαπερατότητα ( $>10^{-2}$  cm/sec).

➤ Ενότητα ΥΔΡ2 (Σχηματισμοί μέσης περατότητας)

• Υποενότητα ΥΔΡ2.1 (Περατότητα πρωτογενούς–δευτερογενούς πορώδους)

Στην ενότητα αυτή κατατάσσονται οι τριτογενείς αποθέσεις όπως τα πλειστοκαινικά ιζήματα περιοχής *Σγούρου*, οι "*Λεβαντίνοι*" σχηματισμοί και οι μολασικοί σχηματισμοί, οι οποίοι εμφανίζουν μικτή συμπεριφορά. Αφενός το πρωτογενές πορώδες τους οφείλεται στην αδρομερή κοκκομετρική τους σύνθεση και στην χαλαρή δομή τους, με συνέπεια την ανάπτυξη αξιόλογου υδροφόρου οριζόντιου. Αφετέρου όμως η τεκτονική καταπόνηση που έχουν υποστεί, ιδιαίτερα λόγω της νεοτεκτονικής δράσης, οδηγεί στη δημιουργία σημαντικού δευτερογενούς πορώδους με μεγάλη ανάπτυξη κατά μήκος των τεκτονικών αξόνων και μικρή πλευρική διασπορά, με συνέπεια την αύξηση της περατότητας και την εμφάνιση μικρών πηγών.

• Υποενότητα ΥΔΡ2.2 (Περατότητα δευτερογενούς πορώδους)

Στην ενότητα αυτή κατατάσσονται οι ασβεστολιθικοί σχηματισμοί της αυτόχθονης και αλλόχθονης τεκτονικής ακολουθίας, όπου η περατότητα εξαρτάται άμεσα από τον βαθμό τεκτονισμού και ρηγμάτωσης. Τα ασβεστολιθικά καλύμματα αναπτύσσουν αξιόλογη υδροφορία που οφείλεται αφενός στην επιφανειακή τους εξάπλωση και στον βαθμό τεκτονισμού και αφετέρου στην ύπαρξη στεγανού οριζόντιου υποβάθρου και στο μεγάλο

βαθμό κατείδυσης (~10%). Οι δε αυτόχθονοι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται και αυτοί έντονα πτυχωμένοι και διερρηγμένοι και σε συνδυασμό με την οριζοντιογραφική τους εξάπλωση, αναπτύσσουν έντονο δευτερογενές πορώδες, δημιουργώντας προϋποθέσεις ανάπτυξης αξιόλογης υδροφορίας, με πιθανή μερική εκφόρτιση στα κορήματα των δυτικών παρυφών της λεκάνης απορροής.

➤ Ενότητα ΥΔΡ3 (Σχηματισμός μικρής περατότητας)

Στην ενότητα αυτή κατατάσσονται αφενός τα συνεκτικά υγιή "*Λεβαντίνοι*" κροκαλοπαγή και τα λεπτομερής διαβάθμισης ιζηματογενή τμήματα των σχηματισμών της περιοχής Σγούρου και αφετέρου τα αδρόκοκκα τμήματα του φλύσχη, καθώς και τα περισσότερα αποσαθρωμένα τμήματα του, ανεξαρτήτου σύστασης. Τα χαρακτηριστικά της εν λόγω ενότητας αυτής είναι κυρίως μορφολογικά, με την ανάπτυξη σημαντικής επιφανειακής απορροής και απότομου αναγλύφου.

➤ Ενότητα ΥΔΡ4 (Σχηματισμοί πρακτικά αδιαπέρατοι)

Στην ενότητα αυτή κατατάσσεται ο φλύσχος "*Καταβιάς*" με κύρια συμμετοχή των επιμέρους λεπτόκοκκων υποενοτήτων του, όπου η σύσταση και η συνοχή του υγιούς σχηματισμού τον καθιστά πρωτογενώς αδιαπέρατο και ο τεκτονισμός του δημιουργεί μερικές ζώνες πολύ μικρής διαπερατότητας ( $10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/sec).

## 2.6. Γεωλογία στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος

Η ευρύτερη περιοχή θεμελίωσης των έργων του φράγματος Γαδουρά δομείται γεωλογικά από ασβεστόλιθους (αυτόχθονους, αλλά και επωθημένους πάνω σε φλύσχη) και ισχυρά αποσαθρωμένους αργιλικούς σχιστολίθους διαφόρων γεωτεκτονικών ζωνών (Πίνδου, Γαβρόβου, Ιονίου). Επίσης, από μεταλπικά μολασσικά, νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα, που αποτελούνται κυρίως από μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, πλευρικά κορήματα, υλικά αναβαθμίδων και καλύπτουν ασύμφωνα τους αλπικούς σχηματισμούς (Μαρίνος et al., 2004 με πηγή Mutti et al., 1970).

Εξαιτίας της θέσεώς του στην απόληξη του αιγιακού τόξου, ο αργιλικός σχιστόλιθος έχει υποστεί μικρή μετακίνηση και εξαιρετική παραμόρφωση, με

εσωτερική αναδιάταξη της δομής του, λόγω του έντονου τεκτονισμού, και χαρακτηρίζεται ως παραυτόχθονος (Μαρίνος et al., 2004 με πηγή Mutti et al., 1970).

Η πολυπλοκότητα της γεωλογικής δομής έχει ενισχυθεί εξαιρετικά από τη σημαντική νεοτεκτονική δραστηριότητα, κατακόρυφου–υποκατακόρυφου χαρακτήρα που βασικά οφείλεται στη γειτονία της νήσου Ρόδου προς το περιθώριο της ζώνης καταβύθισης της αφρικανικής τεκτονικής πλάκας, κάτω από την αιγειακή πλάκα και συνοδεύεται από υψηλή σεισμικότητα.

Τα αποτελέσματα της νεοτεκτονικής δραστηριότητας μπορούν να παρατηρηθούν στις μορφοτεκτονικές αναβαθμίδες στις πλευρές της λεκάνης του Γαδουρά, αλλά δεν είναι εμφανή στο αντέρεισμα όπου τοποθετείται η σήραγγα εκτροπής, λόγω της κάλυψης από τον ελουβιακό μανδύα του φλύσχη.

## **2.7. Σεισμικότητα περιοχής**

Η περιοχή της νήσου Ρόδου ανήκει στη σεισμικά ενεργή ζώνη του ιζηματογενούς μέρους του Ελληνικού τόξου. Χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα, μία από τις μεγαλύτερες στον ελλαδικό χώρο.

Πρόσφατα δεν εμφανίστηκαν σεισμικές εστίες, ούτε και ενεργά ρήγματα στην περιοχή του έργου. Η μεγαλύτερη σεισμική επιτάχυνση που διαπιστώθηκε ποτέ ήταν 0,17g για την γειτονική περιοχή της Λίνδου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:**

### **ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΔΟΚΙΜΕΣ LUGEON**

#### **3.1. Γενικές αρχές**

Η γνώση της διαπερατότητας του εδάφους είναι απαραίτητη, μεταξύ άλλων προκειμένου να εκτιμηθούν:

1. εισροές νερού μέσα σε εκσκαφές (π.χ. σήραγγες, στοές μεταλλείων–ορυχείων, εκσκαφές θεμελιώσεων, ανοικτές εκσκαφές μεταλλείων), και
2. διαρροές μέσα και κάτω από κατασκευές συγκράτησης νερού (π.χ. φράγματα, λιμνοδεξαμενές, αναχώματα λιμνών, κανάλια, κλπ).

Διαπερατότητα είναι η ιδιότητα των υλικών να επιτρέπουν την κίνηση ενός ρευστού διαμέσου της μάζας τους. Συνεπώς οποιοσδήποτε σχηματισμός επιτρέπει τη διέλευση ρευστού δια μέσου της μάζας του καλείται περατός, ενώ όταν η κίνηση αυτή μέσα στη μάζα του σχηματισμού είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη, τότε αυτός καλείται αδιαπέρατος (Μαρίνος, 1991).

Για τους βραχώδεις σχηματισμούς πάντως, πέρα από το πρωτογενές πορώδες η διαπερατότητα συνδέεται και με την παρουσία άλλων κενών χώρων μέσα στη μάζα τους, όπως για παράδειγμα ρωγμές, διαρρήξεις, καρστικοί αγωγοί, κλπ, που διαμορφώνουν το δευτερογενές πορώδες.

Τέτοια κενά ενδεχόμενα να μην επηρεάζουν την υδροπερατότητα, αν δεν υπάρχει σύνδεση – επικοινωνία μεταξύ τους, οπότε ο σχηματισμός είναι αδιαπέρατος. Για παράδειγμα αναφέρονται τα κενά που δημιουργεί ο εγκλωβισμός αερίων στη μάζα ενός ηφαιστειακού πετρώματος, τα οποία πολλές φορές δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

Έτσι, η διαπερατότητα σχετίζεται με:

- Το βαθμό διασύνδεσης και επικοινωνίας των πόρων μέσα στη μάζα του πετρώματος (ενεργό πορώδες).
- Το φυσικό μέγεθος των πόρων, που για τα κοκκώδη υλικά έχει σχέση με το μέγεθος, τη μορφή και τη διάταξη των κόκκων, αφού πολύ μικρού μεγέθους πόροι συνεπάγονται πολύ χαμηλή υδροπερατότητα.

Συνεπώς, στους βραχώδεις σχηματισμούς η διαπερατότητα εξαρτάται κυρίως από το δευτερογενές πορώδες και είναι μόνο έμμεσα συνδεδεμένη με το πρωτογενές πορώδες.

### 3.2. Υδατική ροή μέσω του εδάφους

Για να υπάρξει ροή ρευστού μέσα σε ένα κορεσμένο υλικό χρειάζεται διαφορά υδραυλικού φορτίου, δηλαδή διαφορά στην υδροστατική πίεση (Μαρίνος, 1991).

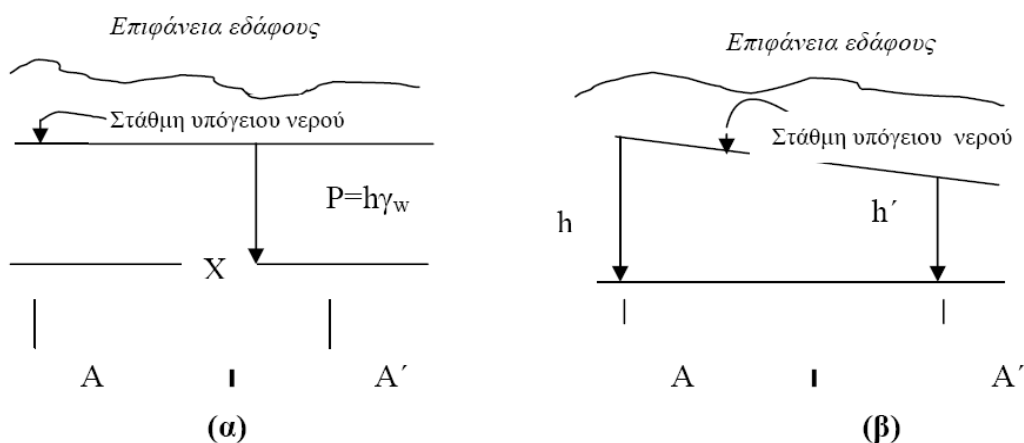
Στην περίπτωση που δεν υπάρχει υδραυλική κλίση,  $i$ , (hydraulic gradient) σε οποιοδήποτε σημείο  $X$  του επιπέδου  $A-A'$ , η πίεση  $P$  είναι ίση με το γινόμενο του  $h$  (ύψος στάθμης υπόγειου νερού) και του  $\gamma_w$  (μοναδιαίο βάρος του νερού) (**Σχήμα 3.1α**):

$$P = h * \gamma_w \quad [3.1]$$

Αντίθετα όπου υπάρχει υδραυλική κλίση, η ποσότητα του νερού ( $Q$ ) που ρέει μέσα από μια διατομή ( $A$ ) ισούται με το συντελεστή υδροπερατότητας ( $k$ ) επί την υδραυλική κλίση ( $dh/dl$ ), σύμφωνα με το νόμο του Darcy (**Σχήμα 3.1β**):

$$Q = -k * A * (dh/dl) \quad [3.2]$$

Συνεπώς, οποιαδήποτε αύξηση είτε στην υδραυλική κλίση είτε στις διαστάσεις της διατομής  $A$ , θα επιφέρει αύξηση στη ποσότητα του νερού που ρέει.



**Σχήμα 3.1:** Υδροδυναμικό καθεστώς υπόγειου νερού. (α) χωρίς υδραυλική κλίση, (β) με υδραυλική κλίση (Μαρίνος, 1991).



Από το νόμο του Darcy φαίνεται ότι ο λόγος της ποσότητας (Q) του νερού που ρέει μέσα από συγκεκριμένη διατομή (A) σε συγκεκριμένο χρόνο, δια της διατομής αυτής, καθορίζει τη μέση ταχύτητα ροής (V), δηλαδή:

$$V=Q/A=- k * (dh/dl) \quad [3.3]$$

ή με γενικευμένη μορφή:  $V = c * i$ , όπου  $i =$  η υδραυλική κλίση ( $dh/dl$ ) και  $c =$  σταθερά, που εξαρτάται από το υλικό μέσο (μέγεθος πόρων, βαθμός διασύνδεσης-επικοινωνίας των πόρων) και τις ιδιότητες του ρευστού (ιξώδες, πυκνότητα κλπ).

Στην περίπτωση που το κινούμενο ρευστό είναι το νερό, τότε η σταθερά  $c$  ισούται με  $k$ , δηλαδή με την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) ή όπως συνήθως καλείται, με το συντελεστή υδροπερατότητας. Συνεπώς θα πρέπει να διακρίνονται σαφώς:

- Η εσωτερική διαπερατότητα  $K_s$ , η οποία είναι μια ιδιότητα του υλικού μέσου μεταβίβασης του ρευστού και ανεξάρτητη των ιδιοτήτων του ρευστού.
- Η διαπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα  $K$ , που εξαρτάται από το πορώδες αλλά και το ίδιο το ρευστό. Όταν το ρευστό είναι νερό συμβολίζεται και με  $k$  (συντελεστής υδροπερατότητας).

Οι δύο αυτές ιδιότητες συνδέονται με τον τύπο:

$$K = K_s * \rho * g / \mu \quad [3.4]$$

όπου,

$K =$  Διαπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού μέσου (cm/sec),

$K_s =$  Εσωτερική διαπερατότητα,

$\mu =$  Ιξώδες ρευστού (cP),

$\rho =$  Πυκνότητα ρευστού ( $g/cm^3$ ),

$g =$  Επιτάχυνση βαρύτητας ( $cm/sec^2$ ).

Ο συντελεστής υδροπερατότητας  $k$ , για την περίπτωση του νερού μετράται σε m/day, m/sec, cm/sec, δηλαδή έχει διαστάσεις ταχύτητας.

Οι καλύτερες προσεγγίσεις της τιμής του συντελεστή υδροπερατότητας γίνονται με τη βοήθεια δοκιμών άντλησης (pumping out tests) σε υδρογεωτρήσεις, όπου η άντληση γίνεται σε μία κύρια γεώτρηση και η παρατήρηση του κώνου πτώσης της στάθμης του νερού στις περιβάλλουσες αυτής γεωτρήσεις.

Καθώς οι μέθοδοι αυτές είναι δαπανηρές και χρονοβόρες, για τις ανάγκες των τεχνικών έργων, ο υπολογισμός του συντελεστή υδροπερατότητας γίνεται:

1. κατ' εκτίμηση, με εμπειρικούς τύπους και διαγράμματα,
2. με τη χρήση περατομέτρων σταθερού ή μεταβλητού φορτίου στο εργαστήριο και
3. στην ύπαιθρο, με δοκιμές εισπίεσης.

### **3.3. Δοκιμές εισπίεσης νερού**

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού, αποτελούν τη βέλτιστη μέθοδο του συντελεστή υδροπερατότητας  $k$ , κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη. Στην περίπτωση των γεωτεχνικών μελετών χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης αυτών, κατά τη διάρκεια της διάρτησης, αλλά και για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Μαρίνος, 1991).

Δεν θα πρέπει πάντως να λησμονείται ότι η περατότητα ακόμα και σε ένα ομοιόμορφο σχηματισμό μεταβάλλεται από το ένα σημείο στο άλλο, ή ότι η παρουσία στρωσιγένειας υποδηλώνει συνήθως διαφορετική περατότητα κατά την οριζόντια σε σχέση με την κατακόρυφο διεύθυνση.

Συνήθως μετράται η περατότητα του πλέον υδροπερατού ορίζοντα. Εν τούτοις, καθώς δεν υπάρχει ικανοποιητική μέθοδος υπολογισμού της διαφοροποίησης της οριζόντιας από την κατακόρυφη διαπερατότητα, οι τιμές που λαμβάνονται στην ύπαιθρο θεωρούνται αντιπροσωπευτικές του εδαφικού στρώματος σαν σύνολο.

Κατά τις δοκιμές αυτές, είτε εισάγεται μέσα στη γεώτρηση ποσότητα νερού και μετρώνται οι απώλειες για δεδομένη πίεση, είτε καταγράφεται ο ρυθμός πτώσης της στάθμης του νερού μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για δοκιμές σταθερού φορτίου (constant head test), ενώ στη δεύτερη για δοκιμές μεταβλητού φορτίου (falling head test).

### 3.3.1. Δοκιμή Maag

Η απλούστερη μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή υδροπερατότητας είναι η δοκιμή Maag, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση υλικών με χαμηλή υδροπερατότητα (Μαρίνος, 1991).

Σύμφωνα με τη δοκιμή αυτή, παροχετεύεται νερό στη γεώτρηση και μετράται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει η στάθμη νερού που δημιουργήθηκε σε μια κατώτερη θέση.

Αν το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με την υδροστατική στάθμη του υδροφόρου είναι σε ένα ύψος περισσότερο από 2 m, οι μετρήσεις χρόνου - στάθμης γίνονται κάθε φορά που η στάθμη πέφτει περίπου 10 cm. Αν το φορτίο είναι σε ύψος λιγότερο από ένα μέτρο, οι αναγνώσεις της πτώσης της στάθμης γίνονται κάθε 2.5 - 5 cm. Οι μετρήσεις συνεχίζονται μέχρι το φορτίο να μην υπερβαίνει το 1/5 του αρχικού.

Στο **Σχήμα 3.2** δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού φορτίου για τις περιπτώσεις που το δοκιμαζόμενο τμήμα βρίσκεται είτε πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση α), είτε κάτω από αυτήν (περίπτωση β).

Γενικά ο συντελεστής  $k$  υπολογίζεται με βάση το γενικό τύπο:

$$k = A / (F \cdot t) \quad [3.5]$$

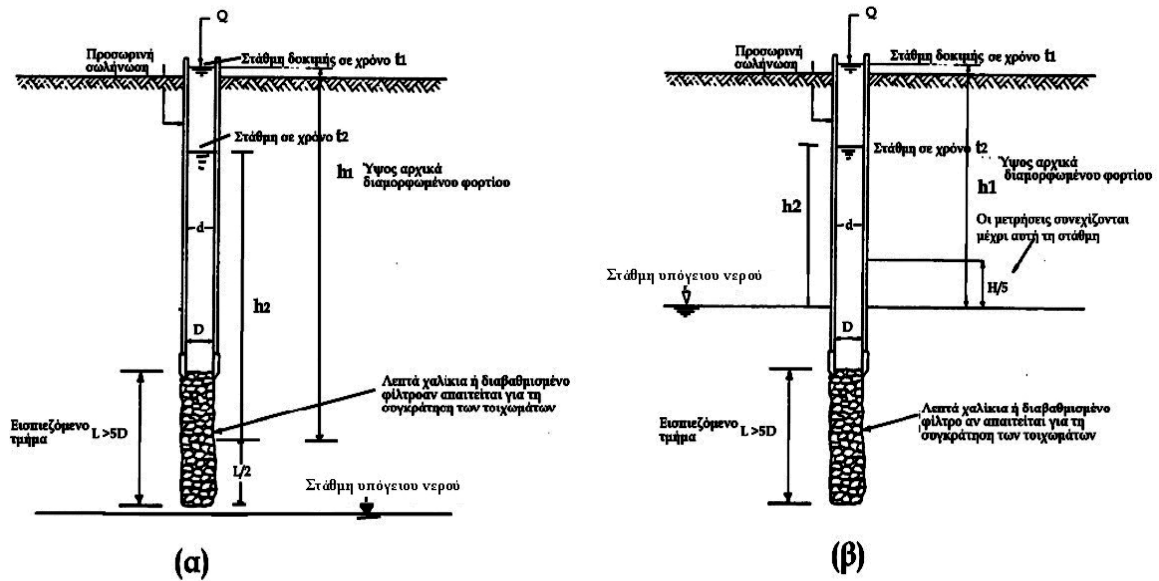
όπου,

$A$  = διατομή της γεώτρησης στο βάθος εκτέλεσης της δοκιμής ( $\text{cm}^2$ ),

$F$  = αδιάστατος παράγοντας σχετιζόμενος με τη γεωμετρία της δοκιμής,

$t$  = χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής (sec).

Ο παράγοντας  $F$  υπολογίζεται με τη βοήθεια διαγραμμάτων, που σχετίζουν τους λόγους  $F/D$  και  $L/D$ , όπου  $D$  η εσωτερική διάμετρος της στήλης σε cm.



**Σχήμα 3.2: Τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού φορτίου (δοκιμή Maag) με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού, (α) κάτω από το εισπνεζόμενο τμήμα της γεώτρησης και (β) πάνω από αυτό (Μαρίνος, 1991).**

Υπάρχουν διάφορες εκφράσεις του γενικού τύπου υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας, όπως :

$$k = A \cdot \ln(h_1/h_2) / (c \cdot t) \quad [3.6]$$

όπου,

$A$  = διατομή της στήλης του νερού μέσα στη γεώτρηση ( $\text{cm}^2$ ),

$c$  = συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος, δηλαδή:

$c = 4\pi r$  για σφαιρικού σχήματος δοκιμαζόμενο τμήμα, ακτίνας  $r$ ,

$c = 2,75d$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι η κυκλική επιφάνεια του πυθμένα της γεώτρησης, με  $d$  την εσωτερική διάμετρο της προσωρινής σωλήνωσης στο βάθος της δοκιμής,

$c = 2d$  όταν η δοκιμή γίνεται στην επαφή υδατοστεγανού – υδροπερατού σχηματισμού,

$c = 2\pi L / \ln(2L/D)$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $L \geq 5D$ , και τέλος,

$c = 2\pi L/\sin(1/h) (L/D)$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $5D > L > D/2$ .

$t =$  χρόνος πτώσης της στάθμης του νερού (sec),

$h_1 =$  το αρχικό ύψος της στάθμης πάνω από το επίπεδο αναφοράς, και

$h_2 =$  το τελικό ύψος της στάθμης πάνω από το επίπεδο αναφοράς.

Σαν επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται η υδροστατική στάθμη, όταν η δοκιμή γίνεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και προκειμένου για δοκιμαζόμενο τμήμα διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $L \geq 5D$ , ο υπολογισμός μπορεί να γίνει βάσει του παρακάτω τύπου:

$$k = (D/L) * \ln(4L+4) * (1/8) * (D/T_i) * (\ln(h_0/h_1)) \quad [3.7]$$

όπου,

$k =$  συντελεστής υδροπερατότητας (cm/sec),

$D =$  εσωτερική διάμετρος σωλήνα (cm),

$L =$  ασωλήνωτο τμήμα (cm),

$T_i =$  χρόνος (sec),

$h_0 =$  υδροστατική στάθμη (cm),

$h_1 =$  πίεση ή υποπίεση (cm).

Από όλες τις παραπάνω αναφορές και σχολιασμούς διαπιστώνεται ότι, τα αποτελέσματα της δοκιμής εξαρτώνται κύρια από την καλή γνώση της υδροστατικής στάθμης του υπόγειου νερού, αλλά και των ορίων των υδροφόρων και των μη υδροφόρων στρωμάτων. Γι' αυτό είναι προτιμότερο οι δοκιμές να εκτελούνται αφού έχει προηγηθεί η διερεύνηση της γεωλογίας και υδρογεωλογίας στην περιοχή έρευνας.

### 3.3.2 Δοκιμή Lefranc

Σύμφωνα με τη μέθοδο Lefranc, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση υλικών με αυξημένη υδροπερατότητα, στη γεώτρηση διοχετεύεται νερό με τη βοήθεια αντλίας, έτσι ώστε να διατηρείται η στάθμη σε επιθυμητό ύψος (σταθερό φορτίο) και μετρούνται οι απώλειες σε ορισμένο, προδιαγεγραμμένο χρόνο (π.χ. 5-20 min) (Μαρίνος, 1991).

Γενικά ο υπολογισμός του συντελεστή υδροπερατότητας εξαρτάται και εδώ από τη σχέση του εισπιεζόμενου τμήματος της γεώτρησης με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού.

Στο **Σχήμα 3.3** δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου για τις περιπτώσεις που το δοκιμαζόμενο τμήμα βρίσκεται είτε πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση α), είτε κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση β).

Γενικά ο συντελεστής  $k$  υπολογίζεται με βάση το γενικό τύπο:

$$k = Q/(c \cdot h) \quad [3.8]$$

όπου,

$Q$  = παροχή του νερού ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ ),

$c$  = συντελεστής σχετιζόμενος με τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος, ακριβώς όπως αναφέρθηκε στη δοκιμή Maag, και

$h$  = ύψος της στήλης νερού που επιβάλλει το υδραυλικό φορτίο (cm).

Μια εφαρμόσιμη μορφή του τύπου αυτού για τη συνήθη περίπτωση, όπου το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι κυλινδρικό, διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$ , με σχέση  $L \geq 5D$ , είναι η ακόλουθη:

$$k = (Q/2 \cdot \pi \cdot L \cdot H) \cdot \ln(L/r) \quad [3.9]$$

όπου,

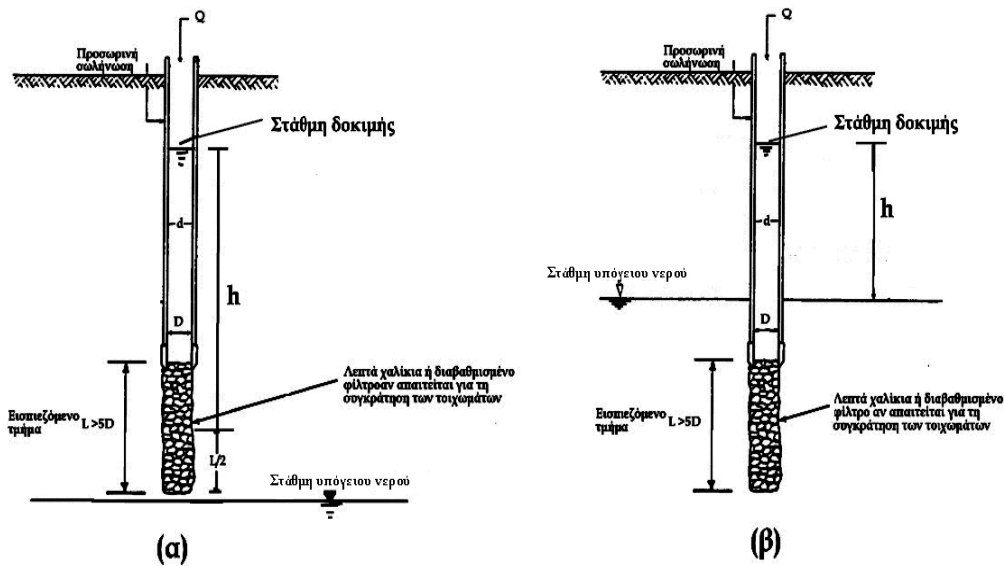
$k$  = συντελεστής υδροπερατότητας ( $\text{cm}/\text{sec}$ ),

$Q$  = παροχή (lit/min),

$L$  = εισπιεζόμενο τμήμα (cm),

$H$  = πρόσθετο υδραυλικό φορτίο (cm), και

$r$  = εσωτερική ακτίνα της στήλης (cm).



**Σχήμα 3.3:** Τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου (δοκιμή Lefranc) με τη στάθμη του υπεδάφικου νερού, (a) κάτω από το εισπνεζόμενο τμήμα της γεώτρησης και (b) πάνω από αυτό (Μαρίνος, 1991).

### 3.3.3. Δοκιμή Lugeon

Για τους βραχώδεις σχηματισμούς χρησιμοποιούνται οι δοκιμές παρεμβυσμάτων (packer tests). Πρόκειται για τις δοκιμές που είναι γνωστές με το όνομα Lugeon, από το όνομα Γάλλου ερευνητή (Μαρίνος, 1991).

Στη δοκιμή Lugeon το εισπνεζόμενο τμήμα, μήκους συνήθως 3 - 5 m, πάνω από τον πυθμένα της γεώτρησης, απομονώνεται από πάνω με κατάλληλο παρέμβυσμα (packer), το οποίο διογκούμενο με ειδική τεχνική, εφάπτεται ερμητικά στα τοιχώματα της γεώτρησης, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της δοκιμής να μην επιτρέπει διαφυγές νερού. Μετά την απομόνωση, εισπνέζεται νερό από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια αντλίας.

Ένα μανόμετρο, ένας υδρομετρητής και μία βαλβίδα ανακούφισης, προσαρμοσμένα σε κατάλληλο αεριοφυλάκιο (πιεστικό καζανάκι), επιτρέπουν την μέτρηση της ποσότητας νερού που απορροφήθηκε, για κάθε πίεση που εφαρμόστηκε.

Η δοκιμή εκτελείται με την εφαρμογή πίεσης κατά βαθμίδες. Για κάθε σταθερή πίεση, η ποσότητα που απορροφάται μετράται σε μια διάρκεια 5 ή καλύτερα

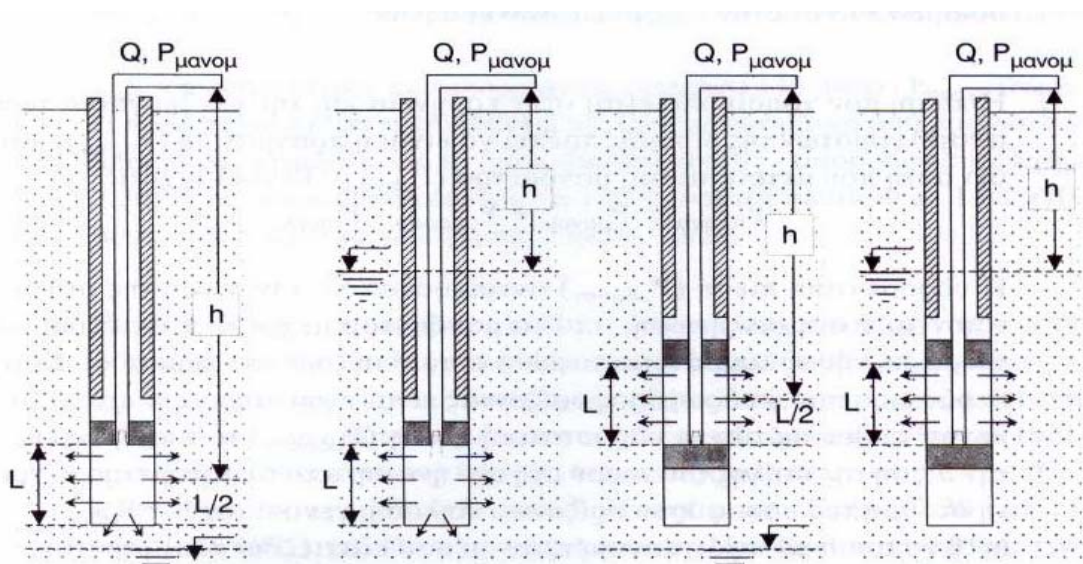
10 min. Εφαρμόζονται κατάλληλα επιλεγμένες πιέσεις σε αύξουσα σειρά, μέχρι μια μέγιστη τιμή πίεσης, και στη συνέχεια κατά φθίνουσα σειρά, με πιέσεις αντίστοιχες της αύξουσας ακολουθίας.

Στην πρόσθετη πίεση που εφαρμόζεται προστίθεται και η πίεση που δημιουργεί η στήλη νερού κατά τη δοκιμή (για παράδειγμα δοκιμή σε βάθος 10 m επιφέρει αύξηση πίεσης κατά 1 ατμόσφαιρα), ενώ πρέπει να αφαιρούνται οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών στην κίνηση του νερού, μέσω του δικτύου της δοκιμής. Η τελευταίες είναι συνήθως πολύ μικρές και δύσκολο να μετρηθούν, οπότε και δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί και σε ανιόντα βήματα μέσα σε γεώτρηση που έχει ήδη ανορυχθεί, με τη βοήθεια διπλών παρεμβυσμάτων (packers), που διογκώνονται με τη βοήθεια παροχέτευσης σε αυτά πεπιεσμένου αέρα. Για να μην αντιμετωπίζονται προβλήματα απωλειών σε πολύ κερματισμένα πετρώματα, χρησιμοποιούνται συστήματα πολλαπλών παρεμβυσμάτων.

Συνήθως στα αποτελέσματα δίνεται η σχέση των απωλειών νερού από το δοκιμαζόμενο τμήμα και των εφαρμοζόμενων βαθμίδων πίεσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.5**, ενώ οι μετρήσεις της υδροπερατότητας γίνονται σε μονάδες Lugeon.

Στο **Σχήμα 3.4** δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon με τη χρήση μονού και διπλού παρεμβύσματος.



**Σχήμα 3.4:** Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon με τη χρήση μονού και διπλού παρεμβύσματος (packer), πάνω και κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2000).

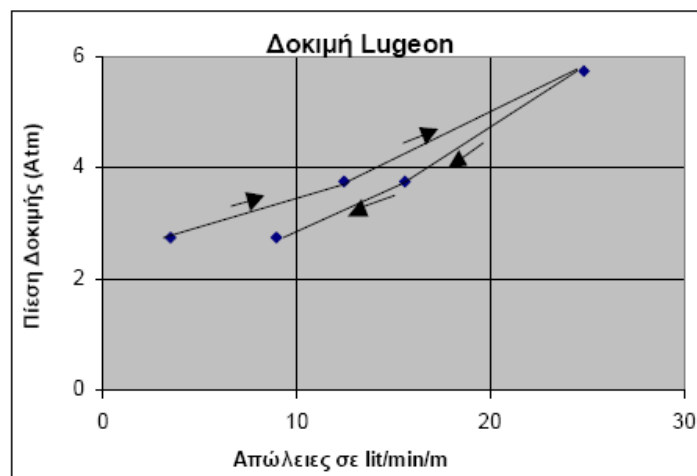


Μια μονάδα Lugeon, είναι η υδροπερατότητα που έχει μια βραχώδης μάζα κάτω από πίεση 10 atm (φορτίο 100 m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν 1 m γεώτρησης διαμέτρου NX (76 mm) σε αυτή τη βραχομάζα επιτρέπει απώλειες 1 λίτρου νερού ανά λεπτό.

Όπως είναι φυσικό, είναι πολύ δύσκολο η μέγιστη πίεση να ξεπεράσει τις 10 atm για να έχουμε τις μονάδες Lugeon για το σχηματισμό που εξετάζεται. Αλλά και η μετατροπή των μονάδων αυτών σε τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας k είναι πολύ δύσκολη λόγω των στοιχείων τυποποίησης της δοκιμής (δεν λαμβάνεται υπόψη πλήρως η γεωμετρία του εισημιζόμενου τμήματος κλπ).

Επί πλέον, η έλλειψη ομοιογένειας στις κερματισμένες βραχομάζες μπορεί να οδηγήσει σε λάθος υπολογισμό του συντελεστή υδροπερατότητας k.

Εν τούτοις, για πρακτικούς λόγους εφαρμογής έχει καθιερωθεί ένας παράγοντας μετατροπής των μονάδων Lugeon σε τιμές συντελεστή k που εξισώνει 1 Lugeon με  $10^{-5}$  cm/sec ( $10^{-7}$  m/sec).



**Σχήμα 3.5: Διάγραμμα απωλειών για τις βαθμίδες πίεσης που εφαρμόστηκαν σε δοκιμή Lugeon (Μαρίνος, 1991).**

Γενικά, έχουν διαμορφωθεί διάφοροι τύποι για τον υπολογισμό του συντελεστή k, όπως αυτός που ακολουθεί (για  $L \geq 5D$ ):

$$k = (Q/2\pi * L * P_{\text{πραγμ}}) * \ln(2L/D) \quad [3.10]$$

όπου,

$$Q = \text{απώλειες (cm}^3\text{/sec),}$$

$L$  = μήκος του εισπιεζόμενου τμήματος (cm),

$P_{\text{πραγμ}}$  = πραγματική πίεση της δοκιμής (cm), και

$D$  = διάμετρος της γεώτρησης (cm).

Τύποι σαν τον παραπάνω, για τη μέτρηση της υδροπερατότητας  $k$ , χρησιμοποιούνται κυρίως για πορώδη πετρώματα ή πετρώματα με πολύ πυκνό δίκτυο λεπτών ρωγμών και δεν διαφέρουν από αυτούς της μεθόδου Lefranc, καθώς το πέτρωμα εξομοιώνεται με έδαφος αυξημένης περατότητας.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής και στη συνέχεια την επεξεργασία των αποτελεσμάτων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2000):

- Η μέγιστη πίεση ( $P_{\text{max}}$ ) που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή εξαρτάται από τις συνθήκες υδραυλικής πίεσης που θα επικρατήσουν στο υπέδαφος κατά την κατασκευή και λειτουργία του τεχνικού έργου και σπάνια υπερβαίνουν τα  $10 \text{ kg/cm}^2$ . Για λόγους ασφαλείας, η μέγιστη πίεση που χρησιμοποιείται δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την κάθετη πίεση του πετρώματος στο τμήμα της δοκιμής, και είναι συνήθως της τάξεως των  $22 \text{ kPa}$  ανά μέτρο κάλυψης εδάφους, για υγιή άρρηκτο πέτρωμα σε βάθη από  $20$  έως  $30 \text{ m}$ , ενώ μειώνεται σε  $8 \text{ kPa}$  ανά μέτρο κάλυψης, στις αποσαθρωμένες ζώνες πετρωμάτων. Αυτό φυσικά έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσκολία εκτέλεσης δοκιμών κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.
- 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 μετράται στο μανόμετρο ( $P_{\text{μανομ}}$ ). Γενικά ισχύει:

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

Η μανομετρική πίεση ( $P_{\text{μανομ}}$ ) αντιπροσωπεύει την πίεση που μετράται από το μανόμετρο στην κορυφή της γεώτρησης.

- Η υδροστατική πίεση ( $P_{\text{υδροστ}}$ ) αντιπροσωπεύει την πίεση της στήλης του νερού στη σωλήνωση, από το μανόμετρο μέχρι το μέσο του εισπιεζόμενου τμήματος. Στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας διαμορφώνεται υψηλότερα του εισπιεζόμενου τμήματος, 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 εισπιεζόμενου τμήματος ή μανομέτρου-βάθους υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι υπόγειου υδροφόρου και για φαινόμενο βάρος νερού = 10 kN/m<sup>3</sup>).

- Οι απώλειες φορτίου ( $P_{απωλ}$ ) 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.ά.). Αυτές αποκτούν πρακτικό ενδιαφέρον σε μεγάλα σχετικά βάθη και για μεγάλες παροχές απορρόφησης. Οι διορθώσεις, όσον αφορά τις απώλειες φορτίου, δίνονται συνήθως με τυποποιημένα νομογράμματα ή πίνακες, η χρήση των οποίων πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη. Συνήθως η σχεδίαση των καμπυλών των 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 εισπιεζόμενου τμήματος και με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται όλες οι σχετικές διορθώσεις.

Γενικά, η υδροπερατότητα που μετράται κατά τη δοκιμή Lugeon σχετίζεται με τον αριθμό, το εύρος και το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, αλλά και με τη συμπεριφορά αυτών κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δηλαδή αν ξεπλένονται, αποφράσσονται, διαστέλλονται κλπ. Επιπρόσθετα, προκύπτουν πέντε τιμές συντελεστή διαπερατότητας  $k$  για κάθε δοκιμή, δηλαδή όσες και τα βήματα αυτής.

Για το λόγο αυτό είναι πολύ χρήσιμο, για κάθε βήμα δοκιμής να καθορίζεται ο τύπος ροής και να περιγράφονται τα αποτελέσματα της δοκιμής. Έτσι, μπορεί να βρεθεί ο καλύτερος τρόπος υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας.

Σε κάθε δοκιμή σχεδιάζεται το διάγραμμα εφαρμοζόμενης 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.

Ο Klapp έκανε πολυάριθμες έρευνες για τη διαπίστωση των σχέσεων που υπάρχουν στην αύξηση ή ελάττωση της πίεσεως με τις αντίστοιχες

προσλαμβανόμενες ποσότητες νερού. Από τις έρευνες κατέληξε σε 5 βασικούς τύπους, οι οποίοι παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.6** (Δημόπουλος, 1983):

**Τύπος 1:** Κατά την διάρκεια της εισπίεσης δεν παρουσιάζεται καμία μεταβολή στη βραχόμαζα.

**Τύπος 2α:** Κατά την εισπίεση εμφανίζεται μια παραμόρφωση της βραχόμαζας η οποία εν μέρει δεν είναι αντιστρεπτή.

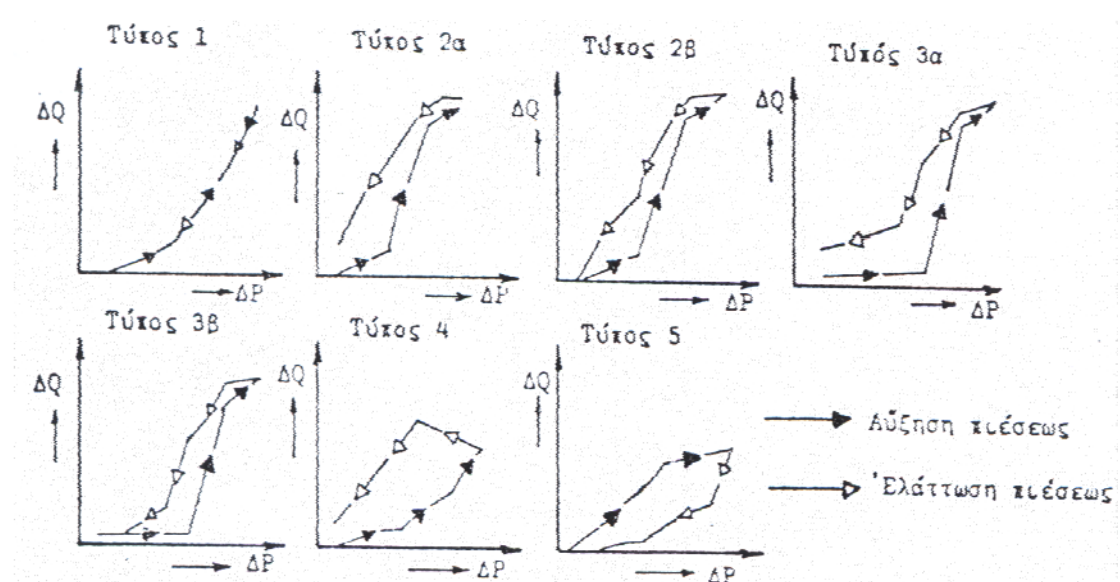
**Τύπος 2β:** Η εμφανιζόμενη παραμόρφωση της βραχόμαζας κατά την εισπίεση είναι αντιστρεπτή.

**Τύπος 3α:** Η ξαφνική αύξηση της προσλαμβανόμενης ποσότητας με αυξανόμενη πίεση δημιουργεί φαινόμενα θραύσης. Επιπλέον, το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό μόνο κατά ένα μέρος.

**Τύπος 3β:** Η ξαφνική αύξηση της προσλαμβανόμενης ποσότητας με αυξανόμενη πίεση δημιουργεί φαινόμενα θραύσης. Το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό.

**Τύπος 4:** Ο τύπος αυτός με αρχικά αυξανόμενη ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια πτώσης της πίεσης, αποδίδεται σε φαινόμενα διάβρωσης της βραχόμαζας (περιοχές ρηγμάτων, ενδεχομένως χρειάζονται τσιμεντενέσεις).

**Τύπος 5:** Η ισχυρά ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού, με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχόμαχα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.



**Σχήμα 3.6:** Τυπικές μορφές ροής που προκύπτουν από την εκτέλεση της δοκιμής Lugeon κατά Klopp (Δημόπουλος, 1983).

Περισσότερες μορφές ροής, με την ανάλογη ερμηνεία συμπεριφοράς της βραχομάζας, δίνονται στο **Σχήμα 3.7** (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2000, με πηγή Μαρίνο, 1991):

Περίπτωση (α): Η αύξηση της παροχής είναι ανάλογη της αύξησης της πίεσης ενώ στον κλάδο με τις φθίνουσες πιέσεις οι τιμές απορρόφησης είναι ίδιες. Ροή γραμμική.

Περίπτωση (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.

Περίπτωση (γ): Είναι ίδια με την περίπτωση (β) με τη διαφορά ότι οι παραμορφώσεις (διαστολή) των ρωγμών είναι ελαστικές,

Περίπτωση (δ): Προοδευτικός κορεσμός του πετρώματος (συνήθως περιορισμένης έκτασης δίκτυο ρωγμών) ή πλήρωσή του από φερτά υλικά,

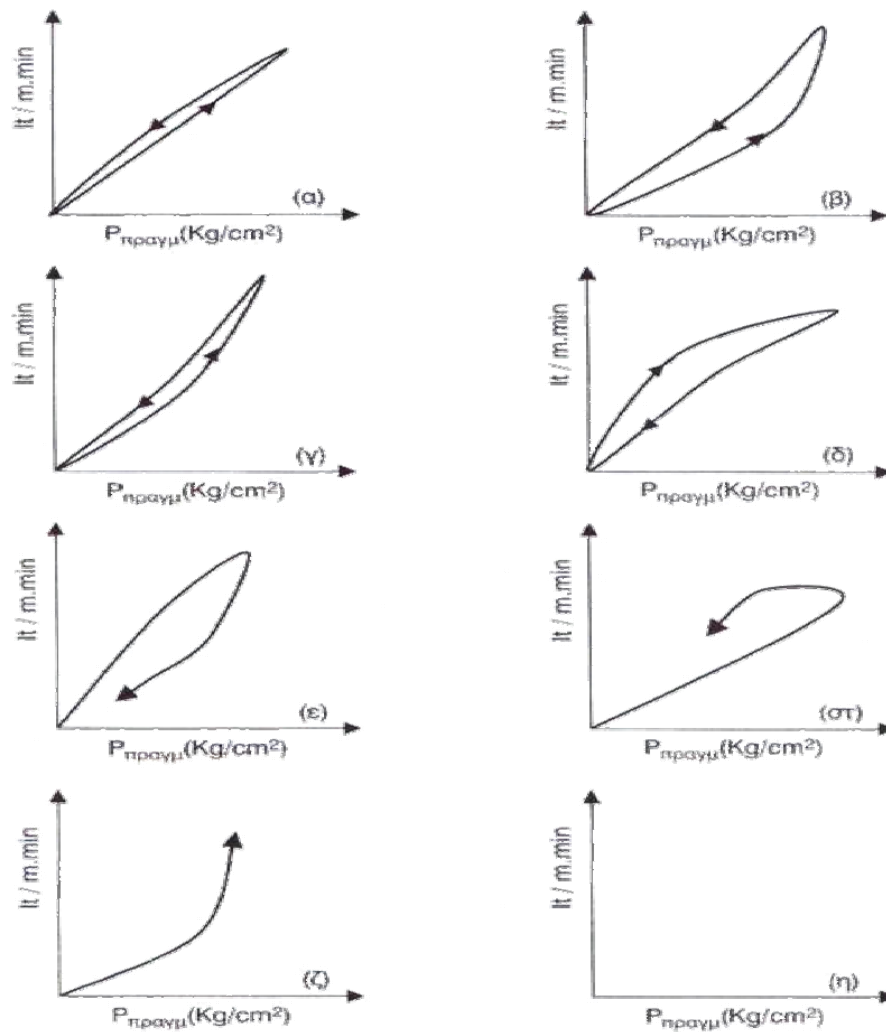
Περίπτωση (ε): Γραμμική ροή στην αρχή και στη συνέχεια πλήρωση των ρωγμών σε υψηλές πιέσεις,

Περίπτωση (στ): Γραμμική ροή στην αρχή και στη συνέχεια απόφραξη ή διαστολή των ρωγμών σε υψηλές πιέσεις,

Περίπτωση (ζ): Απότομη αύξηση της απορρόφησης μετά από κάποια πίεση. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν είτε η «υδραυλική θραύση» του πετρώματος, είτε η απόφραξη κοντινών ρωγμών, με αποτέλεσμα την επικοινωνία με δίκτυο μεγάλης υδροπερατότητας. Μπορεί όμως να αποδοθεί και σε «διαρροές» από τα παρεμβύσματα, λόγω μη καλής απομόνωσης τους, οπότε και η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί.

Οι μονάδες Lugeon ή και οι τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας  $k$  που προκύπτουν από τις δοκιμές, αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην εκτίμηση των διαρροών κάτω από ένα τεχνικό έργο (π.χ. φράγμα) και κατ' επέκταση στον καθορισμό των μεθόδων περιορισμού των διαφυγών.

Σημειώνεται ότι ο χαρακτηρισμός της υδροπερατότητας γίνεται σύμφωνα με τον **Πίνακα 3.1**.



Σχήμα 3.7: Διαγράμματα επιβαλλόμενης πίεσης - απορρόφησης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2000).

Πίνακας 3.1: Χαρακτηρισμός εδαφών με βάση τον συντελεστή k (Στειακάκης, 2005 από Αλεξόπουλο, 1996).

Χαρακτηρισμός	Τιμές k (m/sec)
Αδιαπέρατα	$k < 10^{-9}$
Σχεδόν αδιαπέρατα	$10^{-9} < k < 10^{-7}$
Μικρής διαπερατότητας	$10^{-7} < k < 10^{-5}$
Μέσης διαπερατότητας	$10^{-5} < k < 10^{-3}$
Καλής διαπερατότητας	$10^{-3} < k$

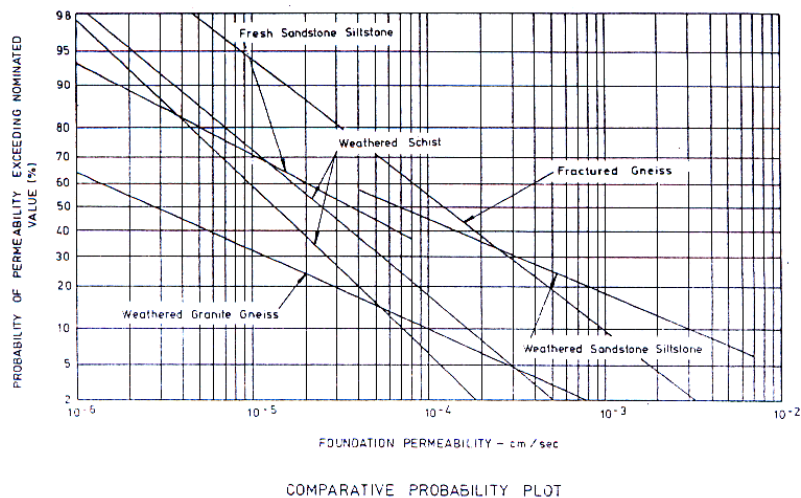
Στον Πίνακα 3.2 δίνεται το εύρος διακύμανσης του συντελεστή υδροπερατότητας  $k$  για μερικές από τις πλέον σημαντικές κατηγορίες εδαφών ή και βραχωδών μαζών.

**Πίνακας 3.2: Διακύμανση του συντελεστή υδροπερατότητας (σε cm/sec) για διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών (Μαρίνος, 1991).**

100	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	
Καθαρά χαλίκια	Καθαρές άμμοι & αμμοχαλίκια		Πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, ιλύες & φυλλώδεις αργιλο-ιλύες.		Μη ρωγματομένες άργιλοι & αργιλοϊλύες (με άργιλο >20%)		Συνεκτικές άργιλοι & χωρίς ρωγμάτωση				
		Ξηρές και ρωγματομένες άργιλοι									
Βραχομάζα πορωδών και σπηλαιωδών βασάλτων ή και σπηλαιωδών ανθρακικών πετρωμάτων		Βραχομάζα ψαμμιτών και κερματισμένων και εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων		Βραχομάζα αργιολίθων, ιλυολιθικών σχιστολίθων		Μαζώδη σχιστολιθικών & γρανιτικών πετρωμάτων					
Σχηματισμοί πολύ υψηλής έως υψηλής υδροπερατότητας				Σχηματισμοί υδροπερατότητας				πτωχής		Πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί	
1 Μονάδα Lugeon (IUL) πρακτικά ισοδυναμεί με $k = 1 \times 10^{-5}$ cm/sec											

Όπως αναφέρεται ανωτέρω, τα αποτελέσματα μιας δοκιμής Lugeon μπορούν να αναχθούν σε μονάδες Lugeon και να συγκριθούν μεταξύ τους ακόμη και με τα αποτελέσματα δοκιμής σε άλλες περιοχές με την χρήση απλών μεθόδων πιθανοτήτων.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες για την πιθανότητα απόκλισης της διαπερατότητας από την ονομαστική της τιμή για διάφορα πετρώματα.



**Σχήμα 3.8: Διάγραμμα διαπερατότητας  $k$  σε συνάρτηση με την πιθανότητα απόκλισης από την ονομαστική τιμή της  $k$  (Burges, 1983).**

### 3.4. Επεξεργασία δεδομένων δοκιμών Lugeon

Για την διερεύνηση του υπεδάφους κάτω από τον άξονα θεμελίωσης του φράγματος εκτελέστηκαν εννέα (9) δειγματοληπτικές γεωτρήσεις κατά μήκος του άξονα του φράγματος, βάθους 15 m στην κοίτη και 15 – 20 m στα αντερείσματα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Πίνακας δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

Γεώτρηση	Χ.Θ.	Υψόμετρο (m)	Βάθος (m)
GAD 96	0+221.40	+ 96.72	20.00
GAD 97	0+251.70	+ 87.26	20.00
GAD 98	0+272.80	+82.27	20.00
GAD 99	0+319.50	+70.66	15.00
GAD 100	0+362.30	+67.40	15.00
GAD 101	0+413.30	+70.51	15.00
GAD 102	0+466.80	+80.82	15.00
GAD 103	0+542.00	+96.12	20.00
GAD 104	0+571.30	+101.81	20.00

Σε όλες τις γεωτρήσεις έγιναν επί τόπου δοκιμές διαπερατότητας, με τη μέθοδο εισπίεσης Lugeon, ανά 4 – 5 m μήκους γεώτρησης και με 4 – 5 βαθμίδες πίεσης. Για κάθε σταθερή βαθμίδα πίεσης μετρήθηκε η ποσότητα νερού που απορροφήθηκε για χρονικό διάστημα 10 min.

Η δοκιμή συνεχίστηκε και με άλλες πιέσεις, με αύξουσα σειρά, μέχρι μια μέγιστη τιμή πίεσης ίση με 2.5 bar, έτσι ώστε να μην προκληθεί θραύση των γεωλικών. Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε φθίνουσα ακολουθία επιβολής ανάλογων πιέσεων.

Για κάθε βαθμίδα μετρήθηκε η απώλεια που αντιστοιχεί σε δεκάλεπτη διάρκεια και σε εισπιεζόμενο τμήμα μήκους L και αποδόθηκε σε λίτρα ανά εισπιεζόμενο μέτρο ανά λεπτό (lit/m.min).

Στους προσδιορισμούς της πραγματικής πίεσης, για τον υπολογισμό της διαπερατότητας στο υπό δοκιμή τμήμα της γεώτρησης, δεν προστέθηκαν απώλειες φορτίου και αυτές θεωρήθηκαν ίσες με μηδέν ( $P_{απωλ}=0$ ). Τυχόν απώλειες που δεν δικαιολογούνται από την εμφάνιση ψαμμιτικών ή ασβεστολιθικών στρώσεων, πιθανόν να οφείλονται σε λανθασμένη τοποθέτηση του παρεμβύσματος.

Ενδεικτικά, στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι εφαρμοζόμενες πιέσεις στην γεώτρηση GAD103 και για εισπιεζόμενη βαθμίδα από 15.2 – 20.2 m.



**Πίνακας 3.4: Εφαρμοζόμενες βαθμίδες πίεσης και μετρούμενες απώλειες της γεώτρησης GAD103.**

Χρόνος (min)	Βαθμίδες πίεσης (bar)					Βαθμίδες πίεσης (bar)				
	0.6	1.2	2.25	1.2	0.6	0.6	1.2	2.25	1.2	0.6
	Ένδειξη υδρομετρητή (lit)					Απώλειες (lit)				
0	803.0	805.0	808.3	807.2	806.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
1	803.0	805.0	808.5	807.2	806.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
2	803.0	805.0	808.6	807.2	806.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	803.0	805.0	808.6	807.2	806.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	803.0	805.0	808.6	807.2	806.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	803.0	805.0	808.6	807.2	806.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
					lit/5min	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00
					lit/min	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00

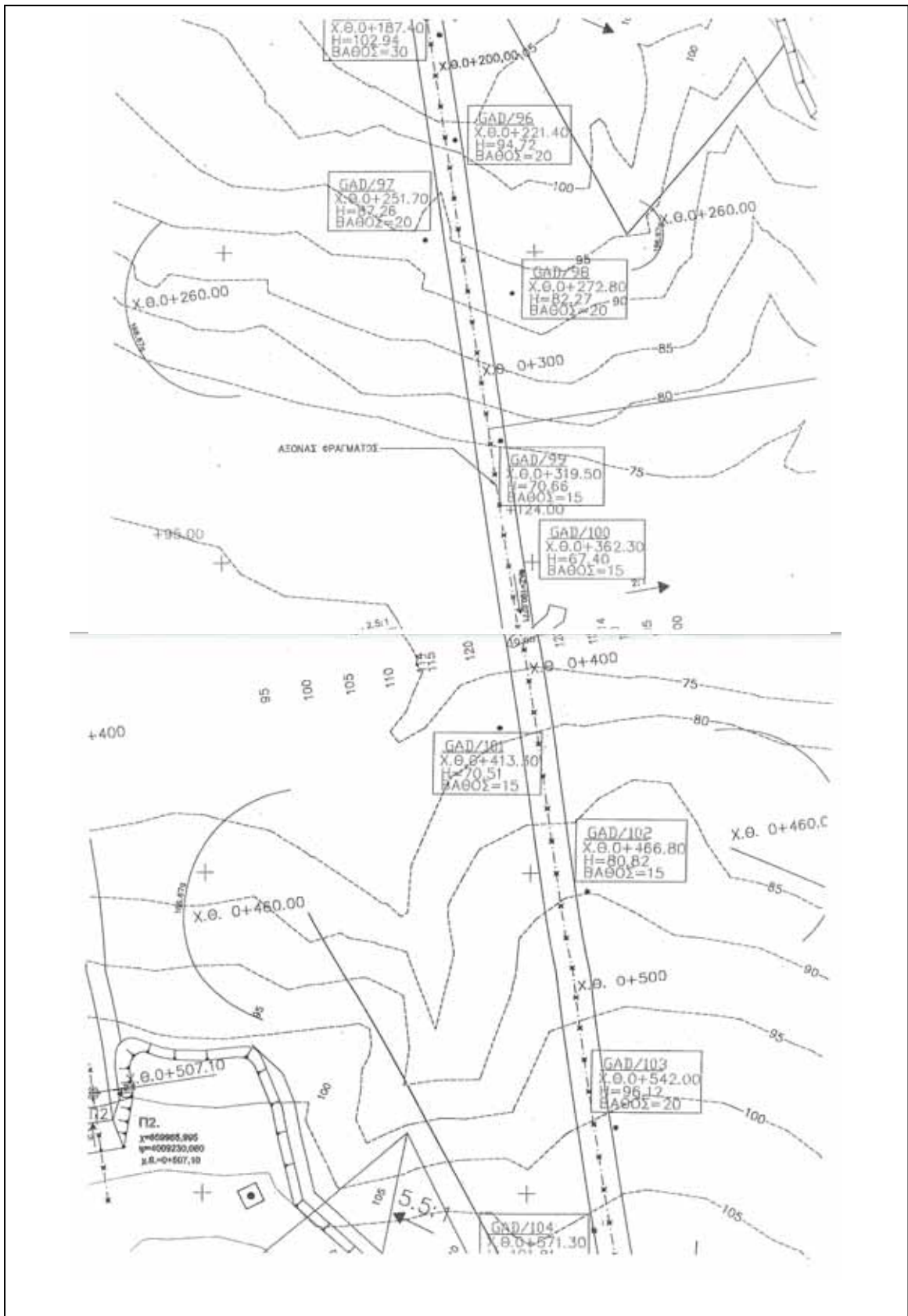
Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι απώλειες (lit/min) και η διαπερατότητα (cm/s) που υπολογίστηκαν σύμφωνα με την σχέση [3.10] σε κάθε επιμέρους τμήμα γεώτρησης.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται κάτοψη και τομή κατά μήκος του σώματος του φράγματος, με τις σχετικές θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Σχήματα 3.9 και 3.10).

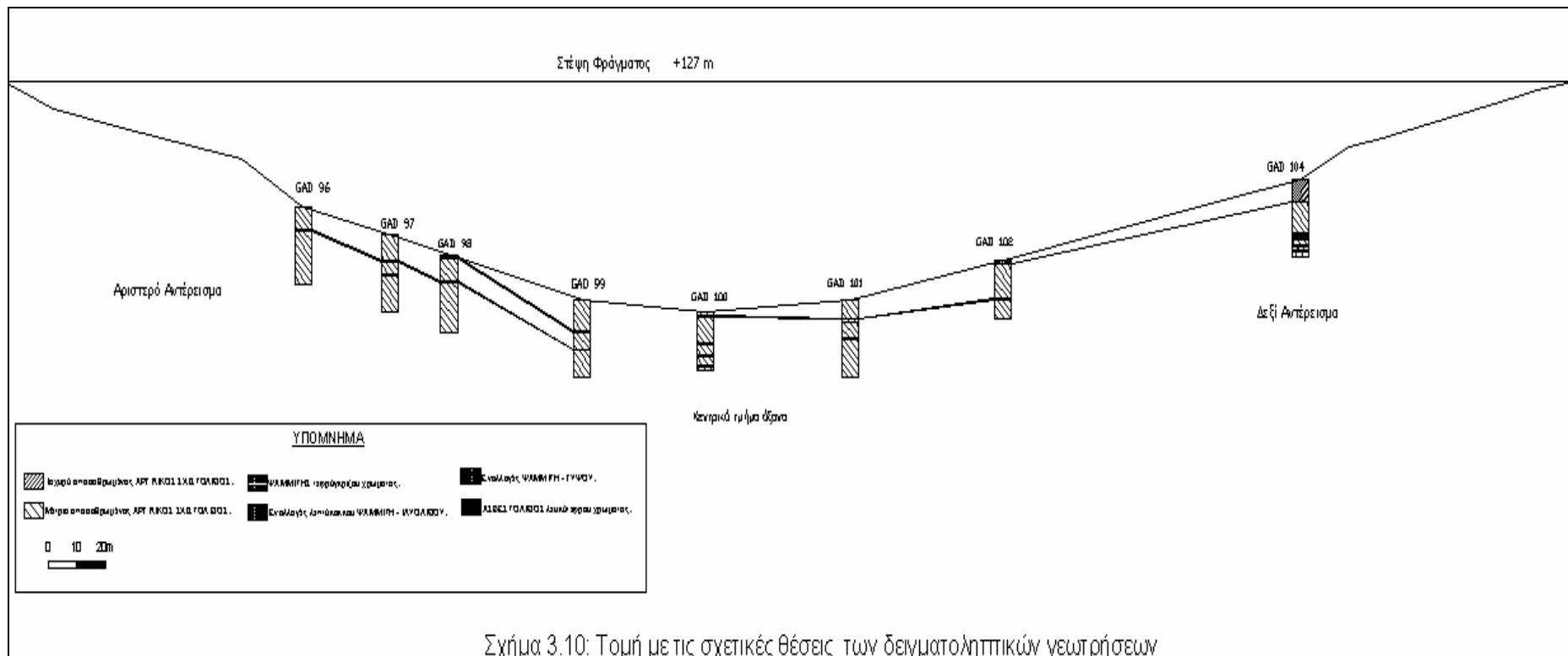
**Πίνακας 3.5: Συγκεντρωτικός πίνακας δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εκτίμηση των απωλειών και της διαπερατότητας.**

GAD104		
Βάθος Δοκιμής (m)	Απώλειες (lit/min)	Διαπερατότητα (cm/s)
15-20	0.00	0.00
10-15	2.28	$2.06 \times 10^{-5}$
6.5-10	39.8	$6.48 \times 10^{-4}$
3.5-6.5	0.00	0.00
GAD103		
Βάθος Δοκιμής (m)	Απώλειες (lit/min)	Διαπερατότητα (cm/s)
15.2-20.2	0.06	$3.73 \times 10^{-7}$
12.5-15	0.00	0.00
10-15	0.00	Αστοχία δοκιμής
7-10	0.06	$1.45 \times 10^{-6}$
GAD102		
Βάθος Δοκιμής (m)	Απώλειες (lit/min)	Διαπερατότητα (cm/s)
10-15	0.35	$5.02 \times 10^{-6}$
6-10	0.03	$8.30 \times 10^{-7}$
4-6	0.00	Αστοχία δοκιμής

<b>GAD101</b>		
<b>Βάθος Δοκιμής (m)</b>	<b>Απώλειες (lit/min)</b>	<b>Διαπερατότητα (cm/s)</b>
15-20	0.06	$3.66 \times 10^{-7}$
10-15	0.05	$4.40 \times 10^{-7}$
6-10	0.08	$1.29 \times 10^{-6}$
3-6	0.00	0.00
<b>GAD100</b>		
<b>Βάθος Δοκιμής (m)</b>	<b>Απώλειες (lit/min)</b>	<b>Διαπερατότητα (cm/s)</b>
9-13	0.42	$7.17 \times 10^{-6}$
4-8	0.00	0.00
<b>GAD99</b>		
<b>Βάθος Δοκιμής (m)</b>	<b>Απώλειες (lit/min)</b>	<b>Διαπερατότητα (cm/s)</b>
15-20	0,04	$2.44 \times 10^{-7}$
10-15	0,04	$3.55 \times 10^{-7}$
6-10	0,06	$9.67 \times 10^{-7}$
3-6	0,00	0.00
<b>GAD98</b>		
<b>Βάθος Δοκιμής (m)</b>	<b>Απώλειες (lit/min)</b>	<b>Διαπερατότητα (cm/s)</b>
15-20	0.04	$2.44 \times 10^{-7}$
10-15	0.04	$3.55 \times 10^{-7}$
6-9,80	0.06	$1.01 \times 10^{-6}$
3-6,20	0.00	0.00
<b>GAD97</b>		
<b>Βάθος Δοκιμής (m)</b>	<b>Απώλειες (lit/min)</b>	<b>Διαπερατότητα (cm/s)</b>
15-20	0.00	0.00
10-14,8	0.20	$1.83 \times 10^{-6}$
6-9	0.00	0.00
3-6	8.20	0.00
<b>GAD96</b>		
<b>Βάθος Δοκιμής (m)</b>	<b>Απώλειες (lit/min)</b>	<b>Διαπερατότητα (cm/s)</b>
15-20	0.07	$4.27 \times 10^{-7}$
10-15	0.04	$3.55 \times 10^{-7}$
6-10	0.06	$9.67 \times 10^{-7}$
3-6	0.00	0.00



Σχήμα 3.9: Κάτοψη με τις θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων



Σχήμα 3.10: Τομή με τις σχετικές θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων

Σύμφωνα με τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας κατά Lugeon προκύπτουν τα εξής:

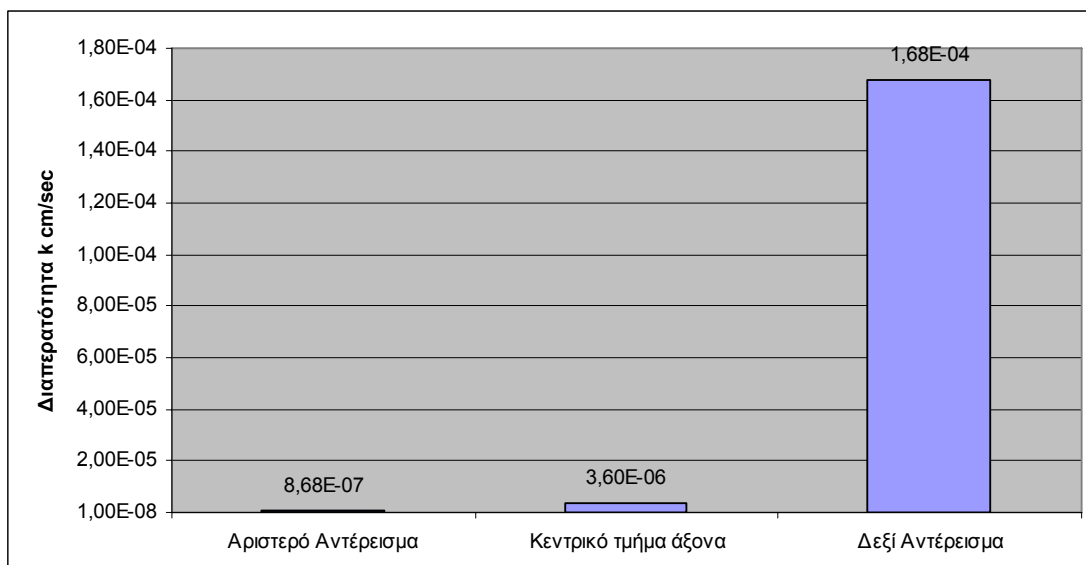
- Ομαδοποιώντας τις υπολογιζόμενες τιμές διαπερατότητας  $k$  (Βλέπε Πίνακα 3.5) που προέκυψαν από τις δοκιμές εισπίεσης Lugeon προκύπτει ότι υπάρχουν τρεις τομείς με διαφορετικές τιμές διαπερατότητας (**Πίνακας 3.6**). Στην περιοχή του αριστερού αντερείσματος (γεωτρήσεις GAD96, GAD97, GAD98, GAD99) η μέση διαπερατότητα εκτιμήθηκε σε  $8.63 \times 10^{-7}$  cm/sec. Στην κεντρική περιοχή, (γεωτρήσεις GAD100, GAD101, GAD102) η τιμή της διαπερατότητας εκτιμάται σε  $3.60 \times 10^{-6}$  cm/sec και στην περιοχή του δεξιού αντερείσματος (γεωτρήσεις GAD103, GAD104) ίση με  $1.68 \times 10^{-4}$  cm/sec.

Το γεγονός αυτό αποδίδεται στα χαμηλά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του ισχυρά αποσαθρωμένου αργιλικού σχιστόλιθου και την σημαντική τεκτονική καταπόνηση τους. Παρουσιάζονται έντονα πτυχωμένοι και διατμημένοι με φλεβίδια ασβεσίτη, γύψου και με εσωτερικές επιφάνειες διατμήσεων ποικίλου μεγέθους και προσανατολισμού.

**Πίνακας 3.6: Πίνακας τομέων κύριου άξονα σε συνάρτηση με την διαπερατότητα.**

Αριστερό αντέρεισμα	
Γεώτρηση	Διαπερατότητα $k$ (cm/sec)
GAD 96	$5.83 \times 10^{-7}$
GAD 97	$1.83 \times 10^{-6}$
GAD 98	$5.36 \times 10^{-7}$
GAD 99	$5.22 \times 10^{-7}$
<b>Μέση τιμή Διαπερατότητας</b>	<b><math>8.68 \times 10^{-7}</math></b>
Κεντρικό τμήμα άξονα	
Γεώτρηση	Διαπερατότητα $k$ (cm/sec)
GAD 100	$7.17 \times 10^{-6}$
GAD 101	$7.00 \times 10^{-7}$
GAD 102	$2.93 \times 10^{-6}$
<b>Μέση Διαπερατότητα</b>	<b><math>3.60 \times 10^{-6}</math></b>
Δεξιό αντέρεισμα	
Γεώτρηση	Διαπερατότητα $k$ (cm/sec)
GAD 103	$9.12 \times 10^{-7}$
GAD 104	$3.34 \times 10^{-4}$
<b>Μέση Διαπερατότητα</b>	<b><math>1.68 \times 10^{-4}</math></b>

Με βάση τον Πίνακα 3.6 προέκυψε το παρακάτω **Σχήμα 3.11**, όπου παρουσιάζεται παραστατικά το σχετικό μέγεθος της διαπερατότητας στον άξονα θεμελίωσης του σώματος του.



**Σχήμα 3.11: Εκτιμώμενη διαπερατότητα στον άξονα θεμελίωσης του φράγματος.**

- Από την επιφάνεια του εδάφους και μέχρι βάθους τουλάχιστον 5 m κατά μήκος του άξονα του φράγματος, κυριαρχεί ο εδαφικός μανδύας, ο οποίος αποτελείται κυρίως από άργιλο, ιλυώδη άργιλο έως μίγμα ιλύος-αργίλου, αργιλώδη άμμο και αποθέσεις της κοίτης του ποταμού. Από τα 5 m έως τα 16 m βάθος, συναντάται ο ισχυρά αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος. Κάτω από το βάθος των 16 m και μέχρι το πέρας των γεωτρήσεων, συναντάται ο μέτρια αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος, ο οποίος εμφανίζεται περισσότερο συνεκτικός. Το τμήμα αυτό περιέχει παρεμβολές ψαμμίτη, ιλυολίθου, ασβεστολίθου και γύψου. Στο δεξιό αντέρεισμα εμφανίζεται σε απόλυτο υψόμετρο +70.00 m περίπου μια εμφάνιση ιλυολίθου και ψαμμίτη, η οποία συμβάλει αρνητικά στην ευστάθεια του δεξιού αντερείσματος, σε αντίθεση με το αριστερό αντέρεισμα όπου κάτι παρόμοιο δεν εμφανίζεται.

Η παραπάνω διαφοροποίηση επηρεάζει ανάλογα και τη διαπερατότητα k. Προκύπτουν μεσαίες τιμές διαπερατότητας ( $10^{-3}$  έως  $10^{-4}$  cm/sec) για τον εδαφικό μανδύα, μικρές τιμές για τον ισχυρά αποσαθρωμένο αργιλικό σχιστόλιθο ( $10^{-5}$  cm/sec) και πολύ μικρές τιμές για τον υποκείμενο μέτρια αποσαθρωμένο

αργιλικό σχιστόλιθο ( $10^{-6}$  έως  $10^{-8}$  cm/sec), οι οποίες δεικνύουν πρακτικά αδιαπέρατο σχηματισμό.

Στο Παράρτημα παρουσιάζονται τα διαγράμματα του βάθους δοκιμής (m) σε συνάρτηση με τις απώλειες (lit/min) και την διαπερατότητα (cm/sec) του υπό δοκιμή τμήματος, για όλες τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις κατά μήκος του άξονα του φράγματος.

- Με βάση τα διαγράμματα κατά Klopp (Δημόπουλος, 1983) και τα διαγράμματα πραγματικής πίεσης – απορρόφησης, κάθε δοκιμής Lugeon, σε σχέση με την αύξηση ή ελάττωση της πίεσεως και τις αντίστοιχες προσλαμβανόμενες ποσότητες, προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.7**.

**Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα διαγραμμάτων πραγματικής πίεσης – απορρόφησης.**

<b>Γεώτρηση GAD96</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
3 – 6	Δεν υπάρχουν απώλειες
6 – 20 (σε τμήματα των 5 m)	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχόμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.
<b>Γεώτρηση GAD97</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
3 – 6	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχόμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.
6 – 9	Δεν υπάρχουν απώλειες
10 – 14.80	Ο τύπος αυτός με αρχικά αυξανόμενη ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια πτώσεως της πίεσης, αποδίδεται σε φαινόμενα διάβρωσης της βραχόμαζας (περιοχές ρηγμάτων, ενδεχομένως χρειάζονται τσιμεντενέσεις).
15 – 20	Δεν έχουμε απώλειες
<b>Γεώτρηση GAD98</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
3 – 6.20	Δεν υπάρχουν απώλειες
6.20 – 20 (σε τμήματα των 5 m)	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχόμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.
<b>Γεώτρηση GAD99</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
3 – 6	Δεν υπάρχουν απώλειες
6 – 20 (σε τμήματα των 5 m)	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχόμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.

<b>Γεώτρηση GAD100</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
4 – 8	Δεν υπάρχουν απώλειες
9 – 13	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχώμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.
<b>Γεώτρηση GAD101</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
3 – 6	Δεν υπάρχουν απώλειες
6 – 20 (σε τμήματα των 5 m)	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχώμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.
<b>Γεώτρηση GAD102</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
4 – 6	Βγήκε το νερό στην επιφάνεια
6 – 15 (σε τμήματα των 5 m)	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχώμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.
<b>Γεώτρηση GAD103</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
3 – 7	Δεν υπάρχουν απώλειες
7 – 10	Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχώμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση
10 – 15	Δεν έχουμε απώλειες νερού
15.2 – 20.2	Κατά την διάρκεια της εισπίεσεως δεν παρουσιάζεται καμία μεταβολή στη βραχώμαζα.
<b>Γεώτρηση GAD104</b>	
<b>Βάθος Δοκιμής m</b>	<b>Αποτέλεσμα</b>
3.5 – 6.5	Δεν υπάρχουν απώλειες
6.5 – 10	Η ισχυρά ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχώμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς καλή υδραυλική επικοινωνία με τη γεώτρηση.
10 – 15	Κατά την διάρκεια της εισπίεσεως δεν παρουσιάζεται καμία μεταβολή στη βραχώμαζα.
15 – 20	Δεν υπάρχουν απώλειες



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΡΟΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΩΜΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

### 4.1. Προσδιορισμός του προβλήματος-παραδοχές

Η προσομοίωση και η μελέτη της ροής του υπογείου νερού μέσα από το σώμα του φράγματος και την ζώνη θεμελίωσης έγινε με το λογισμικό **SEEP/W** στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το **SEEP/W** είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση της διήθησης του νερού καθώς και τις εκτίμησεις της πίεσης των πόρων σε πορώδη μέσα.

Εξετάζονται αναλύσεις που κυμαίνονται από απλά προβλήματα κορεσμένων υλικών σε συνθήκες σταθερής (steady) κατάστασης ροής έως περίπλοκα σε μη κορεσμένα υλικά και σε συνθήκες μεταβλητής (transient) κατάστασης ροής. Το "**SEEP/W**" επιλύει μοντέλα σε δύο διαστάσεις (2D) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση και στο σχεδιασμό γεωτεχνικών, αστικών, υδρογεωλογικών κ.α. εφαρμογών.

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα σταθερής κατάστασης ροής στο σχεδιαζόμενο φράγμα Γαδουρά Ρόδου, ώστε να εκτιμηθούν η πιεζομετρία, τα ανύσματα ροής και οι διαφυγές του νερού (παροχές) διαμέσου του σώματος του φράγματος. Στα μοντέλα σταθερής κατάστασης ροής όλα τα εισαγόμενα δεδομένα είναι σταθερά, ανεξάρτητα από τον χρόνο.

Το μοντέλο Α αφορά την περίπτωση πλήρωσης της λεκάνης κατάκλυσης στην προβλεπόμενη ανώτατη στάθμη λειτουργίας (+117.5 m) ενώ το μοντέλο Β στην προβλεπόμενη ανώτατη στάθμη πλημμύρας (+122.1 m) σε συνθήκες σταθερής (steady) κατάστασης ροής.

Για την προσομοίωση των δύο παραπάνω περιπτώσεων έγιναν οι εξής παραδοχές:

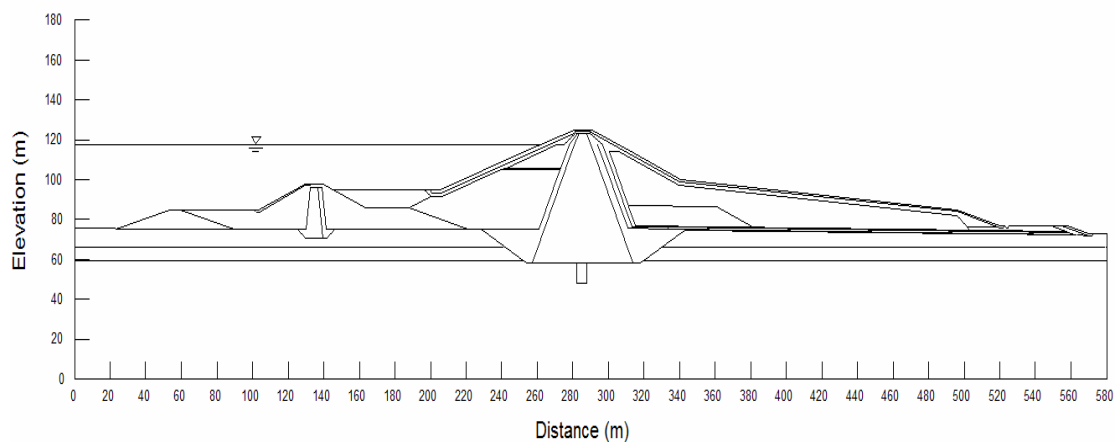
1. Τα υλικά του σώματος του φράγματος και των υποκείμενων σχηματισμών θεωρήθηκαν ομοιογενή, ώστε να ισχύει ο νόμος του Darcy.

2. Η εισαγωγή στα μοντέλα των υδραυλικών παραμέτρων (K και VWC) των γεωλογικών υλικών έγινε με βάση δεδομένα (πρότυπα) διαγράμματα που υποδεικνύει το λογισμικό για ανάλογους σχηματισμούς, προκειμένου να αποδοθούν οι ιδιότητες της κορεσμένης και ακόρεστης φάσης.
3. Οι τιμές διαπερατότητας  $k_{sat}$  που αναφέρονται στην κορεσμένη φάση των υλικών και οι οποίες εισήχθησαν για να διαμορφωθούν τα προαναφερθέντα διαγράμματα ελήφθησαν με βάση μετρήσεις πεδίου (δοκιμές Lugeon) και βιβλιογραφικές αναφορές (Todd, 1980, Driscoll, 1986, Chapman & Hall, 1992, Fetter, 1994, Krahn, 2004).
4. Τα υλικά του σώματος του φράγματος και οι υποκείμενοι σχηματισμοί θεωρήθηκαν ισότροπα ( $k_h/k_v=1$ ), για λόγους όχι τεχνικούς (περιορισμός του προγράμματος), αλλά γιατί δεν υπήρχαν απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση του βαθμού ανισοτροπίας τους.

## 4.2. Σχεδιασμός της γεωμετρίας και εισαγωγή των δεδομένων

### 4.2.1. Σχεδιασμός τυπικής διατομής εγκάρσια στο σώμα του φράγματος

Για τον σχεδιασμό των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε μια τυπική διατομή του φράγματος Γαδουρά (Σχήμα 4.1), όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 κατά την διεύθυνση ΕΕ΄.



**Σχήμα 4.1: Τυπική διατομή κυρίως φράγματος.**

Το φράγμα αποτελείται από τον αργιλικό πυρήνα, τα σώματα στήριξης και τις αναβαθμίδες σταθεροποίησης ανάντη και κατόντη. Το ύψος του φράγματος είναι 67 m και το μήκος της στέψης 570 m.

Μετά από εξοικείωση με τη λειτουργία του λογισμικού, και την επεξεργασία των δεδομένων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που έγιναν στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος (βλέπε ενότητα 3.8), σχεδιάστηκε το μοντέλο και καθορίστηκαν τα υλικά του σώματος του φράγματος και των υποκείμενων σχηματισμών.

Αρχικά ορίστηκε του πεδίο εργασίας και η κλίμακα εφαρμογής. Η κλίμακα ορίστηκε ως 1:2500 για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη διεύθυνση. Ο σχεδιασμός του μοντέλου έγινε με βάση τις συντεταγμένες που δίνονται από την τυπική τομή του φράγματος (βλέπε Σχήμα 1.1).

#### **4.2.2. Υδραυλικές παράμετροι των γεωυλικών κατασκευής του φράγματος και των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών**

Οι βασικές υδραυλικές παράμετροι που ορίζονται στο πρόγραμμα είναι η υδραυλική αγωγιμότητα,  $K$  (υδροπερατότητα,  $k$ ) και η περιεκτικότητα νερού ανά μονάδα όγκου γεωλογικού υλικού (volumetric water content, VWC). Στο **SEEP/W** οι υδραυλικές αυτές παράμετροι πρέπει να ορίζονται ως συναρτήσεις και όχι ως απλές τιμές, προκειμένου να είναι δυνατή η απόδοση της συμπεριφοράς κάθε φάσης (κορεσμένης – ακόρεστης) των υλικών.

##### Υδραυλική αγωγιμότητα

Μια συνάρτηση υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K-Fn$ ) αποδίδει την αγωγιμότητα σε διάφορες συνθήκες κορεσμού του εδάφους, το έδαφος από κορεσμένο γίνεται ακόρεστο και η ικανότητα κίνησης του νερού μειώνεται, δεδομένου ότι η αρνητική πίεση πόρων αυξάνει.

*Για να οριστεί η συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας επιλέγεται **KeyIn** → **Hydraulic Functions** → **Hydraulic Conductivity**.*

Σύμφωνα με την επεξεργασία των δοκιμών εισπίεσης νερού κατά Lugeon (βλέπε Κεφάλαιο 3) εκτιμήθηκε σε κάθε ζώνη του υπεδάφους στην θέση έδρασης του φράγματος, μια τιμή υδροπερατότητας  $k$  στην κορεσμένη φάση του υλικού, η οποία εισήχθη στο πρόγραμμα.

Οι τιμές υδροπερατότητας των υλικών του σώματος του φράγματος εκτιμήθηκαν με βάση την βιβλιογραφία.

Αναλυτικά, οι τιμές υδροπερατότητας που θεωρήθηκαν για κάθε σχηματισμό παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.1**.

**Πίνακας 4.1: Εκτιμώμενες τιμές υδροπερατότητας στην κορεσμένη φάση κάθε υλικού.**

<b>Ζώνη</b>	<b>Υδροπερατότητα, <math>k_{sat}</math> (m/s)</b>
1-Πυρήνας	$1.00 \times 10^{-9}$
2-Φίλτρα	$5.00 \times 10^{-5}$
2α- Φίλτρα	$5.00 \times 10^{-5}$
2β- Φίλτρα	$2.00 \times 10^{-5}$
2&2β- Φίλτρα	$2.00 \times 10^{-5}$
3-Κελύφη	$1.00 \times 10^{-6}$
3α- Κελύφη	$1.00 \times 10^{-6}$
3&3α- Κελύφη	$1.00 \times 10^{-6}$
4-Λιθορριπή προστασίας	$1.00 \times 10^{-3}$
5-Λιθορριπή προστασίας	$1.00 \times 10^{-3}$
6-Ανάχωμα	$5.00 \times 10^{-5}$
7- Φίλτρα	$5.00 \times 10^{-4}$
Εδαφικός μανδύας	$5.00 \times 10^{-5}$
Ισχυρά αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	$5.00 \times 10^{-7}$
Μέτρια αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	$5.00 \times 10^{-8}$
Τσιμεντενέσεις	$5.00 \times 10^{-9}$

#### Περιεκτικότητα σε νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους

Το λογισμικό απαιτεί και τη συνάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους (VWC-Fn), η οποία περιγράφει τον όγκο του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα γεωυλικό σε συνάρτηση με την αρνητική πίεση πόρων. Καθώς η αρνητική πίεση πόρων αυξάνει και το υλικό από κορεσμένο αρχίζει να γίνεται ακόρεστο, η περιεκτικότητα του σε νερό μειώνεται.

Η περιεκτικότητα σε νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους ορίζεται ως το πορώδες πολλαπλασιασμένο με το βαθμό κορεσμού.

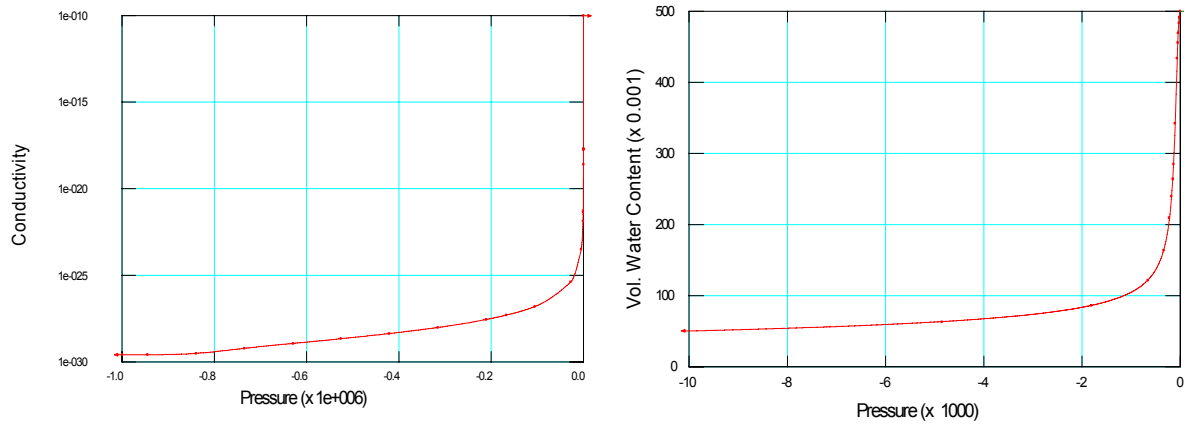
*Ο ορισμός της περιεκτικότητας σε νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους γίνεται μέσω των εντολών KeyIn → Hydraulic Functions → Vol. Water Content.*

Οι συναρτήσεις που αφορούν τόσο την υδραυλική αγωγιμότητα όσο και την περιεκτικότητα σε νερό, προέκυψαν από πρότυπες συναρτήσεις που διαθέτει το ίδιο το πρόγραμμα, για υλικά που θεωρήθηκαν ότι προσεγγίζουν αυτά της παρούσας μελέτης (Πίνακας 4.2).

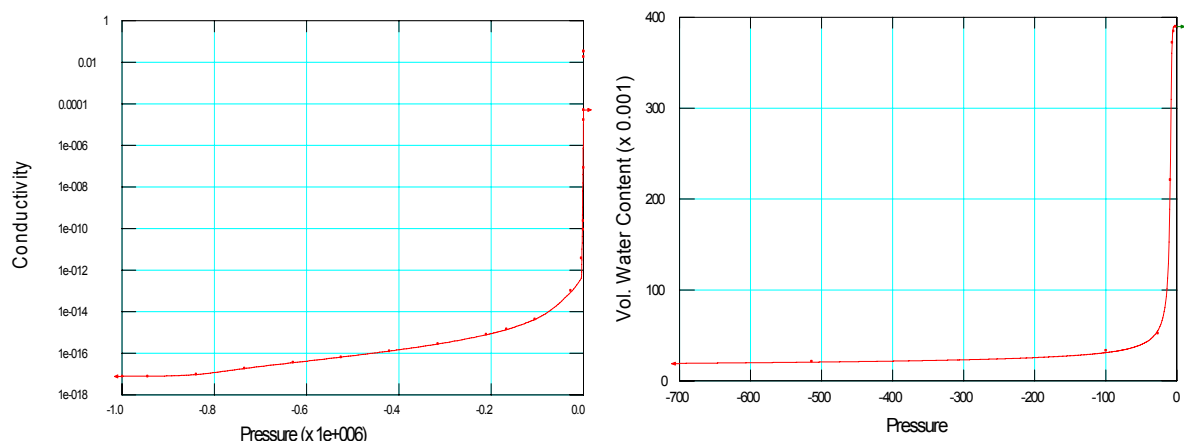
Κάθε πρότυπο διάγραμμα του λογισμικού προσαρμόστηκε με βάση τα  $k_{sat}$  του Πίνακα 4.1 στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3 έως και 4.17. Στα διαγράμματα αυτά το  $K$  (conductivity) είναι σε m/sec, το VWC αδιάστατο και η αρνητική πίεση πόρων (pressure) σε kPa.

**Πίνακας 4.2: Θεώρηση υδραυλικών παραμέτρων με βάση τυπικές τιμές που προτείνονται από το λογισμικό.**

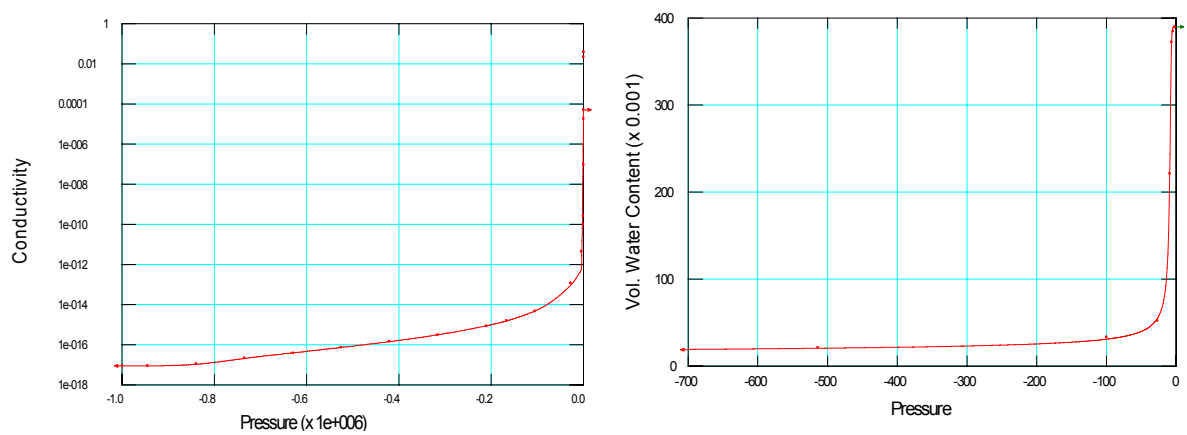
Ζώνη	Περιγραφή	Κωδικός συνάρτησης
1-Πυρήνας	Silty Clay (Fine Tails)	1
2-Φίλτρα	Sand	2
2α- Φίλτρα	Sand	3
2β- Φίλτρα	Sand	4
2&2β- Φίλτρα	Sand	5
3-Κελύφη	Well-graded #1	6
3α- Κελύφη	Well-graded #1	7
3&3α- Κελύφη	Well-graded #1	8
4-Λιθορριπή προστασίας	Uniform Sand	9
5-Λιθορριπή προστασίας	Uniform Sand	10
6-Ανάχωμα	Well-graded #1	11
7- Φίλτρα	Sand	12
Εδαφικός μανδύας	Uniform Fine Sand #1	13
Ισχυρά αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	Sandy Silt	14
Μέτρια αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	Clay/Silt	15
Τσιμεντενέσεις	Clay/Silt	16



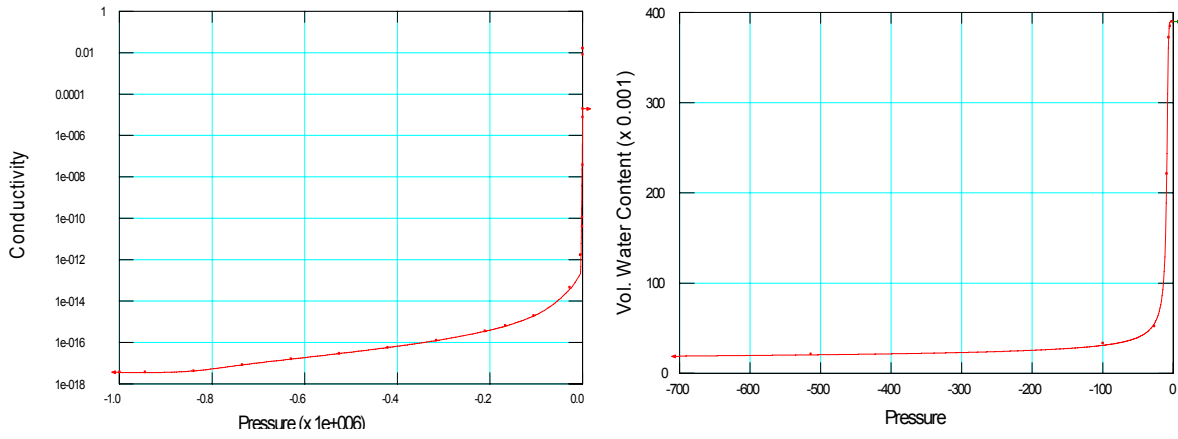
**Σχήμα 4.3: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 1.**



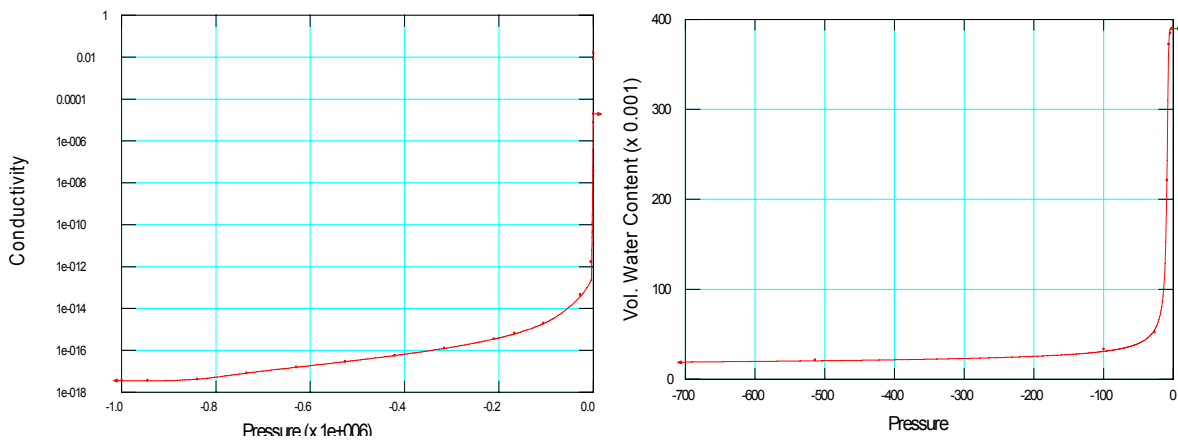
**Σχήμα 4.4: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2.**



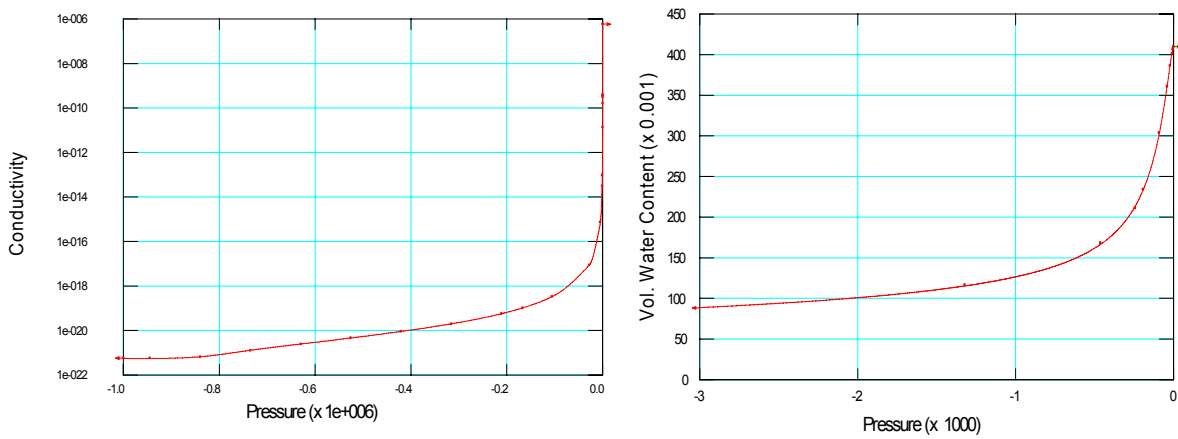
**Σχήμα 4.5: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2α.**



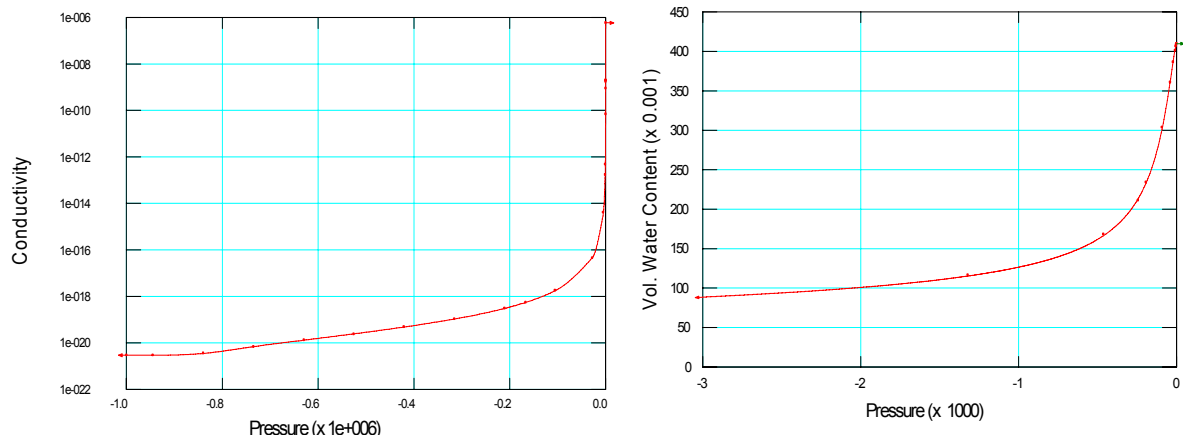
**Σχήμα 4.6:** Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2β.



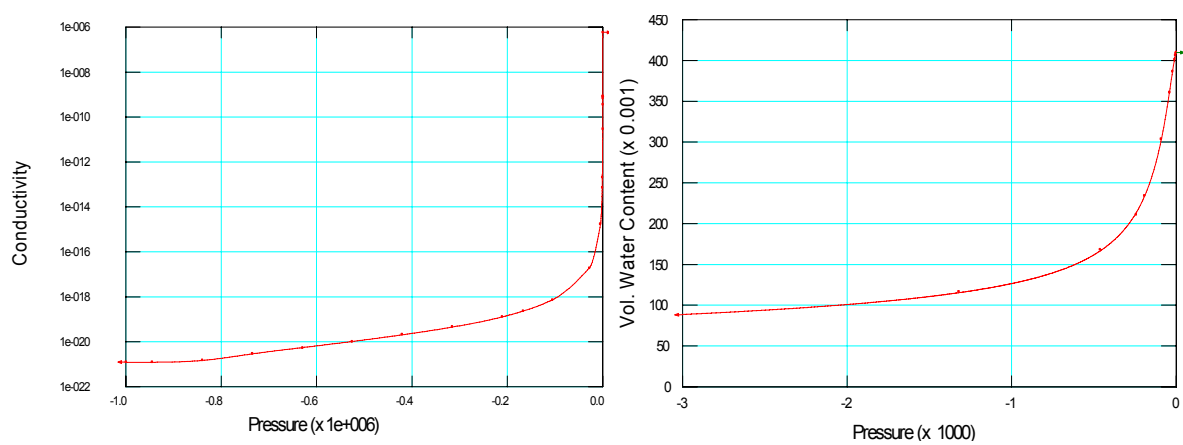
**Σχήμα 4.7:** Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 2&2β.



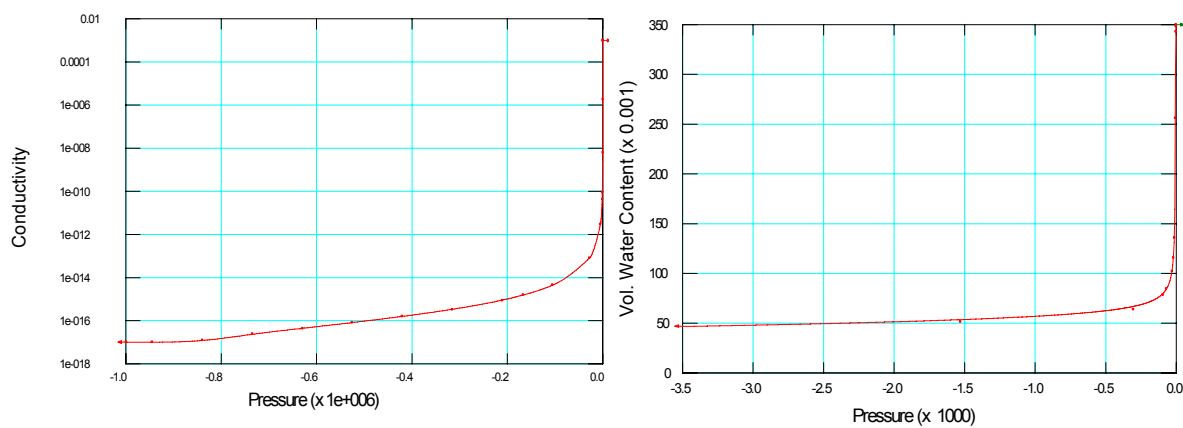
**Σχήμα 4.8:** Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 3.



**Σχήμα 4.9: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 3α.**

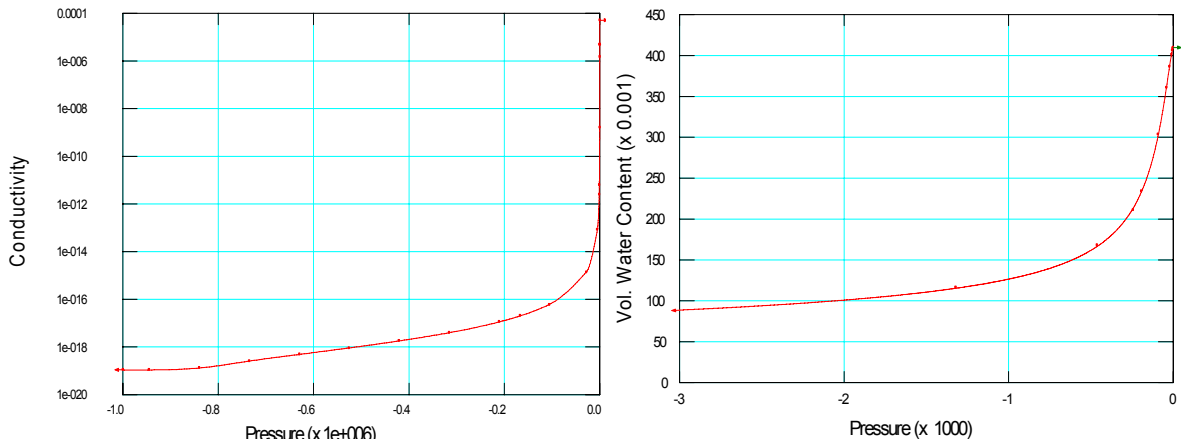


**Σχήμα 4.10: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 3&3α.**

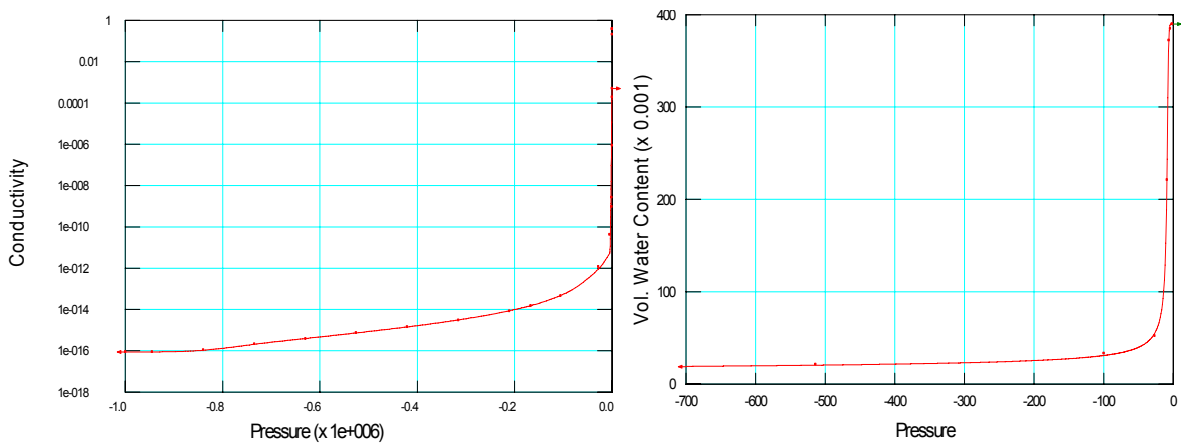


**Σχήμα 4.11: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνες 4 και 5.**

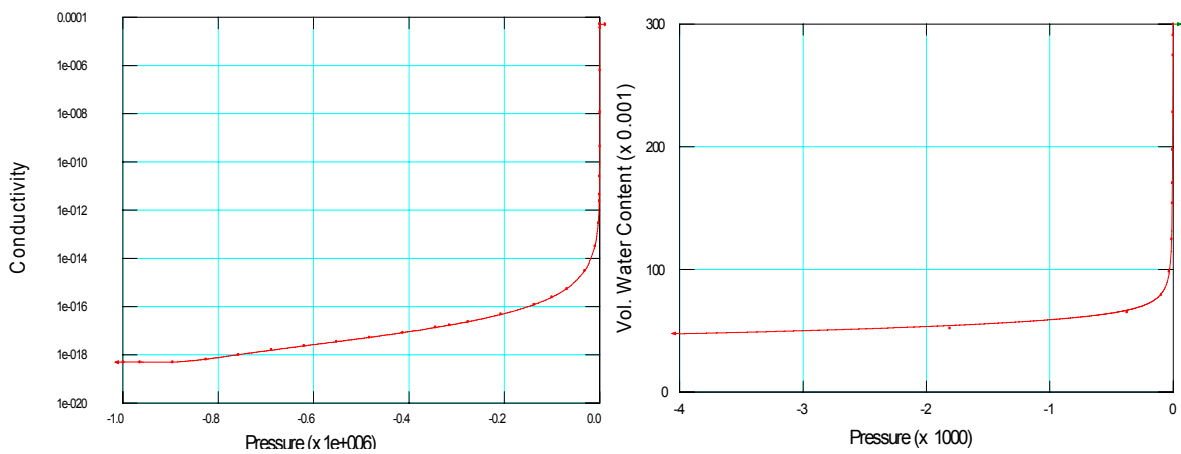




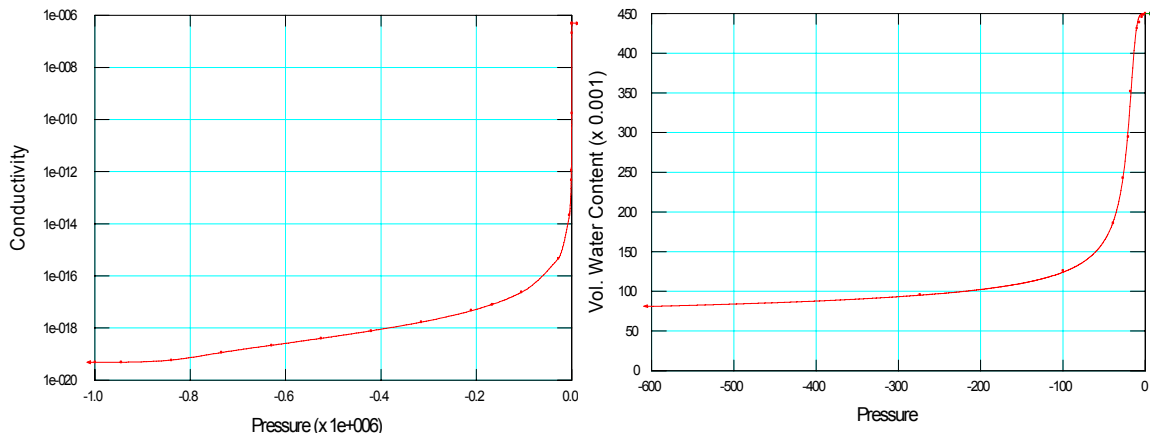
**Σχήμα 4.12: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 6.**



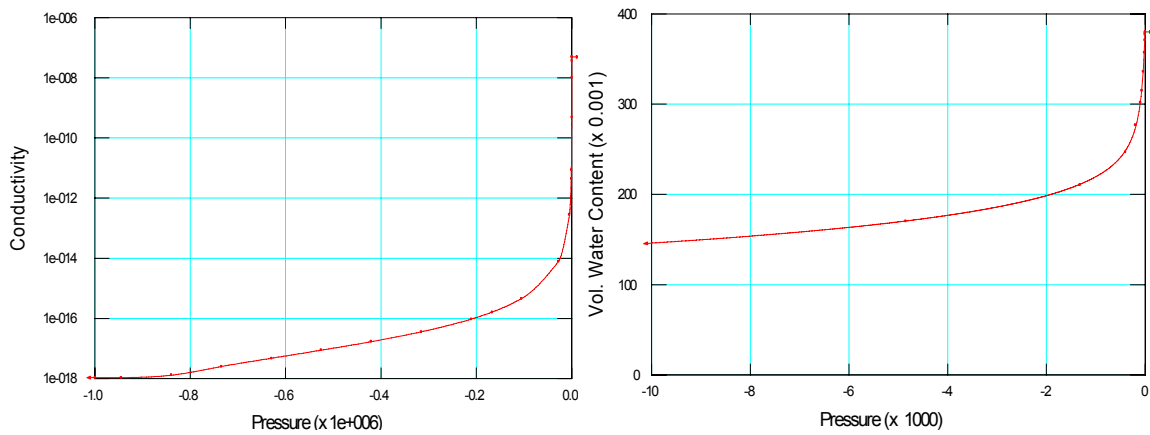
**Σχήμα 4.13: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη Ζώνη 7.**



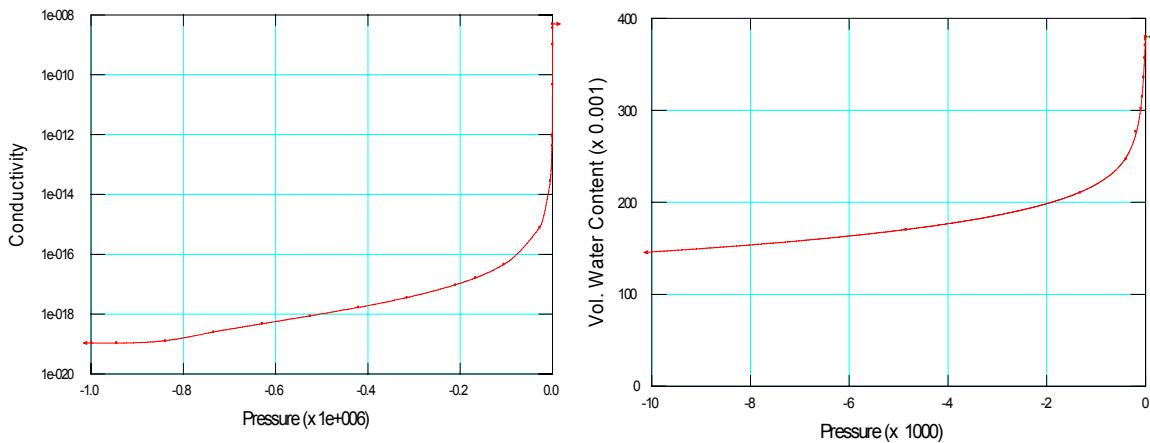
**Σχήμα 4.14: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τον εδαφικό μανδύα.**



**Σχήμα 4.15: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τον ισχυρά αποσαθρωμένο αργιλικό σχιστόλιθο.**



**Σχήμα 4.16: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τον μέτρια αποσαθρωμένο αργιλικό σχιστόλιθο.**



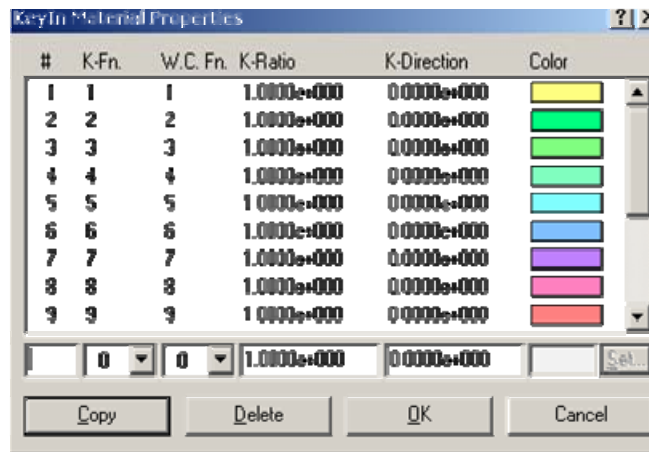
**Σχήμα 4.17: Προσαρμοσμένα διαγράμματα K-P και VWC-P για τη ζώνη τσιμεντενέσεων.**

Στη συνέχεια ορίστηκε ο πίνακας ιδιοτήτων των γεωυλικών του σώματος του φράγματος και της υποκείμενης ζώνης έδρασής του.

Για κάθε υλικό ορίσθηκαν:

1. Η διαπερατότητα ως συνάρτηση K-Fn.
2. Το περιεχόμενο νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους ως συνάρτηση VWC-Fn.
3. Ο λόγος της υδραυλικής αγωγιμότητας (υδροπερατότητα) στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Παραδοχή:  $k_x=k_y \Rightarrow K\text{-Ratio}=1$ .
4. Η διεύθυνση της k (K-Direction) που επιτρέπει τον ορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας σε διεύθυνση εκτός από τις X-Y (Για  $0^\circ \Rightarrow k=k_x$ ).

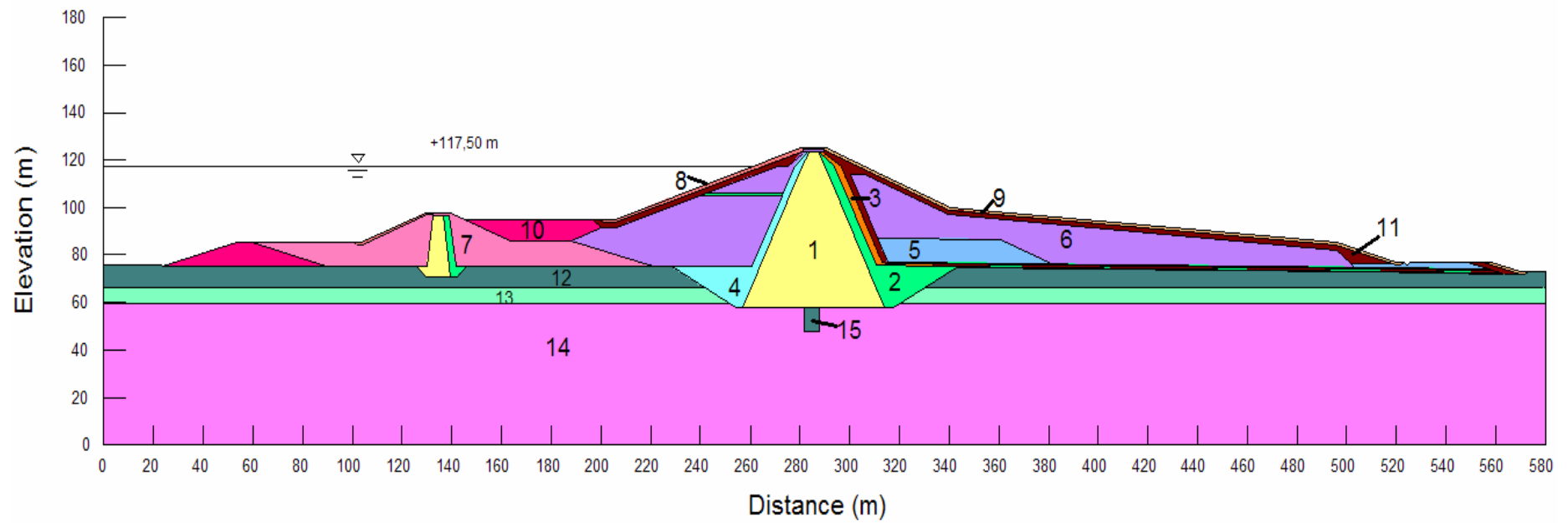
Μέσω του παρακάτω παράθυρου διαλόγου (Σχήμα 4.18) επιλέγοντας KeyIn  $\rightarrow$  Material Properties καθορίστηκαν οι παράμετροι K-Fn, VWC-Fn, K-Ratio, K-Direction, Color για κάθε γεωυλικό του φράγματος και των υποκείμενων σχηματισμών.



#	K-Fn	W.C. Fn	K-Ratio	K-Direction	Color
1	1	1	1.0000e+000	0.0000e+000	Yellow
2	2	2	1.0000e+000	0.0000e+000	Green
3	3	3	1.0000e+000	0.0000e+000	Light Green
4	4	4	1.0000e+000	0.0000e+000	Cyan
5	5	5	1.0000e+000	0.0000e+000	Light Blue
6	6	6	1.0000e+000	0.0000e+000	Blue
7	7	7	1.0000e+000	0.0000e+000	Purple
8	8	8	1.0000e+000	0.0000e+000	Pink
9	9	9	1.0000e+000	0.0000e+000	Red

Σχήμα 4.18: Κατάλογος ιδιοτήτων υλικών.

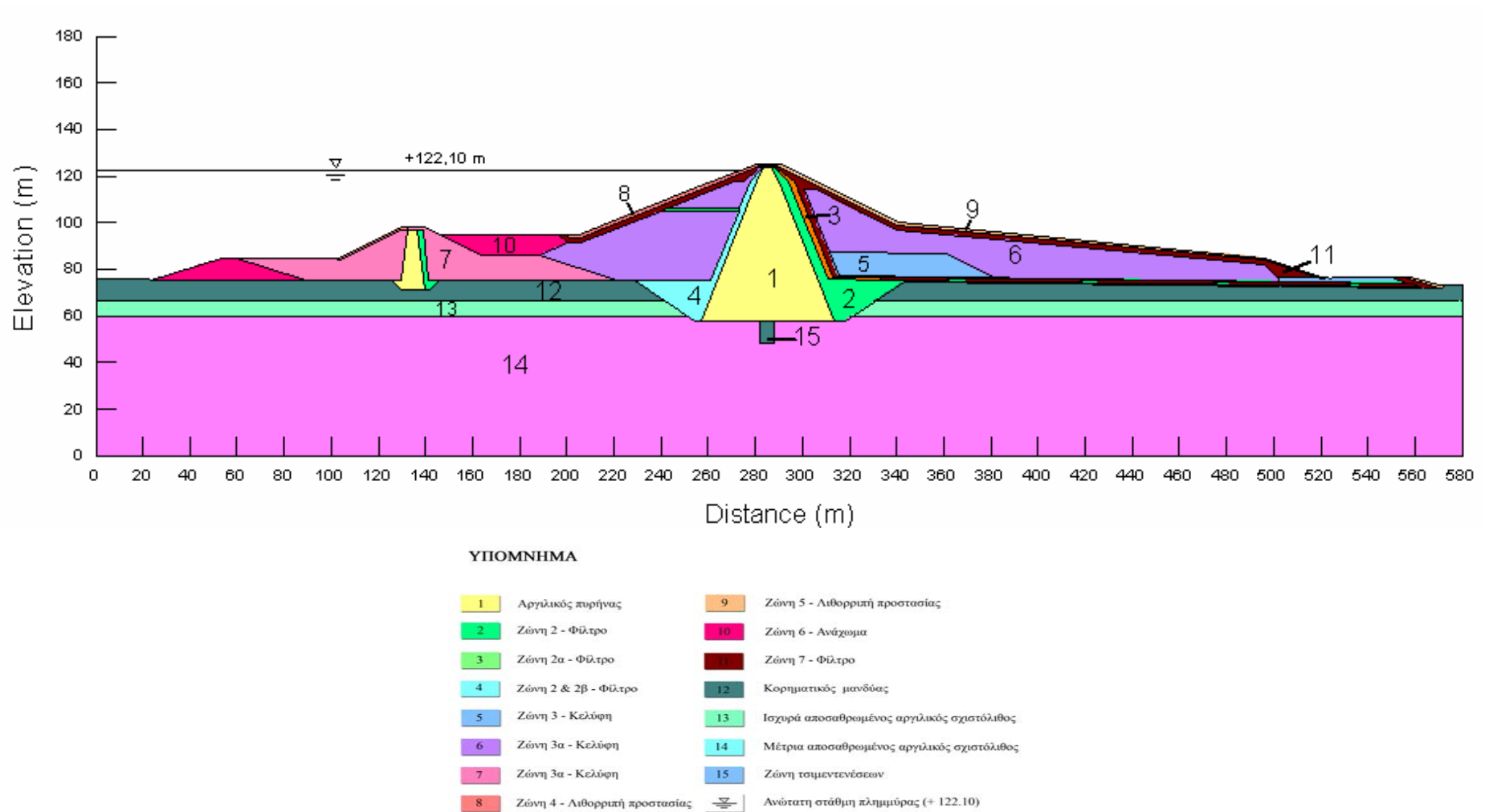
Ορίζοντας τις ιδιότητες όλων των ζωνών του φράγματος, καθώς και των υποκείμενων σχηματισμών, προέκυψαν τα μοντέλα A και B, όπως αυτά παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.19 και 4.20, αντίστοιχα.



**ΥΠΟΜΝΗΜΑ**

<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; padding: 2px;">1</span> Αργιλικός πυρήνας	<span style="background-color: orange; border: 1px solid black; padding: 2px;">9</span> Ζώνη 5 - Λιθορριπή προστασίας
<span style="background-color: green; border: 1px solid black; padding: 2px;">2</span> Ζώνη 2 - Φίλτρο	<span style="background-color: pink; border: 1px solid black; padding: 2px;">10</span> Ζώνη 6 - Ανάχωμα
<span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; padding: 2px;">3</span> Ζώνη 2α - Φίλτρο	<span style="background-color: brown; border: 1px solid black; padding: 2px;">7</span> Ζώνη 7 - Φίλτρο
<span style="background-color: cyan; border: 1px solid black; padding: 2px;">4</span> Ζώνη 2 & 2β - Φίλτρο	<span style="background-color: darkgreen; border: 1px solid black; padding: 2px;">12</span> Κορηματικός μανδύας
<span style="background-color: blue; border: 1px solid black; padding: 2px;">5</span> Ζώνη 3 - Κελύφη	<span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; padding: 2px;">13</span> Ισχυρά αποσπασθρομένους αργιλικός σχιστόλιθος
<span style="background-color: purple; border: 1px solid black; padding: 2px;">6</span> Ζώνη 3α - Κελύφη	<span style="background-color: lightcyan; border: 1px solid black; padding: 2px;">14</span> Μέτρια αποσπασθρομένους αργιλικός σχιστόλιθος
<span style="background-color: magenta; border: 1px solid black; padding: 2px;">7</span> Ζώνη 3α - Κελύφη	<span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; padding: 2px;">15</span> Ζώνη τσιμεντενέσεων
<span style="background-color: red; border: 1px solid black; padding: 2px;">8</span> Ζώνη 4 - Λιθορριπή προστασίας	Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (+ 117.50)

**Σχήμα 4.19: Ζώνες διαφορετικών ιδιοτήτων υλικών φράγματος και υποκείμενων σχηματισμών – Μοντέλο Α.**



**Σχήμα 4.20: Ζώνες διαφορετικών ιδιοτήτων υλικών φράγματος και υποκείμενων σχηματισμών – Μοντέλο Β.**

### 4.3. Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

Στο λογισμικό "SEEP/W" απαιτείται η διακριτοποίηση των ζωνών των μοντέλων σε πεπερασμένα στοιχεία.

Στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διαιρείται το πεδίο σε στοιχεία και υπολογίζεται το ζητούμενο άγνωστο μέγεθος στους κόμβους του πεδίου. Μερικές χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα γραμμικά, τα τριγωνικά και τα ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά.

Για το σχεδιασμό του δικτύου (Mesh) πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να επιλεγεί ένας από τους ακόλουθους τύπους:

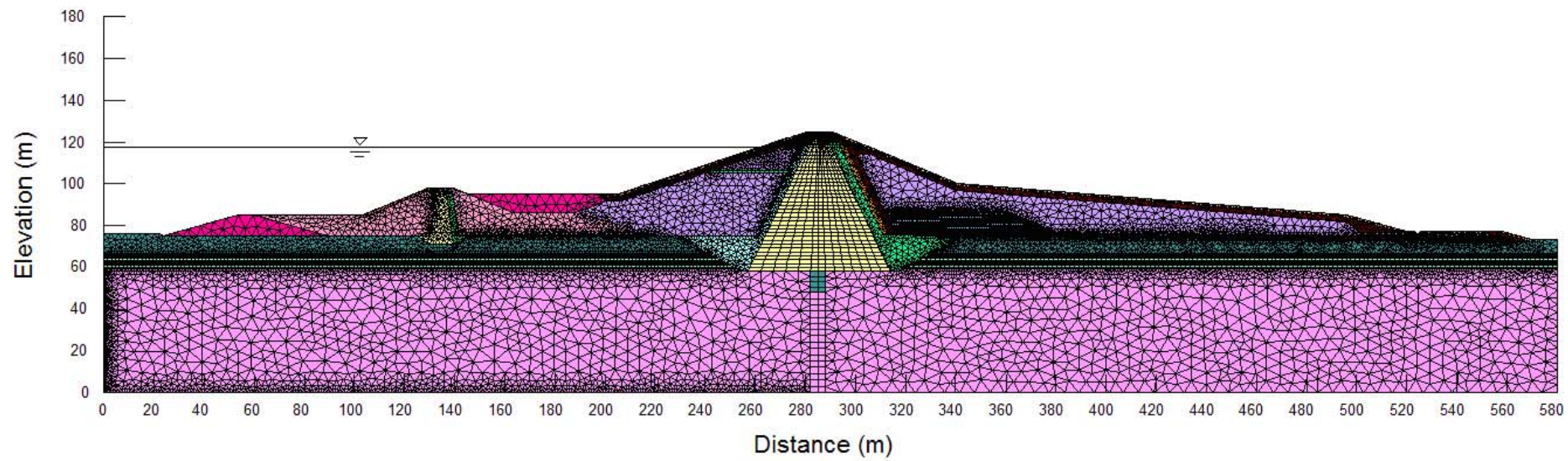
- Unstructured : Διαίρεση του πεδίου σε μη δομημένα τριγωνικά στοιχεία.
- Structured : Διαίρεση του πεδίου σε δομημένα στοιχεία.

Και οι δύο προσεγγίσεις διακριτοποίησης έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Τα μη δομημένα πεπερασμένα στοιχεία ορίζονται ευκολότερα απ' ό,τι τα δομημένα, ενώ ο προσδιορισμός της μορφής τους ελέγχεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Έτσι, τα μη δομημένα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα για ακανόνιστα ή πολύπλοκα γεωμετρικά σχήματα.

Όμως, πιο αξιόπιστα θεωρούνται τα δομημένα πεπερασμένα στοιχεία, γιατί προκαλούν την ελάχιστη δυνατή αλλοίωση στα ανύσματα ροής του υπόγειου νερού (velocity vectors).

Στην συγκεκριμένη περίπτωση και για τα δύο μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν μη δομημένα πεπερασμένα στοιχεία (Σχήμα 4.21), λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδίου και της περιορισμένης δυνατότητας του υπολογιστικού συστήματος.



**Σχήμα 4.21: Διακριτοποίηση με μη δομημένα στοιχεία.**

#### 4.4. Ορισμός αρχικών συνθηκών

Ο ορισμός των οριακών αρχικών συνθηκών γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά επιλέγεται ο τύπος του ορίου (boundary type) και η τιμή του και στη συνέχεια καθορίζονται οι κόμβοι στους οποίους θα εφαρμοστεί.

*Από το κύριο μενού επιλέγεται Draw → Boundary Conditions. Εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου Draw Boundary Conditions, όπου από το αναπτυσσόμενο πεδίο Type καθορίζεται ο τύπος του ορίου (Head H, Total Hydraulic Flux Q, Unit Hydraulic Flux q, Unit Gradient i, Pressure Head P) και η τιμή εφαρμογής του.*

Για τα συγκεκριμένα μοντέλα, ως καταλληλότερες συνοριακές συνθήκες θεωρήθηκαν τα αναμενόμενα επίπεδα (στάθμες) νερού στις ανάντη και κατάντη πλευρές του σώματος του φράγματος. Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών στο συγκεκριμένο μοντέλο, ως οριακή συνθήκη ορίστηκε το υδραυλικό φορτίο (Head H).

Η τιμή του υδραυλικού φορτίου σε ένα σημείο δίνεται από την εξίσωση:

$$H = (u/\gamma_w) + y \quad [4.1]$$

όπου,

H = υδραυλικό φορτίο (m).

u = πίεση πόρων στο συγκεκριμένο σημείο (kPa).

$\gamma_w$  = μοναδιαίο βάρος του νερού (kN/m<sup>3</sup>).

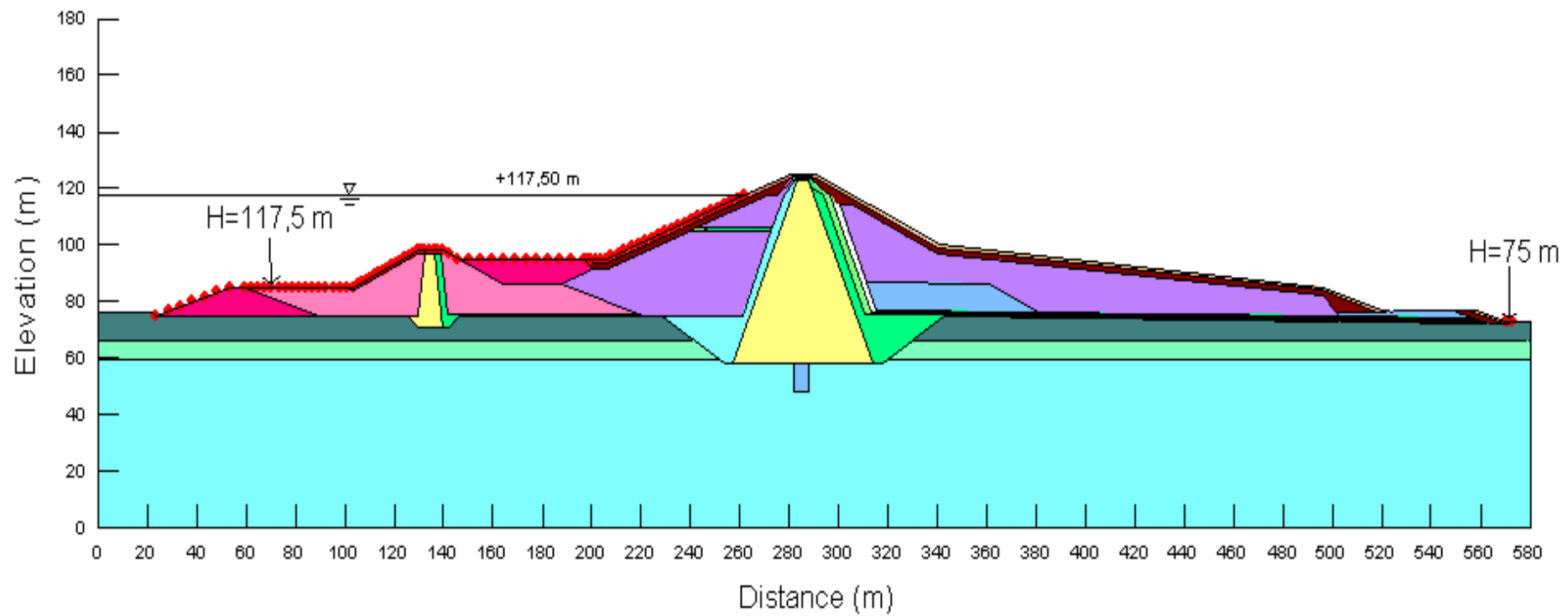
y = ύψος θέσης (m).

Για το μοντέλο A, ο λόγος  $u/\gamma_w$  στην ανάντη πλευρά του φράγματος δεν είναι τίποτε άλλο από το ύψος της στήλης νερού που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο σημείο, ενώ στην κατάντη πλευρά του δεν υπάρχει νερό, συνεπώς  $u/\gamma_w=0$ . Αποτέλεσμα αυτών είναι ότι το ολικό φορτίο H στην ανάντη πλευρά ισούται με το ύψος της ανώτατης στάθμης λειτουργίας (H = 117.50 m) ενώ στην κατάντη ισούται με το υψόμετρο θέσης του σημείου (H = 75 m).

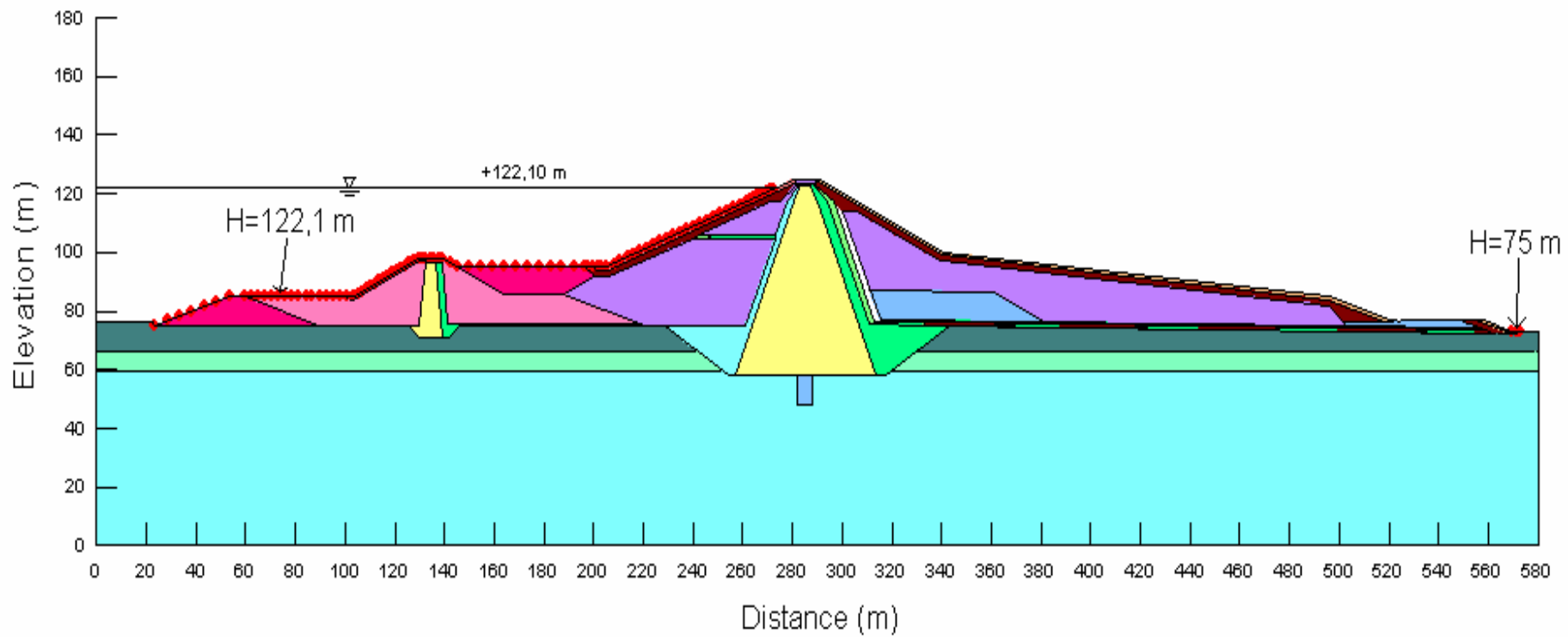
Αντίστοιχα για το μοντέλο B, προκύπτει ότι το ολικό υδραυλικό φορτίο στην ανάντη πλευρά είναι H=122.10 m, όσο δηλ. και το ύψος της ανώτατης στάθμης πλημμύρας της λεκάνης κατάκλυσης, ενώ στην κατάντη πλευρά H=75 m.

Οι οριακές συνθήκες ορίστηκαν στην τυπική διατομή του φράγματος (στους εξωτερικούς κόμβους των ανάλογων στοιχείων διακριτοποίησης) και συμβολίζονται με κόκκινες τελείες στα **Σχήματα 4.22** και **4.23**.





Σχήμα 4.22: Ορισμός αρχικών οριακών συνθηκών – Μοντέλο Α.

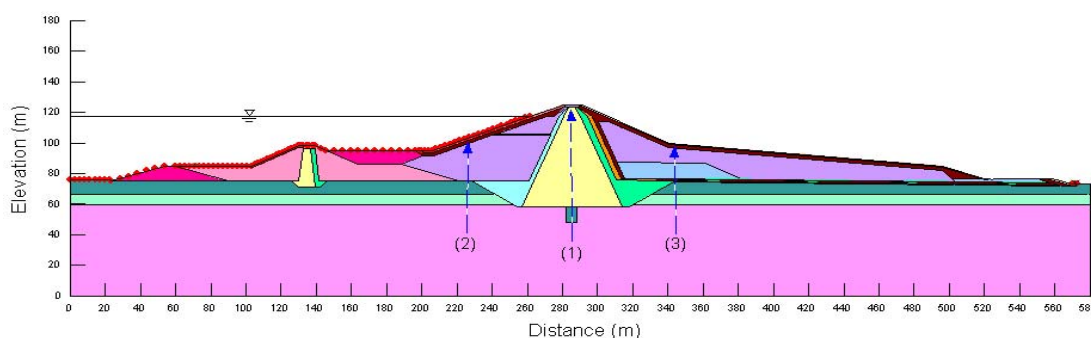


**Σχήμα 4.23: Ορισμός αρχικών οριακών συνθηκών – Μοντέλο Β.**

#### 4.5. Σχεδιασμός τομών για την εκτίμηση διαφυγών (απωλειών) λόγω διήθησης.

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι διαφυγές νερού μέσα από το σώμα του φράγματος (παροχές) είναι απαραίτητο να οριστούν διατομές σε διάφορες θέσεις, μέσα στις οποίες θα γίνουν οι υπολογισμοί.

Για τον υπολογισμό των διαφυγών του νερού στο σώμα του φράγματος και για τα δύο μοντέλα σχεδιάστηκαν τρεις τομές, μία στο κέντρο του αργιλικού πυρήνα (τομή 1) μέχρι κάτω από την κουρτίνα τσιμεντενέσεων, μία στην ανάντη (τομή 2) καθώς και μία στην κατάντη πλευρά του φράγματος (τομή 3), όπως αυτές παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.24**.

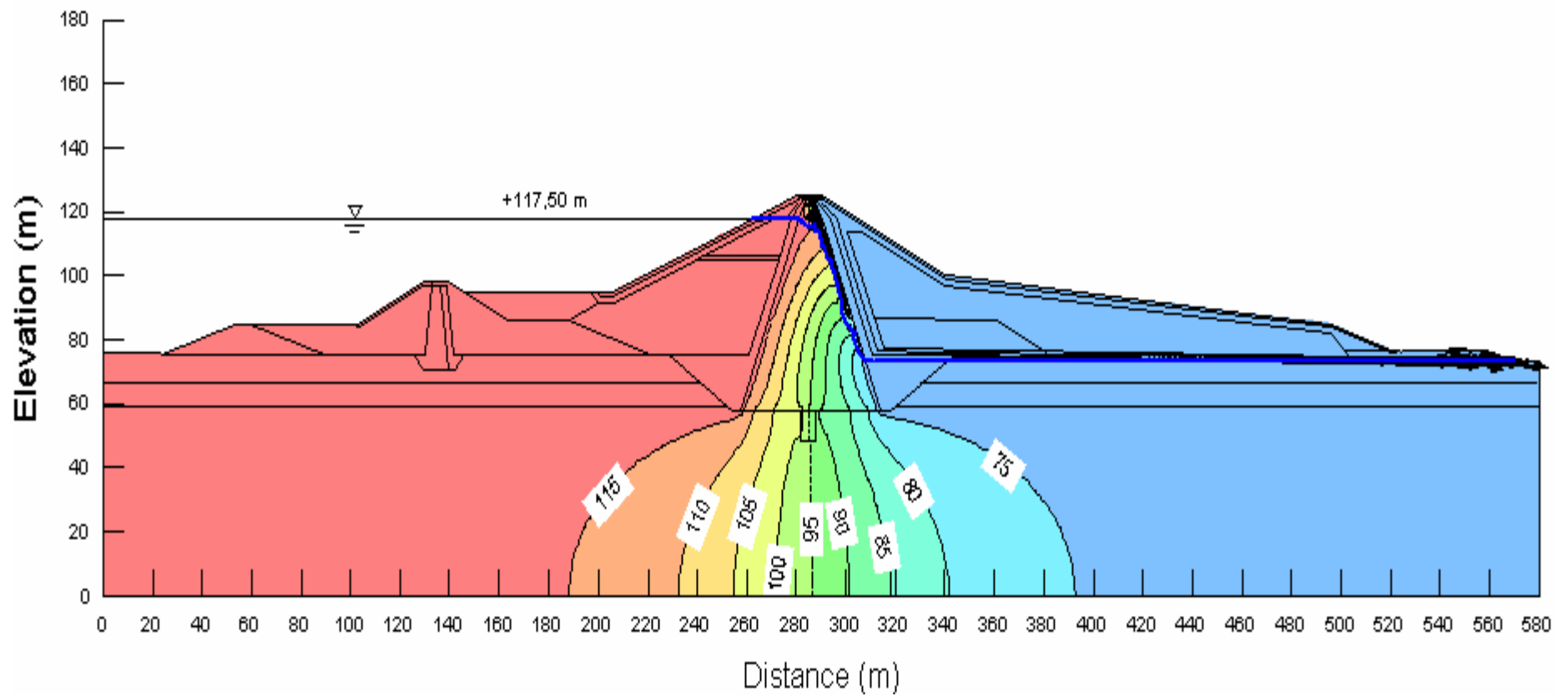


**Σχήμα 4.24: Διατομές υπολογισμού παροχής νερού.**

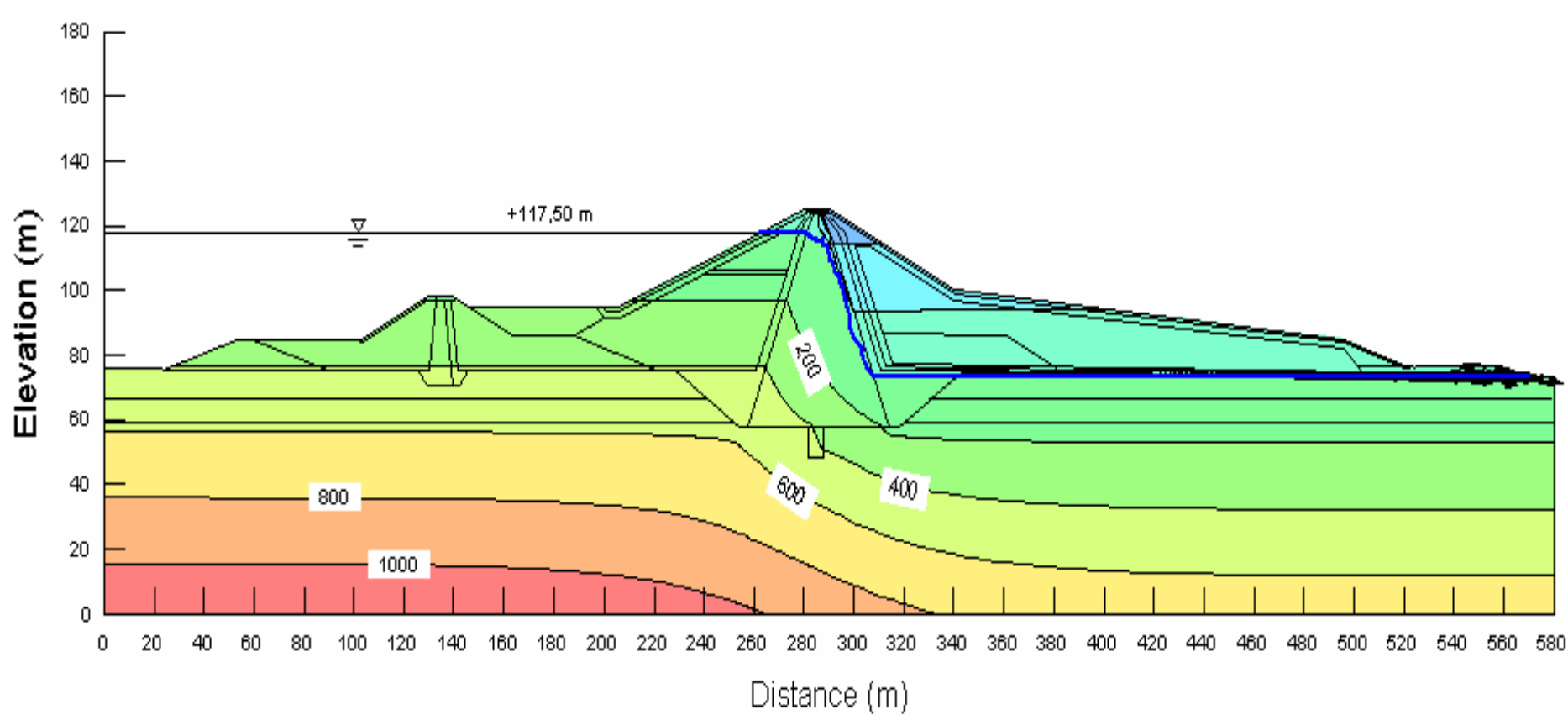
#### 4.6. Επίλυση και αποτελέσματα

Από την επίλυση του μοντέλου A προέκυψε το **Σχήμα 4.25**, στο οποίο παρουσιάζεται η πιεζομετρία στο σώμα του φράγματος. Στο ίδιο σχήμα διακρίνονται τόσο οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες (σε m), οι οποίες διαχωρίζουν ζώνες διαφορετικού χρωματισμού (πίεσης), όσο και η ελεύθερη επιφάνεια του νερού μέσα στο φράγμα (γαλάζια γραμμή). Στο **Σχήμα 4.26** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες πίεσης πόρων (σε kPa) που αναπτύσσονται στο σώμα του φράγματος και στους υποκείμενους γεωλογικούς σχηματισμούς.

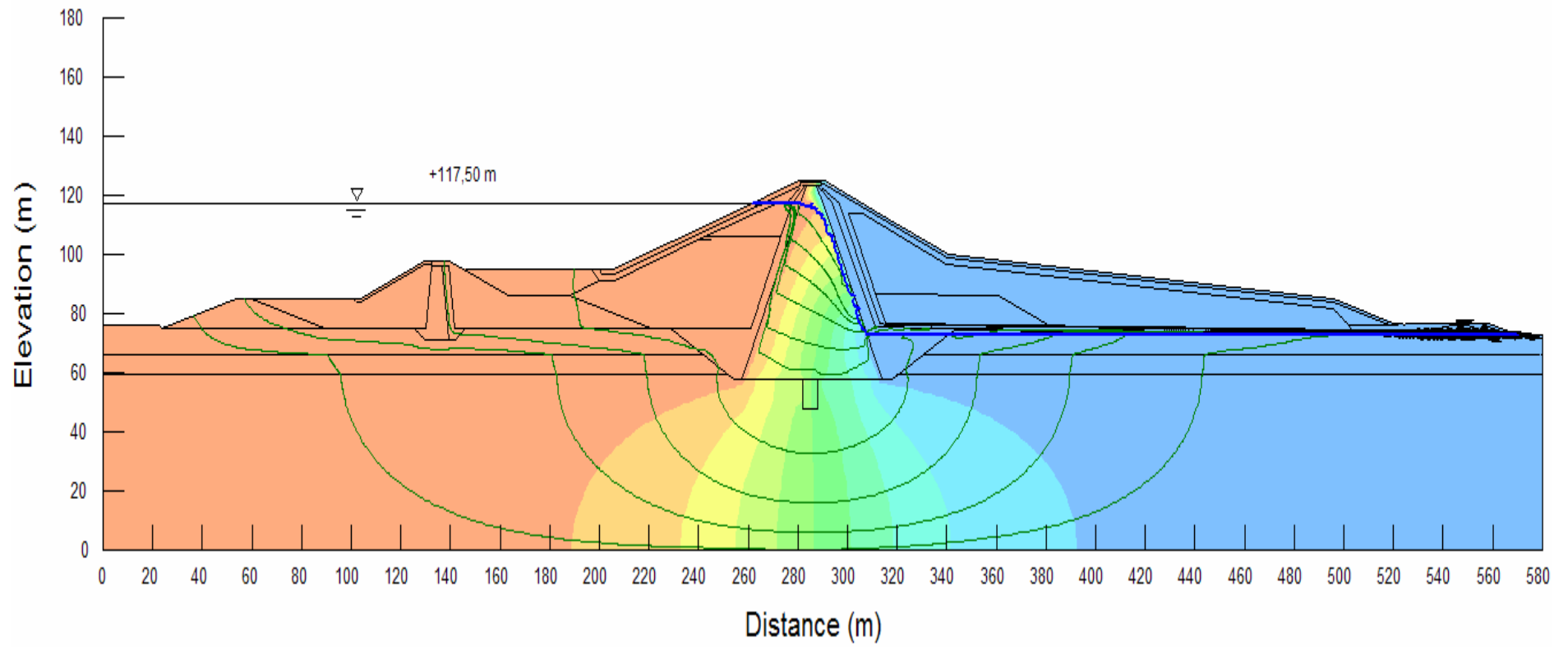
Με βάση την ίδια επίλυση προέκυψαν, τα ανύσματα ταχύτητας ροής του νερού διαμέσου του φράγματος (μαύρα βέλη) (**Σχήμα 4.27**) και διακριτές γραμμές ροής (με πράσινο χρώμα). Στα **Σχήματα 4.28, 4.29 και 4.30** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου B, σε μορφή ανάλογη με αυτήν των Σχήματα 4.25, 4.26 και 4.27.



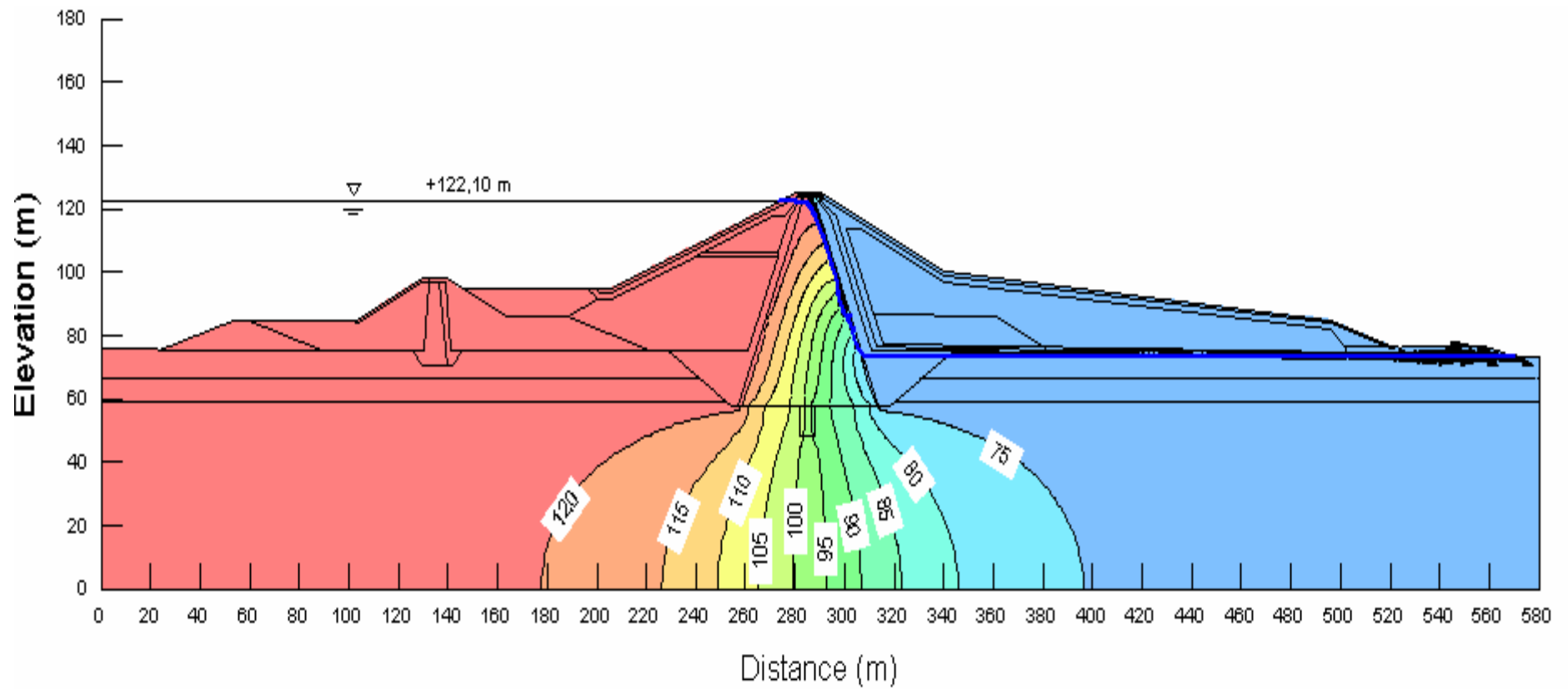
Σχήμα 4.25: Υδραυλικό φορτίο μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Α).



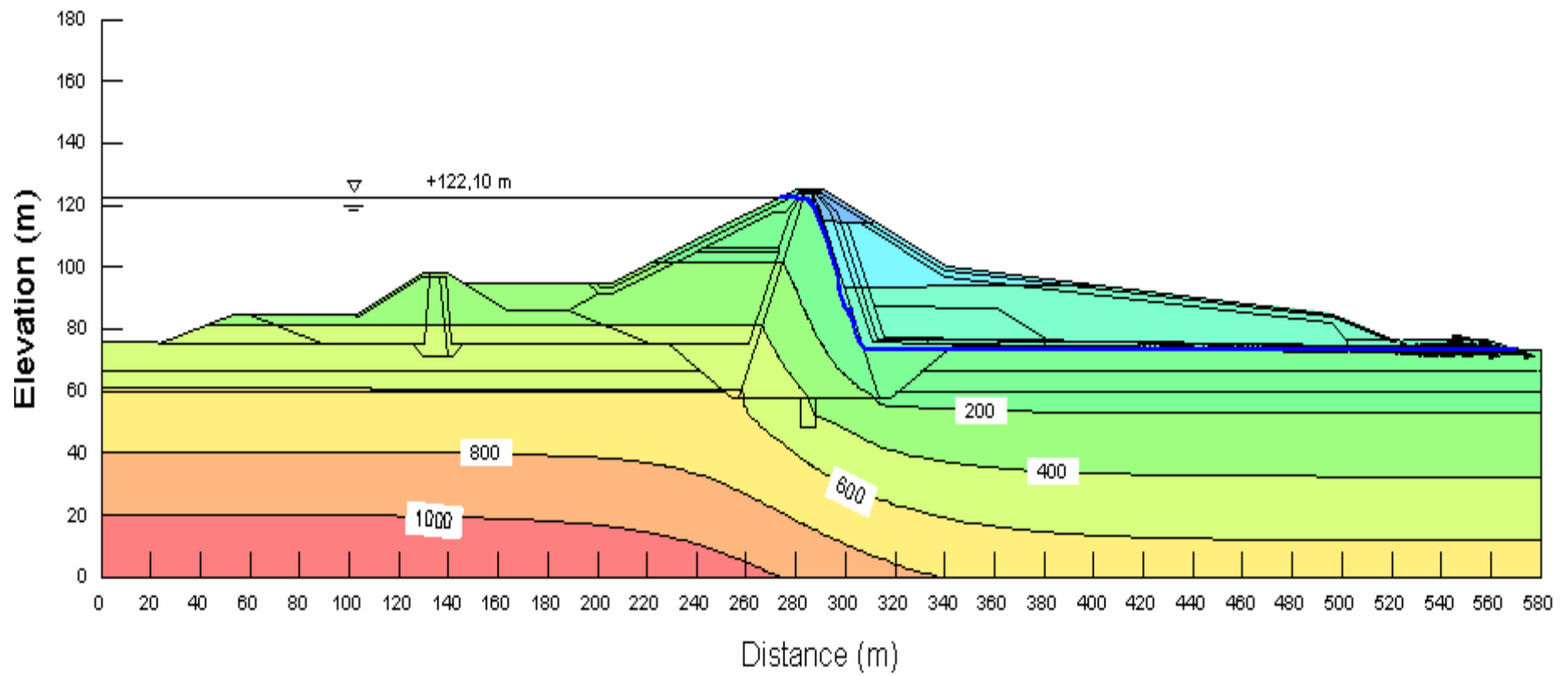
Σχήμα 4.26: Πίεση πόρων (kPa) μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Α).



**Σχήμα 4.27: Ανύσματα ροής μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Α).**

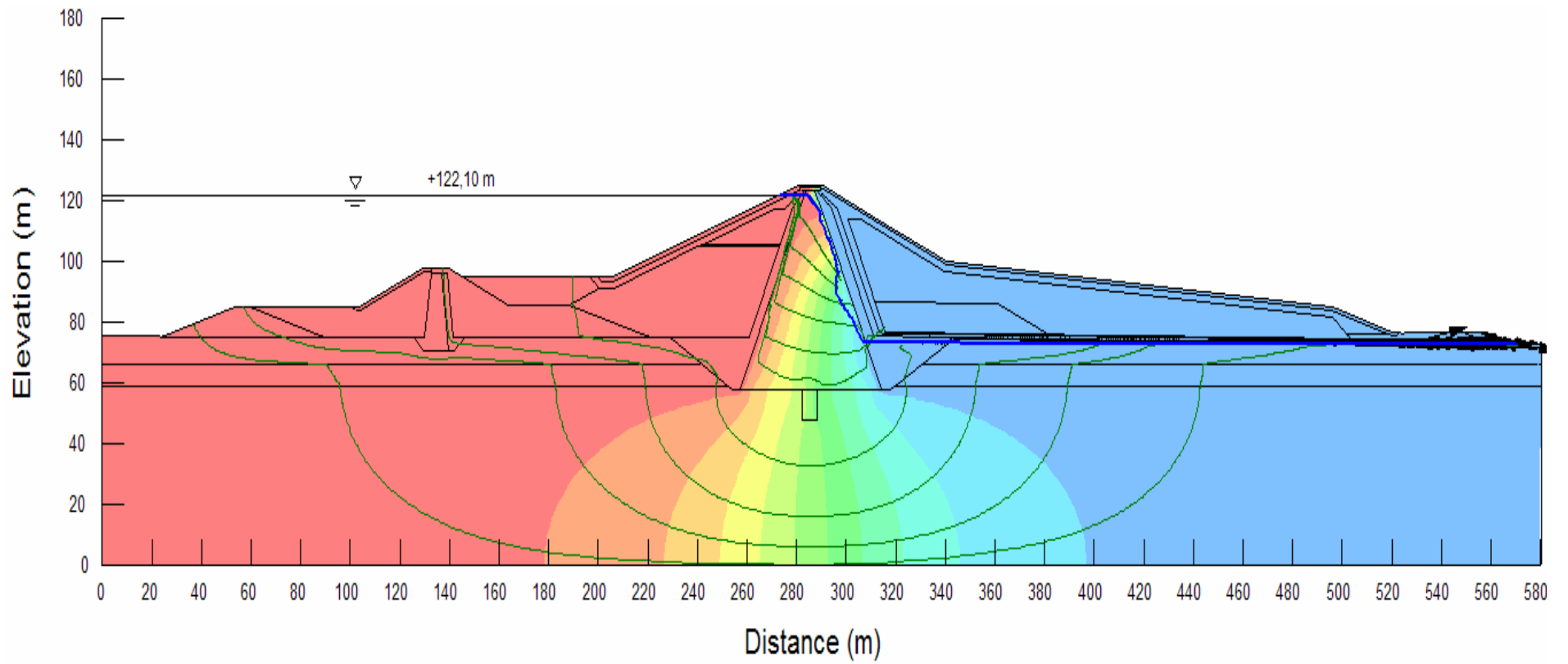


Σχήμα 4.28: Υδραυλικό φορτίο μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Β).



Σχήμα 4.29: Πίεση πόρων (kPa) μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Β).





**Σχήμα 4.30: Ανύσματα ροής μοντέλου σταθερής ροής (Μοντέλο Β).**

#### 4.7. Διερεύνηση της διαπερατότητας μέσω παραμετρικής ανάλυσης

Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την επίλυση είναι η υδροπερατότητα στις διάφορες κορεσμένες λιθολογικές ζώνες ( $k_{sat}$ ).

Προκειμένου να εξετασθεί η επίπτωση της διαφοροποίησης των τιμών υδροπερατότητας που εισάχθηκαν στα δύο μοντέλα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης (διαφυγές ροής) έγινε παραμετρική ανάλυση με δύο επιπλέον περιπτώσεις διαφορετικής διαπερατότητας (Πίνακας 4.3).

**Πίνακας 4.3: Παραμετρική ανάλυση υδροπερατότητας.**

Ζώνη	$k_{sat}$ (m/sec)			
	Περίπτωση 1 (Μοντέλο A <sub>1</sub> )	Περίπτωση 2 (Μοντέλο A <sub>2</sub> )	Περίπτωση 3 (Μοντέλο B <sub>1</sub> )	Περίπτωση 4 (Μοντέλο B <sub>2</sub> )
1-Πυρήνας	$1.00 \times 10^{-9}$	$1.00 \times 10^{-9}$	$1.00 \times 10^{-9}$	$1.00 \times 10^{-9}$
2-Φίλτρα	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$
2α- Φίλτρα	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$
2β- Φίλτρα	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$
2&2β- Φίλτρα	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$
3-Κελύφη	$1.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-7}$
3α- Κελύφη	$1.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-7}$
3&3α- Κελύφη	$1.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-7}$
4-Λιθορριπή προστασίας	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$
5-Λιθορριπή προστασίας	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$
6-Ανάχωμα	$5.00 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-6}$
7- Φίλτρα	$2.00 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-5}$
Εδαφικός μανδύας	$5.00 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$5.00 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-4}$
Ισχυρά αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	$5.00 \times 10^{-7}$	$5.00 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-7}$	$5.00 \times 10^{-6}$
Μέτρια αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	$7.00 \times 10^{-8}$	$5.00 \times 10^{-8}$	$7.00 \times 10^{-8}$	$5.00 \times 10^{-8}$
Τσιμεντενέσεις	$5.00 \times 10^{-9}$	$5.00 \times 10^{-9}$	$5.00 \times 10^{-9}$	$5.00 \times 10^{-9}$

Λόγω αξιόπιστης γνώσης όσον αφορά την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ομοιογένεια των υλικών, οι τιμές της διαπερατότητας στις ζώνες 1, 4, 5 και στη ζώνη τσιμεντενέσεων θεωρήθηκαν αμετάβλητες σε όλες τις περιπτώσεις. Στους υποκείμενους σχηματισμούς οι τιμές διαπερατότητας διαμορφώθηκαν σύμφωνα με τα ανώτερα και κατώτερα όρια που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των δοκιμών Lugeon.

Σημειώνεται ότι σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις τα διαγράμματα Κ – Ρ των Σχημάτων 4.3 έως και 4.17 διαφοροποιούνται, αλλά μόνο ως προς τις απόλυτες τιμές τους και όχι ως προς την μορφή τους (κλίσεις). Για το λόγο αυτό, δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιασθούν.

Στον **Πίνακα 4.4** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα μεγέθη διαφυγών που υπολογίσθηκαν για όλες τις διατομές (1 έως και 3) του Σχήματος 4.24, στα μοντέλα σταθερής κατάστασης ροής που αναλύθηκαν προηγουμένως.

**Πίνακας 4.4: Εκτιμώμενες διαφυγές.**

Μοντέλο	Διαφυγές (m <sup>3</sup> /sec)		
	Διατομή (1) Πυρήνας	Διατομή (2) Ανάτη πρανές	Διατομή (3) Κατάτη πρανές
<b>A</b>	7.92×10 <sup>-7</sup>	7.62×10 <sup>-7</sup>	1.01×10 <sup>-6</sup>
<b>B</b>	9.02×10 <sup>-7</sup>	7.88×10 <sup>-7</sup>	9.00×10 <sup>-7</sup>
<b>A<sub>1</sub></b>	1.28×10 <sup>-8</sup>	2.32×10 <sup>-8</sup>	2.04×10 <sup>-6</sup>
<b>A<sub>2</sub></b>	4.33×10 <sup>-7</sup>	7.36×10 <sup>-7</sup>	1.91×10 <sup>-6</sup>
<b>B<sub>1</sub></b>	1.52×10 <sup>-7</sup>	2.90×10 <sup>-8</sup>	4.49×10 <sup>-6</sup>
<b>B<sub>2</sub></b>	4.79×10 <sup>-7</sup>	9.83×10 <sup>-7</sup>	2.87×10 <sup>-7</sup>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

# ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

### 5.1. Προσδιορισμός του προβλήματος-παραδοχές

Η διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών του σώματος του φράγματος έγινε με το λογισμικό **SLOPE/W**.

Το πρόγραμμα αυτό για κάθε περίπτωση γεωμετρίας ενός πρανού, κατάσταση φόρτισης και τιμές εδαφοτεχνικών παραμέτρων, είναι δυνατόν να διερευνήσει έναν μεγάλο αριθμό πιθανών επιφανειών ολίσθησης και να προσδιορίσει την δυσμενέστερη, δηλαδή αυτήν που αντιστοιχεί στον ελάχιστο συντελεστή ευστάθειας.

Επίσης το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα εμφάνισης της ανάλυσης ισορροπίας των δυνάμεων σε κάθε λωρίδα υπολογισμού οποιασδήποτε επιφάνειας ολίσθησης.

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα θεωρώντας κατάσταση σταθερής ροής, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. για δύο στάθμες στη λεκάνη κατάκλυσης. Οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στο σώμα του φράγματος και στους υποκείμενους σχηματισμούς εκτιμήθηκαν μέσω του SEEP/W και χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια στο **SLOPE/W** για την εξέταση της ευστάθειας του ανάντη και κατόντη πρανού του φράγματος.

Σημειώνεται ότι το φράγμα καταπονείται τόσο από τις αυξομειώσεις στην στάθμη του νερού, όσο και από σεισμικά φορτία, η ανάλυση των οποίων δεν μελετήθηκε, λόγω έλλειψης επαρκών και αξιόπιστων παραμέτρων που αφορούν την εδαφομηχανική του συμπεριφορά

Για το σχεδιασμό και την επίλυση των δύο μοντέλων ήταν απαραίτητο να γίνουν διάφορες παραδοχές, αναγκαίες για το λογισμικό **SLOPE/W**.

1. Κατά τις αναλύσεις της ευστάθειας πρανών χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη μέθοδος Bishop (η πλέον συνήθης μέθοδος) και εξετάστηκαν κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης.

2. Θεωρείται ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb ικανοποιείται κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας αστοχίας και η εκτίμηση της ευστάθειας διερευνάται με τον υπολογισμό (α) των δυνάμεων που επενεργούν στην επισφαλή μάζα, και (β) της αντίστασης σε διάτμηση.
3. Οι τιμές των παραμέτρων  $c$ ,  $\phi$  και  $\gamma$  των γεωυλικών κατασκευής του φράγματος και των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών ορίστηκαν με βάση τη γεωτεχνική ταξινόμηση των υλικών και βιβλιογραφικές αναφορές.
4. Η τιμή του μοναδιαίου βάρους που εισήχθη σε κάθε γεωυλικό και στους υποκείμενους σχηματισμούς αντιστοιχεί στο κορεσμένο μοναδιαίο βάρος ( $\gamma_{sat}$ ).
5. Η ανάλυση της ευστάθειας πρηνών (ανάντη-κατάντη) του φράγματος έγινε με βάση τις πιέσεις πόρων που υπολογίστηκαν από το **SEEP/W** για σταθερή κατάσταση ροής (βλέπε κεφάλαιο 4).

## 5.2. Εισαγωγή δεδομένων

Το λογισμικό **SLOPE/W** εξέτασε την ευστάθεια με βάση την διατομή εγκάρσια στο σώμα του φράγματος που είχε χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση - εκτίμηση των διαρροών με το πρόγραμμα **SEEP/W** (βλέπε κεφάλαιο 4).

Γεωτεχνικές παράμετροι των γεωυλικών κατασκευής του φράγματος και των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών.

Οι βασικές εδαφικές παράμετροι που ορίστηκαν στο λογισμικό, είναι η γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi'$ ), η συνοχή ( $c'$ ) και το κορεσμένο μοναδιαίο βάρος.

Με βάση την γεωτεχνική ταξινόμηση των υλικών κατασκευής και βιβλιογραφικές αναφορές εκτιμήθηκαν σε κάθε ζώνη και εισήχθησαν στο πρόγραμμα οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής ( $\phi$ ), της συνοχής ( $c'$ ) και του κορεσμένου μοναδιαίου βάρους ( $\gamma_{sat}$ ) των γεωυλικών και των υποκείμενων σχηματισμών, δεδομένου ότι η συμπεριφορά τους περιγράφεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb. Αναλυτικά οι εκτιμώμενες τιμές των εδαφικών παραμέτρων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1**.

*Με την εντολή KeyIn → Material Properties ορίστηκαν στο λογισμικό οι παράμετροι του Πίνακα 5.1.*

**Πίνακας 5.1: Τιμές εδαφικών παραμέτρων κάθε υλικού.**

Ζώνη	Κορεσμένο μοναδιαίο βάρος $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Συνοχή $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi'$ (°)
1-Πυρήνας	20	15	25
2-Φίλτρα	21	0	35
2α- Φίλτρα	21	0	35
2β- Φίλτρα	21	0	35
2&2β- Φίλτρα	21	0	35
3-Κελύφη	22	8	32
3α- Κελύφη	22	8	32
3&3α- Κελύφη	22	8	32
4-Λιθορριπή προστασίας	23	0	35
5-Λιθορριπή προστασίας	23	0	35
6-Ανάχωμα	22	5	38
7- Φίλτρα	21	0	35
Εδαφικός μανδύας	24	5	18
Ισχυρά αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	24	8	19
Μέτρια αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος	24	14	23
Τσιμεντενέσεις	24	25	26
Νερό ταμειτήρα	9.81	-	-

### 5.3. Ανάλυση ευστάθειας πρανών

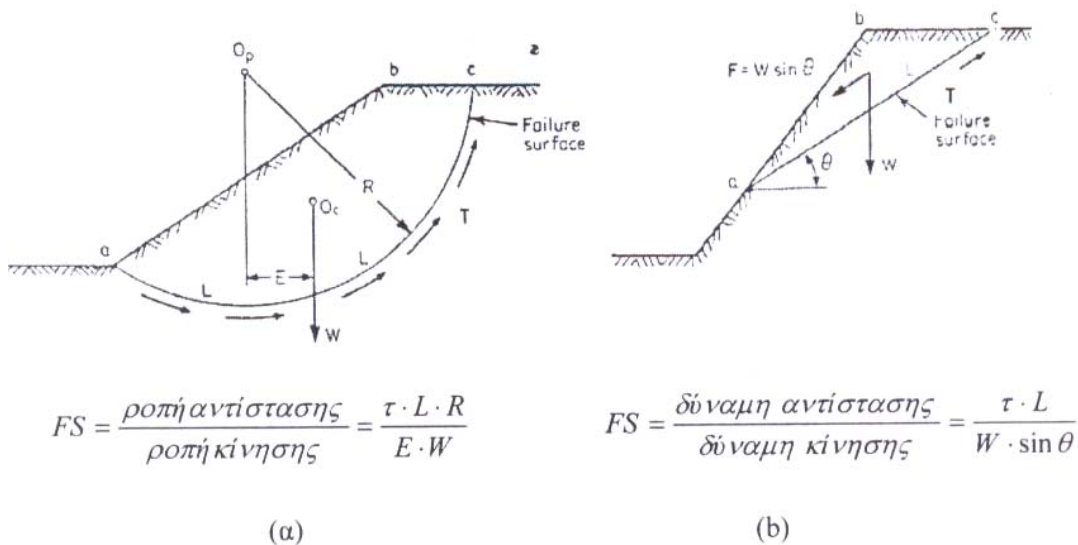
#### 5.3.1. Προσδιορισμός ελάχιστου συντελεστή ευστάθειας

Σε μια αστοχία τύπου ολίσθησης, θεωρείται ότι εκδηλώνεται θραύση ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία μιας (ή περισσότερων επιφανειών) και η μάζα κινείται προς το κατάντη. Η αστοχία του πρανούς προκύπτει από το γεγονός ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην θεωρούμενη επιφάνεια ολίσθησης υπερβαίνουν την διατμητική αντοχή των γεωλικών.

Οι περισσότερες μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας βασίζονται στην αρχή της οριακής ισορροπίας. Συνήθως θεωρείται ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb ( $\tau=c+\sigma_n \tan\phi$ ) ικανοποιείται κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας αστοχίας και η εκτίμηση της ευστάθειας διερευνάται με τον υπολογισμό (α) των δυνάμεων που επενεργούν στην επισφαλή μάζα και (β) της αντίστασης σε διάτμηση που αυτή επιδεικνύει.

Στο **Σχήμα 5.1α** παρουσιάζεται μια κυκλική αστοχία ενός ομογενούς πρανού. Στην κατολισθαίνουσα μάζα ενεργεί το βάρος ( $W$ ) που προκαλεί μια ροπή κίνησης ( $W \times E$ ). Σ' αυτή τη ροπή αντιστέκεται η διατμητική τάση ( $\tau$ ) που ενεργοποιείται κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης ( $L$ ) και αναπτύσσει μια ροπή αντίστασης ( $\tau \times L \times R$ ).

Στην περίπτωση επίπεδης ολίσθησης (**Σχήμα 5.1β**), η διατμητική αντίσταση στο επίπεδο ολίσθησης ( $\tau \times L$ ), αντιστέκεται στην κινητήρια δύναμη που προκύπτει από τη βαρύτητα ( $W \times \sin \theta$ ).



**Σχήμα 5.1: Δυνάμεις που ενεργούν σε κυλινδρικές επιφάνειες αστοχίας (Στειακάκης, 2005 από Hunt, 1986).**

Οι δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις αφορούν απλές προσεγγίσεις του προβλήματος της ευστάθειας. Γενικά, σε όλες τις περιπτώσεις υπολογίζεται ο συντελεστής ευστάθειας ΣΑ (Factor of Safety, FS), ο οποίος ορίζεται ως:

- Ο λόγος των δυνάμεων αντίστασης προς τις δυνάμεις που προκαλούν τη μετακίνηση κατά μήκος μιας πιθανής επιφάνειας θραύσης.
- Ο λόγος των ροπών αντίστασης προς τις ροπές που προκαλούν τη μετακίνηση γύρω από ένα σημείο.

Οι επιτρεπόμενοι Συντελεστές Ασφαλείας στα πρανή των χωμάτων φραγμάτων για διάφορες συνθήκες που διαμορφώνονται κατά της φάσεις λειτουργίας εμφανίζονται στον **Πίνακα 5.2** ("Engineering and design – Stability of earth and rock fill dams" , Dept. of ACE 1-4-70).

**Πίνακας 5.2: Επιτρεπόμενοι συντελεστές ασφαλείας για τα πρανή των χωμάτινων φραγμάτων.**

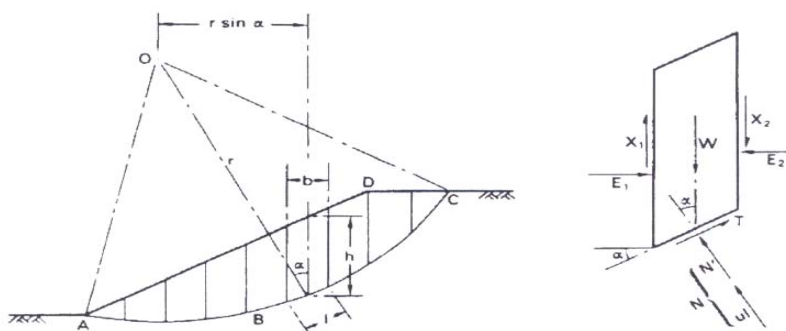
A/A	Συνθήκη ανάλυσης	Ελάχιστος επιτρεπτός συντελεστής
1	Σταθερή ροή διήθησης	1.5
2	Πέρασ κατασκευής	1.3
3	Απότομος καταβιβασμός στάθμης	1.0

### 5.3.2. Μέθοδος των λωρίδων κατά Bishop

Για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών σε ολίσθηση κατά κυκλικό τομέα, θεωρείται μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας, η οποία οριοθετεί τη μάζα του εδάφους που μπορεί να ολισθήσει. Η μάζα αυτή χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες και η ισορροπία κάθε μιας εξετάζεται χωριστά (Σχήμα 5.2). Η ανάλυση των δυνάμεων για κάθε λωρίδα δίνει δύο εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και μια εξίσωση ροπών (Στειακάκης, 2005).

Ο προσδιορισμός της ορθής τάσης ( $N$ ) στην επιφάνεια διάτμησης είναι πρόβλημα αόριστο, επειδή ο αριθμός των εξισώσεων ισορροπίας είναι μικρότερος από τον αριθμό των αγνώστων. Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται βάση παραδοχών (για μείωση των αγνώστων) που αφορούν κυρίως τη διεύθυνση ή/και το μέγεθος των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων. Έτσι, έχουν προκύψει διάφορες μέθοδοι επίλυσης (Fellenius, Bishop) ανάλογα με τις θεωρούμενες παραδοχές.

Η τροποποιημένη (modified) μέθοδος Bishop η οποία χρησιμοποιείται και στην ανάλυση της ευστάθειας των πρανών του υπό μελέτη φράγματος είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος και θεωρεί ότι οι εφαπτομενικές δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων (Σχήμα 5.2) είναι αρκετά μικρές και μπορούν να παραληφθούν.



**Σχήμα 5.2: Η μέθοδος των λωρίδων (Στειακάκης, 2005 από Craig, 1983).**



Οι ορθές τάσεις στην επιφάνεια διάτμησης, προσδιορίζονται θεωρώντας ισορροπία δυνάμεων κατά την κατακόρυφο διεύθυνση. Σε κατάσταση ισορροπίας, η διατμητική τάση στη βάση κάθε λωρίδας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$T = (c' * l + N' * \tan\varphi') / FS_1 \quad [5.1]$$

Αναλύοντας τις δυνάμεις ως προς την κατακόρυφο διεύθυνση, προκύπτει ότι σε κατάσταση ισορροπίας ισχύει:

$$W = N' * \cos\alpha + u * l * \cos\alpha + (c' * l / FS_1) * \sin\alpha + (N' / FS_1) * \tan\varphi' * \sin\alpha \Rightarrow$$

$$N' = [W - (c' * l * \sin\alpha) / FS_1 - u * l * \cos\alpha] / [\cos\alpha + (\tan\varphi' * \sin\alpha) / FS_1] \quad [5.2]$$

Επίσης ένας συντελεστής ασφαλείας (θεωρώντας τις ροπές ως προς το κέντρο του κυκλικού τομέα), υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$FS_2 = \sum (c' + N' * \tan\varphi') * l / \sum (W * \sin\alpha) \quad [5.3]$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 5.2 στην 5.3 προκύπτει ότι:

$$FS_2 = \sum (c' + (W - u * l) * \tan\varphi') / \sum (W * \sin\alpha) * m_\alpha \quad [5.4]$$

$$\text{όπου } m_\alpha = \cos\alpha * l + [( \tan\alpha * \tan\varphi' ) / FS_1]$$

Συντελεστές ασφαλείας εμφανίζονται και στις δύο πλευρές της εξίσωσης. Υποθέτοντας την τιμή του  $FS_1$ , υπολογίζεται ο  $FS_2$  στο άλλο σκέλος της εξίσωσης και η διαδικασία συνεχίζεται με τη μέθοδο προσέγγισης μέχρις ότου  $FS_1 = FS_2$ . Οι λύσεις συγκλίνουν ταχύτατα και δίνουν αποτελέσματα ελάχιστα μικρότερα από αυτά της αρχικής προτεινόμενης μεθόδου Bishop (Στειακάκης, 2005 με πηγή Hunt, 1986).

### 5.3.3 Καθορισμός παραμέτρων ανάλυσης

Αρχικά ήταν απαραίτητος ο καθορισμός των παραμέτρων ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθούν για την μελέτη της ευστάθειας των πρανών του φράγματος.

Οι παράμετροι ορίζονται με τις επιλογές του προγράμματος *KeyIn* → *Analysis Setting*. Στο παράθυρο διαλόγου *Analysis Settings* και στην καρτέλα *Method* επιλέγεται

η μέθοδος επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί (*Fellenius, Bishop, Morgenstern-Price, Spencer κ.α*).

Όπως έχει αναφερθεί, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του υπό μελέτη προβλήματος είναι η τροποποιημένη μέθοδος Bishop, εξετάζοντας πιθανούς κύκλους ολίσθησης, τα κέντρα των οποίων βρίσκονται σε κάρναβο και ακτίνες που ορίζονται από κάρναβο εφαπτόμενων στους κύκλους.

Λόγω της σπουδαιότητας της πίεσης του νερού των πόρων σε μία μελέτη ευστάθειας το πρόγραμμα ορίζει την πίεση πόρων με διάφορους τρόπους, μερικοί εκ των οποίων είναι ο ορισμός της πίεσης πόρων με  $r_u$ , σε διακριτά σημεία με τη βοήθεια ενός καννάβου, με ισοκαμπύλες πίεσης που εισάγονται από τον ίδιο τον χρήστη κ.α.

Μια άλλη εφαρμογή, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση του προβλήματός μας και ίσως η προσεγγιστικά καλύτερη είναι η χρησιμοποίηση των πιέσεων πόρων που εκτιμήθηκαν από το **SEEP/W**.

#### 5.4. Επίλυση και αποτελέσματα μοντέλων

Σε κατάσταση σταθερής ροής σχεδιάσθηκαν και επιλύθηκαν δύο μοντέλα στο ανάντη και κατάντη πρανές του φράγματος, όπως αυτά περιγράφονται στον **Πίνακα 5.3**.

Στην επίλυση συμπεριλήφθηκε επίσης η δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια του ανάντη πρανούς από τη μάζα νερού του ταμιευτήρα.

**Πίνακας 5.3: Σχεδιασμός μοντέλων.**

Μοντέλο	Περιγραφή συνθηκών	Περιοχή διερεύνησης της ευστάθειας	Ανώτατη στάθμη ύδατος (απόλυτο υψόμετρο, m)
A	Κατάσταση σταθερής ροής	Ανάντη Πρανές	+117.5
		Κατάντη Πρανές	+117.5
B	Κατάσταση σταθερής ροής	Ανάντη Πρανές	+122.1
		Κατάντη Πρανές	+122.1

Από την επίλυση του μοντέλου A προέκυψαν τα **Σχήματα 5.3** και **5.4**, στα οποία παρουσιάζονται οι συντελεστές ευστάθειας στο ανάντη και κατάντη πρανές του φράγματος για απόλυτη στάθμη ύδατος στην λεκάνη κατάκλυσης (ταμιευτήρα) ίση με

+117.5 m. Στα ίδια σχήματα διακρίνονται τόσο οι κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης με κίτρινο χρώμα που αντιστοιχούν στους συντελεστές ευστάθειας όσο και οι κατακόρυφες λωρίδες, βάση των οποίων εκτιμάται η ευστάθεια.

Στα **Σχήματα 5.5** και **5.6** αντίστοιχα παρουσιάζονται τα γραφικά αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου B, σε μορφή αντίστοιχη των Σχημάτων 5.3 και 5.4.

Στον **Πίνακα 5.4** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του συντελεστή ευστάθειας που υπολογίσθηκαν στα υπό μελέτη μοντέλα.

**Πίνακας 5.4: Εκτιμώμενοι συντελεστές ευστάθειας.**

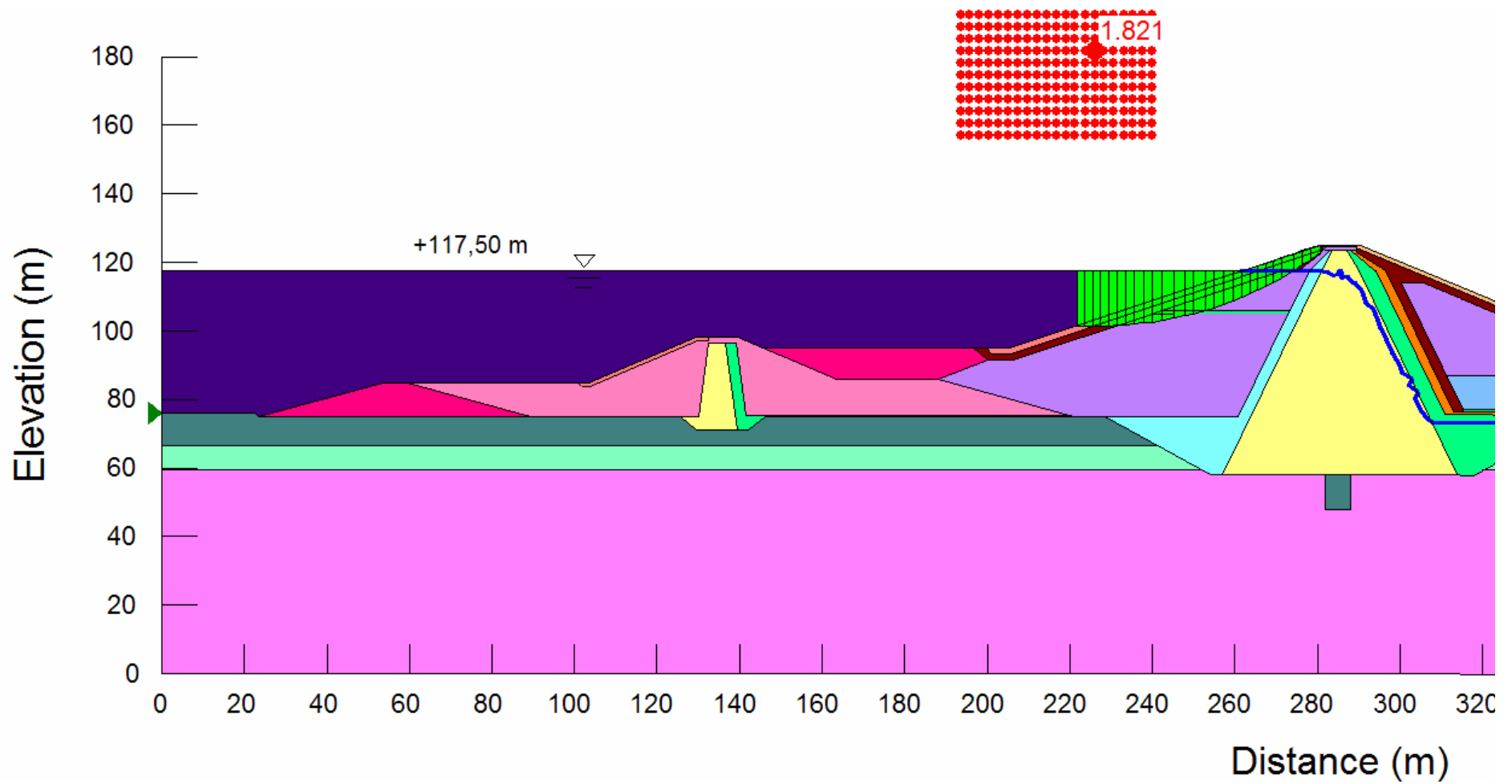
Μοντέλο	Περιοχή	Συντελεστής ευστάθειας
A	Ανάντη Πρανές	1.82
	Κατάντη Πρανές	1.54
B	Ανάντη Πρανές	1.95
	Κατάντη Πρανές	1.53

Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές αφορούν στις βαθύτερες επιφάνειες ολίσθησης που επιλέχθηκαν και οδηγούν σε αστοχία.

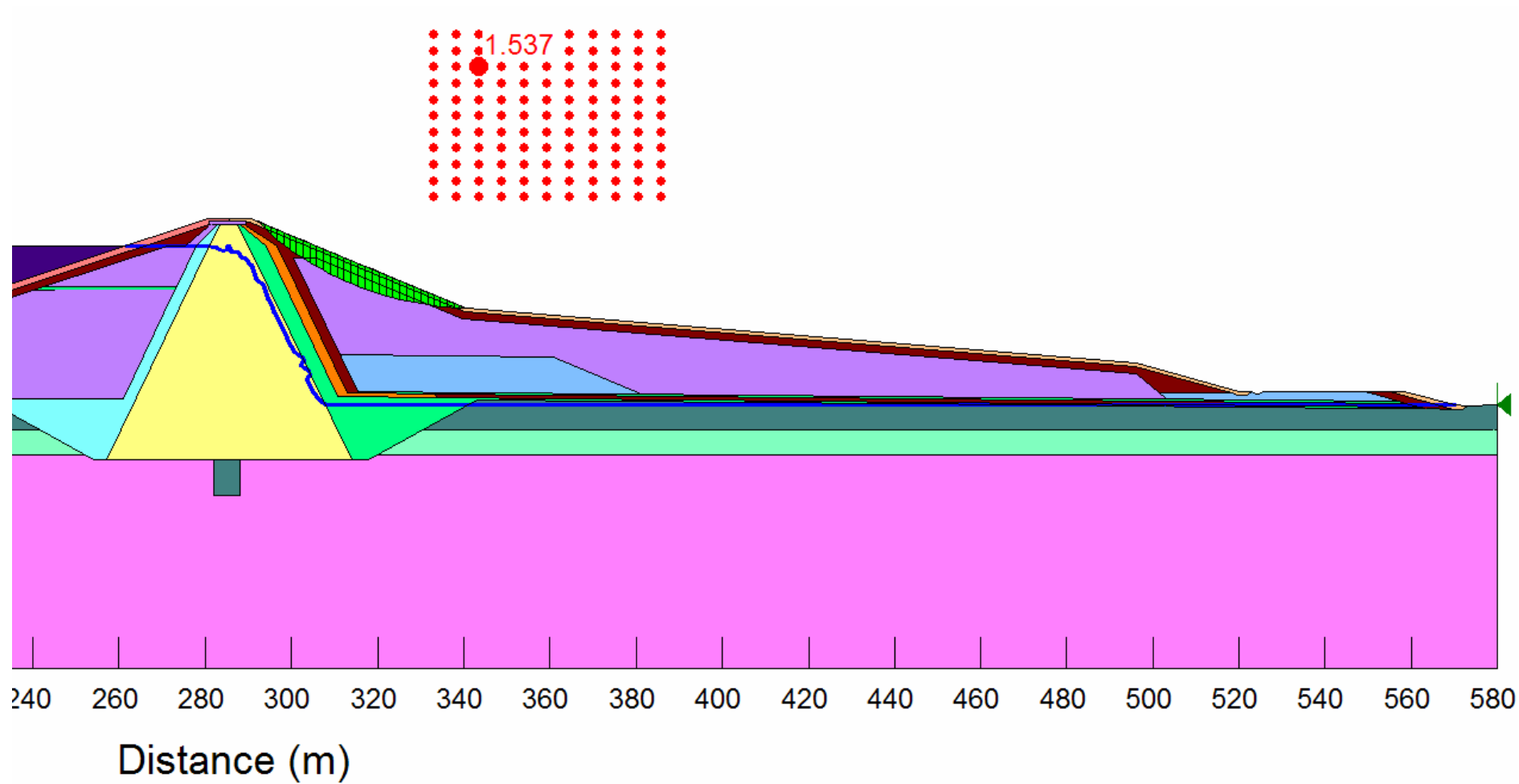
Από την ανάλυση που προηγήθηκε βρέθηκαν ακόμα μικρότεροι συντελεστές ασφαλείας, οι οποίοι όμως αντιστοιχούν σε ρηχές επιφάνειες ολίσθησης, μη αντιπροσωπευτικές της συνολικής έκτασης του πρανούς (Πίνακας 5.5).

**Πίνακας 5.5: Εκτιμώμενοι ελάχιστοι συντελεστές ευστάθειας.**

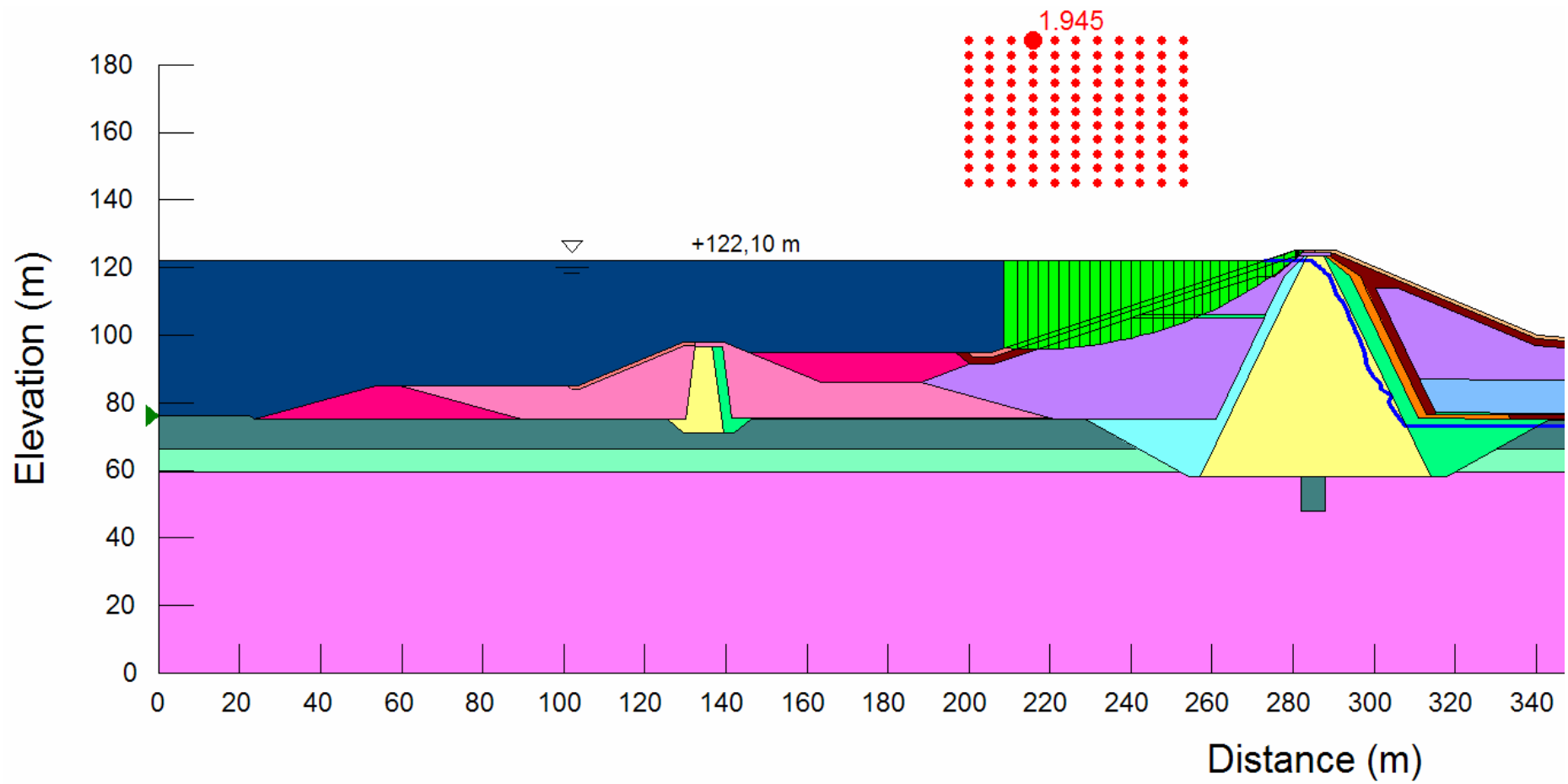
Μοντέλο	Περιοχή	Συντελεστής ευστάθειας
Γ	Ανάντη Πρανές	1.72
	Κατάντη Πρανές	1.45
Δ	Ανάντη Πρανές	1.55
	Κατάντη Πρανές	1.48



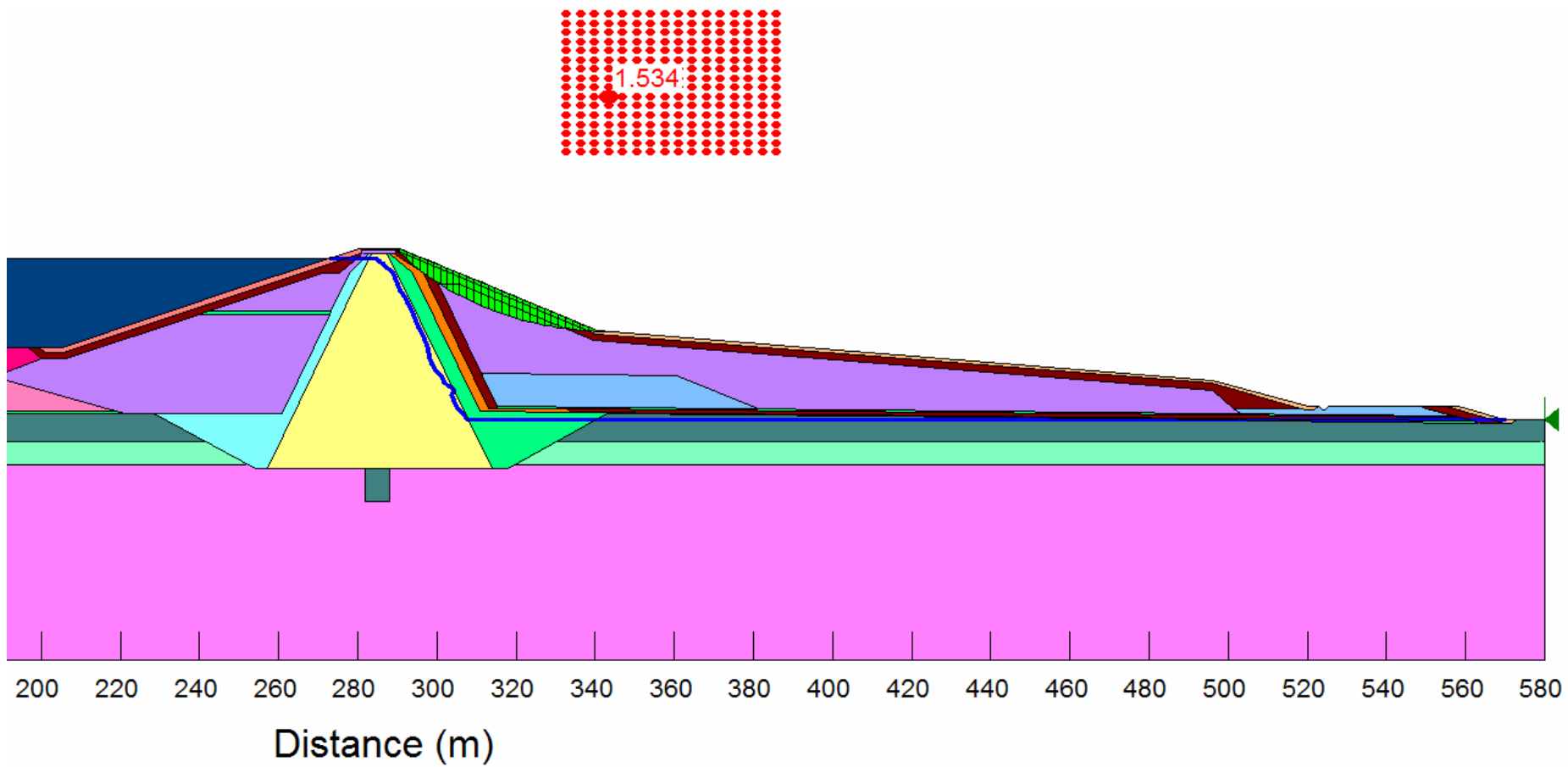
Σχήμα 5.3: Συντελεστής ευστάθειας ανάντη πρανούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη λειτουργίας 117.5 m –Μοντέλο Α.



Σχήμα 5.4: Συντελεστής ευστάθειας κατάντη πρανούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη λειτουργίας 117.5 m –Μοντέλο Α.



Σχήμα 5.5: Συντελεστής ευστάθειας ανάντη πρανούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη πλημμύρας 122.1 m – Μοντέλο Β.



Σχήμα 5.6: Συντελεστής ευστάθειας κατάντη πρηνούς και επιφάνεια ολίσθησης για στάθμη πλημμύρας 122.1 m – Μοντέλο Β.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και τα αποτελέσματα των δοκιμών εισπίεσης Lugeon:

- Μέχρι βάθος 5 m κυριαρχεί εδαφικός μανδύας με μεσαίες τιμές διαπερατότητας ( $10^{-5}$  έως  $10^{-6}$  m/sec). Από τα 5 m έως τα 16 m βάθος συναντάται ισχυρά αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος με μικρές τιμές διαπερατότητας ( $10^{-7}$  m/sec) ενώ κάτω από το βάθος των 16 m και μέχρι το πέρας των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων απαντάται ένας μέτρια αποσαθρωμένος αργιλικός σχιστόλιθος, ο οποίος εμφανίζει πολύ μικρές τιμές διαπερατότητας ( $10^{-8}$  έως  $10^{-9}$  m/sec).

Από τις επιλύσεις και τα αποτελέσματα των μοντέλων, όπου εξετάστηκε η κίνηση του νερού μέσα από το σώμα του σχεδιαζόμενου φράγματος σε συνθήκες σταθερής κατάστασης ροής με το λογισμικό **SEEP/W** συνάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η επιλογή της προσαρμογής πρότυπων διαγραμμάτων υδραυλικής αγωγιμότητας και αποθηκευμένου όγκου νερού σε σχέση με την αρνητική πίεση πόρων (Σχήματα 4.3 έως και 4.17) είναι αναγκαία για την προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού. Η προσέγγιση αυτή γίνεται λόγω έλλειψης δεδομένων, αλλά θεωρείται επαρκής για την πραγματοποίηση των στόχων της παρούσας εργασίας.
- Μεγαλύτερη ακρίβεια στα παραπάνω διαγράμματα (μετρήσεις πεδίου - εργαστηριακές μετρήσεις) θα έδινε περισσότερο αξιόπιστα από τις επιλύσεις αποτελέσματα. Όπως προέκυψε από τις διάφορες επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα μοντέλα σταθερής ροής, μικρές διαφοροποιήσεις των συγκεκριμένων διαγραμμάτων επιφέρουν μικρές μεταβολές στα ποσοτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- Η πιεζομετρία και τα ανύσματα ροής των μοντέλων δείχνουν σωστή λειτουργία του σχεδιαζόμενου φράγματος. Χαρακτηριστικά είναι τα ανύσματα ροής (Σχήματα 4.27 και 4.30) που υποδεικνύουν σχεδόν αποκλειστική κίνηση του νερού στα φίλτρα αποστράγγισης, όπως είναι και το επιθυμητό.



- Οι απώλειες ροής (Πίνακας 4.4) παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα στο κεντρικό τμήμα του φράγματος (από  $1.28 \times 10^{-8}$  έως  $1.52 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/sec) γεγονός που υποδηλώνει τις καλές υδραυλικές ιδιότητες του πυρήνα.

Από τις επιλύσεις και τα αποτελέσματα της ευστάθειας πρανών των μοντέλων που αναλύθηκαν με το λογισμικό SLOPE/W συνάγονται τα εξής:

- Ανάντη πρανές

Ο ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας σε κατάσταση σταθερή ροής όταν το νερό του ταμιευτήρα φτάνει στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας (+117.50 m) είναι ίσος με  $\Sigma A=1.72$ . Με το νερό στην ανώτατη στάθμη πλημμύρας (+122.10 m) ο ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας είναι ίσος με  $\Sigma A=1.55$ . Αυτοί οι ελάχιστοι συντελεστές ευστάθειας αφορούν μικρούς κύκλους επιφανειών ολίσθησης οι οποίοι πρακτικά δεν επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών, ενώ οι συντελεστές ευστάθειας για βαθύτερους κύκλους οι οποίοι οδηγούν σε αστοχία είναι  $\Sigma A=1.82$  και  $\Sigma A=1.95$  αντίστοιχα.

- Κατάντη πρανές

Ο ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας σε κατάσταση σταθερής ροής όταν το νερό της λεκάνης κατάκλυσης βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας (+117.50 m) είναι ίσος με  $\Sigma A=1.45$  ενώ με το νερό της λεκάνης κατάκλυσης στην ανώτατη στάθμη πλημμύρας (+ 122.10) είναι ίσος με  $\Sigma A=1.48$ . Αυτοί οι ελάχιστοι συντελεστές ευστάθειας αφορούν μικρούς κύκλους επιφανειών ολίσθησης, ενώ οι συντελεστές ευστάθειας για βαθύτερους κύκλους οι οποίοι οδηγούν σε αστοχία είναι  $\Sigma A=1.54$  και  $\Sigma A=1.53$  αντίστοιχα.

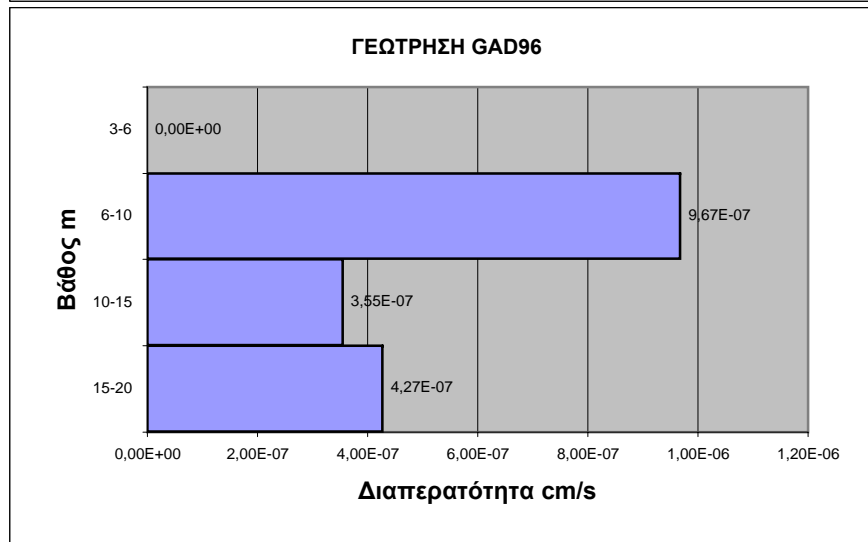
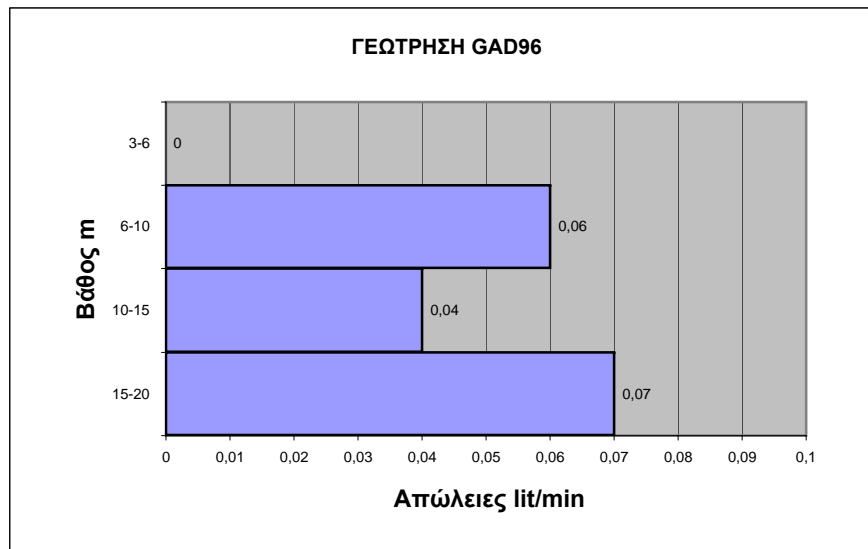
- Όλοι οι συντελεστές ασφαλείας για κατάσταση σταθερής ροής στο ανάντη, αλλά και στο κατάντη πρανές του σώματος του φράγματος κρίνονται ικανοποιητικοί, δεδομένου ότι τα μεγέθη τους εκτιμήθηκαν μέσα σε επιτρεπτά όρια (βλέπε Πίνακα 5.2).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

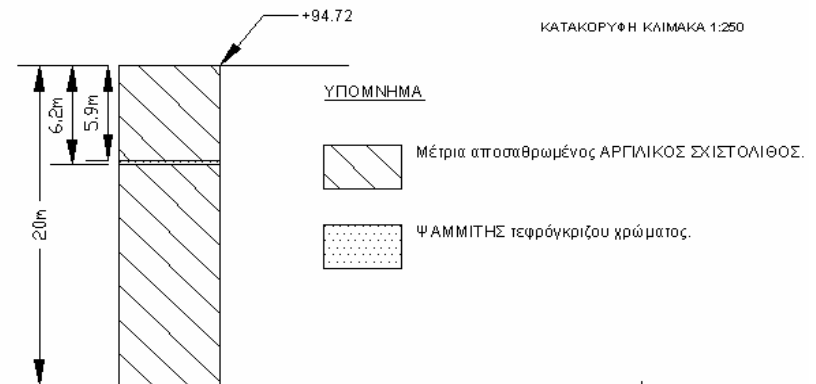
- ΑΕΓΕΚ, φωτογραφικό υλικό.
- Δημόπουλος, Γ. 1983. Εφαρμοσμένη Γεωλογία-Τόμος ΙΙ. Εκδ. Α.Π.Θ.
- Κούκης, Γ. και Σαμπατακάκης, Ν. 2000. Τεχνική Γεωλογία. Εκδ. ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ
- Μαρίνος, Π. 1991. Εργαστηριακές Ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας. Εκδ. Ε.Μ.Π.
- Μαρίνος, Π. 1991. Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας. Εκδ. Ε.Μ.Π.
- Μαρίνος Π. et al, 2004. Αργιλικοί σχιστόλιθοι του φλύσχη. Συμπεριφορά τους στη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής φράγματος Γαδουρά Ρόδου. 10ο Διεθνές Συνέδριο Γεωλογίας.
- Οριστική Μελέτη Φράγματος Γαδουρά, 2000. Τεχνική Έκθεση (Τεύχος 2).
- Οριστική Μελέτη Φράγματος Γαδουρά, 2000. Γεωλογική Έκθεση (Τεύχος 3).
- Στειακάκης, Εμμ., (2005) Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας - Εδαφομηχανικής. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Burges, P. 1983. In situ Permeability testing in soil and rock. In situ testing for geotechnical investigations. Εκδ. A.A BALKEMA, ROTTERDAM.
- Driscoll, F.G. (1986). Groundwater and Wells. 2nd Edition, Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul – Minnesota, USA.
- GEO-SLOPE International Ltd (2004). GeoStudio Tutorials: Includes Student Edition Lessons. 1st Edition, Calgary – Alberta, Canada.
- Krahn, John (2004). Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology. 1st Edition, GEO-SLOPE International Ltd, Calgary – Alberta, Canada.
- Mutti, E., Orombelli, G., Pozzi, R., 1960-1965. Geological map of Rhodes island (Greece), 3 φύλλα, University of Milan, Institute of geology, Italy.
- Todd, D.K. (1980). Groundwater Hydrology. 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 96



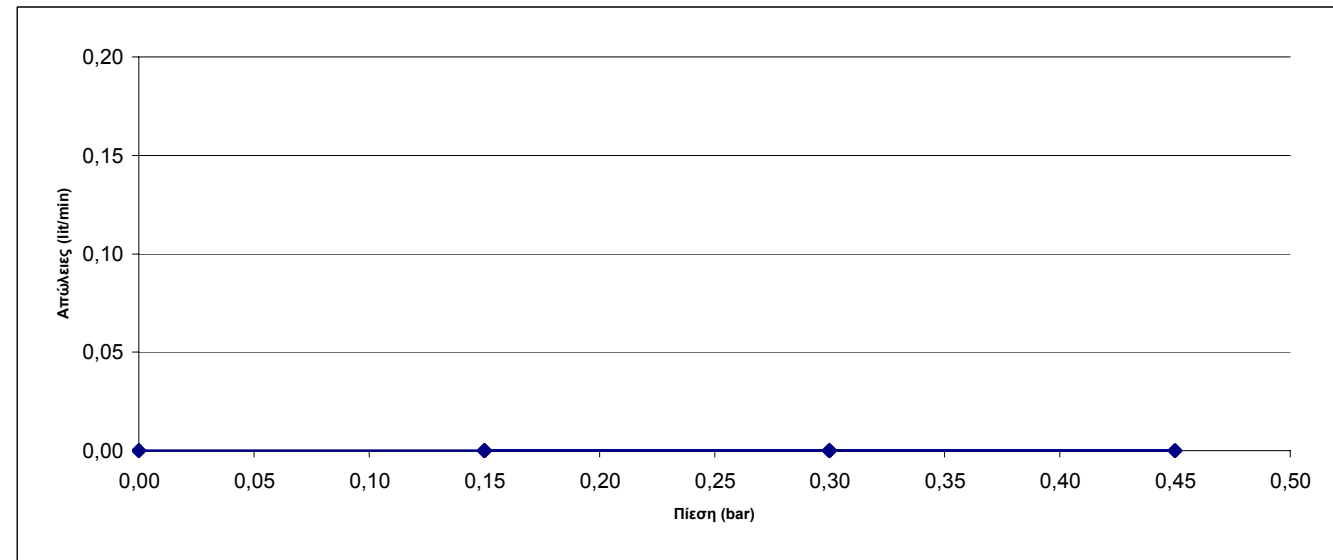
ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ GAD\_96



**GAD96**

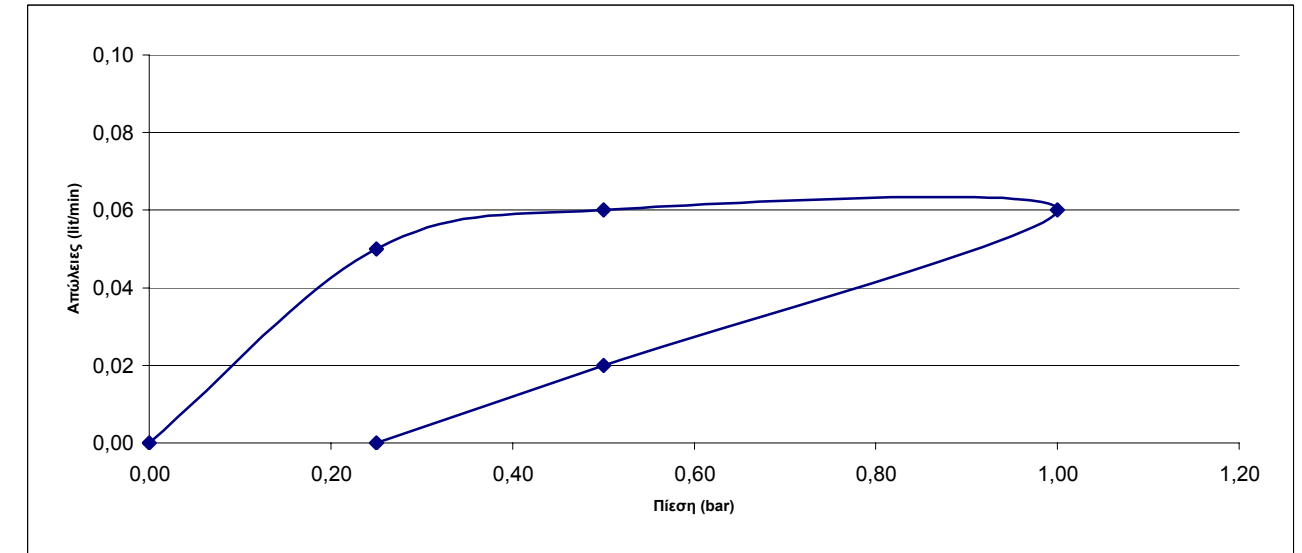
**Βάθος Δοκιμής 3~6 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,15	0,00
0,30	0,00
0,45	0,00
0,30	0,00
0,15	0,00



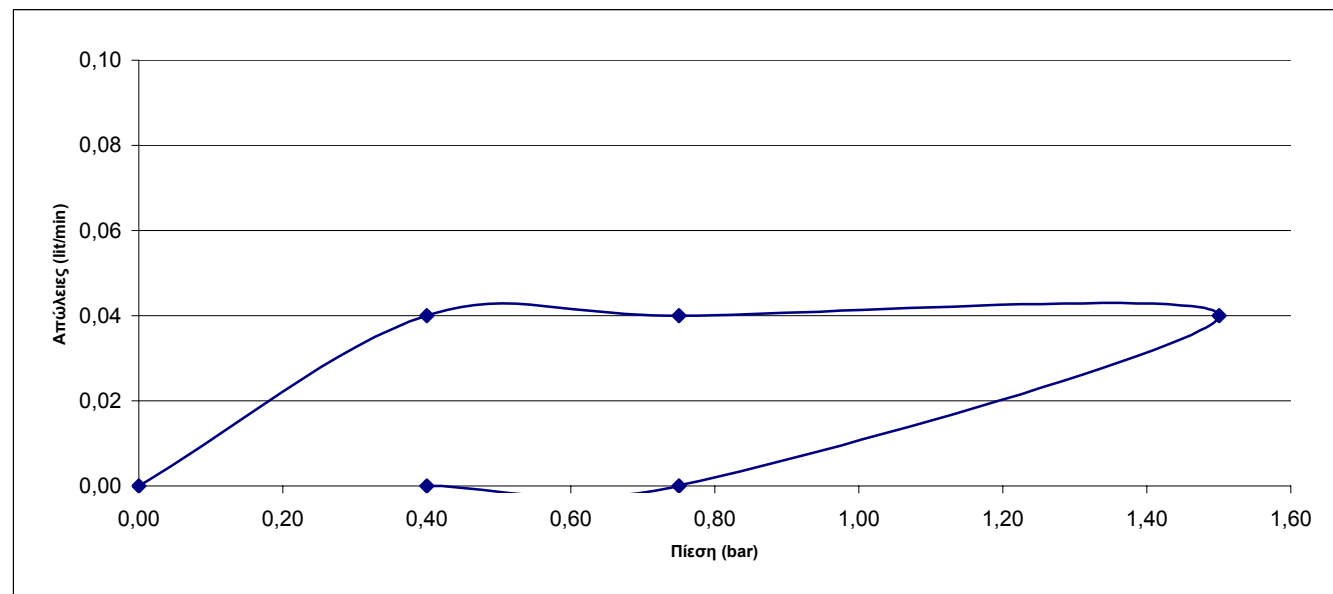
**Βάθος Δοκιμής 6~10 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,05
0,50	0,06
1,00	0,06
0,50	0,02
0,25	0,00



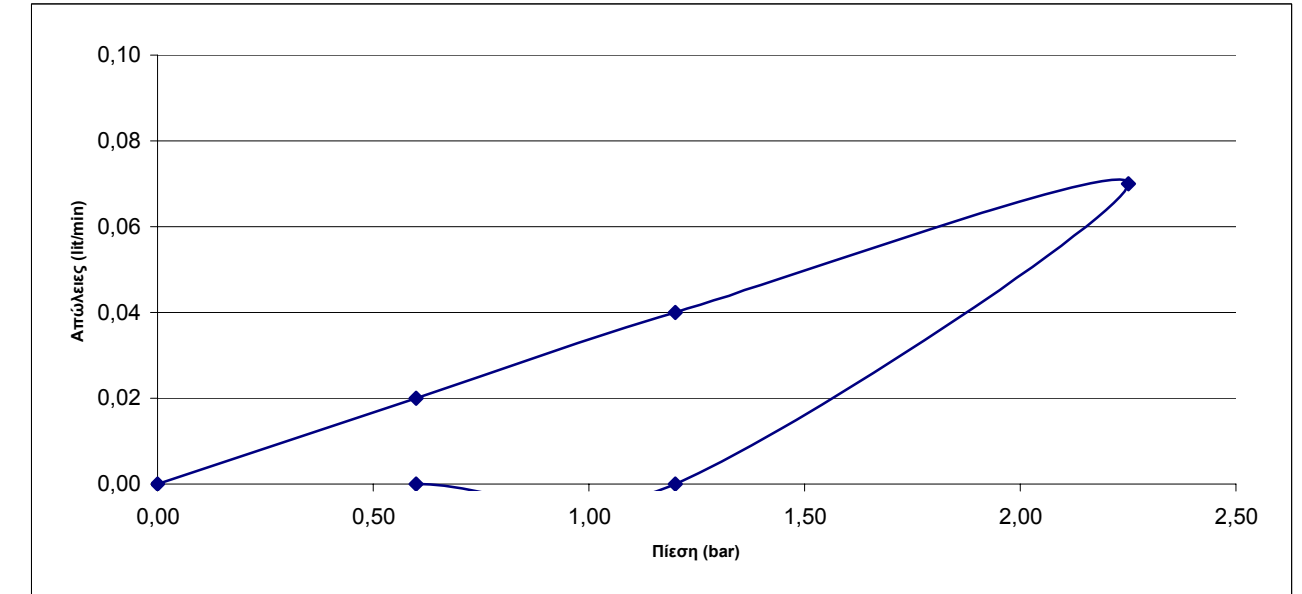
**Βάθος Δοκιμής 10~15 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,04
0,75	0,04
1,50	0,04
0,75	0,00
0,40	0,00

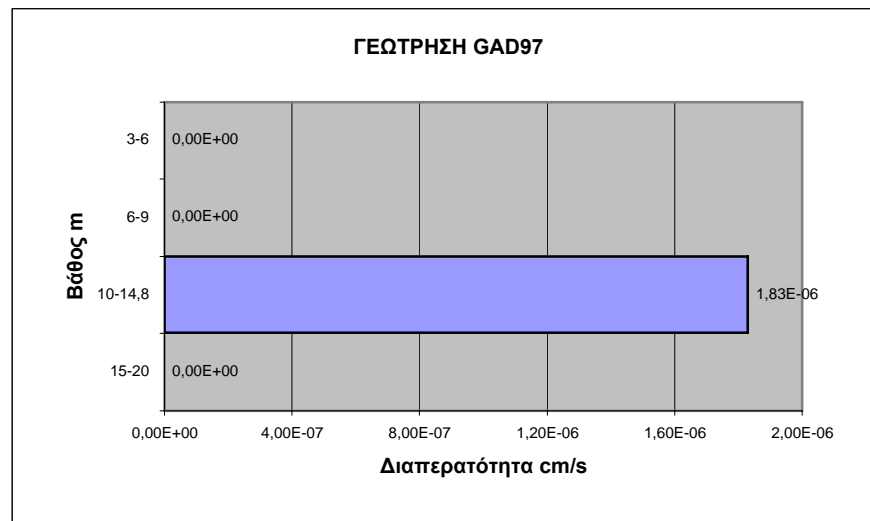
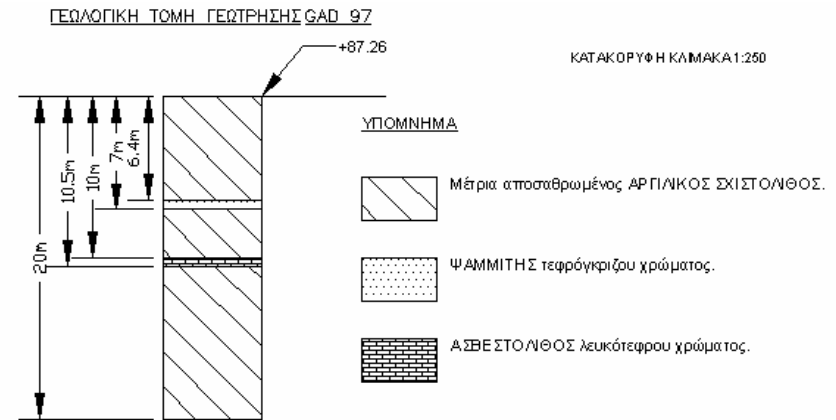
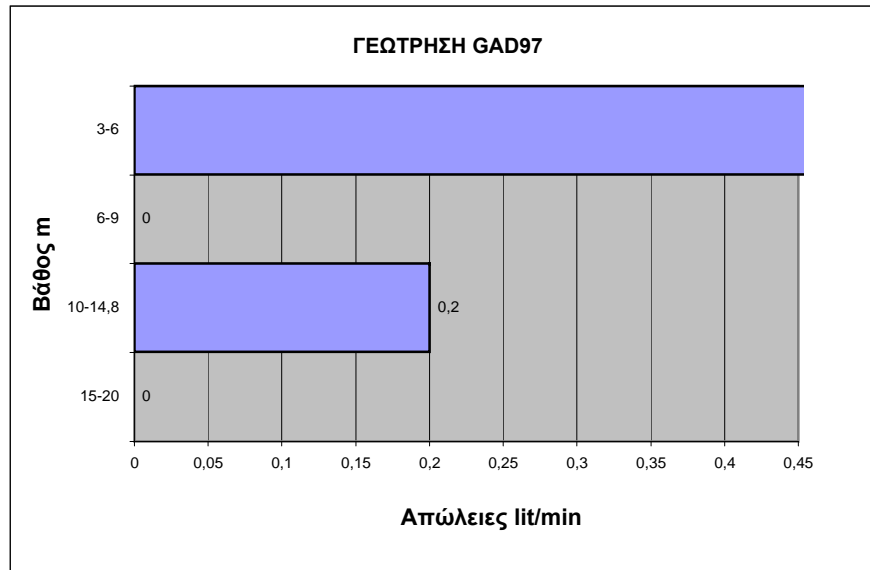


**Βάθος Δοκιμής 15~20 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,02
1,20	0,04
2,25	0,07
1,20	0,00
0,60	0,00



# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 97

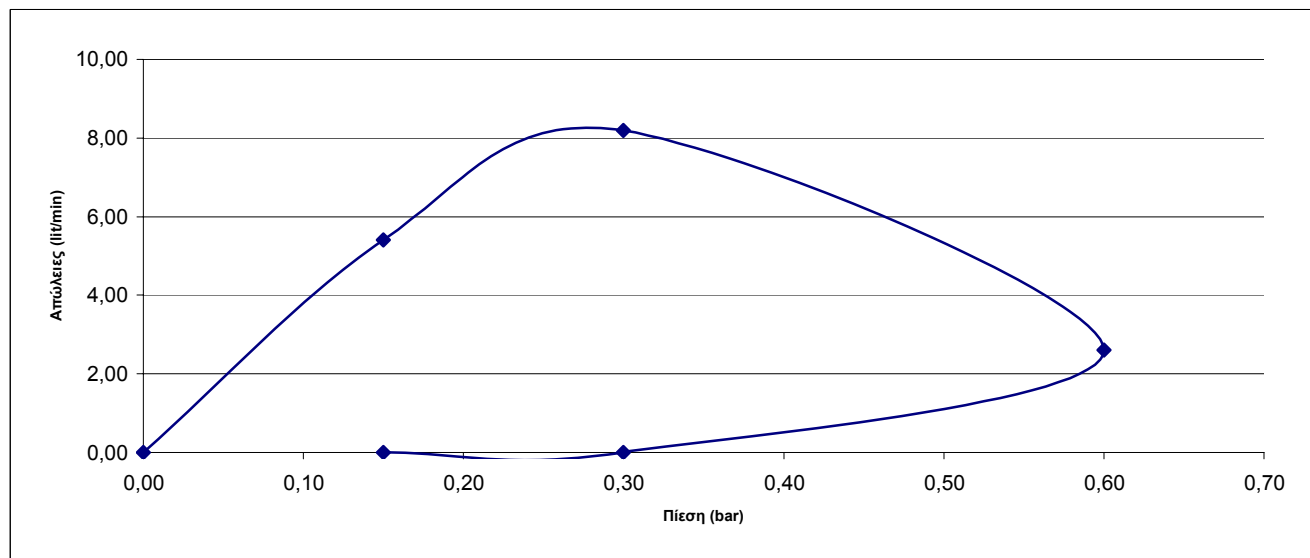




GAD97

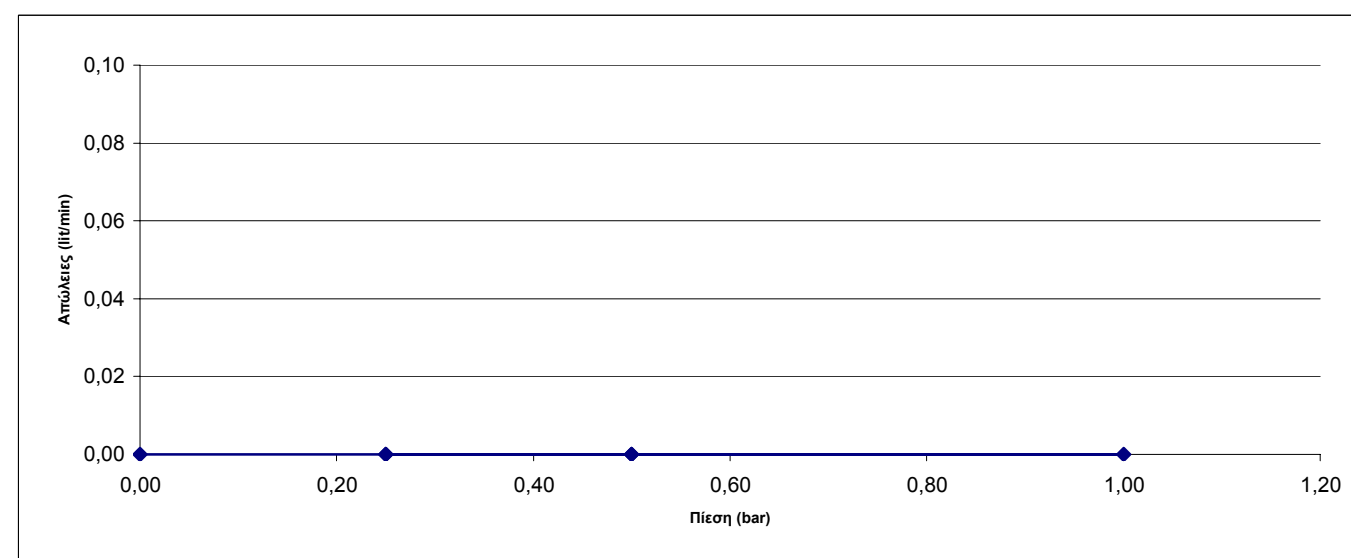
Βάθος Δοκιμής 3~6 m

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,15	5,40
0,30	8,20
0,60	2,60
0,30	0,00
0,15	0,00



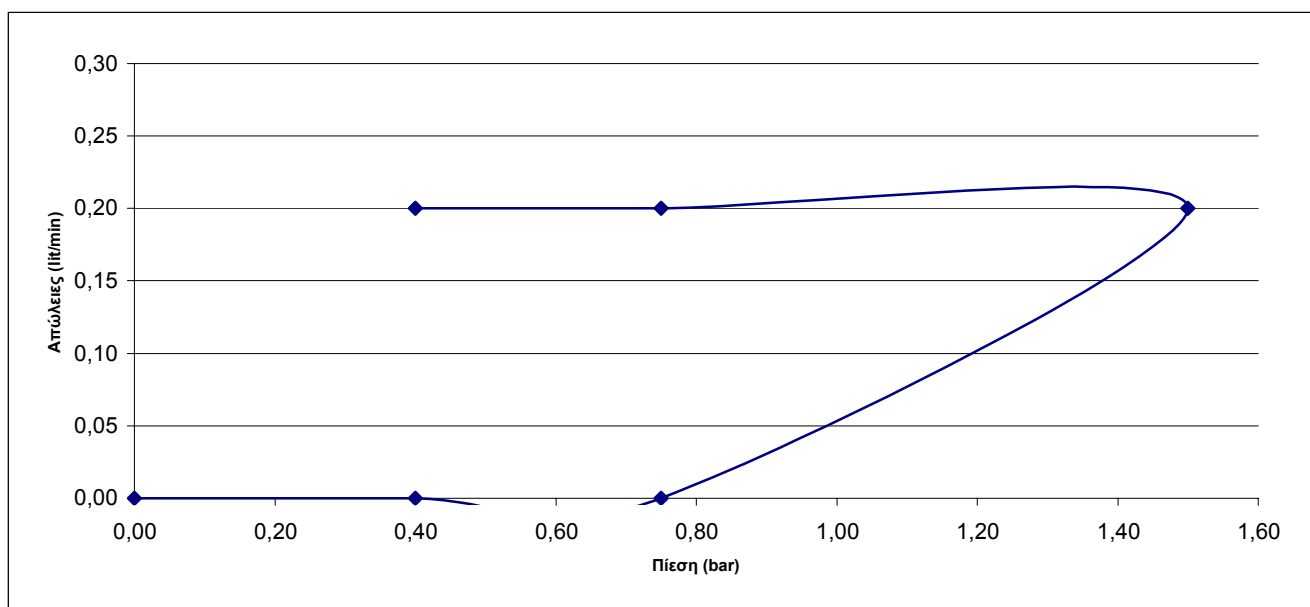
Βάθος Δοκιμής 6~10 m

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,00
0,50	0,00
1,00	0,00
0,50	0,00
0,25	0,00



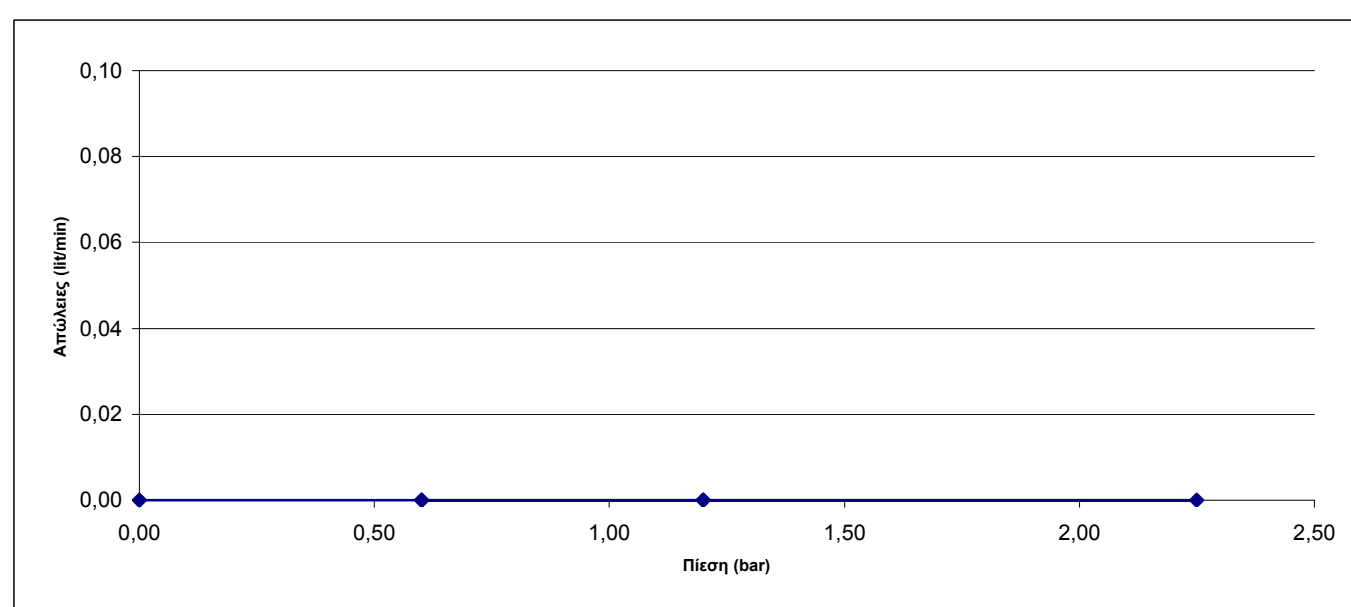
Βάθος Δοκιμής 10~15 m

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,00
0,75	0,00
1,50	0,20
0,75	0,20
0,40	0,20

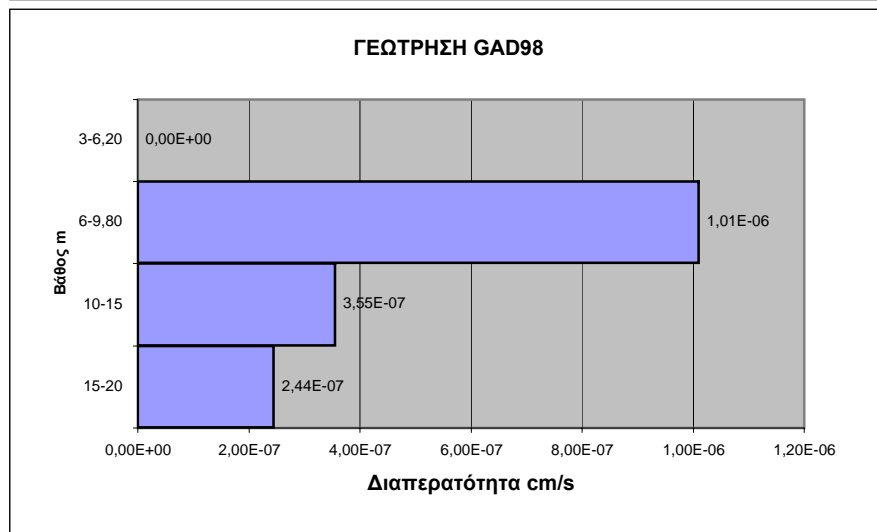
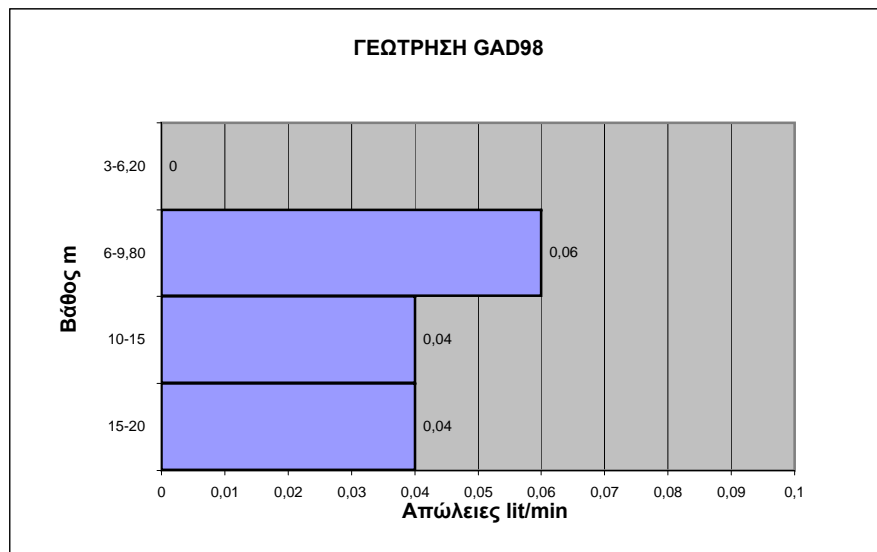


Βάθος Δοκιμής 15~20 m

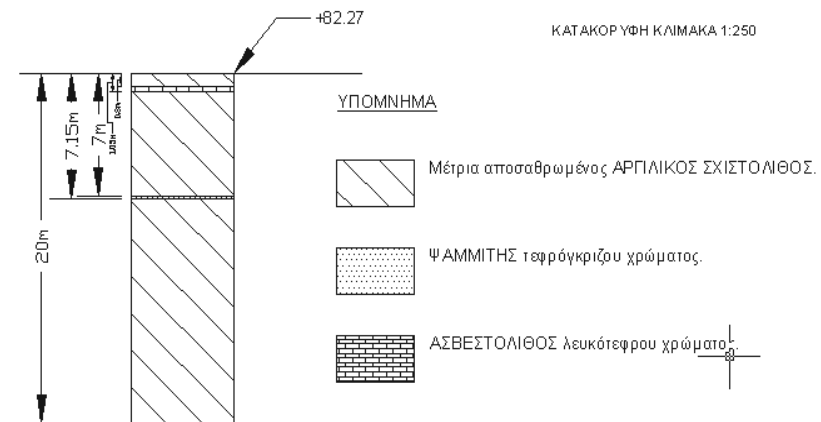
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,00
1,20	0,00
2,25	0,00
1,20	0,00
0,60	0,00



# ΓΕΩΤΡΗΣΗ 98

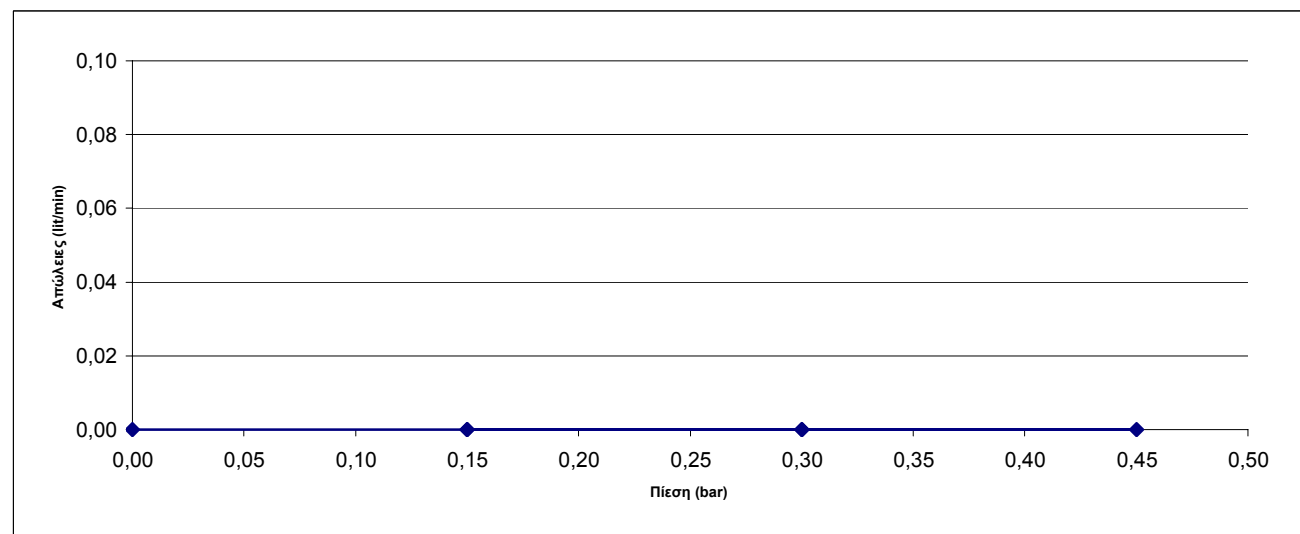


ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ GAD 98

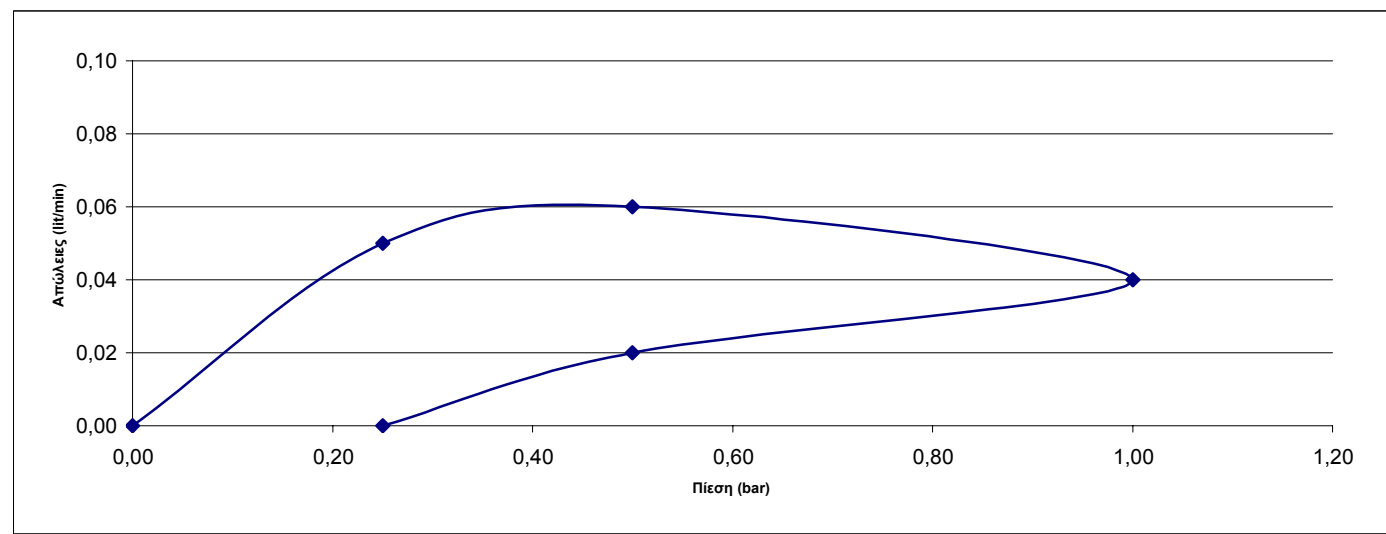


**GAD98****Βάθος Δοκιμής 3~6 m**

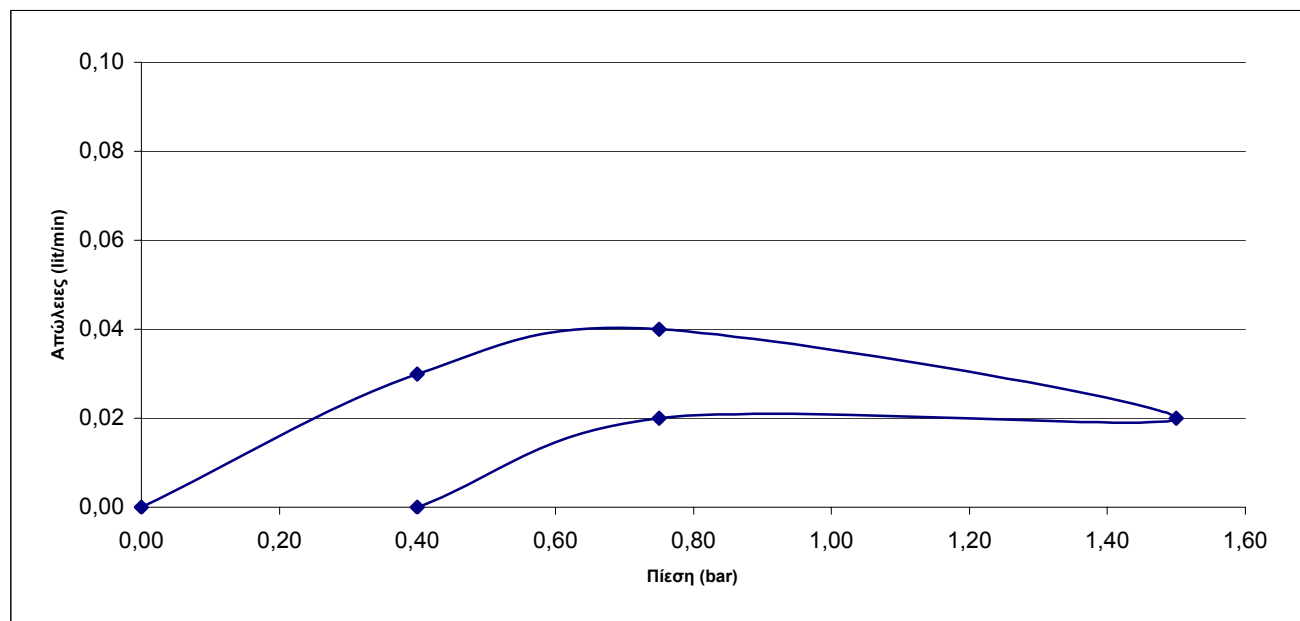
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,15	0,00
0,30	0,00
0,45	0,00
0,30	0,00
0,15	0,00

**Βάθος Δοκιμής 6~10 m**

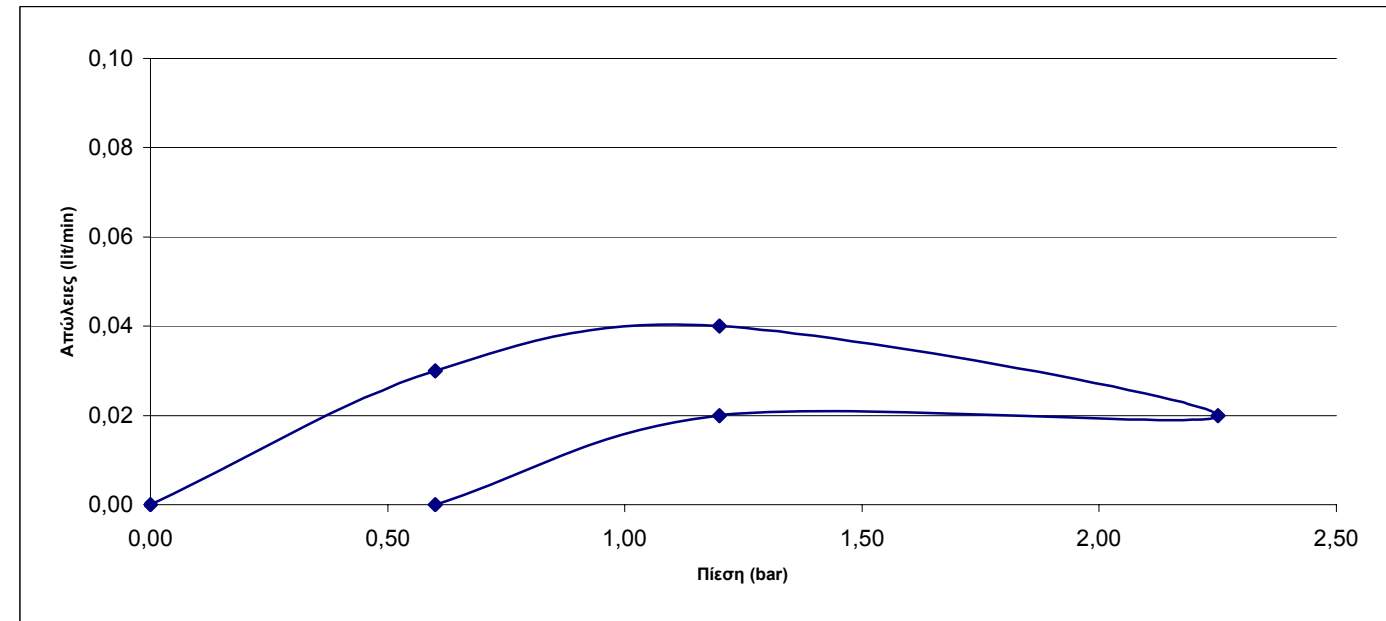
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,05
0,50	0,06
1,00	0,04
0,50	0,02
0,25	0,00

**Βάθος Δοκιμής 10~15 m**

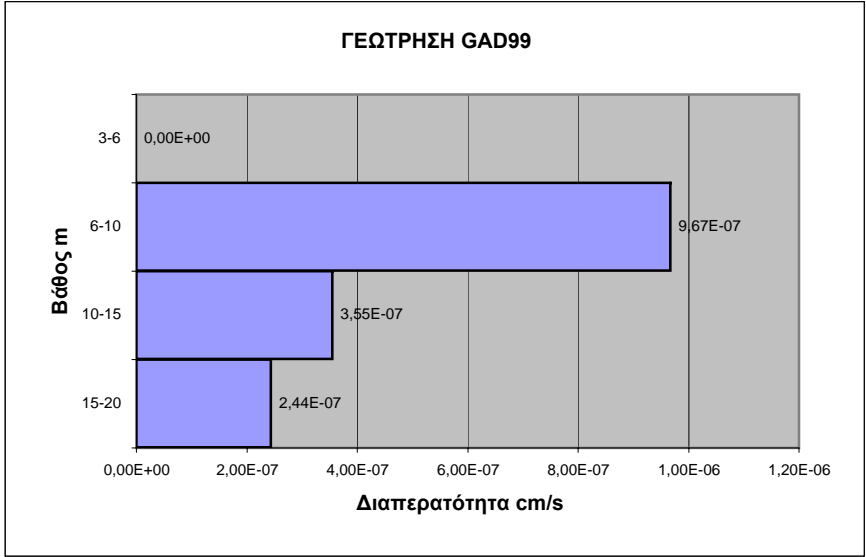
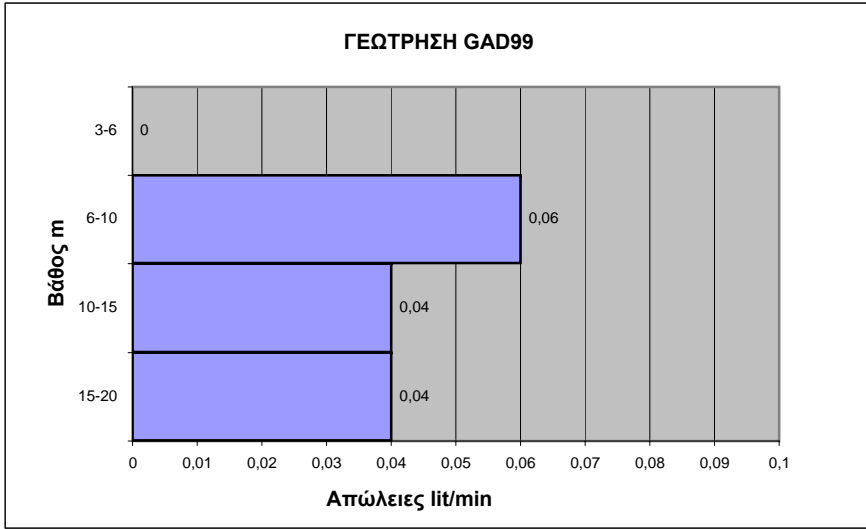
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,03
0,75	0,04
1,50	0,02
0,75	0,02
0,40	0,00

**Βάθος Δοκιμής 15~20 m**

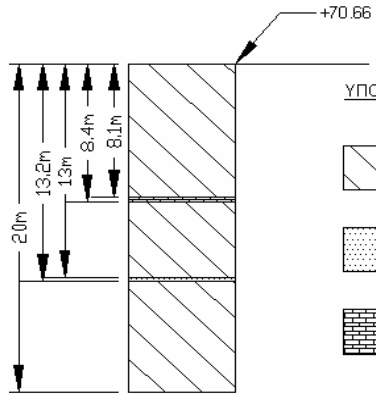
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,03
1,20	0,04
2,25	0,02
1,20	0,02
0,60	0,00



# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 99






ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ GAD\_99



ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΛΙΜΑΚΑ 1:250

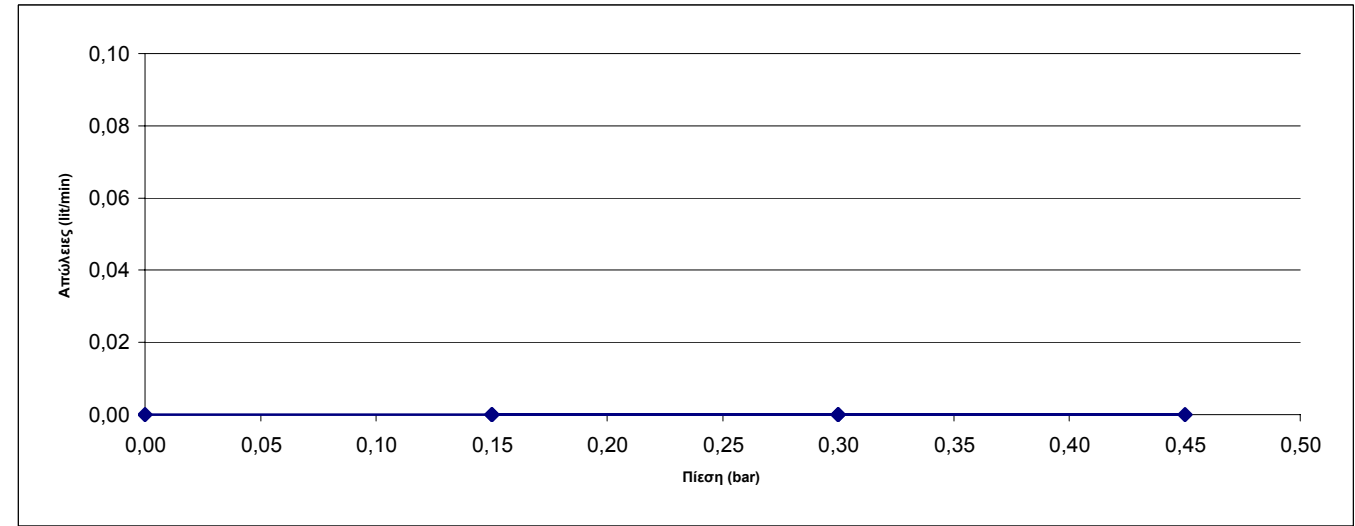
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

-  Μέτρια αποσαθρωμένος ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ.
-  ΨΑΜΜΙΤΗΣ τεφρόγκριζου χρώματος.
-  ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ λευκότεφρου χρώματος.

**GAD99**

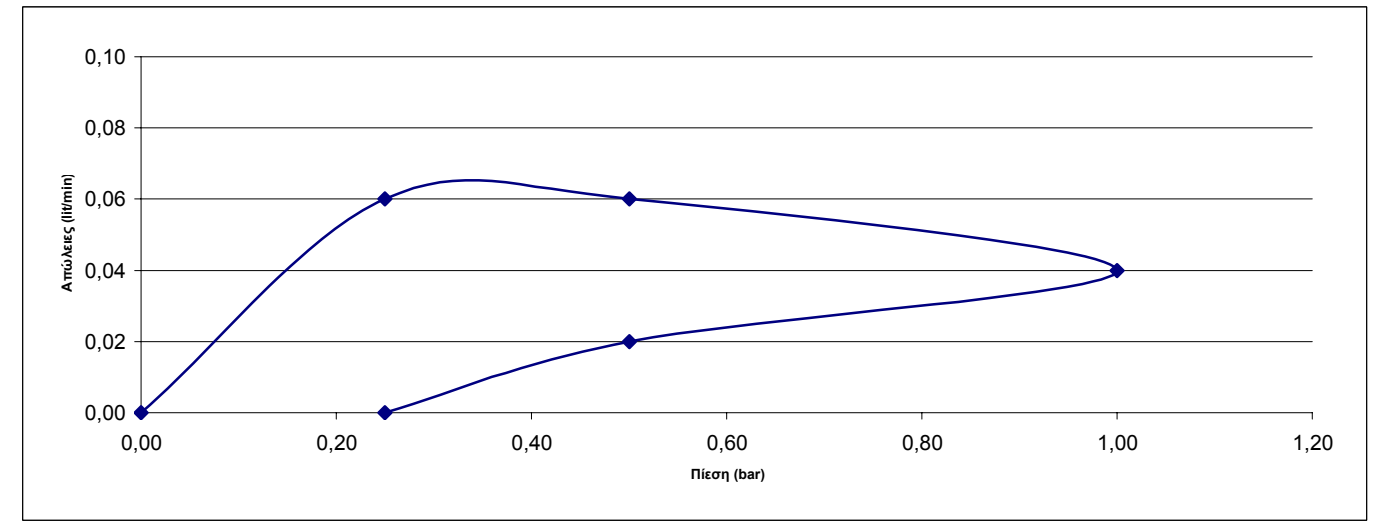
**Βάθος Δοκιμής 3~6 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,15	0,00
0,30	0,00
0,45	0,00
0,30	0,00
0,15	0,00



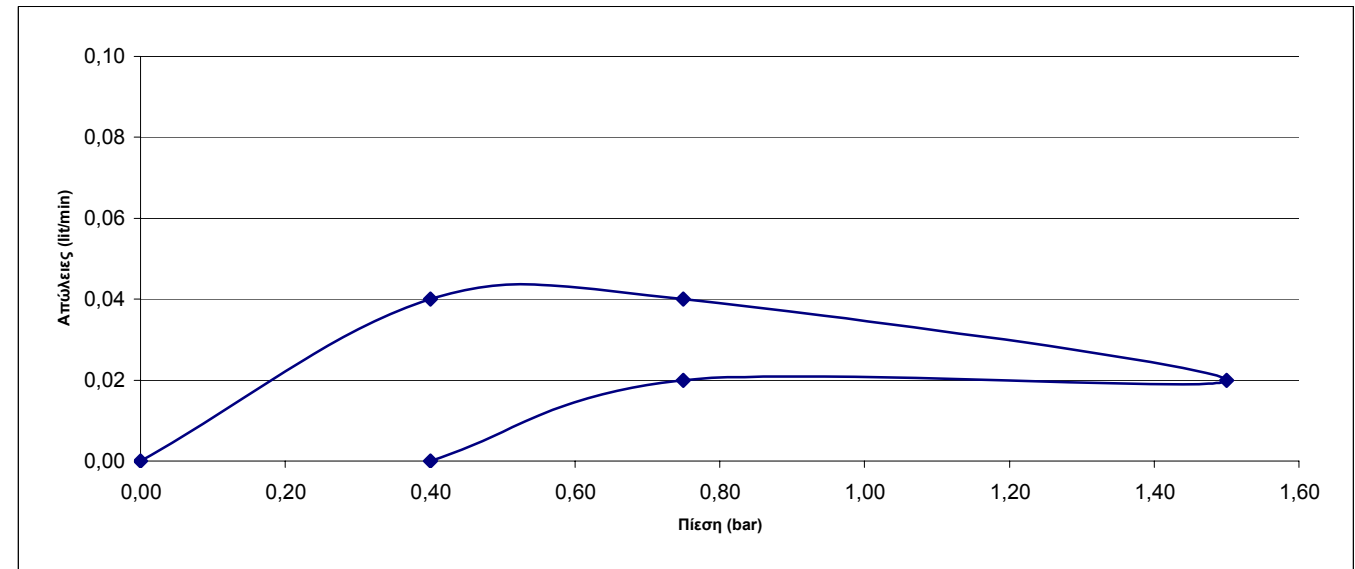
**Βάθος Δοκιμής 6~10 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,06
0,50	0,06
1,00	0,04
0,50	0,02
0,25	0,00



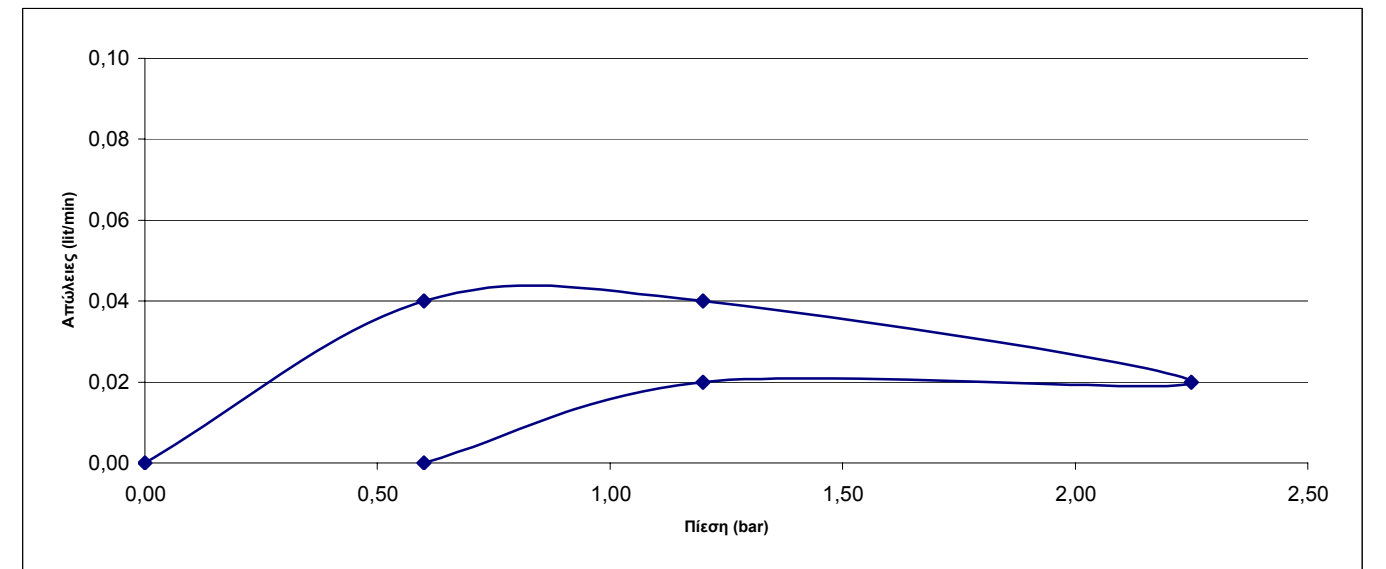
**Βάθος Δοκιμής 10~15 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,04
0,75	0,04
1,50	0,02
0,75	0,02
0,40	0,00



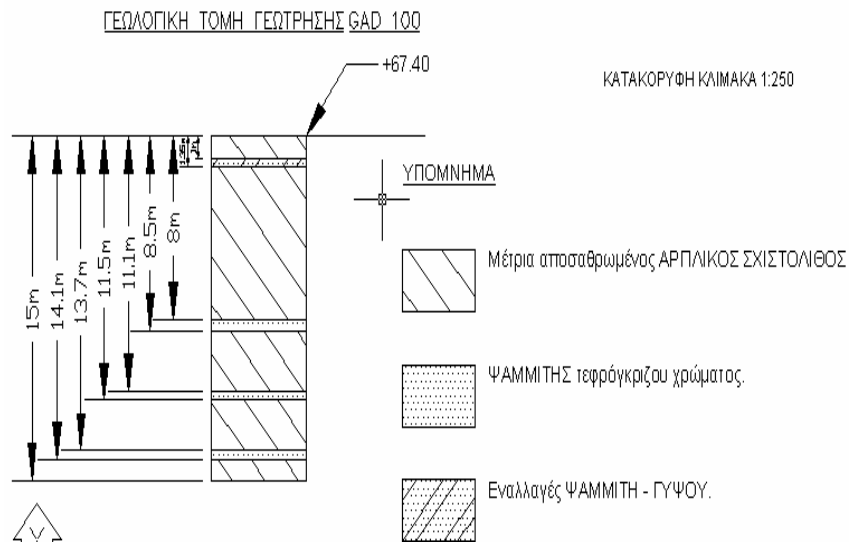
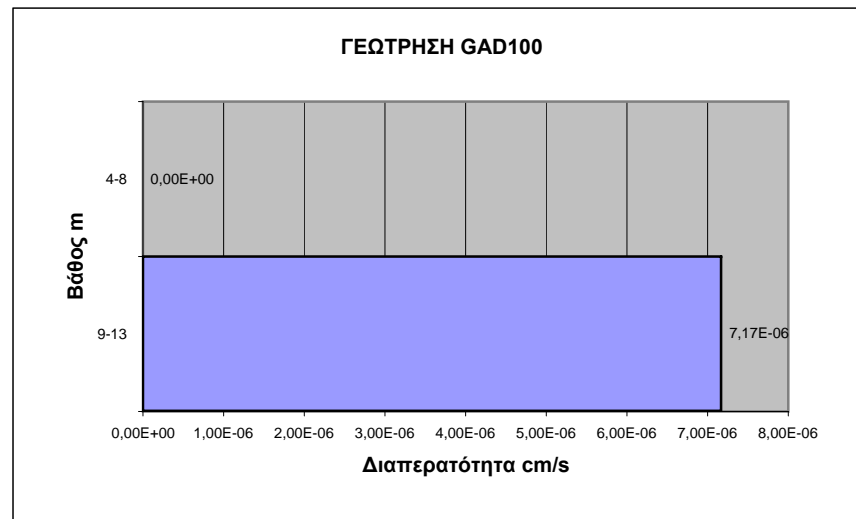
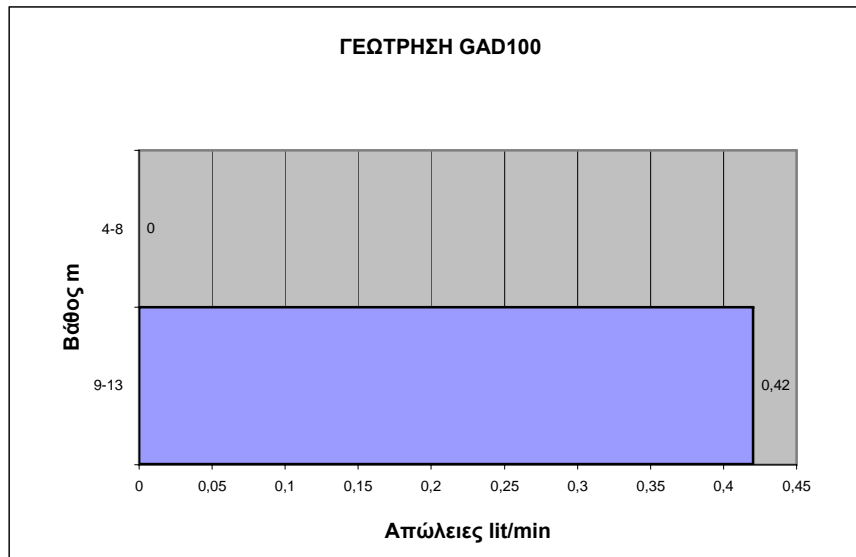
**Βάθος Δοκιμής 15~20 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,04
1,20	0,04
2,25	0,02
1,20	0,02
0,60	0,00



# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 100

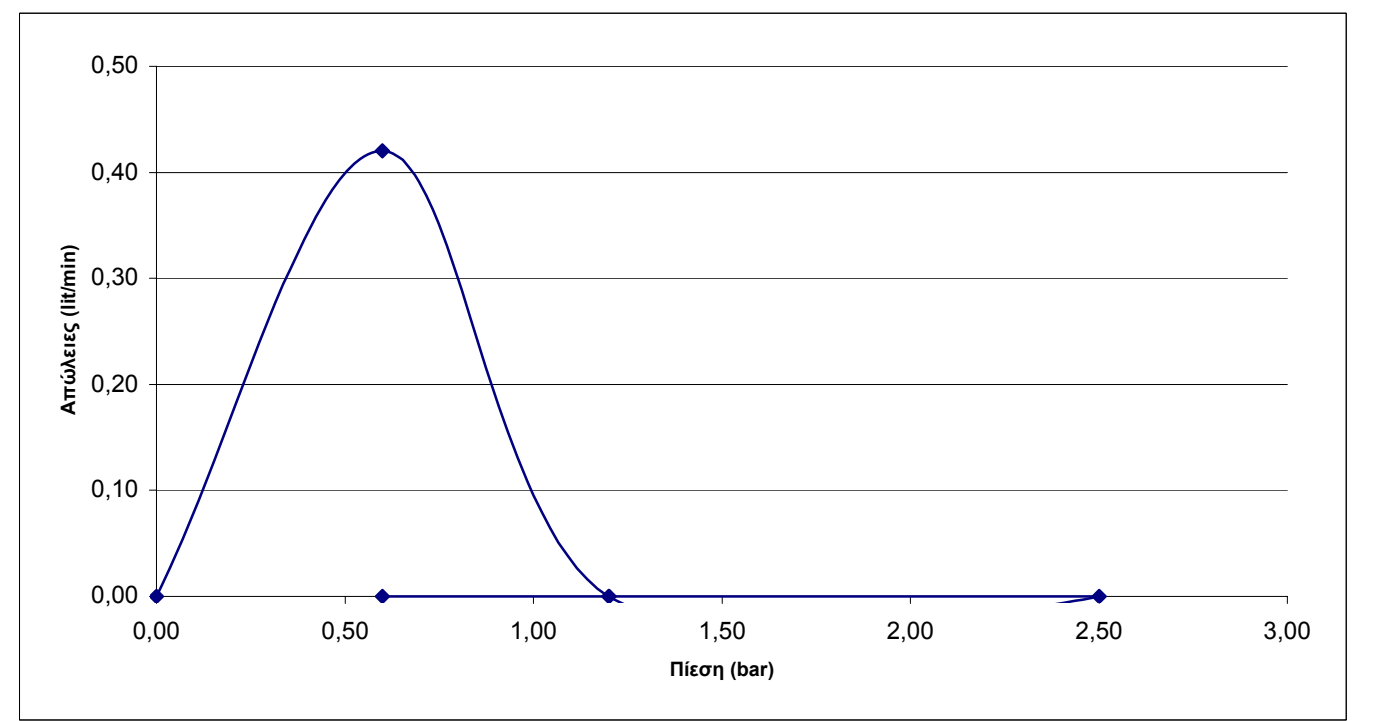
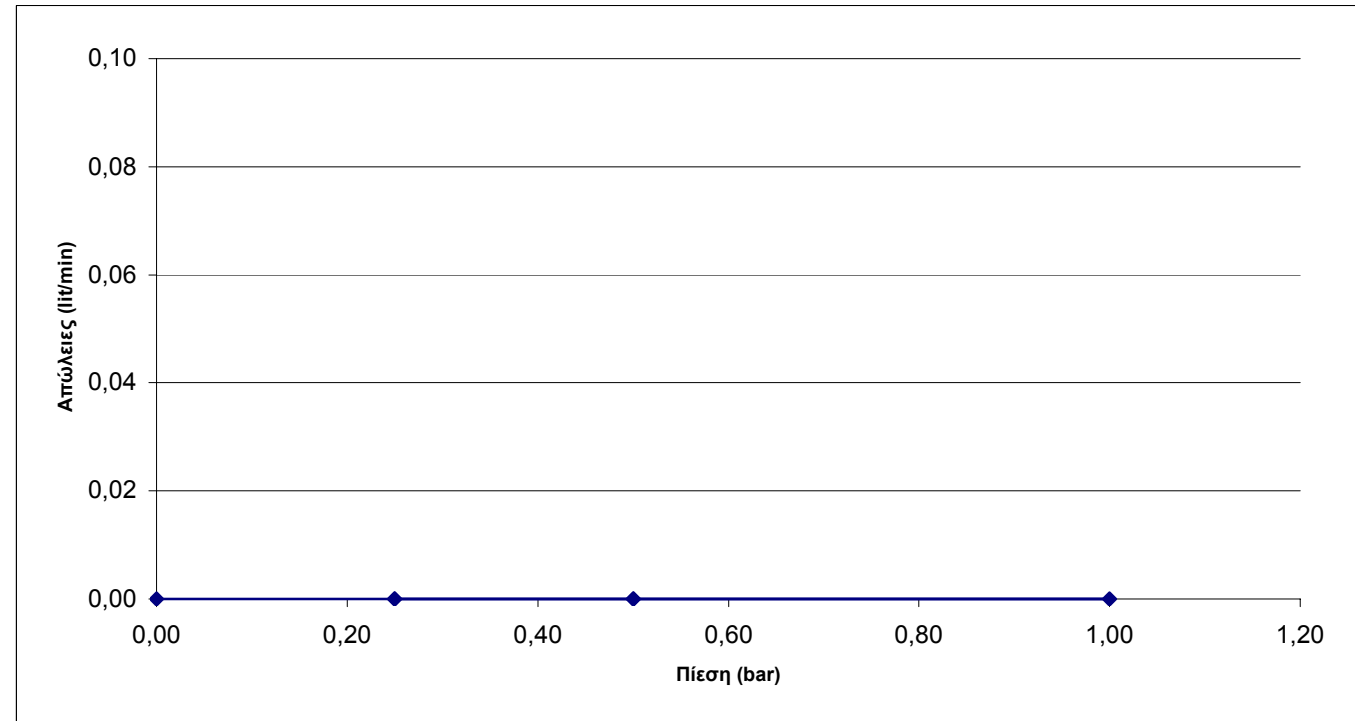




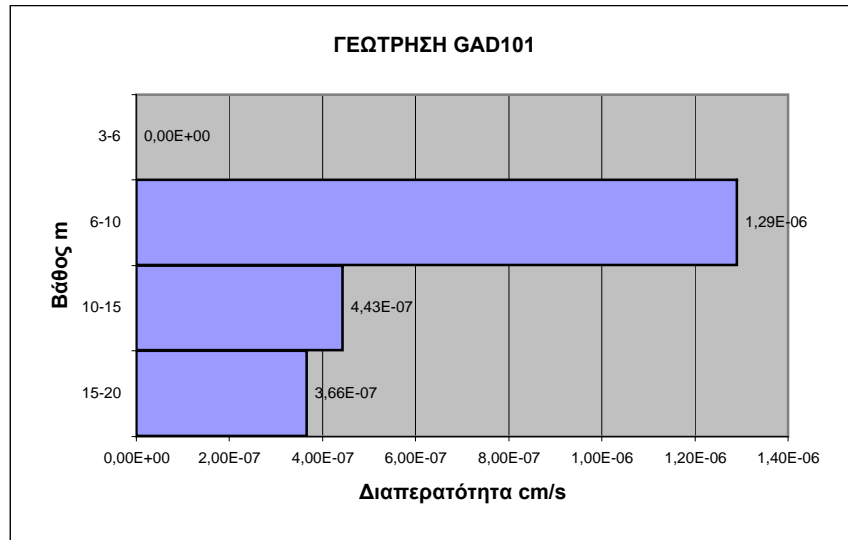
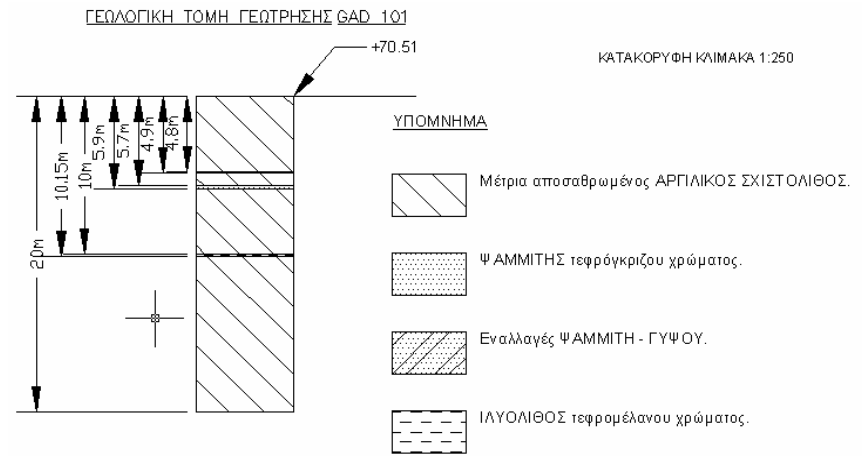
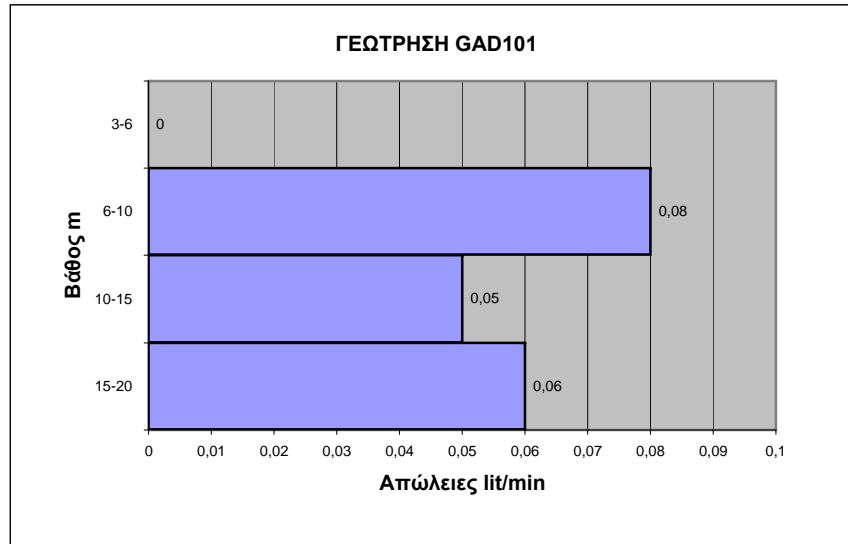
**GAD100**

Βάθος Δοκιμής 4~8 m	
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,00
0,50	0,00
1,00	0,00
0,50	0,00
0,25	0,00

Βάθος Δοκιμής 9~13 m	
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,42
1,20	0,00
2,50	0,00
1,20	0,00
0,60	0,00



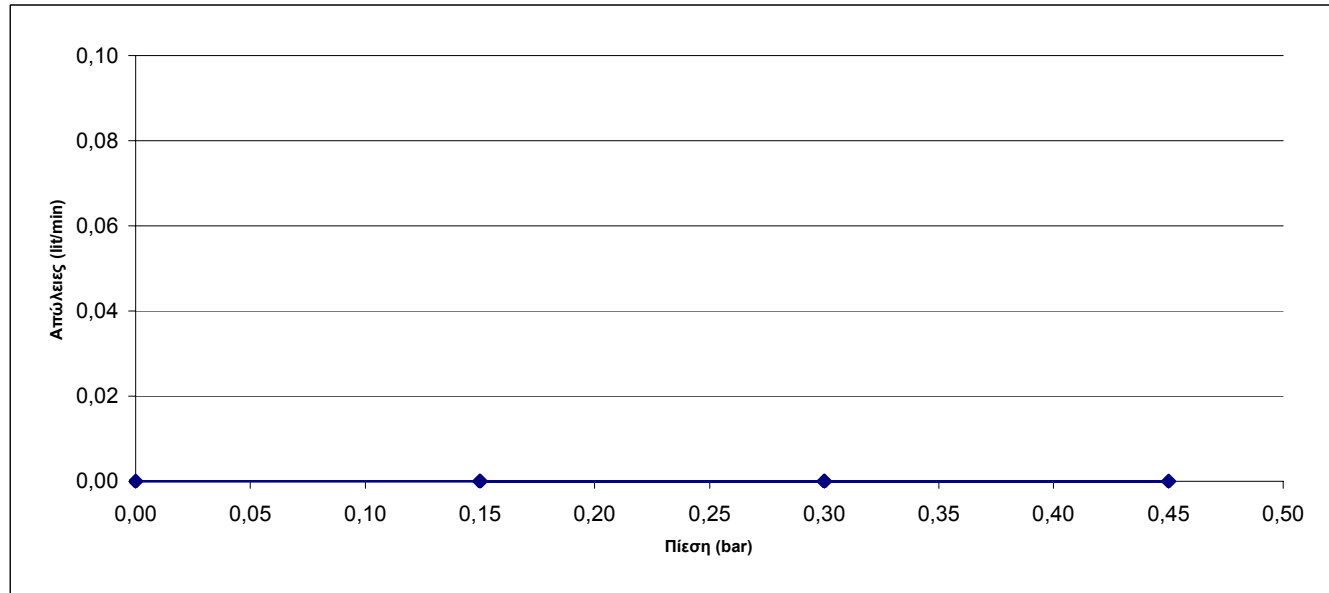
# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 101



**GAD101**

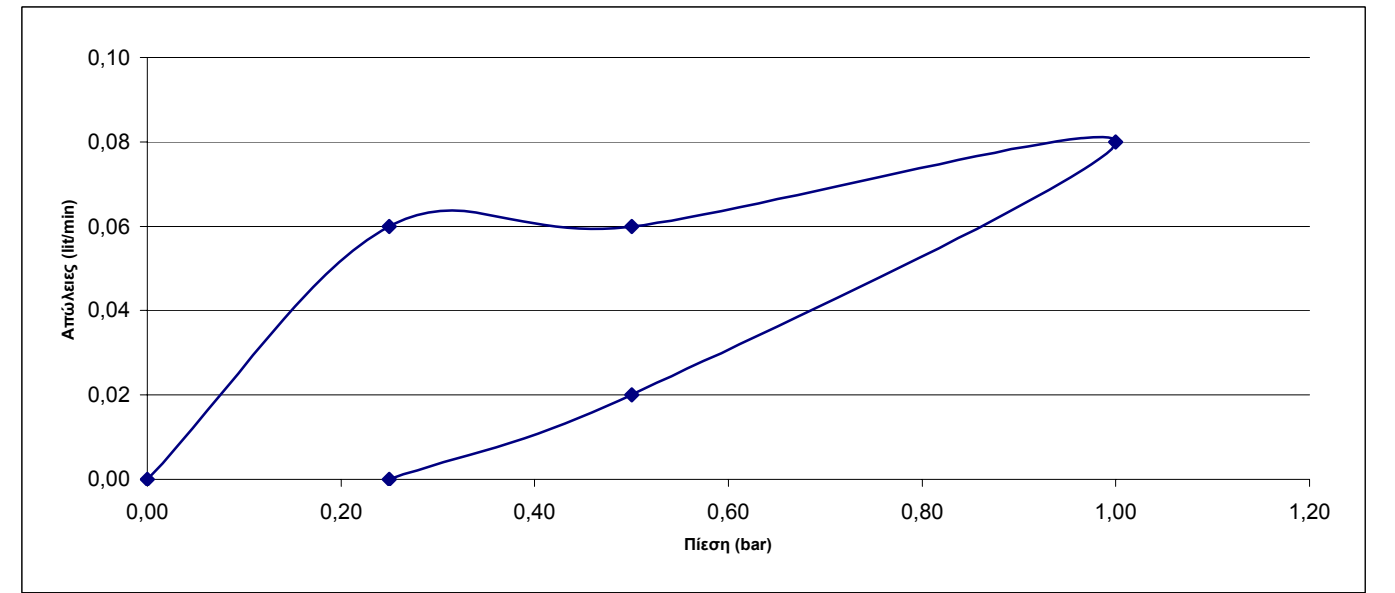
**Βάθος Δοκιμής 3~6 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,15	0,00
0,30	0,00
0,45	0,00
0,30	0,00
0,15	0,00



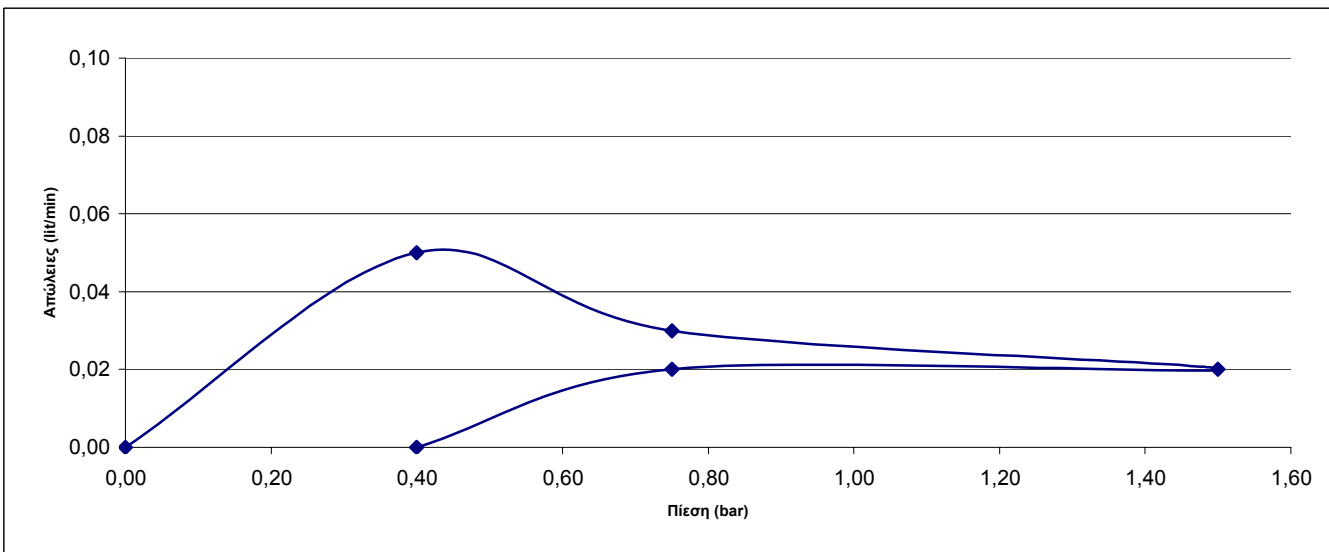
**Βάθος Δοκιμής 6~10 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,06
0,50	0,06
1,00	0,08
0,50	0,02
0,25	0,00



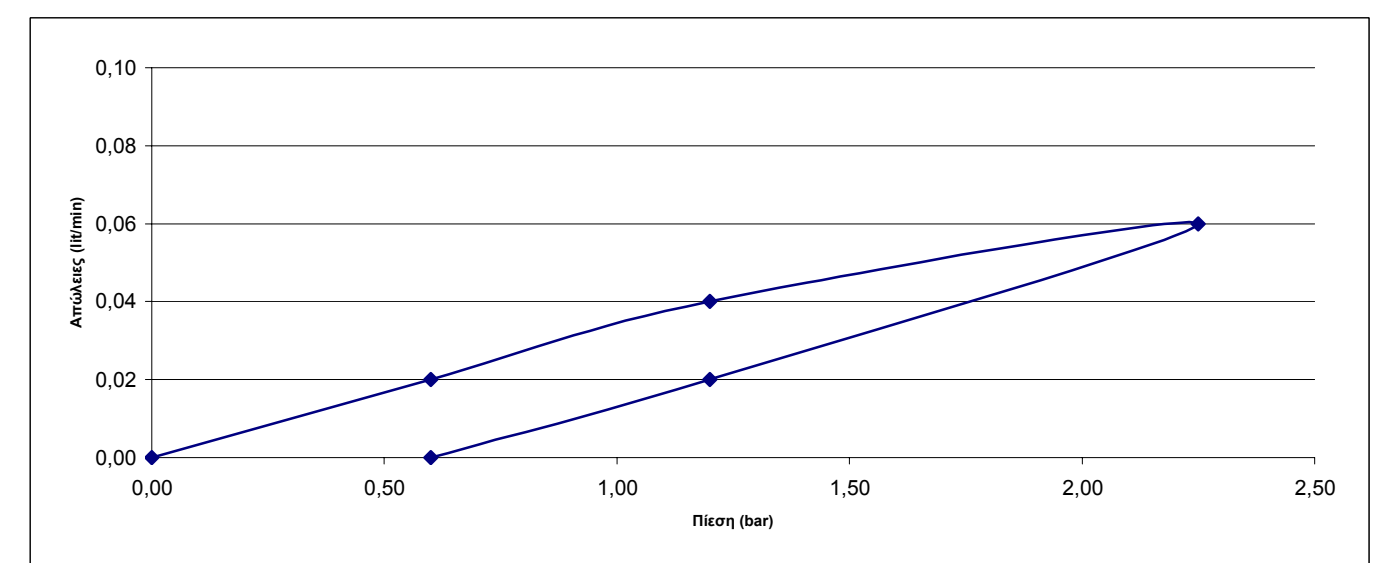
**Βάθος Δοκιμής 10~15 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,05
0,75	0,03
1,50	0,02
0,75	0,02
0,40	0,00

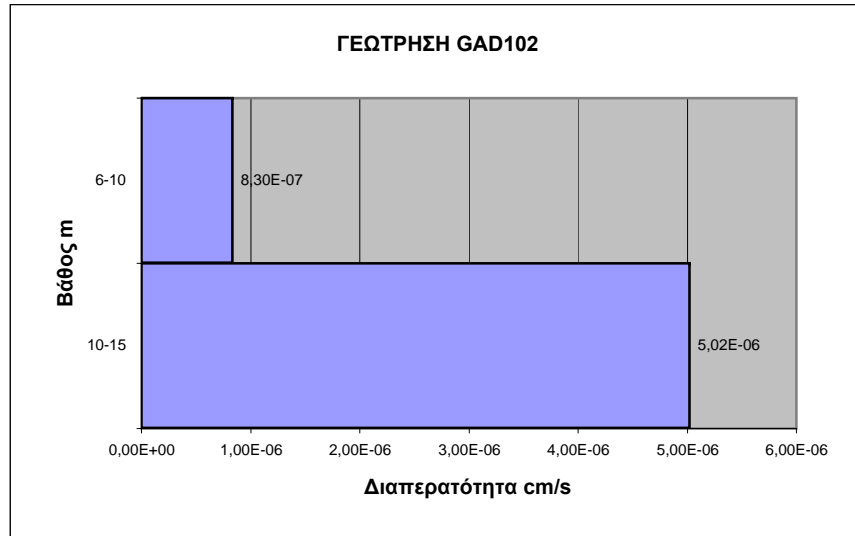
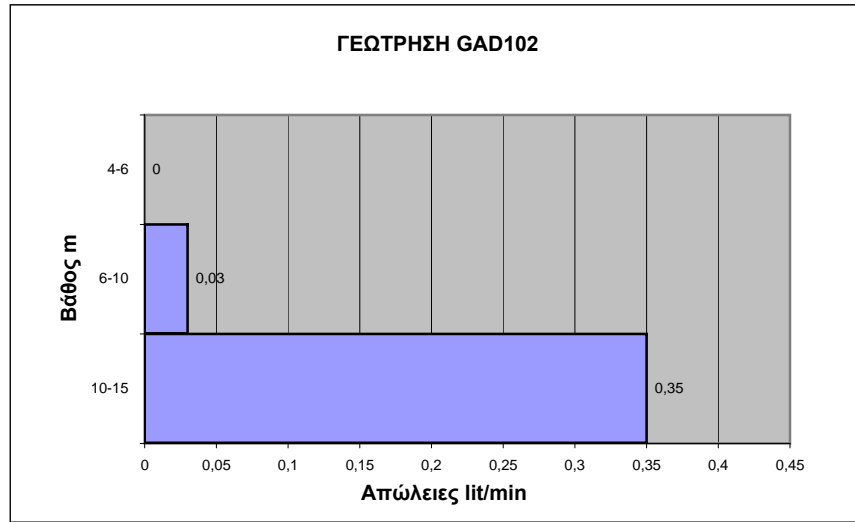


**Βάθος Δοκιμής 15~20 m**

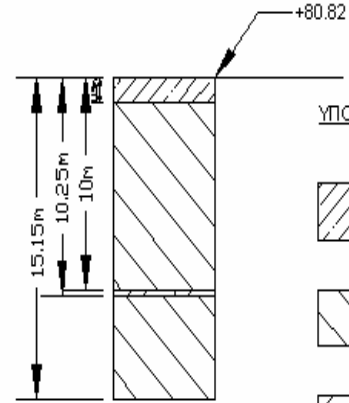
Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,02
1,20	0,04
2,25	0,06
1,20	0,02
0,60	0,00



# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 102



ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ GAD 102



ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΛΙΜΑΚΑ 1:250

ΥΠΟΜΝΗΜΑ



Ισχυρά αποσθρωμμένος ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ.



Μέτρια αποσθρωμμένος ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ.

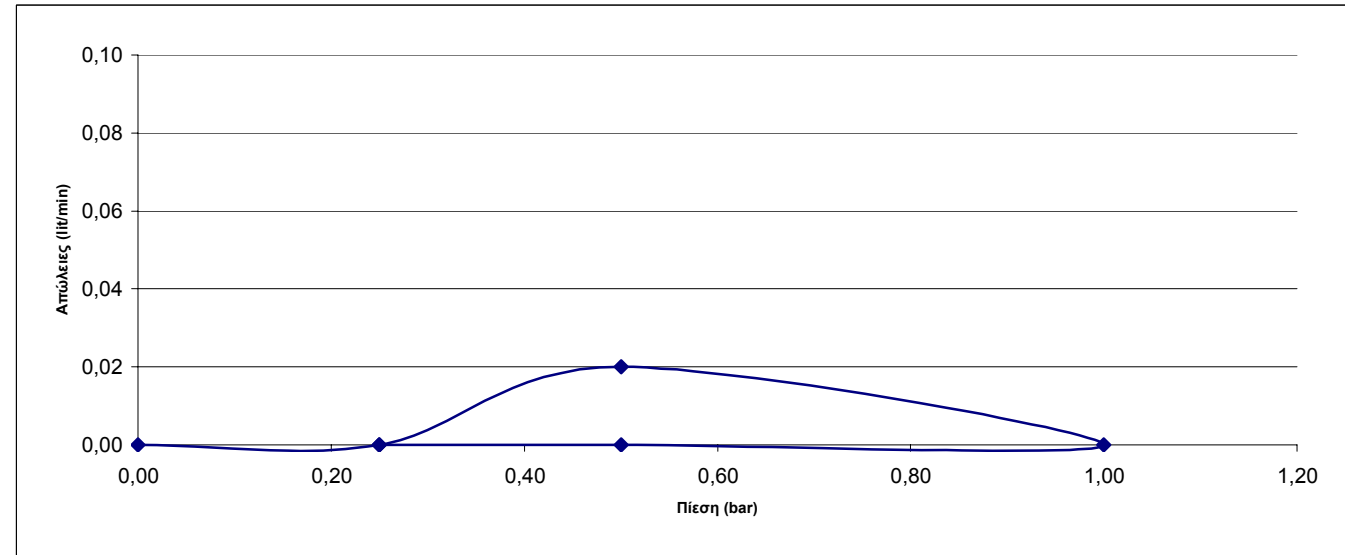


ΓΥΨΟΣ

**GAD102**

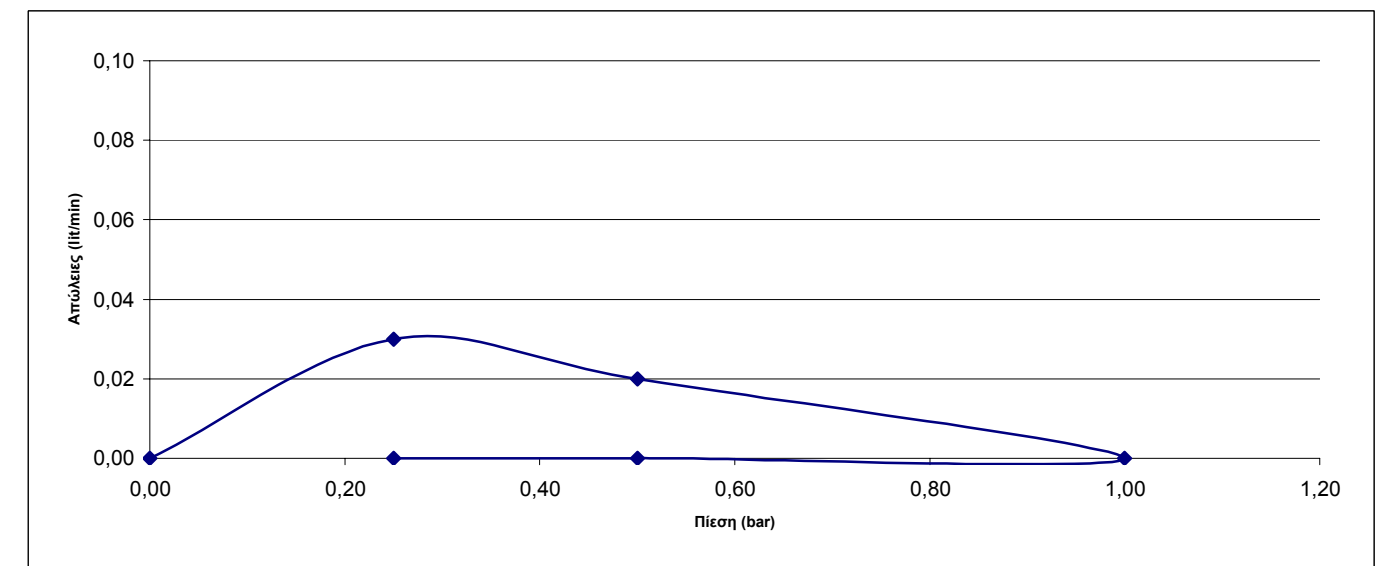
**Βάθος Δοκιμής 4~6 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,00
0,50	0,02
1,00	0,00
0,50	0,00
0,25	0,00



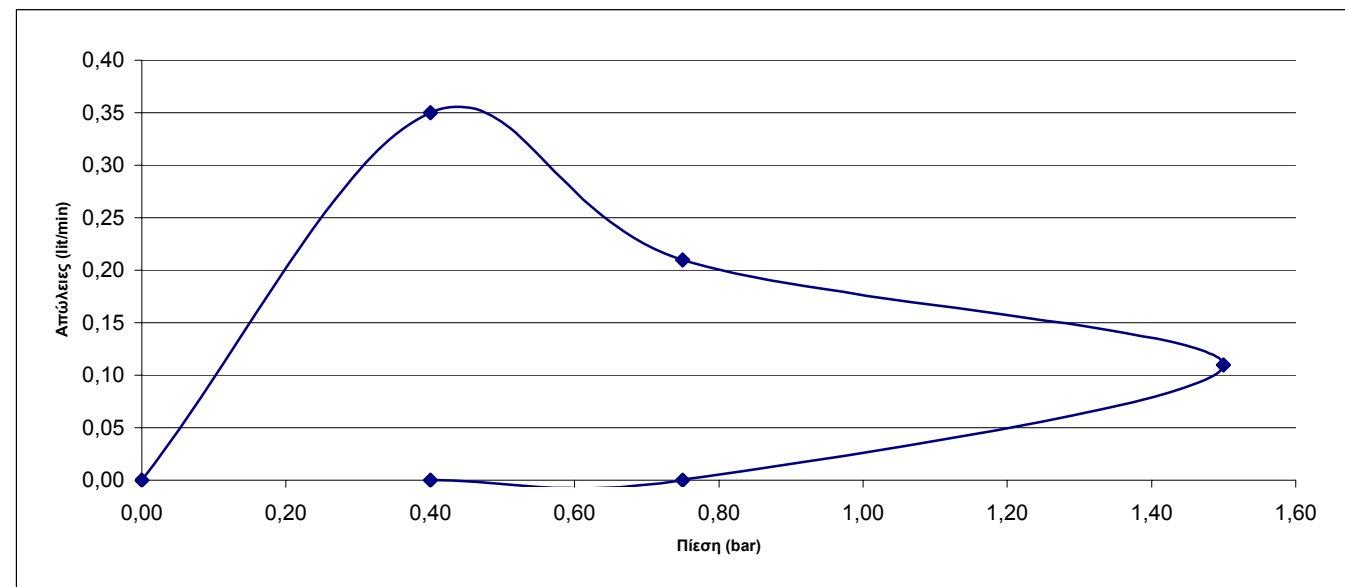
**Βάθος Δοκιμής 6~10 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,03
0,50	0,02
1,00	0,00
0,50	0,00
0,25	0,00



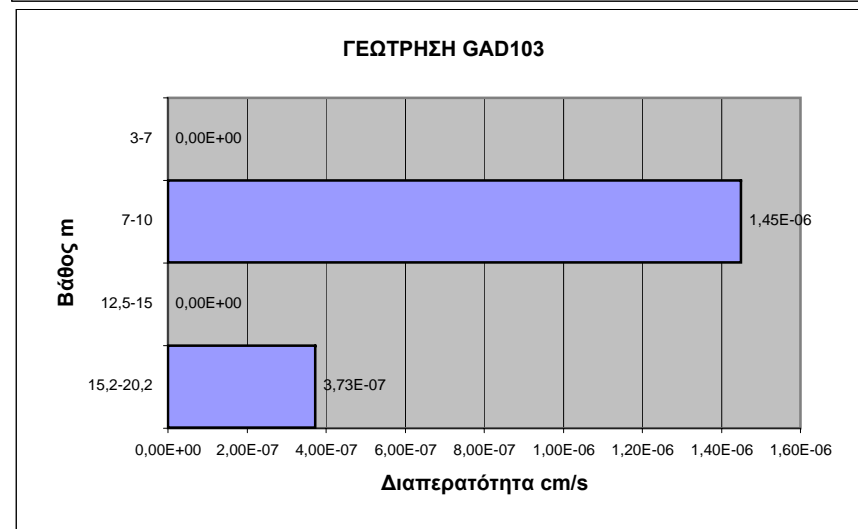
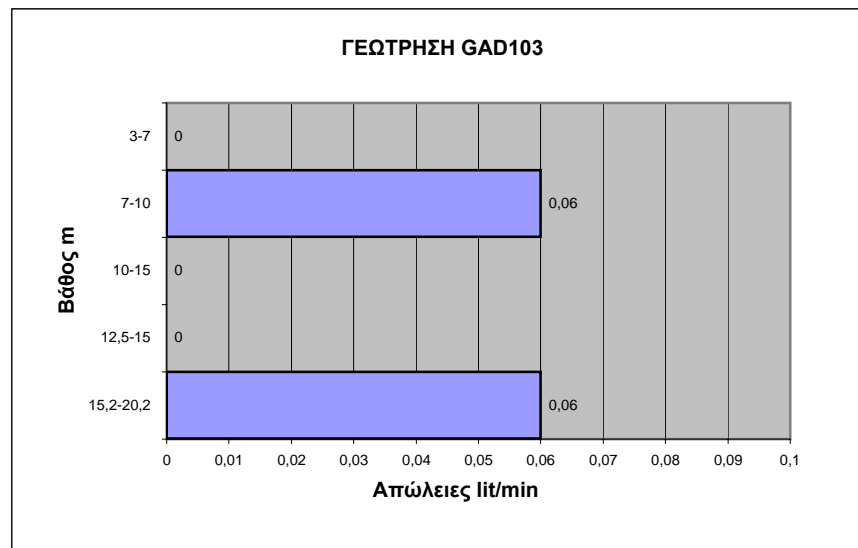
**Βάθος Δοκιμής 10~15 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,35
0,75	0,21
1,50	0,11
0,75	0,00
0,40	0,00





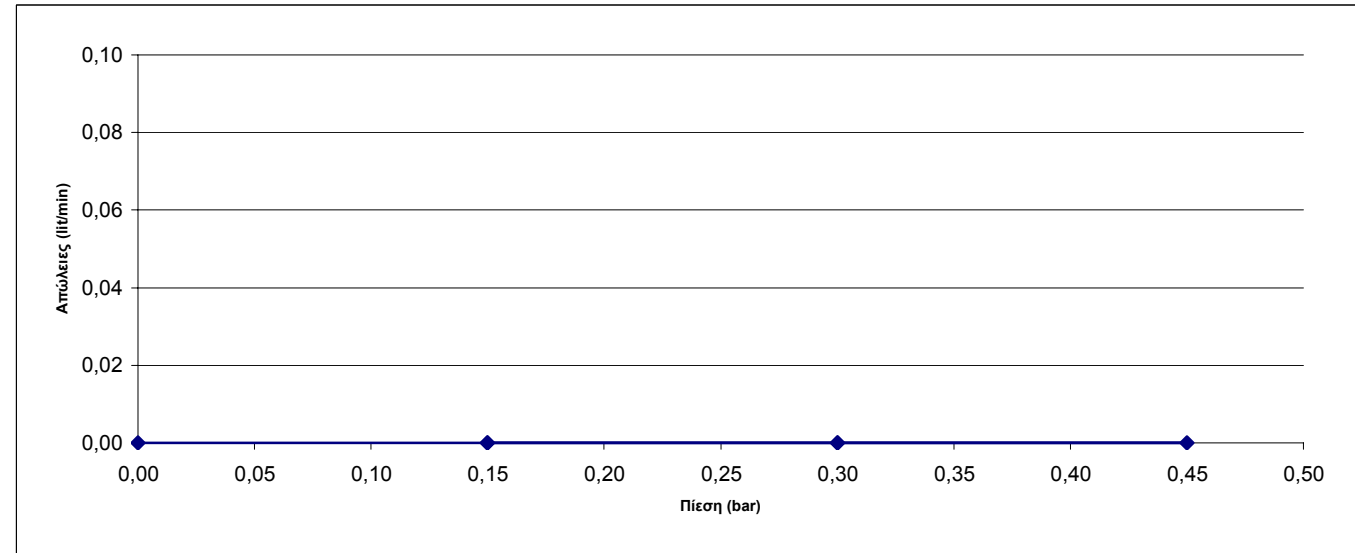
# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 103



**GAD103**

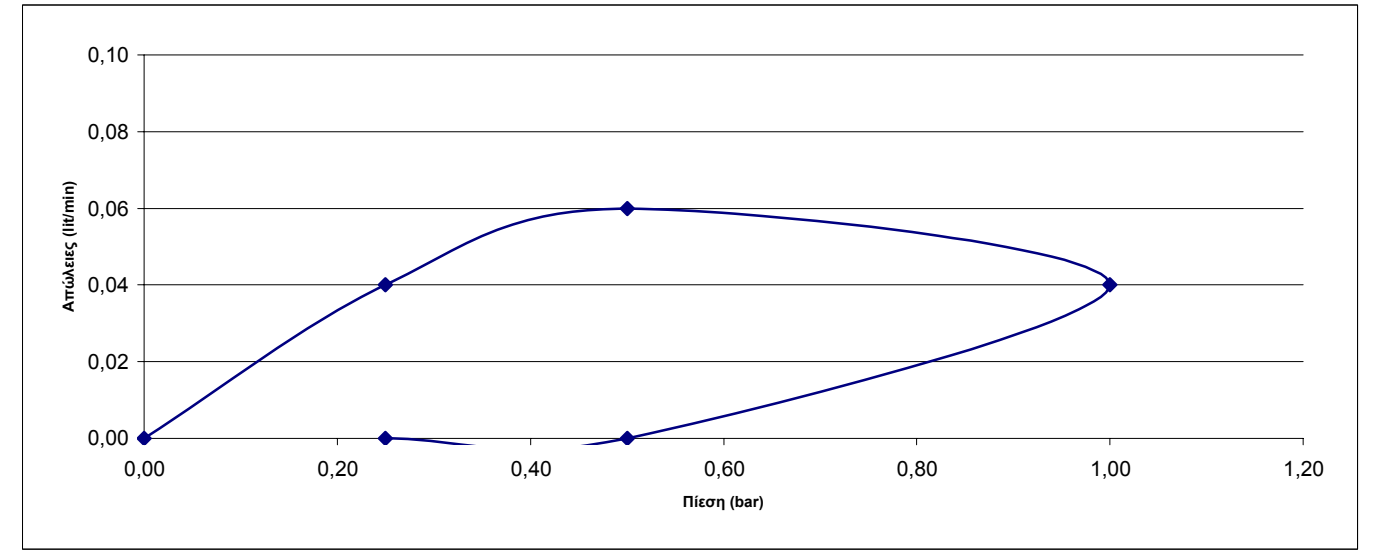
**Βάθος Δοκιμής 3~7 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,15	0,00
0,30	0,00
0,45	0,00
0,30	0,00
0,15	0,00



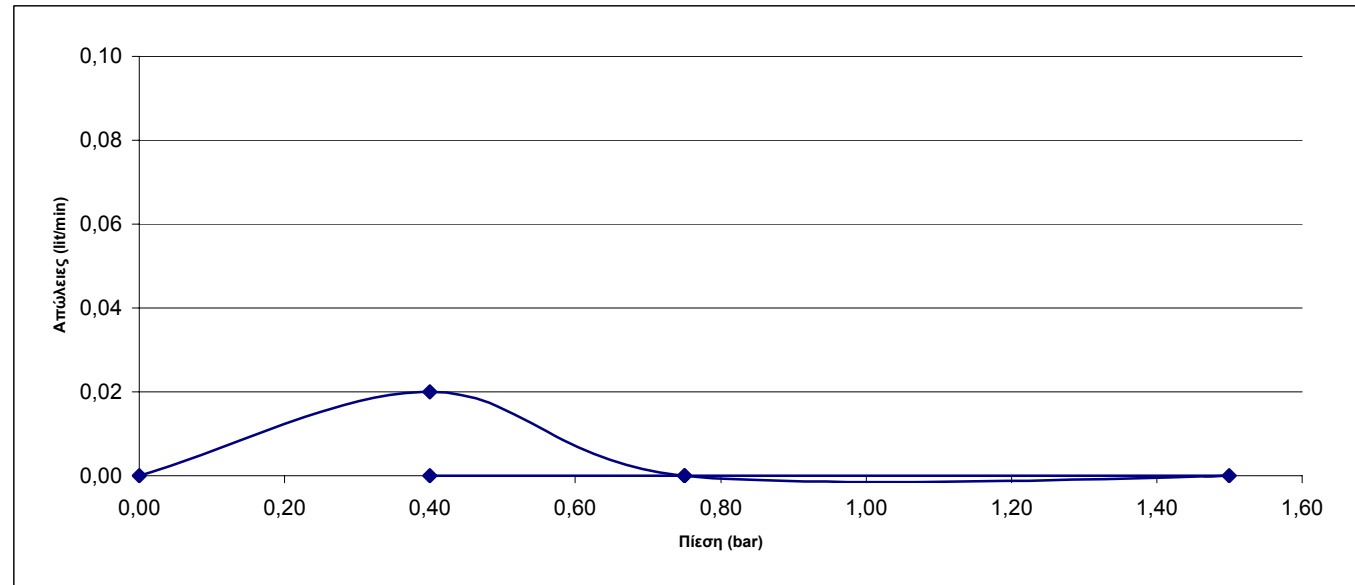
**Βάθος Δοκιμής 7~10 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	0,04
0,50	0,06
1,00	0,04
0,50	0,00
0,25	0,00



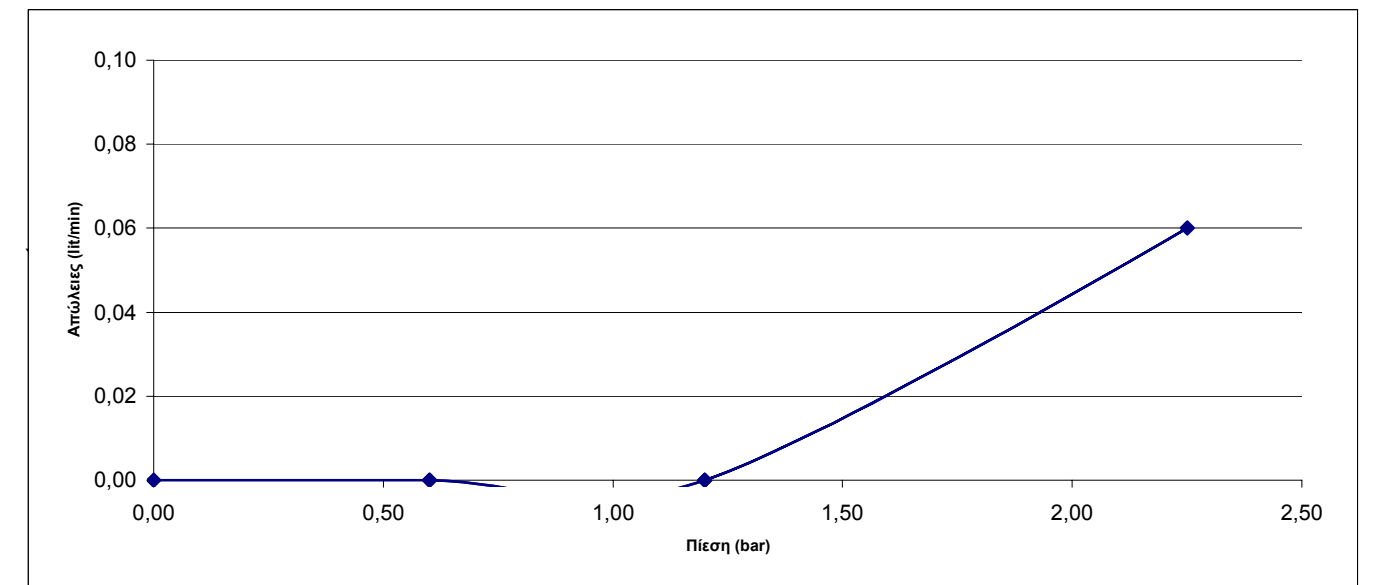
**Βάθος Δοκιμής 10~15 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,02
0,75	0,00
1,50	0,00
0,75	0,00
0,40	0,00

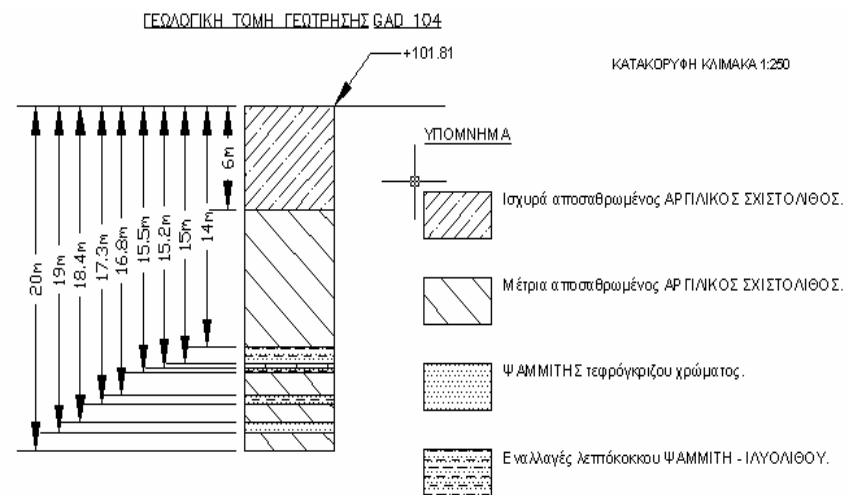
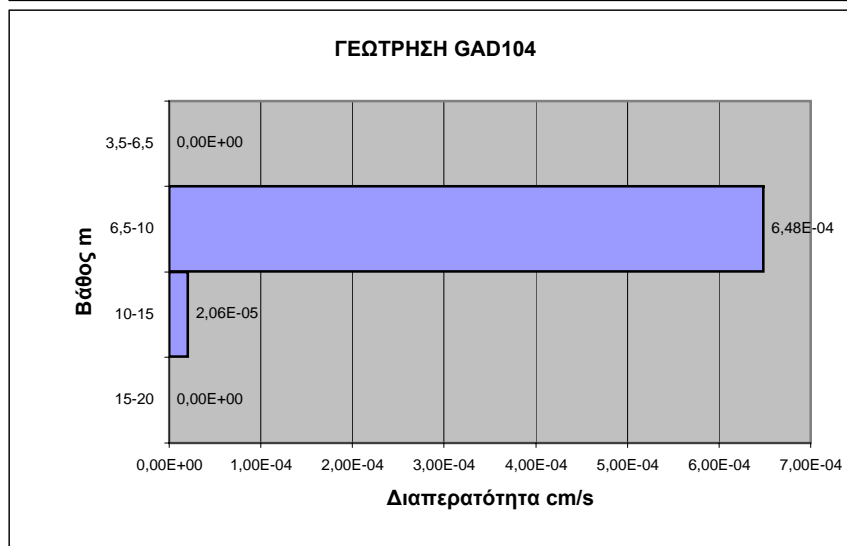
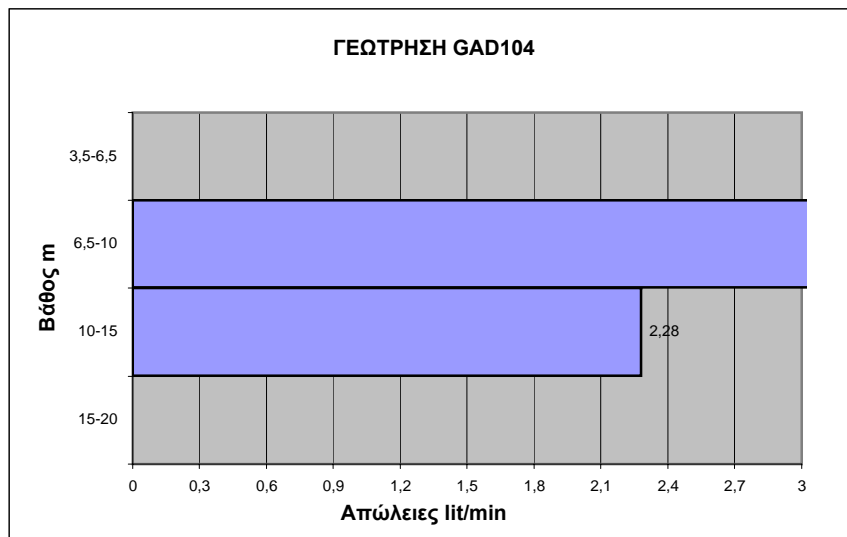


**Βάθος Δοκιμής 15~20 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,00
1,20	0,00
2,25	0,06
1,20	0,00
0,60	0,00



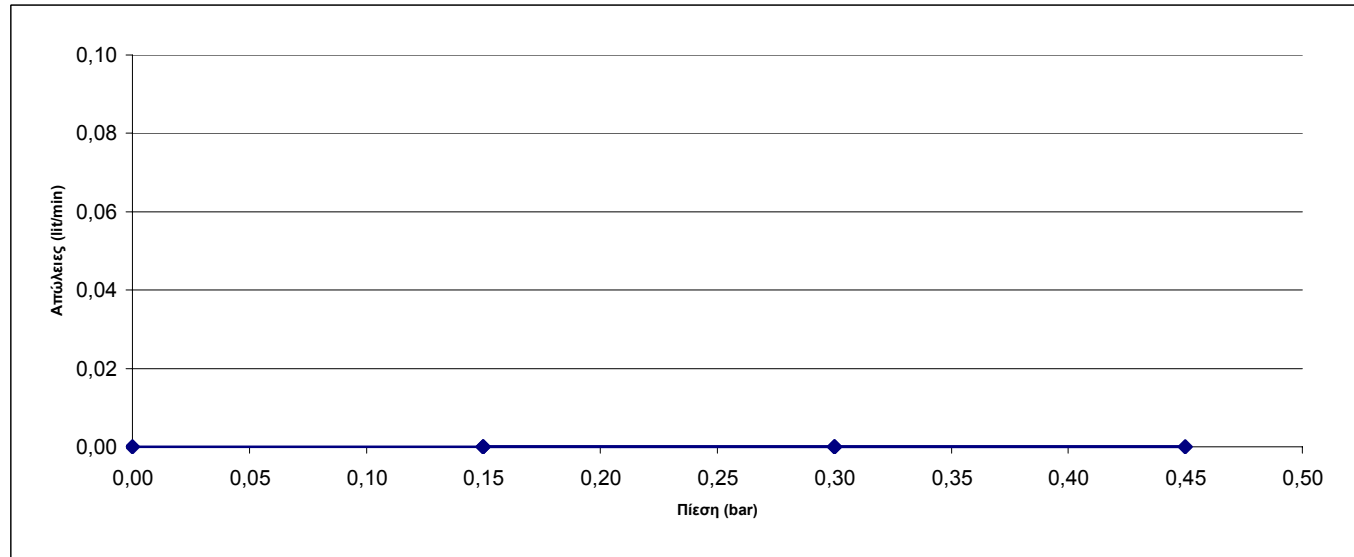
# ΓΕΩΤΡΗΣΗ GAD 104



**GAD104**

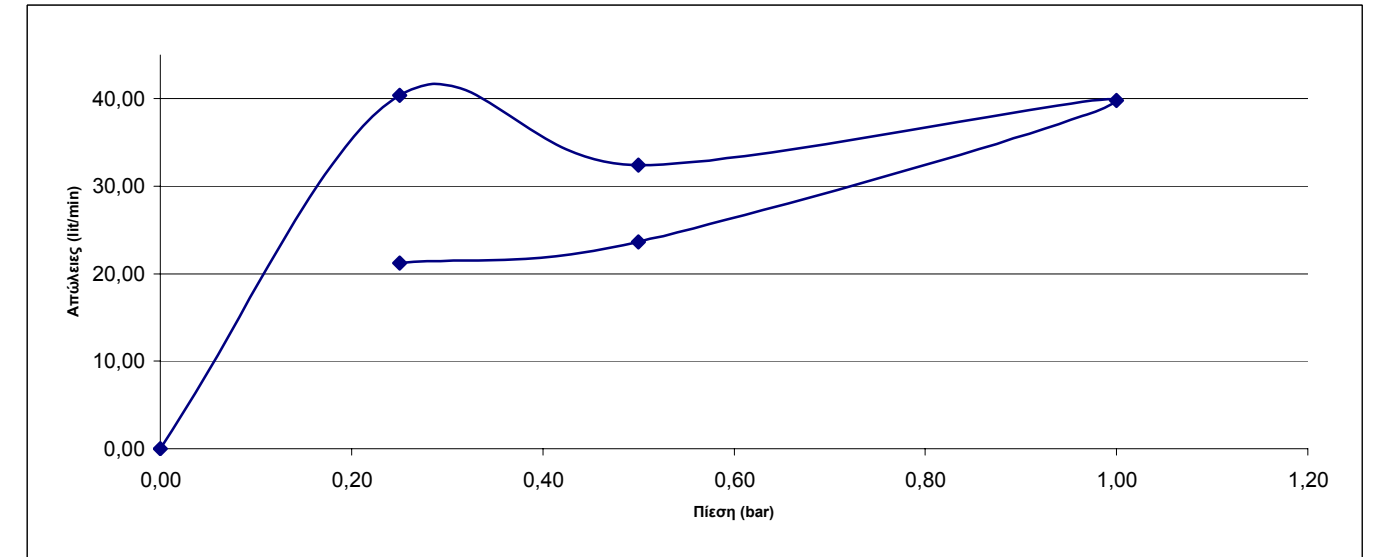
**Βάθος Δοκιμής 3,5~6,5 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,15	0,00
0,30	0,00
0,45	0,00
0,30	0,00
0,15	0,00



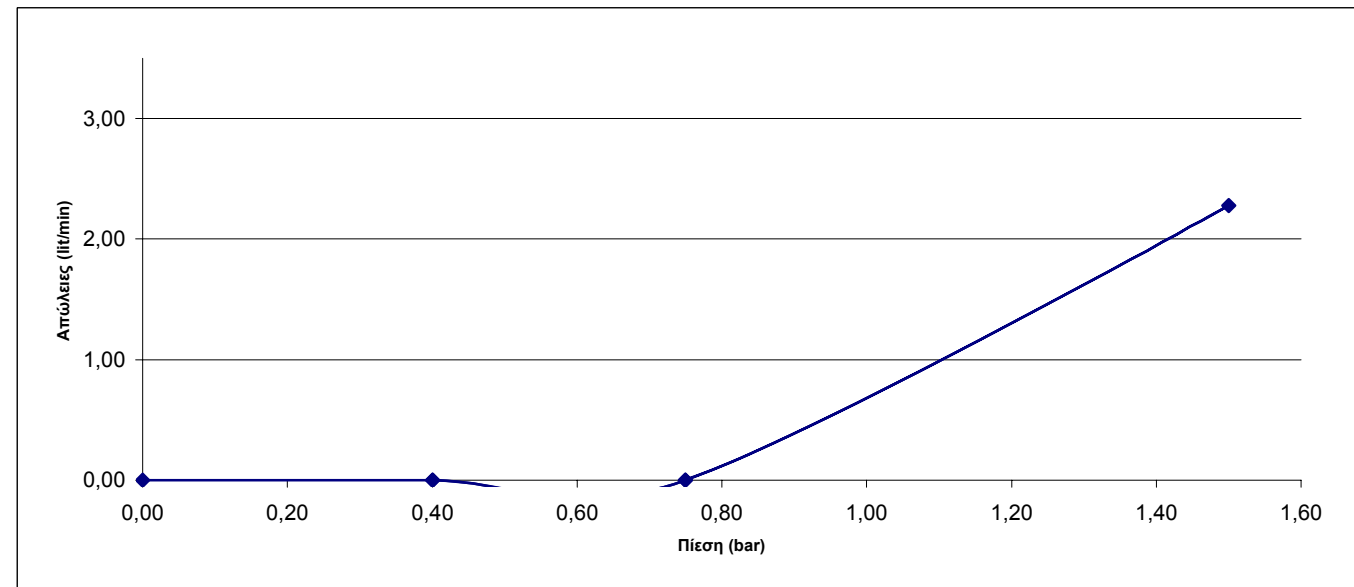
**Βάθος Δοκιμής 6,5~10 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,25	40,40
0,50	32,40
1,00	39,80
0,50	23,60
0,25	21,20



**Βάθος Δοκιμής 10~15 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,40	0,00
0,75	0,00
1,50	2,28
0,75	0,00
0,40	0,00



**Βάθος Δοκιμής 15~20 m**

Πίεση (bar)	Απώλειες (lit/min)
0,00	0,00
0,60	0,00
1,20	0,00
2,25	0,00
1,20	0,00
0,60	0,00

