



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

***ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΠΡΟΣ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ
(ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΗ ΣΤΟΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
ΑΛΜΥΡΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ)***

ΜΑΡΙΑ Ν. ΚΛΕΙΔΟΠΟΥΛΟΥ



(Blyth – De Freitas, 1984, Fig. 18.6)

ΧΑΝΙΑ,

ΜΑΡΤΙΟΣ 2003

Στον σύζυγο μου,

Διονύση ...

για την βοήθεια,

την υποστήριξη και

την υπομονή του

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Δήμος Ηρακλείου είναι ένας από τους μεγαλύτερους και ταχύτερα αναπτυσσόμενους δήμους στην Ελλάδα. Στην τελευταία απογραφή (2001) ο μόνιμος πληθυσμός του έφτανε τους 138.766 κατοίκους. Παρόλα αυτά, ανέκαθεν ταλαιπωρούνταν από την έλλειψη επαρκών ποσοτήτων νερού για ύδρευση.

Κατά καιρούς έγιναν επανειλημμένες προσπάθειες από διάφορους φορείς για την αξιοποίηση του υδροφορέα που τροφοδοτεί την υφάλμυρη καρστική πηγή Αλμυρού, την μεγαλύτερη πηγή της περιοχής. Τα τελευταία 40 χρόνια, σημαντικός αριθμός Ελλήνων και ξένων επιστημόνων ανέπτυξαν απόψεις που αφορούν στην κατανόηση της λειτουργίας του υδροφορέα για την βέλτιστη εκμετάλλευσή του. Οι επικρατέστερες από αυτές τις απόψεις προχώρησαν και στο στάδιο της υλοποίησης.

Το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε συνεργασία με την Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου (ΔΕΥΑΗ) και στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος με τίτλο "Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού", διετύπωσε μία από τις πιο εμπεριστατωμένες απόψεις για την εκμετάλλευση του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία βρίσκεται στο στάδιο υλοποίησης τα τελευταία 15 περίπου χρόνια, με θετικά αποτελέσματα. Στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας υποδείχθηκε σειρά θέσεων υδρογεωτρήσεων που στην πλειοψηφία τους αποδείχθηκαν παραγωγικές. Το πρώτο "πεδίο εκμετάλλευσης" ήταν στην περιοχή Τυλίσου (1987-90) και τα επόμενα στις περιοχές Γωνιανού Φαραγγιού (1989-91) και Κέρης (1990-95).

Όμως, από τα πρώτα κιόλας έτη παραγωγής (1988-89), παρατηρήθηκε υφαλμύριση του υπόγειου νερού στο πεδίο Τυλίσου. Το φαινόμενο αποδόθηκε σε εκτεταμένες υπεραντλήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνταν προκειμένου να καλυφθούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις του πληθυσμού σε υδρευτικό νερό.

Στα επόμενα έτη το μέτωπο υφαλμύρισης κινήθηκε ενδοχώρα, προς το πεδίο Κέρης, παρά την μείωση των αντλούμενων ποσοτήτων νερού από την Τύλισο. Έτσι, η ΔΕΥΑΗ προχώρησε στην ανάπτυξη νέων πεδίων υδρογεωτρήσεων στις ευρύτερες περιοχές (πεδία) Κρουσώνα – Λουτρακίου και Αγίου Μύρωνα.

Από την πλευρά της, η συνεργαζόμενη ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης, προκειμένου να διατυπώσει εναλλακτικές λύσεις για να αντιμετωπιστεί το

πρόβλημα της υφαλμύρινσης, πρότεινε την εξόρυξη υδρομαστευτικής στοάς (παλαιότερη ιδέα των Μονόπωλη – Μάστορη, 1969). Τον Οκτώβριο του 1996, με προκαταρκτική έκθεση έγινε για πρώτη φορά ολοκληρωμένη πρόταση στην υπεύθυνη επιχείρηση (ΔΕΥΑΗ) για "συνολική αξιοποίηση του υδροφόρου ορίζοντα με την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς ανάντη της πηγής Αλμυρού και εκείθεν των ζωνών υφαλμύρινσης" ^[157].

Μετά το 1998, οπότε και υπεισέρχεται αλλαγή των διοικητικών ορίων όλων των Δήμων της χώρας (Νόμος "Καποδίστριας"), η έκταση και κατά συνέπεια ο πληθυσμός του Δήμου Ηρακλείου αυξάνουν, χωρίς να συνοδεύονται από ανάλογη αύξηση των υδατικών του πόρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναζήτηση, από πλευράς ΔΕΥΑΗ, νέων μεθόδων εκμετάλλευσης των υδατικών αποθεμάτων του Δήμου, πέρα των υδρογεωτρήσεων.

Στις κατά καιρούς υπηρεσιακές και δημόσιες εισηγήσεις για την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς παρουσιάζονταν τα πρακτικά συμπεράσματα που οδηγούσαν στον τύπο, τις διαστάσεις και τους λόγους επιτυχίας και απόδοσης του έργου. Η παρούσα διατριβή αφορά στην ανάλυση των δεδομένων και την θεωρητική τεκμηρίωση όλων των συμπερασμάτων από πλευράς επιτυχίας και απόδοσης.

Η όλη εργασία περιλαμβάνει την συλλογή και επεξεργασία μετρήσεων παροχής, στάθμης, ποιότητας των γεωτρήσεων και της πηγής Αλμυρού, την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν στις παραμέτρους του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και την προσομοίωση (μοντελοποίηση) της ροής με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, μέσω του προγράμματος ModFlow (σε H/Y). Η μοντελοποίηση έγινε προκειμένου να προβλεφθεί η κατάσταση ροής της ευρύτερης περιοχής κατά την διάρκεια της λειτουργίας των παραπάνω υδρομαστευτικών έργων (γεωτρήσεις και υδρομαστευτική στοά), η αλληλεπίδραση αυτών με την πηγή Αλμυρού και να βρεθεί η βέλτιστη λύση για την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του υδρευτικού έργου.

Η συλλογή στοιχείων – παρατηρήσεων περιέλαβε την συγκέντρωση μελετών και προτάσεων για την ύδρευση του Δήμου Ηρακλείου, την καταγραφή της σημερινής κατάστασης στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, την συγκέντρωση πληθυσμιακών δεδομένων, δεδομένων παροχής, ποιότητας (χλωριόντα), χρόνων άντλησης νερού, όπως και επί τόπου επισκέψεις για την απογραφή και την ακριβή χαρτογράφηση των σημείων νερού που συνεισφέρουν στην υδροδότηση του νέου δήμου.

Όσον αφορά το υδρογεωλογικό μέρος της εργασίας, έγιναν επί τόπου υδρογεωλογικές αναγνωρίσεις και τα στοιχεία που προέκυψαν αναλύθηκαν και αποτυπώθηκαν σε σειρά θεματικών χαρτών. Με αυτό τον τρόπο δόθηκε η υδρογεωλογική εικόνα της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος.

Η επεξεργασία όλων των συλλεχθέντων στοιχείων οδήγησε σε ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου της περιοχής. Έτσι, δημιουργώντας πρότυπα (μοντέλα) πρόβλεψης, σε συνθήκες λειτουργίας της υδρομαστευτικής στοάς υπολογίζονται οι αναμενόμενες αποδόσεις του έργου και αποδεικνύεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος εκμετάλλευσης του υδροφορέα είναι βιώσιμη και αποτελεσματική.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την πραγματοποίηση της διατριβής καθοριστικό ρόλο αποτέλεσε η διαρκής και ουσιαστική συνεργασία με τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, Διονύσιο Μονόπωλη (επιβλέπων), τον οποίο ευχαριστώ θερμά.

Πολλές ευχαριστίες θα πρέπει να απευθύνω και στα υπόλοιπα μέλη της ερευνητικής ομάδας του προγράμματος "Υδρευση Ηρακλείου: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού" και ιδιαίτερα στους Διονύση Βαβαδάκη (Μηχ. Ο. Π., MSc) και Μανώλη Στειακάκη (Τεχν. Γεωλόγος, MSc), οι οποίοι, είτε βοηθώντας στη συγκέντρωση των στοιχείων, είτε διατυπώνοντας ιδέες και προτάσεις, συνέβαλαν σημαντικά στην αρτιότερη ολοκλήρωση της εργασίας.

Επίσης, εκφράζω την αμέριστη εκτίμησή μου στους κ.κ. Παναγιώτη Σοφίου, Γεωλόγο, Προϊστάμενο του Γεωλογικού Τμήματος της ΔΕΥΑΗ και Μιχάλη Καδιανάκη, Γεωλόγο της ΔΕΥΑΗ, οι οποίοι συνέβαλαν τα μέγιστα στη συγκέντρωση και διάθεση δεδομένων (απογραφές – χαρτογραφήσεις γεωτρήσεων, μετρήσεις υπαίθρου κ.λπ.) και κατέθεσαν την εμπειρία τους για θέματα που η εν λόγω εργασία πραγματεύεται.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα το μέλος της Τριμελούς Επιτροπής Παρακολούθησης, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει στην ολοκλήρωση της εργασίας. Επίσης, το τρίτο μέλος της επιτροπής, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Καρατζά, του οποίου η βοήθεια ξεκίνησε πολύ πριν επισημοποιηθεί ο ρόλος του στην παρούσα διατριβή.

Ευχαριστίες απευθύνονται και στα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τις χρήσιμες υποδείξεις τους. Πρόκειται για τους κ.κ. Β. Γκέκα, Καθηγητή στο Πολυτεχνείο Κρήτης, Ν. Λαμπράκη, Αναπληρωτή Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο Πατρών, Γ. Σταμάτη, Επίκουρο Καθηγητή στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, και Ι. Κυρούση, Επίκουρο Καθηγητή στο Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Μανώλη Σαλδάρη (Μηχ. Ο. Π., MSc) για τις συμβουλές και υποδείξεις του σε θέματα σχετικά με προσομοιωτές ροής, τον κ. Χρύσανθο Στειακάκη (Μηχ. Ο. Π., MSc) για την υποστήριξή του κατά την κατασκευή του μοντέλου και την κα. Έφη Ψαροπούλου (Γεωλόγο) για την βοήθειά της στην εγκατάσταση και λειτουργία του software.

Ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω και στον κ. Hugh McCreadie, Προϊστάμενο Υδρογεωχημικό της Waterloo Hydrogeologist Inc. για τις ουσιαστικές υποδείξεις του στα πρώτα στάδια κατασκευής του μοντέλου.

Τέλος, σημαντική βοήθεια στην συλλογή πληθυσμιακών στοιχείων μου παρείχαν οι Στατιστικές Υπηρεσίες Χανίων και Ηρακλείου, ενώ ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει για την κα. Κλαίρη Στρατήγη (Στατιστική Υπηρεσία Ηρακλείου), της οποίας η υποστήριξη ήταν άμεση και ουσιαστική.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
<i>1.1. Ιστορικό</i>	1
<i>1.2. Μεθοδολογία</i>	7
2. ΥΔΡΕΥΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΗΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ	9
<i>2.1. Εκτίμηση υδρευτικών αναγκών πληθυσμού</i>	9
<i>2.2. Δυναμικό σημείων υδροληψίας</i>	13
<i>2.3. Αξιολόγηση υδρευτικής κατάστασης</i>	15
<i>2.4. Προτάσεις αντιμετώπισης του υδρευτικού προβλήματος</i>	18
2.4.1. Περαιτέρω αξιοποίηση της γεωτρητικής έρευνας	18
2.4.2. Ανύψωση τεχνητού φράγματος στη λίμνη της πηγής Αλμυρού	19
2.4.3. Απευθείας χρήση παροχών "γλυκού νερού" από την πηγή Αλμυρού	19
2.4.4. Κατασκευή υδατοταμιευτήρα στο ρέμα του Γαζανού ποταμού	20
2.4.5. Ενιαία διαχείριση υδατικών πόρων βορείου άξονα Ανατ. Κρήτης	20
2.4.6. Κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς	20
3. ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΕΣ ΣΤΟΕΣ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	29
<i>3.1. Παραδοσιακές υδρομαστευτικές στοές</i>	29
3.1.1. Qanat	29
3.1.2. Karez	30
<i>3.2. Σύγχρονες υδρομαστευτικές στοές</i>	33
3.2.1. Γενικά	33
3.2.2. Σχεδιασμός υδρομαστευτικής στοάς κάτω από επιφανειακό ρεύμα	34
3.2.3. "Αγωγοί τύπου Maui" στην Hawaii	35
3.2.4. Qanats στην κοιλάδα Varamin του Ιράν	38
3.2.5. Οριζόντια υδρομαστευτική στοά στην Αλάσκα	41

3.2.6. Σήραγγα αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην Αίγυπτο -----	41
3.2.7. Σήραγγα αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην Φιλανδία -----	43
3.2.8. Σήραγγα αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην Κολομβία -----	44
3.3. Σύγχρονες υδρομαστευτικές στοές στην Ελλάδα -----	45
3.3.1. Τύπος qanat Νέας Ζίχνης -----	46
3.3.2. Τύπος qanat Ροδολείβους -----	47
3.3.3. Τύπος qanat Σιδηροδρομικού Σταθμού Αγγίστας -----	50
3.3.4. Τύπος qanat Αγγίστας -----	51
4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ -----	53
4.1. Γενικά -----	53
4.2. Γεωλογική περιγραφή της περιοχής ενδιαφέροντος -----	53
4.2.1. Μορφολογία -----	53
4.2.2. Γεωλογία -----	54
4.2.3. Τεκτονική -----	57
4.3. Υδρογεωλογική περιγραφή της περιοχής ενδιαφέροντος -----	59
4.3.1. Υδρολιθολογία -----	59
4.3.2. Ανάπτυξη υδροφοριών -----	61
4.4. Απογραφή σημείων νερού -----	65
4.5. Αποτύπωση έρευνας σε θεματικούς χάρτες -----	65
4.5.1. Τοπογραφία - Σημεία νερού -----	66
4.5.2. Γεωλογία - Υδρογεωλογία -----	66
4.5.3. Επανατροφοδότηση -----	80
4.6. Γεωτρητική έρευνα – Προσδιορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων των υδροφόρων σχηματισμών -----	85
4.6.1. Προσδιορισμός μεταβιβατικότητας και υδροπερατότητας -----	86
4.6.2. Εξέλιξη αποκάρσωσης με το βάθος -----	89
4.7. Πηγή Αλμυρού – Υδρογεωλογικές παράμετροι -----	90
4.7.1. Υδρογεωλογικές παράμετροι της πηγής -----	91
4.7.2. Ημέρες "γλυκού νερού" -----	98

4.8. Υπερετήσια συμπεριφορά του υδροφορέα	102
4.8.1. Η υφαλμύρινη ως συνέπεια εκμετάλλευσης	103
4.8.2. Κατασκευή ισοπιεζομετρικών και ισοχλώριων χαρτών	104
4.8.3. Ερμηνεία ισοπιεζομετρικών καμπυλών	108
4.8.4. Ερμηνεία ισοχλώριων καμπυλών	113
4.8.5. Παρατηρήσεις – διαπιστώσεις από την ερμηνεία των χαρτών	120
4.9. Υδρομαστευτική στοά – Εκτίμηση υδρογεωλογικών παραμέτρων	123
5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΟ MODFLOW	135
5.1. Ο ρόλος της προσομοίωσης	135
5.2. Μαθηματική περιγραφή ομοιωμάτων επίλυσης	136
5.2.1. Γενίκευση του Νόμου του Darcy – Εξίσωση της υπόγειας ροής	136
5.2.2. Θεμελιώδης εξίσωση της ροής	141
5.3. Επίλυση μαθηματικού προτύπου	142
5.3.1. Αναλυτικές επιλύσεις	142
5.3.2. Αριθμητικές επιλύσεις	143
5.3.3. Το λογισμικό φύλλο του μοντέλου πεπερασμένων διαφορών	146
5.4. Εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών	147
5.4.1. Γενικά	147
5.4.2. Χαρακτηριστικά ομοιώματος ModFlow	148
5.5. Παράμετροι στρωμάτων	150
5.6. Συνοριακές συνθήκες	151
5.6.1. Τύποι συνοριακών συνθηκών	151
5.6.2. Καθορισμός συνοριακών συνθηκών	152
5.7. Το προφίλ του μοντέλου	153
5.8. Ιδιαιτερότητες προσομοίωσης μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής	153
5.8.1. Αρχικές συνθήκες	154
5.8.2. Συνοριακές συνθήκες	156
5.8.3. Διακριτοποίηση του χρόνου	157
5.9. Εκτέλεση μοντέλου και διαδικασία βαθμονόμησής του	160

5.9.1. Επιλογή κώδικα -----	160
5.9.2. Εισαγωγή στην διαδικασία εκτέλεσης -----	160
5.9.3. Κριτήρια σφάλματος -----	161
5.9.4. Διαδικασία βαθμονόμησης -----	163
5.10. Πρόβλεψη -----	175
5.11. Μοντελοποίηση σε κατακερματισμένους υδροφόρους σχηματισμούς ---	177
5.11.1. Ισοδύναμο πορώδες μέσο -----	179
5.11.2. Διακριτοποιημένες ρωγματώσεις -----	180
5.11.3. Διπλό πορώδες -----	181
5.11.4. Καρστικά συστήματα -----	181
5.12. Μηχανές επίλυσης ModFlow -----	183
5.12.1. Πακέτο προαπαιτούμενης συζυγούς βαθμίδας -----	183
5.12.2. Πακέτο διαδικασίας σταθερής συνεπαγωγής -----	184
5.12.3. Πακέτο επιτυχούς εκτόνωσης -----	184
5.12.4. Μηχανή επίλυσης WHS -----	185
6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΡΟΗΣ -----	189
6.1. Σχεδιασμός μοντέλων -----	189
6.1.1. Γενικές παραδοχές -----	189
6.1.2. Σχεδιασμός ανάγλυφου και υπόγειων στρωμάτων -----	191
6.1.3. Επιλογή χρονικού "παραθύρου" -----	197
6.1.4. Εισαγωγή υδρογεωλογικών παραμέτρων -----	198
6.1.5. Σχεδιασμός ζωνών επανατροφοδότησης -----	205
6.1.6. Εισαγωγή δεδομένων άντλησης -----	206
6.1.7. Εισαγωγή δεδομένων παρατήρησης -----	217
6.1.8. Σχεδιασμός συνοριακών συνθηκών ροής -----	218
6.1.9. Σχεδιασμός υδρομαστευτικής στοάς -----	227
6.2. Επίλυση μοντέλων – Έλεγχος βαθμονόμησης -----	232
6.2.1. Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής -----	232
6.2.2. Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής -----	234
6.2.3. Μοντέλα πρόβλεψης -----	238

6.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης	246
6.3.1. Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής	246
6.3.2. Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής	251
6.3.3. Μοντέλο πρόβλεψης – Σενάριο Α	263
6.3.4. Μοντέλο πρόβλεψης – Σενάριο Β	272
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	281
7.1. Συμπεράσματα	281
7.2. Προτάσεις	284
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	291

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μέρος Α (Συμπληρωματικά πληθυσμιακά στοιχεία)

Μέρος Β (Συμπληρωματικά στοιχεία σημείων νερού)

Μέρος Γ (Συμπληρωματικά τοπογραφικά και υδρολογικά στοιχεία)

Μέρος Δ (Συμπληρωματικά δεδομένα μοντελοποίησης)

Μέρος Ε (Συμπληρωματικά αποτελέσματα μοντελοποίησης)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υφάλμυρη καρστική πηγή Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης αποτελεί αντικείμενο επιστημονικών (και όχι μόνο) συζητήσεων για περισσότερο από 35 χρόνια. Το μεγάλο ενδιαφέρον από φορείς και επιστήμονες για τον υδροφόρο ορίζοντα που δίνει γένεση στην συγκεκριμένη πηγή οφείλεται στο επιβεβαιωμένο πια συμπέρασμα ότι είναι μερικά τουλάχιστο εκμεταλλεύσιμη.

Το μέγεθος και η σημασία του συγκεκριμένου υδροφορέα γίνονται εύκολα αντιληπτά αν αναλογισθεί κανείς ότι οι παροχές της πηγής φτάνουν τα 250 εκατ. m³ το χρόνο, ποσότητα η οποία θα μπορούσε θεωρητικά να υδρεύσει πόλη πλέον των 3,5 εκατ. κατοίκων.

1.1. Ιστορικό

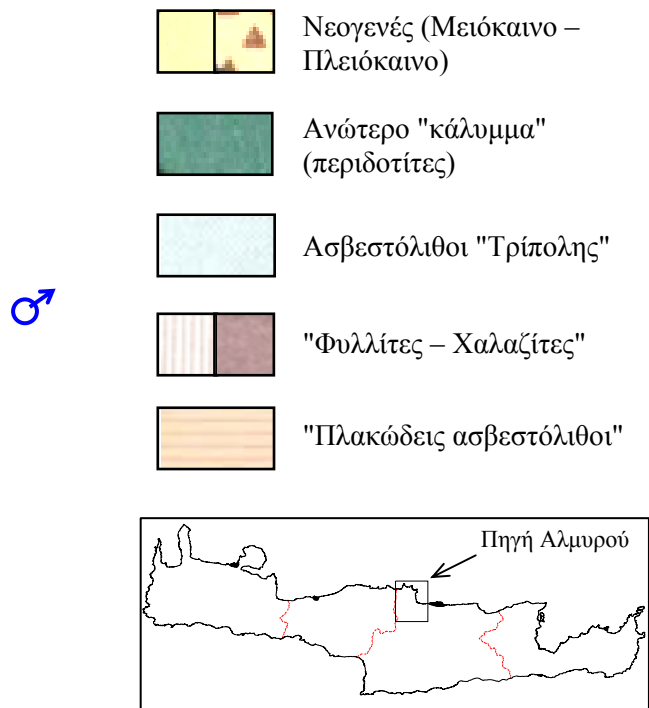
Η πηγή Αλμυρού βρίσκεται περί τα 8 km δυτικά της πόλης Ηρακλείου, στην περιοχή "Λινοπεράματα", σε υψόμετρο περί τα +2 m και απέχει 1.200 m περίπου από την ακτογραμμή του κόλπου Ηρακλείου (βλέπε **Σχήμα 1.1**). Σήμερα η πηγή, λόγω της κατασκευής ρυθμιστικού φράγματος, αναβλύζει σε κυμαινόμενο υψόμετρο από +3,5 μέχρι +6,7 m, σχηματίζοντας τεχνητή λίμνη επιφανείας μερικών στρεμμάτων.

Τα νερά πηγάζουν μέσα από ασβεστόλιθους – δολομίτες της γεωτεκτονικής υποζώνης "Τρίπολης", ακριβώς στο ορατό "ίχνος" μεγάλης μετάπτωσης, διεύθυνσης B → N, που φέρει σε άμεση επαφή "αλπικά" πετρώματα και ψαμμιτομάργες του Νεογενούς, στα "ριζά" του υψώματος Κέρης ^[164].

Η τροφοδοσία της πηγής γίνεται κύρια από τον ορεινό όγκο του Ψηλορείτη (Κνιθάκης – Καλούμενος, 1992) και οι παροχές της κυμαίνονται από 3,5 μέχρι και πλέον των 40 m³/sec, ενώ η αλμυρότητα του νερού κυμαίνεται από > 5.000 ppm Cl⁻ μέχρι πρακτικά τελείως "γλυκό" (< 100 ppm Cl⁻). Οι ημέρες κατά τις οποίες η συγκέντρωση ιόντων Cl⁻ είναι μικρότερη από 300 ppm ("ημέρες γλυκού νερού") υπολογίζονται κατά μέσο όρο σε 46,5 (0 για τα ξηρά έτη και μέχρι 78 ημέρες για τα πολύ υγρά έτη).



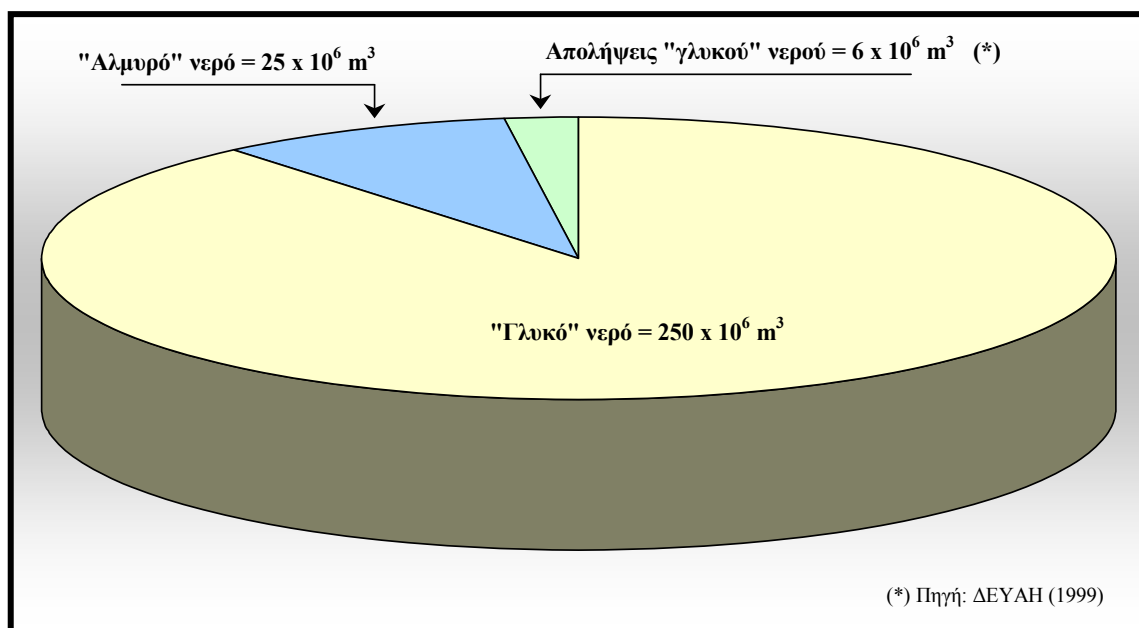
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΜΝΗΜΑ



Σχήμα 1.1: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Αλμυρού (απόσπασμα από γεωλογικό χάρτη Creutzburg, 1977, κλίμακα 1:200.000).

Κατά τη διάρκεια των "ημερών γλυκού νερού" οι παροχές της πηγής υπερβαίνουν τα $12 \text{ m}^3/\text{sec}$, αγγίζοντας το 1/4 περίπου της συνολικής ετήσιας παροχής ενός μέσου υδρολογικού έτους [164]. Η μέση ετήσια παροχή της πηγής είναι της τάξης των $275 \times 10^6 \text{ m}^3$, από τα οποία τα 250×10^6 αντιστοιχούν σε "γλυκό νερό" και τα $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ σε αλμυρό (= θαλασσινό) (βλέπε **Σχήμα 1.2**).

Οι εκροές της πηγής παραμένουν πρακτικά ανεκμετάλλευτες, αφού μέρος μόνο αυτών χρησιμοποιείται σαν ψυκτικό νερό από τον Θερμοηλεκτρικό Σταθμό της ΔΕΗ στα Λινοπεράματα. Κατά τα τελευταία 10 χρόνια, κύρια λόγω των γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΗ, του Δήμου και του ΤΟΕΒ Τυλίσου που έχουν εκτελεσθεί ανάντη των πηγών, υπάρχει πολύ μικρή εκμετάλλευση του υδροφορέα, συγκριτικά με τις δυνατότητές του. Συνολικά, οι ετήσιες απολήψεις δεν υπερβαίνουν τα $6 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Σχήμα 1.2: Μέση ετήσια κατανομή και απολήψεις υδρολογικού έτους 1998-99 νερών πηγής Αλμυρού.

Το 1964, το ΙΓΜΕ (τότε ΙΓΕΥ) σε συνεργασία με τον FAO και το Υπουργείο Γεωργίας ασχολούνται αναγνωριστικά με το πρόβλημα εκμετάλλευσης της πηγής και εισηγούνται την περαιτέρω συστηματική έρευνα ^[21]. Τελικά, διατυπώνουν την ιδέα της ενδεχόμενης κατασκευής ρυθμιστικού φράγματος για την τεχνητή ανύψωση της στάθμης της λίμνης στη θέση ανάβλυσσης της πηγής, μέχρι του υψομέτρου των +10 m περίπου. Με τον τρόπο αυτό, οι ερευνητές διέβλεπαν ότι θα ήταν δυνατόν να ελαττωθεί ή / και να εμποδιστεί η ανάμιξη του γλυκού με το αλμυρό νερό.

Αντίθετα, ερευνητές του ΙΓΜΕ, το 1969, σε συνεργασία με την εταιρεία Litton / Benelux, μετά από την εκτέλεση μερικά αποτυχημένου ειδικού πειράματος που παρακολουθήθηκε μέσα από δύο γεωτρήσεις δειγματοληψίας – παρατήρησης, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η πρόταση του ρυθμιστικού φράγματος δεν είναι η καλύτερη. Αντ' αυτής συνιστάται να εξετασθεί κατά προτεραιότητα το θέμα των γεωτρήσεων και η υδρομαστευτική στοά ανάντη της πηγής Αλμυρού.

Εν τω μεταξύ, στο πλαίσιο της συνεργασίας Υπουργείου Γεωργίας – FAO, κατασκευάζεται ρυθμιστικό φράγμα, το οποίο έχει την δυνατότητα τεχνητής ανύψωσης της στάθμης της λίμνης ανάβλυσσης της πηγής περί τα +10 m. Το φράγμα τίθεται σε πειραματική λειτουργία το υδρολογικό έτος 1978-79 και κύρια το έτος 1987. Οι

ερευνητές, στηριζόμενοι στις παρατηρήσεις του πειράματος και παρά τις σαφείς επιφυλάξεις τους, εστιάζουν την προτίμησή τους στην κατασκευή μόνιμου ρυθμιστικού φράγματος, το οποίο να μπορεί να ανεβάσει την στάθμη της λίμνης μέχρι του υψόμετρου των +30 m. Στο υψόμετρο αυτό εκτιμούν ότι το νερό που θα εκρέει από την πηγή θα είναι σταθερά "γλυκό".

Παράλληλα, κατά τη διάρκεια των δεκαετιών '70 και '80, είχαν επιχειρηθεί από άλλους ενδιαφερόμενους φορείς (AGRIDEV, GEMEE, TOEB, ΙΓΜΕ κ.ά.) ερευνητικές γεωτρήσεις σε διάφορες θέσεις ανάντη της πηγής (Βουλισμένο Αλώνι, Λαγκάδα Αγίου Γεωργίου, Γωνιανό Φαράγγι κ.ά.). Οι γεωτρήσεις αυτές, άλλοτε για τεχνικούς λόγους ή έλλειψη τεχνικών μέσων και άλλοτε λόγω θέσεως, είχαν πρακτικά αποτύχει, παρ' ότι σε μερικές περιπτώσεις διαφαίνονταν θετικές ενδείξεις (γεώτρηση Δήμου και Συνδέσμου Τυλίσου, γεωτρήσεις GEMEE).

Πάντως, γεγονός είναι ότι σε ορισμένες ζώνες ανάντη της πηγής Αλμυρού υπάρχει εισροή θαλασσινού νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό που αναβλύζει από την πηγή να είναι υφάλμυρο και να είναι αδύνατη η απευθείας εκμετάλλευσή του. Η μοναδική περίπτωση να είναι εκμεταλλεύσιμο το νερό της πηγής είναι να "μαστευθεί" πριν αυτό φτάσει στις ζώνες υφαλμύρισης. Οι γεωτρήσεις αποτελούν την συνηθέστερη και πλέον εύκολα εφαρμόσιμη μέθοδο υδρομάστευσης.

Έτσι, από το 1987 η ΔΕΥΑΗ ξεκινάει γεωτρητικό πρόγραμμα στις επαρχίες Μαλεβιζίου και Τεμένους και ειδικότερα στις περιοχές Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού, Κέρης, Λουτρακίου, Κρουσώνα, Αγίου Μύρωνα, Γιούχτα κ.ά. Εκτελέσθηκαν, σε διαδοχικά στάδια, πάνω από 50 γεωτρήσεις, οι τελευταίες από τις οποίες βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη (δεν έχουν εισαχθεί στο δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Ηρακλείου).

Η έρευνα άρχισε αυτοδύναμα από τη ΔΕΥΑΗ (με επικεφαλής τον κ. Π. Σοφίου) και ακολούθησε συνεργασία με ιδιώτη σύμβουλο – μελετητή (κ. Κ. Μπεζές), ο οποίος αναλαμβάνει έρευνα με γεωτρήσεις στις περιοχές Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού και Κέρης. Από την έρευνα αυτή επιβεβαιώνονται οι προηγούμενες μεμονωμένες ενδείξεις και η πρόταση των Μονόπωλη – Μάστορη (1969), η οποία έδινε προτεραιότητα στις γεωτρήσεις και απέβη "σωτήρια για την άμεση κάλυψη σημαντικού μέρους των υδρευτικών αναγκών του Δήμου Ηρακλείου" ^[167].

Από τα τέλη του 1992, η ΔΕΥΑΗ συνεργάζεται με το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (ερευνητικό έργο με τίτλο "Υδρευση Ηρακλείου: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού", εκτέλεση 1993-97). Η

συνεργασία αυτή έχει ως σκοπό την συνέχιση του προγράμματος γεωτρήσεων και σε άλλες καρστικές υδατοπιθανές περιοχές των Επαρχιών Μαλεβιζίου και Τεμένους (Λουτράκι, Κρουσώνας, Άγιος Μύρωνας, Σάρχος, Γιούχτας κ.λπ.).

Η μακροχρόνια παρακολούθηση της ποιότητας του νερού των γεωτρήσεων στα πεδία Τυλίσου και Κέρης, τα οποία είναι τα πλέον ευάλωτα στην υφαλμύριση, έδειξε ότι υπάρχουν ζώνες οι οποίες "ανθίστανται" στην θαλάσσια ρύπανση και αυτό ακριβώς το γεγονός καθιστά τις εν λόγω περιοχές κατάλληλες για να φιλοξενήσουν και άλλου τύπου υδρομαστευτικά έργα. Έτσι, το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε συνεργασία πάντα με τη ΔΕΥΑΗ, πρότεινε την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς.

Αναλυτικότερα, με την παραπάνω συνεργασία, δόθηκε η ευκαιρία στην ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης να συλλέξει δεδομένα που αφορούν στα τελευταία 35 περίπου χρόνια, των οποίων το πλήθος υπερβαίνει τις 40.000 καταγραφές. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν μετρήσεις στάθμης της λίμνης της πηγής Αλμυρού, ποιότητα νερού (αγωγιμότητα και συγκέντρωση ιόντων Cl), παροχές της πηγής, στάθμες των ανάντη γεωτρήσεων (δυναμικές – ηρεμίας), παροχές αντλήσεων κ.λπ.

Οι καταγραφές καλύπτουν επίσης τις περιόδους των πειραμάτων των ΙΓΕΥ – Litton / Benelux (1968) και του Υπουργείου Γεωργίας – FAO (1977-87). Κύριες πηγές παροχής των δεδομένων ήταν η ΔΕΥΑΗ, το Υπουργείο Γεωργίας – ΠΔΕΒ (πρώην ΥΕΒ) και παλαιότερες δημοσιευμένες μελέτες.

Η μαθηματική ανάλυση και η συγκριτική μελέτη των στοιχείων, επιβεβαιώνει ή αμφισβητεί πολλές διαπιστώσεις και υποθέσεις προγενέστερων μελετητών (ΙΓΕΥ, Υπ. Γεωργίας – FAO κ.ά.). Τα συμπεράσματα, λόγω του απρόσωπου τρόπου επεξεργασίας, του μεγάλου πλήθους αλλά και της ποικίλης και μακροχρόνιας προέλευσης των δεδομένων, θα ήταν δυνατό να θεωρηθούν, με αυξημένη βεβαιότητα, ότι είναι αντικειμενικά και αναμφισβήτητα. Μερικά από αυτά τα συμπεράσματα τα οποία αναλύονται στην συνέχεια, είναι τα εξής ^[164]:

- (1) Οι τεχνητές αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης συνεπάγονται στατιστικά αντίρροπη μεταβολή στην παροχή και στη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου. Το φαινόμενο πιθανόν να προδικάζει ότι κατά την ξηρή περίοδο, η επιθυμητή ποιότητα δεν θα μπορεί να εξασφαλισθεί με ταυτόχρονη ικανοποιητική παροχή στην πηγή. Με βάση αυτή την υδρογεωλογική διαπίστωση, ανεξάρτητα από τα γεωτεχνικά, φυσιογραφικά και λειτουργικά προβλήματα που πρέπει να

αντιμετωπίσει το προτεινόμενο ρυθμιστικό φράγμα, κατά την κατασκευή του, αμφισβητείται βάσιμα η ικανοποιητική του απόδοση.

- (2) Όλες ανεξαιρέτως οι γεωτρήσεις (πλέον των 50), οι οποίες εξορύχθηκαν κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες από την ΔΕΥΑΗ και από τρίτους φορείς, μέσα σε ανθρακικά πετρώματα της ζώνης "Τρίπολης" και των "Πλακωδών ασβεστόλιθων" (επαρχίες Μαλεβιζίου και Τεμένους), έχουν δώσει ικανοποιητική υδροφορία περί το επίπεδο της θάλασσας. Πρόκειται, δηλαδή, για γενικευμένη υδροφορία του αλπικού καρστ, περί το φυσιογραφικό επίπεδο βάσης, η οποία, άλλοτε άμεσα και άλλοτε έμμεσα, βρίσκεται σε επικοινωνία με τη θάλασσα.
- (3) Ποιοτικά, μετά από πολυετείς και παρατεταμένες αντλήσεις παραγωγής, τα νερά των βορειοτέρων και πλέον παρακτίων γεωτρήσεων (πεδία Κέρης και Τυλίσου) είναι σε μερικές γεωτρήσεις και σε ποικίλο βαθμό, από γεώτρηση σε γεώτρηση, επηρεασμένα από τη θάλασσα, ενώ των νοτιότερων και πλέον ενδοχώριων, σταθερά "γλυκά".
- (4) Αναφορικά με το συντελεστή υδροπερατότητας (**k**), η μαθηματική ανάλυση δεν έδωσε αξιόπιστη σχέση με το βάθος (= πάχος υδροφορίας). Δηλαδή, για τα διατηρηθέντα βάθη, δεν διαπιστώθηκε αύξηση της αποκάρστωσης με το βάθος (συνδέοντας έμμεσα την **k** με τον βαθμό αποκάρστωσης). Η διαπίστωση αυτή επιτρέπει να θεωρηθεί ότι μία κατακόρυφη διάτρηση (π.χ. γεώτρηση) έχει ίσες πιθανότητες συνάντησης υδροφόρων καρστικών αγωγών με μία οριζόντια / υπο-οριζόντια διάτρηση (π.χ. υδρομαστευτική στοά), υπό την προϋπόθεση ότι και οι δύο εξορύσσονται μέσα στη ζώνη κορεσμού. Οι τιμές του συντελεστή περατότητας που συνηθέστερα υπολογίσθηκαν στις γεωτρήσεις της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος, κυμάνθηκαν σε τάξη μεγέθους $10^{-4} - 10^{-6}$ m/sec.
- (5) Η προτεινόμενη στοά, σε σχέση με την εξόρυξη στην ίδια περιοχή υδρογεωτρήσεων, οι οποίες θα έδιναν αθροιστικά ανάλογες ποσότητες νερού, ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες υποβάθμισης της ποιότητας του τοπικού υδροφορέα (υφαλμύριση).

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, επαναδιατυπώθηκε από την ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης η παλαιότερη πρόταση των Μονόπωλη – Μάστορη (1969), η οποία αφορά στην αξιοποίηση του υδροφόρου ορίζοντα που δίνει γένεση στην πηγή Αλμυρού. Η πρόταση αυτή μπορεί να συνοψιστεί στις παρακάτω φράσεις:

Εξόρυξη υδρομαστευτικής στοάς ανάντη των πηγών Αλμυρού και εκείθεν των ζωνών υφαλμύρισης. Η υδρομαστευτική στοά θα παίζει το ρόλο του συλλέκτη νερού. Στη συνέχεια, το νερό θα μεταφέρεται, με τη βοήθεια της βαρύτητας, σε συλλεκτήριο πηγάδι από το οποίο θα αντλείται.

1.2. Μεθοδολογία

Οι εργασίες που ακολουθήθηκαν για την ολοκλήρωση της διατριβής, είναι δυνατό να διακριθούν σε τρία στάδια:

Στο Α' στάδιο συγκεντρώθηκαν δεδομένα παραγωγής (μετρήσεις παροχής, στάθμης και ποιότητας, ιστορικό λειτουργίας γεωτρήσεων άντλησης) και παρατήρησης (μετρήσεις στάθμης και ποιότητας, ιστορικό λειτουργίας γεωτρήσεων παρατήρησης και στοιχεία πηγής Αλμυρού). Προκειμένου για την ολοκληρωμένη συγκέντρωση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω "Τεχνικά Τεύχη", τα οποία συντάχθηκαν κατά την διάρκεια εξόρυξης των γεωτρήσεων και της διαδικασίας των δοκιμαστικών αντλήσεων:

- Κ. Ευθυμίου (1988): "Γεωτρήσεις ΔΕΥΑΗ: Δ' και Ε' στάδια",
- Ε. Κουτεντάκης (1988–90): "Γεωτρήσεις ΔΕΥΑΗ: ΣΤ', Ζ' και Η' στάδια", και
- Ε. Κουτεντάκης (1991–97): "Έρευνα Υδροφορέων Β. Τμήματος Ν. Ηρακλείου: Θ', Ι', Κ', Λ', Μ', Ν', Ξ', Ο' και Π' στάδια".

Στο Β' στάδιο έγινε επί τόπου αναγνώριση των υφιστάμενων σημείων υδροληψίας (απογραφή – χαρτογράφηση), ενώ εξετάσθηκαν οι διάφορες εναλλακτικές προτάσεις που έχουν κατά καιρούς διατυπωθεί. Στο ίδιο στάδιο εργασιών συμπεριλαμβάνεται η ανάλυση των στοιχείων που συγκεντρώθηκαν (μετρήσεις στάθμης, παροχής και ποιότητας, συντεταγμένες γεωτρήσεων και πηγής κ.λπ.) και η παραγωγή νέων δεδομένων (χαρτογράφηση σημείων νερού, στοιχεία ροής υδρομαστευτικής στοάς κ.λπ.).

Το Γ' στάδιο της έρευνας (μοντελοποίηση) περιλαμβάνει την σύνθεση όλων των διαθέσιμων δεδομένων με την χρήση του προγράμματος προσομοίωσης ροής ModFlow (σε Η/Υ), προκειμένου να γίνει πρόβλεψη της κατάστασης ροής μετά και την λειτουργία της υποδεικνυόμενης υδρομαστευτικής στοάς.

2. ΥΔΡΕΥΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΗΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΑΙ **ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ**

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται να δοθεί εικόνα των σημερινών υδρευτικών αναγκών του Δήμου Ηρακλείου (στην νέα "Καποδιστριακή" του μορφή), αλλά και των βραχυχρόνιων μελλοντικών του αναγκών. Ως "έτος πρόβλεψης" ορίστηκε το 2010.

Επίσης, παρουσιάζεται η δυναμικότητα των σημερινών υδατικών πόρων που εκμεταλλεύεται η ΔΕΥΑΗ και εκτιμάται η δυναμικότητα και των προβλεπόμενων νέων υδατικών πόρων, μέχρι το έτος πρόβλεψης. Από την σύγκριση υδρευτικών αναγκών και δυναμιכוτήτων συνάγονται συμπεράσματα για την μελλοντική υδρευτική κατάσταση του δήμου (υδρευτικό έλλειμμα ή πλεόνασμα).

2.1. Εκτίμηση υδρευτικών αναγκών πληθυσμού

Οι πραγματικές ανάγκες ύδρευσης ενός οικισμού είναι συνάρτηση της κλιματολογικής περιόδου, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των μόνιμων κατοίκων του και του αριθμού των εποχιακών (κυρίως θερινών) επισκεπτών του.

Βάσει μελετών της ΠΔΕΒ και της ΤΥΔΚ, οι σημερινές (2001) ημερήσιες καταναλώσεις υδρευτικού νερού ανά άτομο (συντελεστές ημερήσιας κατανάλωσης) στις διάφορες πληθυσμιακές ομάδες (καταναλωτές) του Δήμου Ηρακλείου φαίνονται στον **Πίνακα 2.1**. Στον ίδιο πίνακα εκτιμώνται οι τιμές των συντελεστών κατά τα έτη 2005 και 2010. Η εκτίμηση της μελλοντικής ημερήσιας κατανάλωσης έγινε παρακολουθώντας τους ρυθμούς μεταβολής των συντελεστών κατανάλωσης κατά τις προηγούμενες δεκαετίες και λαμβάνοντας υπόψη ότι το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων αυξάνει συνεχώς, άρα και οι ανάγκες τους σε υδρευτικό νερό.

Για να υπολογιστούν οι ανάγκες ύδρευσης του Δήμου Ηρακλείου πρέπει να είναι γνωστός ο πληθυσμός των καταναλωτών του. Ο μόνιμος πληθυσμός, σύμφωνα με την τελευταία απογραφή (26 Μαρτίου 2001) δίνεται στον **Πίνακα 2.2** (δεδομένα από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία, ΕΣΥΕ). Στον ίδιο πίνακα φαίνονται και οι πληθυσμοί με βάση τις απογραφές που εκτέλεσε η ΕΣΥΕ κατά τα προηγούμενα έτη, καθώς και οι ετήσιοι ρυθμοί μεταβολής αυτών, ανά δημοτικό (Δ.Δ.) ή κοινοτικό (Κ.Δ.) διαμέρισμα.

Πίνακας 2.1: Εκτίμηση συντελεστών ημερήσιας κατανάλωσης (lt/day) υδρευτικού

νερού στον Δήμο Ηρακλείου.

Πληθυσμιακές ομάδες	Έτος 2001		Έτος 2005		Έτος 2010	
	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Χειμώνας	Καλοκαίρι
Μόνιμοι και εποχιακοί κάτοικοι πόλης	160	200	170	210	180	220
Επισκέπτες πόλης (τουρίστες)	160	250	170	260	180	270
Μόνιμοι κάτοικοι περιστατικών χωριών	150	260	160	270	170	280
Εποχιακοί κάτοικοι και επισκέπτες χωριών	150	180	160	190	170	200

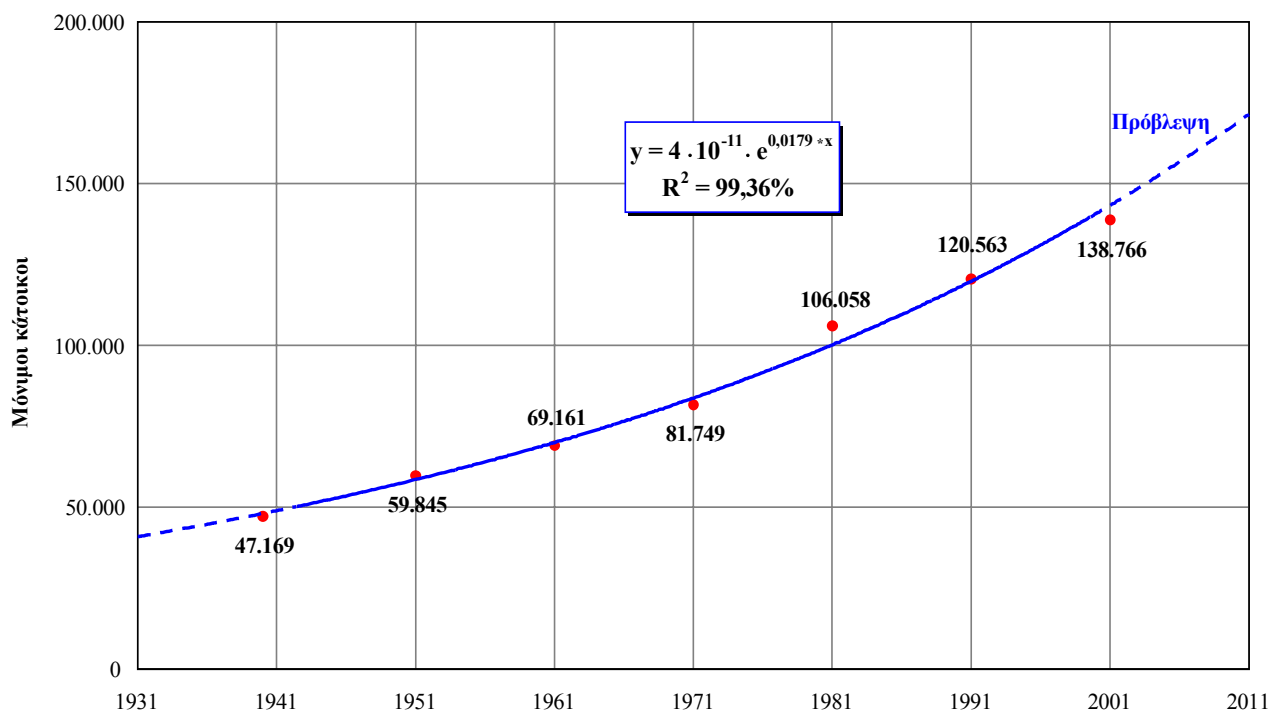
(*) "Χειμώνας": Νοέμβριος – Μάρτιος (5 μήνες). "Καλοκαίρι": Απρίλιος – Οκτώβριος (7 μήνες).

Πίνακας 2.2: Μόνιμοι κάτοικοι και μεταβολές πληθυσμών στον Δήμο Ηρακλείου.

Διοικητικό διαμέρισμα	Μόνιμος πληθυσμός						
	1940	1951	1961	1971	1981	1991	2001
Δ.Δ. Ηρακλείου	42.557	55.373	64.337	78209	102.398	116.178	—
Κ.Δ. Βουτών	803	786	908	609	618	1.049	—
Κ.Δ. Δαφνών	1.344	1.360	1.585	1.131	1.236	1.352	—
Κ.Δ. Σκαλανίου	968	839	852	723	760	792	—
Κ.Δ. Σταυρακίων	911	902	897	658	622	639	—
Κ.Δ. Βασιλειών	586	585	582	419	424	553	—
ΣΥΝΟΛΟ	47.169	59.845	69.161	81.749	106.058	120.563	138.766
Διοικητικό διαμέρισμα	Ετήσιος ρυθμός μεταβολής (%)						
	...1940	1940-51	1951-61	1961-71	1971-81	1981-91	1991-01
Δ.Δ. Ηρακλείου	—	+2,42	+1,51	+1,97	+2,73	+1,27	—
Κ.Δ. Βουτών	—	-0,19	+1,45	-3,92	+0,15	+5,43	—
Κ.Δ. Δαφνών	—	+0,11	+1,54	-3,32	+0,89	+0,90	—
Κ.Δ. Σκαλανίου	—	-1,29	+0,15	-1,63	+0,50	+0,41	—
Κ.Δ. Σταυρακίων	—	-0,09	-0,06	-3,05	-0,56	+0,27	—
Κ.Δ. Βασιλειών	—	-0,02	-0,05	-3,23	+0,12	+2,69	—
ΣΥΝΟΛΟ	—	+2,19	+1,46	+1,69	+2,64	+1,29	+1,42

(*) Κατά την συγγραφή της διατριβής δεν διατίθονταν (από την ΕΣΥΕ) αναλυτικά στοιχεία για το έτος 2001.

Αναπαριστώντας σε διάγραμμα τα στοιχεία του τελευταίου πίνακα (**Σχήμα 2.1**) προκύπτει εκθετική καμπύλη, με βάση την οποία γίνεται εκτίμηση της πληθυσμιακής εξέλιξης του μόνιμου πληθυσμού μέχρι και το έτος 2010. Όμοια, παραστάθηκαν και οι εκθετικές καμπύλες κάθε διοικητικού διαμερίσματος του Δήμου Ηρακλείου ξεχωριστά (**Σχήματα Α.1** έως και **Α.6** στο Παράρτημα – Μέρος Α).



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη μόνιμου πληθυσμού Δήμου Ηρακλείου.

Συνεκτιμώντας τα δεδομένα για διάφορες πληθυσμιακές ομάδες που δεν βρίσκονται συνέχεια εντός των ορίων του Δήμου (φοιτητές, τουρίστες κ.λπ.) προέκυψε ο **Πίνακας 2.3**. Σ' αυτόν παρουσιάζεται εκτίμηση του "συνολικού πληθυσμού" των καταναλωτών υδρευτικού νερού στον Δήμο Ηρακλείου. Ο συνολικός πληθυσμός μεταβάλλεται εποχιακά, καθώς περιλαμβάνει εκτός από τους μόνιμους κατοίκους, ευμετάβλητες πληθυσμιακές ομάδες με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Με συνδυασμό των Πινάκων 2.1 και 2.3 κατασκευάστηκε ο **Πίνακας 2.4**, ο οποίος περιλαμβάνει τις εκτιμώμενες ημερήσιες υδρευτικές ανάγκες του πληθυσμού του Δήμου Ηρακλείου, μέχρι και το έτος πρόβλεψης (2010).

Πίνακας 2.3: Εκτίμηση "συνολικού πληθυσμού" καταναλωτών υδρευτικού νερού στον Δήμο Ηρακλείου.

Διοικητικό διαμέρισμα	Χειμώνας ⁽¹⁾			Καλοκαίρι ⁽²⁾		
	2001	2005	2010	2001	2005	2010
Δ.Δ. Ηρακλείου	143.806	159.799	174.653	179.007	196.523	212.792
Κ.Δ. Βουτών	1.331	1.524	1.733	1.458	1.670	1.898
Κ.Δ. Δαφνέ	1.662	1.771	1.834	1.820	1.939	2.008
Κ.Δ. Σκαλανίου	922	967	979	1.010	1.059	1.072
Κ.Δ. Σταυρακίων	672	702	703	736	769	770
Κ.Δ. Βασιλειών	611	667	707	670	730	775
ΣΥΝΟΛΟ	149.004	165.429	180.609	184.701	202.690	219.315

(1) "Συνολικός πληθυσμός" = Μόνιμος πληθυσμός + Τουρισμός (= 3.300 άτομα) + Διακινούμενος πληθυσμός (= 5% μόνιμου πληθυσμού).

(2) "Συνολικός πληθυσμός" = Μόνιμος πληθυσμός + Τουρισμός (= 26.400 άτομα) + Εσωτερικός τουρισμός (= 10% μόνιμου πληθυσμού) – Φοιτητές (= 1.280 άτομα) + Διακινούμενος πληθυσμός (= 5% μόνιμου πληθυσμού).

(*) Οι ομάδες "τουρισμός" και "φοιτητές" λήφθηκαν υπόψη μόνο στο Δ.Δ. Ηρακλείου. Η ομάδα "εσωτερικός τουρισμός" υφίσταται μόνο κατά την διάρκεια του καλοκαιριού.

Πίνακας 2.4: Εκτίμηση ημερήσιων αναγκών ύδρευσης Δήμου Ηρακλείου.

Διοικητικό διαμέρισμα	Κατανάλωση χειμώνα (m ³ /day)			Κατανάλωση καλοκαιριού (m ³ /day)		
	2001	2005	2010	2001	2005	2010
Δ.Δ. Ηρακλείου	23.009	27.166	31.438	37.121	42.590	48.134
Κ.Δ. Βουτών	200	244	295	364	433	512
Κ.Δ. Δαφνών	249	283	312	454	503	541
Κ.Δ. Σκαλανίου	138	155	166	252	275	289
Κ.Δ. Σταυρακίων	101	112	120	184	200	208
Κ.Δ. Βασιλειών	92	107	120	167	189	209
ΣΥΝΟΛΟ	23.789	28.067	32.450	38.542	44.191	49.893

(*) Οι ομάδες "εσωτερικός τουρισμός" και "διακινούμενος πληθυσμός" θεωρήθηκαν ως "εποχιακοί κάτοικοι πόλης" ή "επισκέπτες χωριών", ενώ η ομάδα "φοιτητές" θεωρήθηκε "μόνιμοι κάτοικοι πόλης" (βλέπε Πίνακες 2.1 και 2.3).

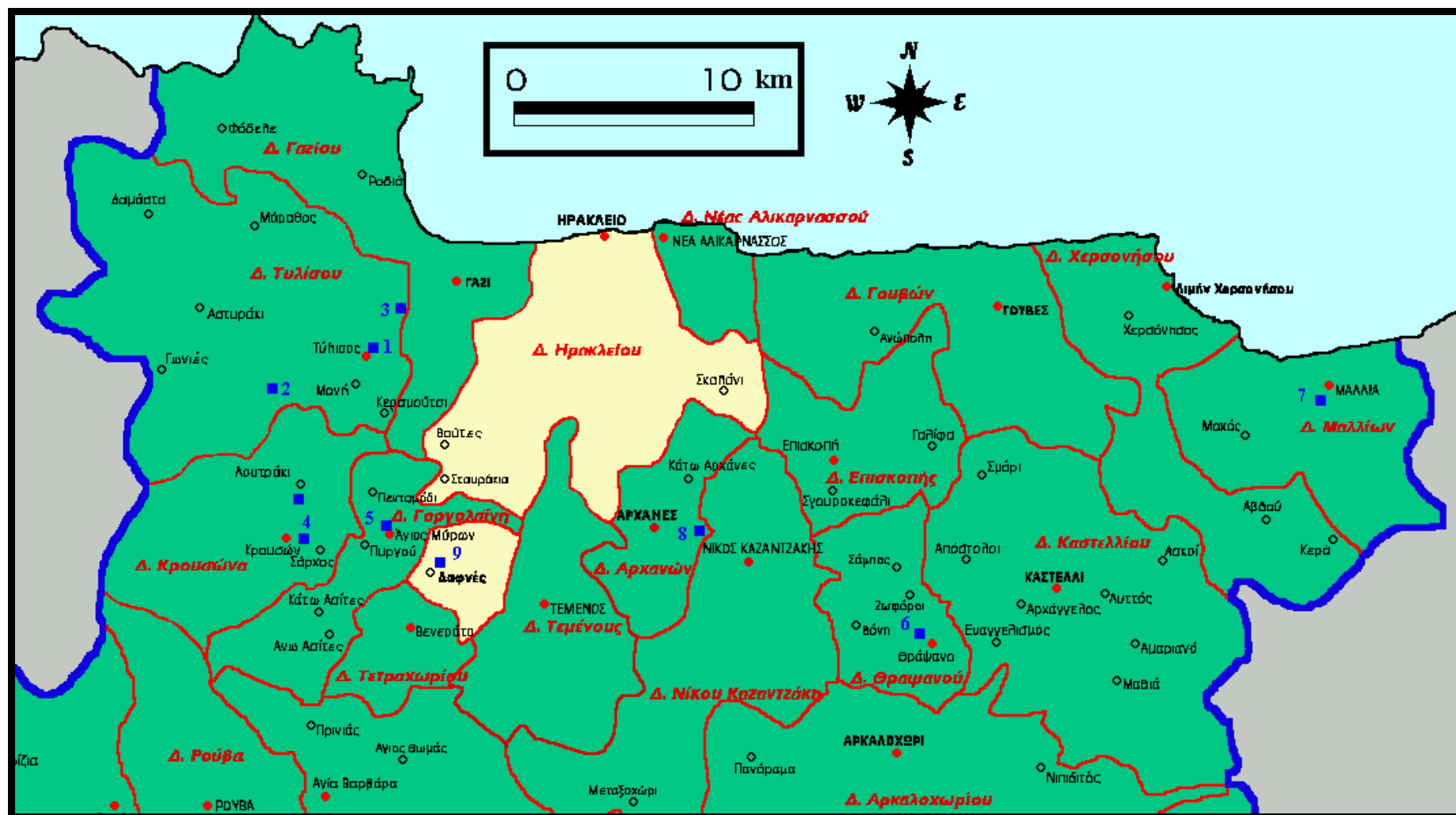
2.2. Δυναμικό σημείων υδροληψίας

Σύμφωνα με τα στοιχεία που έχει παραχωρήσει η ΔΕΥΑΗ και αφορούν μέχρι και το έτος 2000, αλλά και εκτιμήσεις για την μελλοντική απόδοση των υφιστάμενων παραγωγικών γεωτρήσεων (από συζητήσεις με τα στελέχη της επιχείρησης), οι απολήψεις από τα διάφορα πεδία εκμετάλλευσης, μέχρι και το έτος 2010, διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2.5**. Στον πίνακα παρουσιάζονται όλα τα γεωτρητικά πεδία, ακόμα και εκείνα που προβλέπεται να εισαχθούν μελλοντικά στο υδρευτικό δίκτυο του Δήμου Ηρακλείου. Για τα τελευταία, μόνο εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν για το πότε (και αν) θα εισαχθούν στο δίκτυο.

Στο **Σχήμα 2.2** παρατίθενται τα γεωγραφικά όρια του Δήμου Ηρακλείου, καθώς και οι θέσεις των σημαντικότερων από τα παραπάνω πεδία εκμετάλλευσης. Πρόκειται για τα πεδία "Τυλίσου" (1), "Γωνιανού Φαραγγιού" (2), "Κέρης" (3), "Κρουσώνα – Λουτρακίου" (4), "Αγίου Μύρωνα" (5), "Θραψανού" (6), "Μαλλίων" (7), "Γιούχτα" (8) και "Δαφνών" (9). Είναι αξιοπρόσεκτο ότι μόνο ένα πεδίο εκμετάλλευσης (Δαφνών) βρίσκεται εντός των ορίων του δήμου.

Πίνακας 2.5: Εκτίμηση δυναμικού γεωτρητικών πεδίων Δήμου Ηρακλείου.

Γεωτρητικά πεδία εκμετάλλευσης	Παροχή (m ³ /day)		
	2001	2005	2010
Πεδίο Τυλίσου (1)	4.946	4.946	4.946
Πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού (2)	1.625	1.625	1.625
Πεδίο Κέρης (3)	7.714	7.714	7.714
Πεδίο Κρουσώνα – Λουτρακίου (4)	0	7.260	7.260
Πεδίο Αγίου Μύρωνα (5)	2.400	6.000	6.000
Πεδίο Θραψανού (6)	2.880	1.440	720
Πεδίο Μαλλίων (7)	9.600	9.600	9.600
Πεδίο Γιούχτα (8)	0	4.800	4.800
Πεδίο Δαφνών (9)	0	0	2.400
Λοιπές γεωτρήσεις, πηγές κ.λπ.	5.000	5.000	5.000
ΣΥΝΟΛΟ	34.165	48.385	50.065



Σχήμα 2.2: Χάρτης με τα διοικητικά όρια και τα σημαντικότερα πεδία εκμετάλλευσης του Δήμου Ηρακλείου.

2.3. Αξιολόγηση υδρευτικής κατάστασης

Προκειμένου να εκτιμηθεί η μελλοντικά απαιτούμενη τροφοδοσία των δικτύων ύδρευσης του Δήμου Ηρακλείου, χρησιμοποιήθηκαν ως βάση οι σχέσεις:

$$T_A = \Pi + A \quad (2.1)$$

$$A = \alpha \cdot T_A \quad (2.2)$$

$$T_A = \frac{\Pi}{1 - \alpha} \quad (2.3)$$

όπου, T_A απαιτούμενη τροφοδοσία δικτύων ύδρευσης (m^3/day),

Π υδρευτικές ανάγκες πληθυσμού (m^3/day),

A απώλειες δικτύων ύδρευσης (m^3/day), και

α ποσοστό (%) των απωλειών, ως προς την απαιτούμενη τροφοδοσία των δικτύων ύδρευσης.

Σύμφωνα με την ΔΕΥΑΗ, το υδρολογικό έτος 1995-96 οι απώλειες στα δίκτυα ύδρευσης ανέρχονταν σε περίπου 40% της απαιτούμενης τροφοδοσίας τους. Οι απώλειες αυτές υπολογίσθηκαν για τους χειμερινούς μήνες, καθώς το καλοκαίρι οι συνεχείς διακοπές υδροδότησης δεν επιτρέπουν ασφαλή εκτίμηση.

Με την ίδια λογική, θεωρήθηκε ως χρονικό επίπεδο αναφοράς ο χειμώνας του έτους 2001, κατά τον οποίο θεωρητικά δεν σημειώθηκε ούτε έλλειμμα, ούτε πλεόνασμα νερού. Υποθέτοντας λοιπόν μηδενικό υδρευτικό ισοζύγιο για την συγκεκριμένη εποχή θα ισχύει:

$$T_{(X-01)} = T_{A(X-01)} \quad (2.4)$$

όπου, T τροφοδοσία (διαπιστωμένες απολήψεις = "δυναμικό") από τα σημεία υδροληψίας (m^3/day), και

$(X-01)$ δείκτης για τον χειμώνα του 2001.

Από τις σχέσεις 2.1, 2.2 και 2.4 προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$A_{(X-01)} = T_{(X-01)} - \Pi_{(X-01)} \quad (2.5)$$

$$\alpha_{(X-01)} = 1 - \frac{\Pi_{(X-01)}}{T_{(X-01)}} \quad (2.6)$$

Όπως προαναφέρθηκε, για το "καλοκαίρι" (Απρίλιος – Οκτώβριος) του 2001 δεν είναι δυνατό να υπολογισθούν απώλειες, καθώς υπήρξε έλλειμμα που αντιμετωπίστηκε με συνεχείς διακοπές υδροδότησης. Έτσι, θεωρήθηκε ότι το ποσοστό απωλειών (α) του "χειμώνα" (Νοέμβριος – Μάρτιος) αντιπροσωπεύει ολόκληρο το έτος (άρα και το καλοκαίρι), παρά το γεγονός ότι συνήθως οι αγωγοί μεταφοράς νερού κατά τους θερινούς μήνες βρίσκονται υπό μειωμένο φορτίο (μεγαλύτερη κατανάλωση) και συνεπώς παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες νερού. Θεωρήθηκε, δηλαδή, ότι:

$$A_{(X-01)} = A_{(\Theta-01)} = A_{(01)} \quad (2.7)$$

όπου, $(\Theta-01)$ δείκτης για το καλοκαίρι του 2001, και

(01) δείκτης για ολόκληρο το έτος 2001.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις και τα δεδομένα των Πινάκων 2.4 και 2.5 προκύπτει: $A_{(01)} = 34.165 - 23.789 \text{ m}^3/\text{day} = 10.376 \text{ m}^3/\text{day}$, ή $\alpha_{(01)} = 30,37\%$.

Παρατηρείται μείωση των απωλειών σε σχέση με το έτος 1996, η οποία πιθανόν να οφείλεται σε παρεμβάσεις της ΔΕΥΑΗ στους αγωγούς μεταφοράς νερού. Υποθέτοντας ότι αυτές οι παρεμβάσεις θα συνεχιστούν και μελλοντικά, θεωρήθηκε ότι το ποσοστό των απωλειών για τα έτη 2005 και 2010 θα μειωθεί στο 20%.

Ακολουθώντας λοιπόν την παραπάνω μεθοδολογία προέκυψε ο **Πίνακας 2.6**, στον οποίο δίδεται το "θεωρητικό" (εκτίμηση) υδρευτικό ισοζύγιο του Δήμου Ηρακλείου μέχρι και το έτος 2010.

Όπως φαίνεται στον πίνακα, η σημερινή ελλειμματική υδρευτική κατάσταση του δήμου δεν δύναται να ξεπεραστεί στα επόμενα έτη, παρά την προγραμματισμένη εισαγωγή στο δίκτυο ύδρευσης επιπλέον υδατικών πόρων (π.χ. πεδίο Κρουσώνα – Λουτρακίου).

Τα συμπεράσματα του Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται γραφικά στα **Σχήματα 2.3** και **2.4**. Στο Σχήμα 2.3 αναπαρίστανται οι δυνατές εισροές (T) και οι εποχιακά (χειμώνας – καλοκαίρι) κυμαινόμενες αναγκαίες εισροές (T_A) και απώλειες (A) στα δίκτυα ύδρευσης του Δήμου Ηρακλείου, όπως αυτά τα μεγέθη εκτιμήθηκαν μέχρι και το έτος 2010.

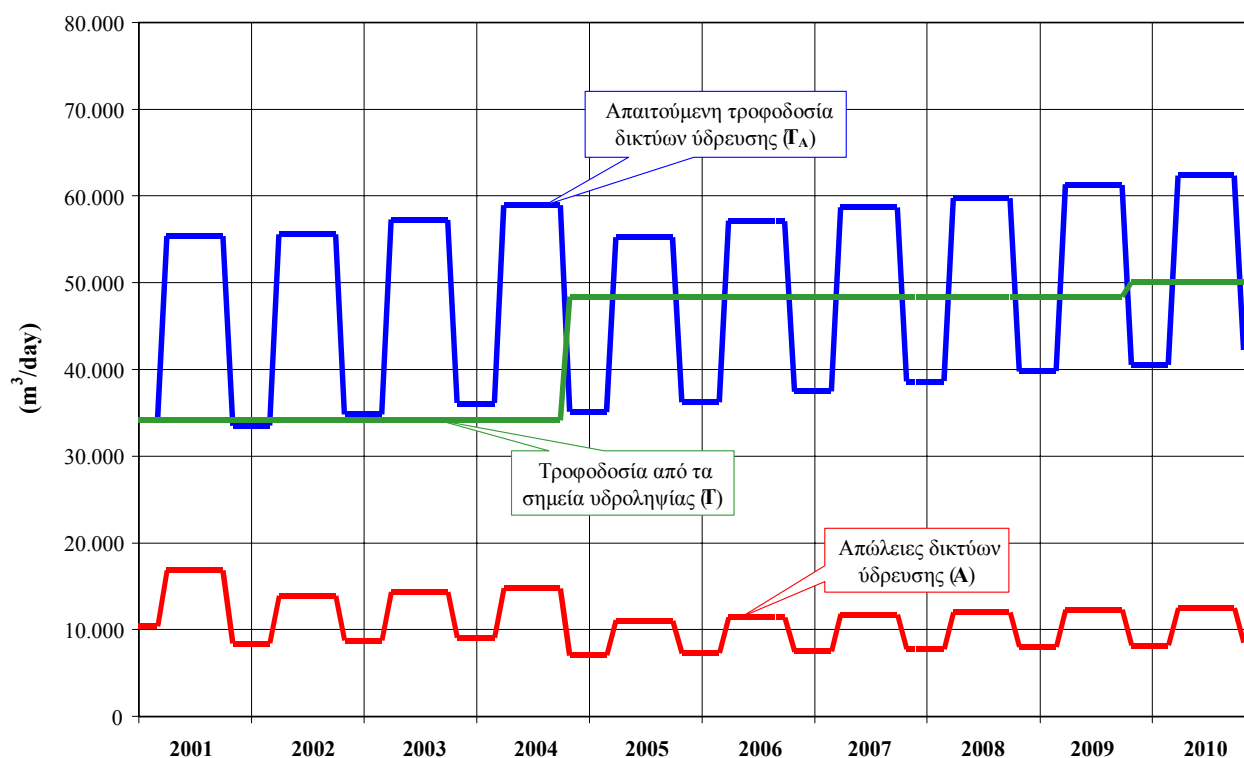
Στο δεύτερο σχήμα (Σχήμα 2.4) φαίνεται το εκτιμώμενο (θεωρητικό) υδρευτικό ισοζύγιο (έλλειμμα ή πλεόνασμα), για τα έτη 2005 και 2010.

Πίνακας 2.6: Θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο Δήμου Ηρακλείου, μέχρι και το έτος

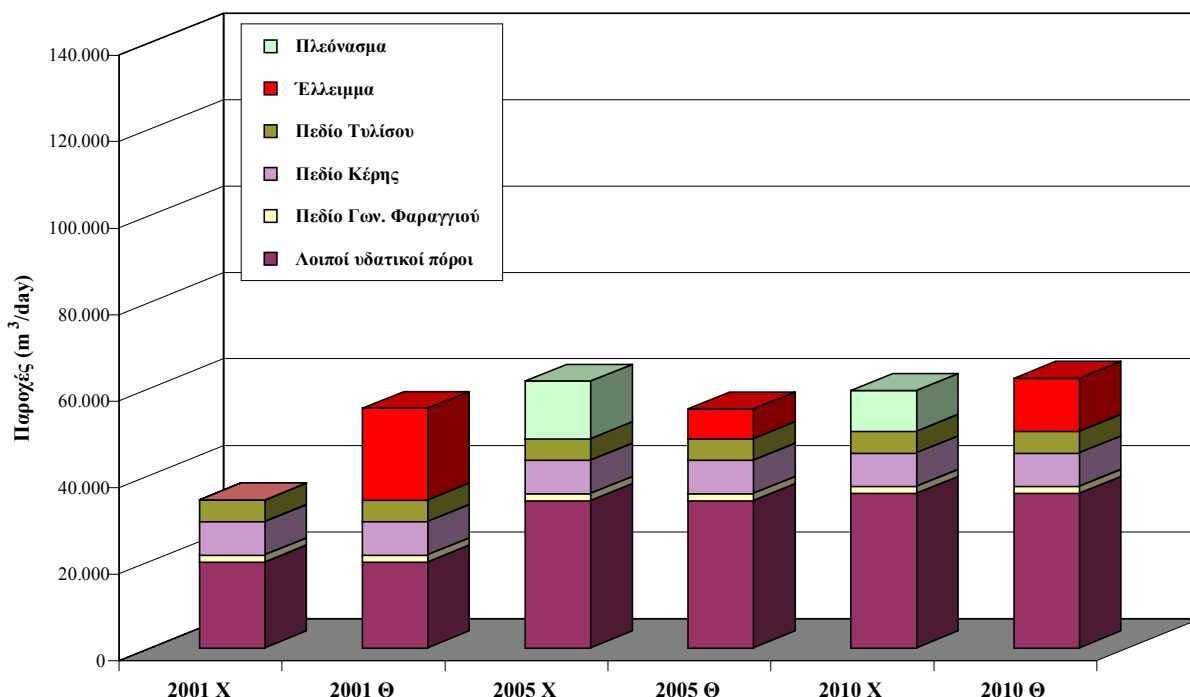
πρόβλεψης (2010).

"Χειμώνας" (Νοέμβριος – Μάρτιος)			"Καλοκαίρι" (Απρίλιος – Οκτώβριος)		
Τροφοδοσία, T (m ³ /day)	Απαιτήσεις, T _A (m ³ /day)	Ισοζύγιο (m ³ /day)	Τροφοδοσία, T (m ³ /day)	Απαιτήσεις, T _A (m ³ /day)	Ισοζύγιο (m ³ /day)
Έτος 2001					
34.165	34.165	0	34.165	55.353	-21.188
Έτος 2005					
48.385	35.084	+13.301	48.385	55.239	-6.854
Έτος 2010					
50.065	40.563	+9.503	50.065	62.366	-12.301

(*) T από τον Πίνακα 2.5. T_A από την σχέση 2.3, τον Πίνακα 2.4 και με απώλειες: α = 30,37% για το έτος 2001 και α = 20% για τα έτη 2005 και 2010. "Ισοζύγιο" = T – T_A.



Σχήμα 2.3: Δυνατές εισροές (Τροφοδοσία, T), αναγκαίες εισροές (T_A) και απώλειες (A) δικτύων ύδρευσης του Δήμου Ηρακλείου, μέχρι και το έτος 2010.



Σχήμα 2.4: Θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο Δήμου Ηρακλείου (X = "χειμώνας", Θ = "καλοκαίρι").

2.4. Προτάσεις αντιμετώπισης του υδρευτικού προβλήματος

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν διατυπωθεί πολλές προτάσεις αντιμετώπισης του υδρευτικού προβλήματος του Δήμου Ηρακλείου. Παρακάτω θα αναφερθούν επιγραμματικά μερικές από αυτές:

2.4.1. Περαιτέρω αξιοποίηση της γεωτρητικής έρευνας

Η πρόταση εξετάζει το ενδεχόμενο ένταξης νέων πεδίων εκμετάλλευσης στο δίκτυο ύδρευσης και ιδιαίτερα των πεδίων Κρουσώνα – Λουτρακίου και Αγίου Μύρωνα και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι θα υπάρξει ανακούφιση του δήμου, αλλά προσωρινή. Άλλωστε αυτό φαίνεται τόσο στον Πίνακα 2.5, όσο και στα Σχήματα 2.3 και 2.4, καθώς το υδρευτικό έλλειμμα αρχικά μειώνεται (2005), όμως στην συνέχεια αυξάνει (2010).

Επομένως, πρόκειται για λύση βραχυπρόθεσμη. Επέκταση της γεωτρητικής έρευνας σε υδατοπιθανές περιοχές που έχουν υποδειχθεί από την ερευνητική ομάδα

συνεργασίας ΔΕΥΑΗ και Πολυτεχνείου Κρήτης, πιθανόν να προσέφερε μακροπρόθεσμη αξιοποίηση του υδροφορέα [155].

2.4.2. Ανύψωση τεχνητού φράγματος στη λίμνη της πηγής Αλμυρού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (κεφ. 1, παρ. 1.1), η πηγή Αλμυρού αναβλύζει στον πυθμένα χοανοειδούς λίμνης. Στην κατάντη πλευρά της λίμνης υπήρχε υδατοφράκτης με σταθερό υπερχειλιστή. Σύμφωνα με πρόταση των FAO – ΠΔΕΒ, το υδρολογικό έτος 1976-77 έγινε ανύψωση του φράγματος με σκοπό να φτάσει η στάθμη της λίμνης τα +10 m και να βελτιωθεί η ποιότητα του νερού της πηγής, μέσω της αύξησης της πίεσης στους καρστικούς αγωγούς.

Τελικά, η πραγματοποίηση του εγχειρήματος, κατά τους ερευνητές, έφερε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς απέδειξε ότι η ποιότητα του νερού εξαρτάται από τη στάθμη της λίμνης. Πάντως, από διάφορους ερευνητές έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς αμφιβολίες για την αποτελεσματικότητα της πρότασης ανύψωσης τεχνητού φράγματος [152].

2.4.3. Απευθείας χρήση παροχών "γλυκού νερού" από την πηγή Αλμυρού

Η πηγή Αλμυρού κάποιες ημέρες του έτους παράγει "γλυκό νερό" (συγκέντρωση χλωριόντων μικρότερη και από 100 ppm). Οι ποσότητες νερού που παράγονται κατά τη διάρκεια αυτών των ημερών είναι αξιολογότες. Επιπροσθέτως, οι περίοδοι εκροής "γλυκού νερού" (ημέρες "γλυκού νερού") είναι προβλέψιμες και μπορούν να εκμεταλλευθούν απευθείας με την εγκατάσταση αγωγού μεταφοράς και δημιουργία έργων αποταμίευσης (φράγμα, λιμνοδεξαμενές κ.λπ.) [161].

Η τελευταία αυτή διαπίστωση επιβεβαιώνεται και σε ανάλογη διδακτορική διατριβή [2]. Στην εν λόγω εργασία αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο (πρόγραμμα SWIKAC) για την περιοχή της πηγής Αλμυρού, βάσει του οποίου είναι δυνατό να εντοπίζεται ο βαθμός διείσδυσης του αλμυρού νερού και η θέση της διεπιφάνειας μεταξύ θαλάσσιου και χερσαίου νερού, για τις διάφορες περιόδους του υδρολογικού έτους.

2.4.4. Κατασκευή υδατοταμιευτήρα στο ρέμα του Γαζανού ποταμού

Η πρόταση προσεγγίζει την προοπτική κατασκευής φράγματος, το οποίο θα αποδέχεται τόσο τα νερά της επιφανειακής απορροής, όσο και τις ποσότητες "γλυκού νερού" που αναβλύζουν από την πηγή Αλμυρού ^[158]. Το μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι ο συγκεκριμένος τρόπος αποθήκευσης του νερού θα οδηγήσει στην υποβάθμισή του.

2.4.5. Ενιαία διαχείριση υδατικών πόρων βορείου άξονα Ανατ. Κρήτης

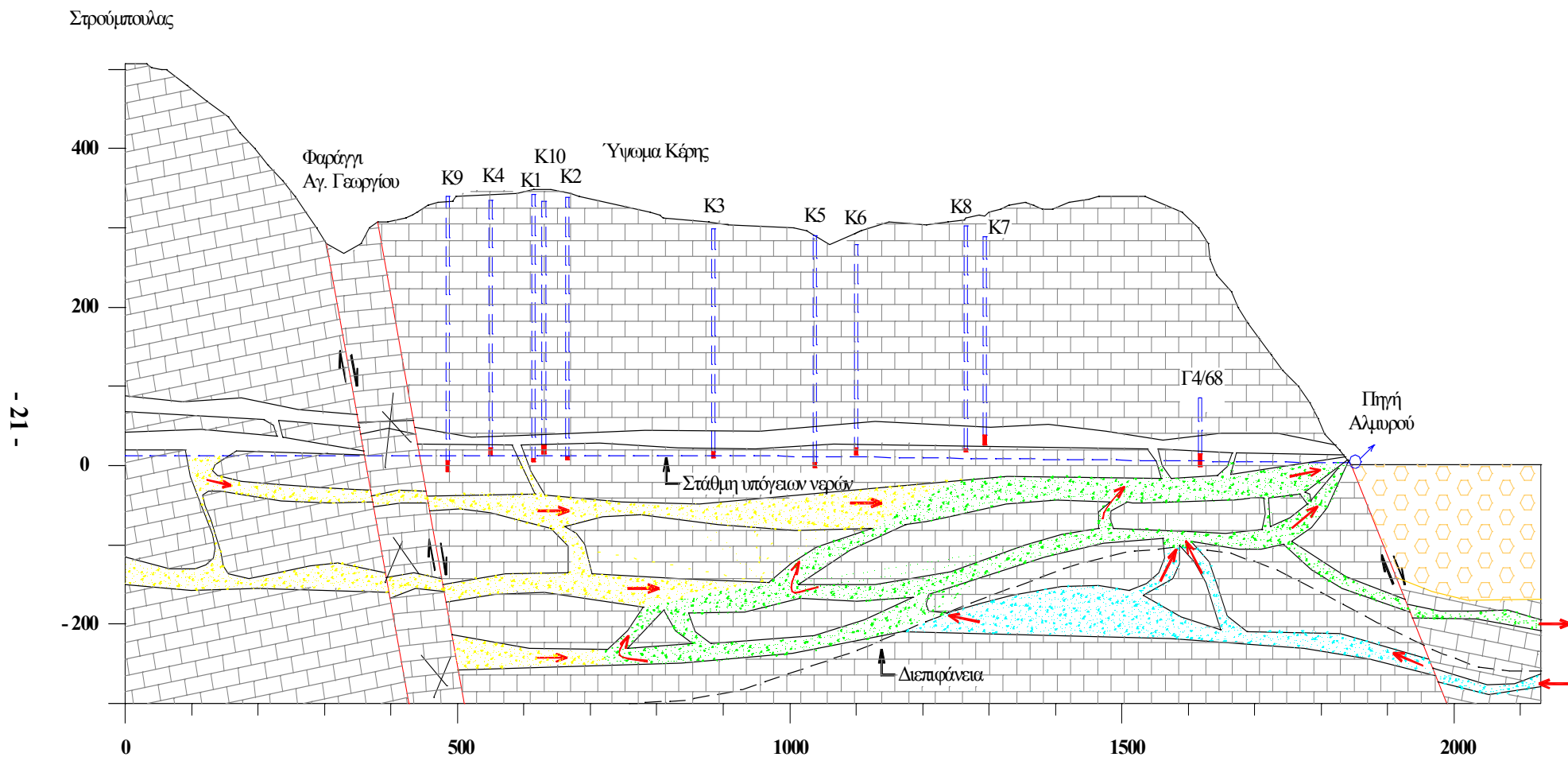
Προτείνεται η ενιαία διαχείριση των υδατικών πόρων όλων των δήμων του βορείου άξονα της Ανατολικής Κρήτης μέσω δικτύου αγωγών. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στην ανάμιξη νερών διαφορετικής ποιότητας.

2.4.6. Κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς

Η ιδέα αυτή διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1969 ^[145]. Οι ερευνητές της πρότασης διαπίστωσαν ότι η κατασκευή ενός τέτοιου έργου ανάντη της πηγής Αλμυρού (ευρύτερη περιοχή Κέρης), θα μπορούσε να δώσει μεγάλες παροχές πόσιμου νερού χωρίς άντληση (με βαρύτητα).

Η σημαντικότερη υδροφορία των ασβεστόλιθων "Τριπόλεως" (γεωτεκτονική ζώνη "Γαβρόβου – Τριπόλεως") στηρίζεται στην δημιουργία καρστικών αγωγών, μέσω των οποίων το νερό κινείται με μεγάλη ευκολία. Μία υπο-οριζόντια υδρομαστευτική στοά θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί τους καρστικούς αγωγούς "γλυκού νερού", σε αντίθεση με τις γεωτρήσεις, στις οποίες υπάρχει μεγάλη πιθανότητα διάτρησης καρστικού αγωγού "υφάλμυρου νερού".

Τα παραπάνω είναι ευκολότερο να κατανοηθούν στο **Σχήμα 2.5**, στο οποίο δίνεται σχηματική τομή διεύθυνσης ΔΝΔ → ΑΒΑ που διέρχεται από το ύψωμα Στρούμπουλα, τη λαγκάδα Αγίου Γεωργίου, το λόφο Κέρης και την πηγή Αλμυρού. Η τομή του σχήματος αποδίδει υπό κλίμακα την γεωλογία και υδρογεωλογία της περιοχής και εμπλουτίζεται με υποθετικό (σχηματικό) δίκτυο καρστικών αγωγών, μέσα στους οποίους αναπτύσσονται διάφορες υδροδυναμικές σχέσεις που γεωγραφικά και τοπολογικά συμφωνούν με τα μέχρι σήμερα ευρήματα της συστηματικής έρευνας.



Σχήμα 2.5: Σχηματική γεωλογική – υδρογεωλογική τομή περιοχής Αλμυρού (βελτιωμένη απόδοση του Σχ. 8-1 των Μονόπωλη – Μάστορη, 1969) ^[164]. (Υπόμνημα στην σελ. 25).

Τα "κανάλια προνομιακής ροής" του νερού είναι σχεδιασμένα αυθαίρετα και φυσικά όχι στις πραγματικές τους διαστάσεις, αφού κάτι τέτοιο θα τα έκανε μη ορατά σε γεωλογική τομή. Το σκίτσο αυτό, γιατί για τέτοιο πρόκειται, δεν έχει ως σκοπό να δώσει τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στον υδροφορέα που τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού, αλλά να περιγράψει τον μηχανισμό υφαλμύρινσής του.

Στο **Σχήμα 2.6** αποδίδεται σχηματικά το προτεινόμενο υδρομαστευτικό έργο, το οποίο θα περιλαμβάνει, όσον αφορά τα βασικά τεχνικά του μέρη ^[164]:

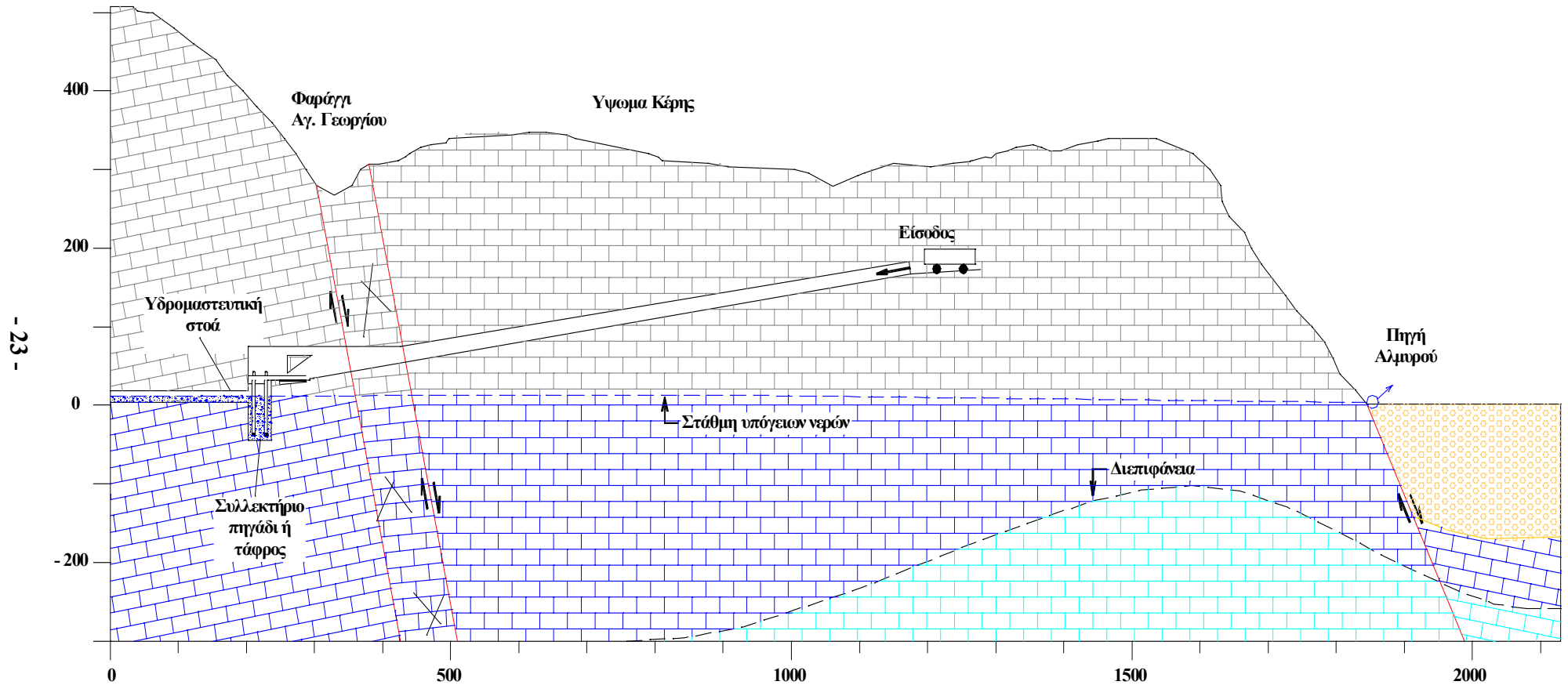
- (α) Κεκλιμένη στοά προσπέλασης (φυρές) συνολικού μήκους 1 – 1,2 km, της οποίας η είσοδος θα είναι στο νότιο πρानές του λόφου της Κέρης (φαράγγι Αγίου Γεωργίου), θα έχει διάμετρο περίπου 6 m και μέση κλίση < 12%. Η στοά θα είναι επισκέψιμη από προσωπικό και βαρέα οχήματα (γεωτρύπανα, εκσκαπτικά, γερανοφόρα κ.ο.κ.), υποστυλωμένη – επενδυμένη.
- (β) Συλλεκτήριο πηγάδι βάθους 25 – 30 m, διαμέτρου 2,5 – 4 m και θάλαμο αντλιοστασίου διαμέτρου περίπου 6 m με υποστύλωση – επένδυση οροφής και τοιχωμάτων.
- (γ) Υπο-οριζόντια (κλίσεις περίπου 1‰) υδρομαστευτική στοά (adit = infiltration gallery) διαμέτρου 3 – 4 m, ανεπένδυτη, ελευθέρως ροής.

Στο **Σχήμα 2.7** δίδεται σχηματική τομή του υδρομαστευτικού έργου σε μεγέθυνση, προκειμένου να είναι δυνατό να διακριθούν οι τεχνικές προδιαγραφές του (τεχνικά μέρη) ^[164].

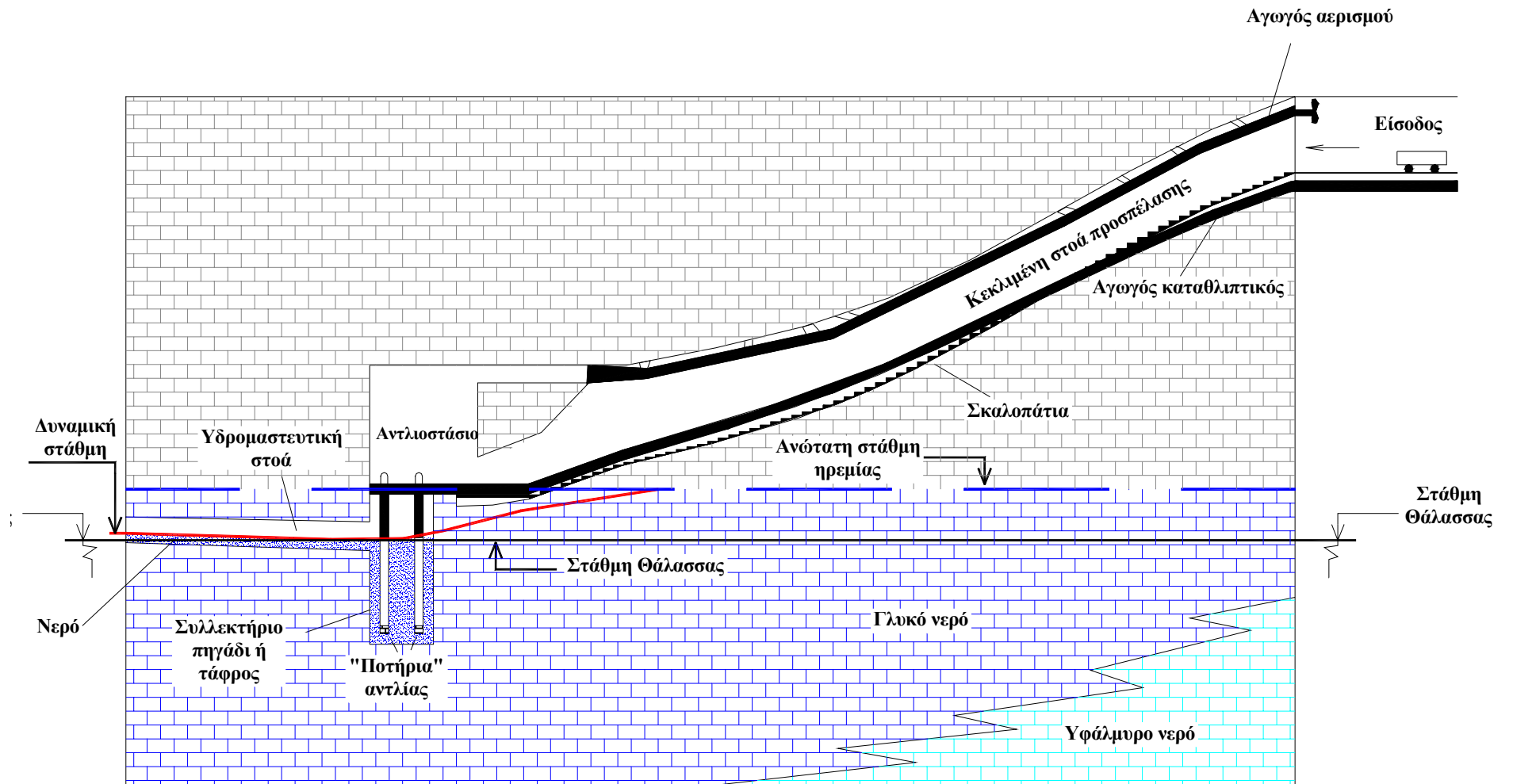
Το προτεινόμενο έργο, από τεχνικής άποψης, είναι ουσιαστικά εναλλακτική μορφή (μικρές παραλλαγές) του "αγωγού τύπου Maui", όπως αυτός εμφανίζεται στο Σχήμα 3.2 και περιγράφεται στο κεφ. 3, παρ. 3.2.3 που ακολουθεί.

Οι καταλληλότερες περιοχές για να φιλοξενήσουν την υδρομαστευτική στοά με τα επιμέρους τεχνικά μέρη της εντοπίστηκαν σε διάφορες θέσεις μεταξύ Γωνιανού Φαραγγιού και υψώματος Στρούμπουλα, δυτικά από την Τύλισο και στην λαγκάδα Αγίου Γεωργίου, δυτικά από τον λόφο της Κέρης. Η επιλογή των θέσεων έγινε με βάση κυρίως οικονομοτεχνικά κριτήρια, αλλά και λόγω της επάρκειας στοιχείων (μετρήσεις στάθμης, παροχής κ.λπ.) από τις εκεί υδρογεωτρήσεις.

Στρούμπουλας

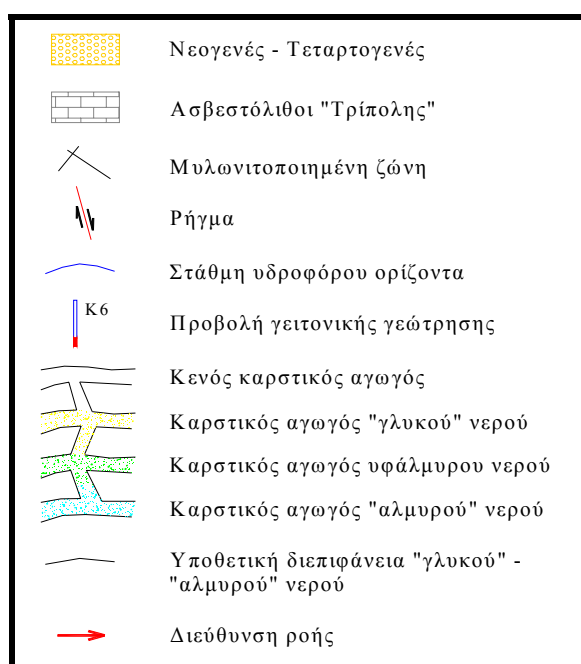


Σχήμα 2.6: Σχηματική τομή υδρομαστευτικού έργου ^[164]. (Υπόμνημα στην σελ. 25).



Σχήμα 2.7: Σχηματική τομή τεχνικών τμημάτων υδρομαστευτικού έργου ^[164]. (Υπόμνημα στην σελ. 25).

Υπόμνημα (Σχήματα 2.5, 2.6 και 2.7)

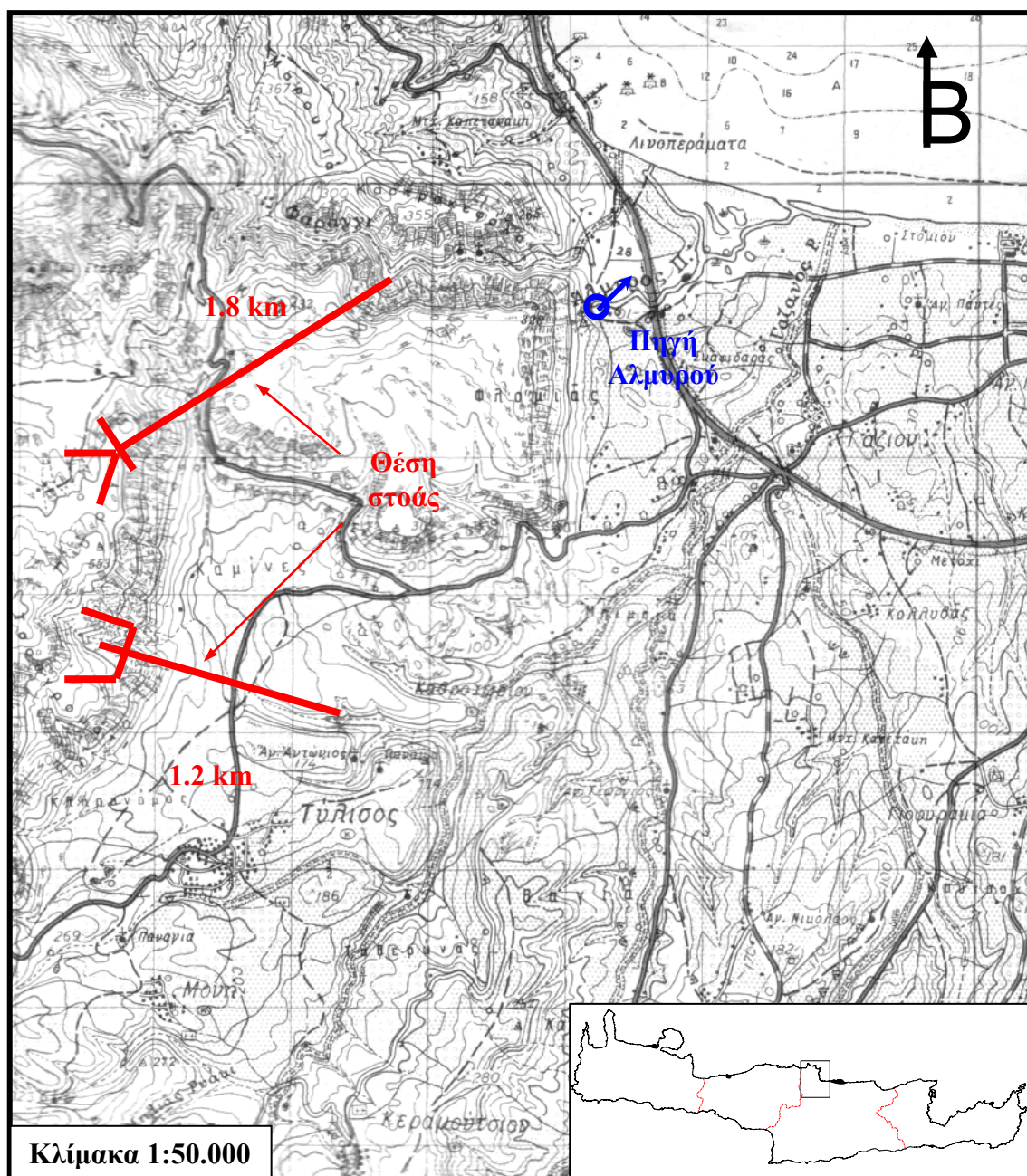


Στο **Σχήμα 2.8** δίνεται σε κάτοψη η γεωγραφική θέση του έργου που περιλαμβάνει (ενδεικτικά) δύο εναλλακτικές λύσεις ^[164].

- 1) Θέση δυτικά από το "Βουλισμένο Αλώνι", με προσπέλαση (είσοδο) από το φαράγγι Αγίου Γεωργίου Κέρης (υδρομαστευτική στοά μήκους 1,8 km), και
- 2) Θέση "Καμίνες", με προσπέλαση από το υδατόρευμα μεταξύ των οικισμών Τυλίσου και Καβροχωρίου (υδρομαστευτική στοά μήκους 1,2 km).

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης λύσης έναντι άλλων μεθόδων εκμετάλλευσης, έχουν ως εξής ^[164].

- Το νερό θα εισέρχεται στη στοά με ελεύθερη ροή και κατ' αυτό τον τρόπο δεν θα προκαλείται "αναστάτωση" στον υδροφορέα, όπως γίνεται π.χ. με τις γεωτρήσεις. Επίσης, λόγω διαμέτρου, η στοά θα έχει πολλαπλάσια απόδοση, σε σύγκριση με γεωτρήσεις αθροιστικού πάχους υδροφορέα ίσου με το μήκος της στοάς.
- Μειωμένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (προσωπικό, ανταλλακτικά, προμήθειες, οδοιπορικά κλπ.). Το κόστος συντήρησης, λειτουργίας και ελέγχου που απαιτείται για την υδρομαστευτική στοά είναι μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος ενός ισοδύναμου σε απόδοση δικτύου γεωτρήσεων.



Σχήμα 2.8: Γεωγραφική θέση (κάτοψη) υδρομαστευτικής στοάς [164].

- Άμεσος και πλέον αποτελεσματικός έλεγχος λειτουργίας, καθώς τόσο το αντλητικό συγκρότημα και ο μηχανολογικός εξοπλισμός, όσο και τα έργα υποδομής (δίκτυα μεταφοράς παροχών και οδικό δίκτυο), θα είναι συγκεντρωμένα σ' ένα ενιαίο χώρο.

- Τα ιστορικά δεδομένα και η διεθνής πρακτική αποδεικνύουν ότι ο χρόνος ζωής ενός τέτοιου έργου είναι πρακτικά απεριόριστος (βλέπε κεφ. 3), ενώ αντίθετα οι γεωτρήσεις, υπό τις καλύτερες προϋποθέσεις, είναι έργα ληξιπρόθεσμα.
- Το προτεινόμενο υδρομαστευτικό έργο, προκειμένου να καλύψει τις αυξημένες μελλοντικές υδρευτικές ανάγκες, μπορεί να επεκτείνεται σταδιακά (διακλάδωση της στοάς), χωρίς πρακτικά να διακόπτεται η λειτουργία του έργου και να προκαλούνται ανεπιθύμητες επιβαρύνσεις στον υδροφόρο ορίζοντα της πηγής.
- Μείωση των προβλημάτων καθαλάτωσης στο δίκτυα μεταφοράς και διανομής του υδρευτικού νερού. Θα ελαττωθούν σημαντικά οι φθορές που οφείλονται στις μεγάλες συγκεντρώσεις αλάτων.
- Μειωμένος κίνδυνος υφαλμύρινσης σε σχέση με γεωτρήσεις εγκατεστημένες στην περιοχή επίδρασης της στοάς (όπως προαναφέρθηκε στο κεφ. 1).
- Αποτελεσματικότερος έλεγχος της ανθρωπογενούς ρύπανσης.
- Δεν θα επηρεάσει αρνητικά την απόδοση οποιασδήποτε άλλης από τις κατά καιρούς προταθείσες λύσεις αξιοποίησης του υδροφορέα (ρυθμιστικό φράγμα στην πηγή Αλμυρού, γεωτρήσεις σε άλλες περιοχές κ.λπ.).

Στην συνέχεια της παρούσας διατριβής πραγματοποιείται αναλυτικότερη προσέγγιση της απόδοσης της προτεινόμενης κατασκευής, μέσω μοντελοποιητή. Στόχος είναι να δοθούν εναλλακτικοί σχεδιασμοί (σενάρια) για τις δύο προτεινόμενες θέσεις κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς, ώστε να αναδειχθεί ο βέλτιστος τρόπος αξιοποίησης του υδροφόρου ορίζοντα.

Η εργασία επιχειρεί πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης ροής στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως αυτή διαμορφώνεται από την λειτουργία της προτεινόμενης στοάς. Η πρόβλεψη αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω Η/Υ (βλέπε κεφ. 6), με το πρόγραμμα προσομοίωσης ροής ModFlow, το πιο δημοφιλές (εμπορικά) για προβλήματα τέτοιου είδους.

3. ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΕΣ ΣΤΟΕΣ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Οι υδρομαστευτικές στοές κατέχουν θέση μεταξύ των παλαιότερων τρόπων συλλογής νερού. Όμως, πιθανόν ως αποτέλεσμα της φαινομενικά απλής και συνηθισμένης εμφάνισής τους, λίγες τεχνικές πληροφορίες είναι δημοσιευμένες σχετικά με τους παράγοντες που ρυθμίζουν την παροχή και τις απαιτήσεις συντήρησής τους. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει το υπάρχον επίπεδο γνώσης και να δείξει ότι αυτό επιτρέπει ακριβέστερη αξιολόγηση των παραγόντων που αφορούν στα συγκεκριμένα έργα, απ' ό,τι γενικά εφαρμόζεται.

Η ιδέα της υδρομαστευτικής στοάς γεννήθηκε από την ανάγκη κάλυψης υδρευτικών αναγκών περιοχών που υπέφεραν από έλλειψη νερού. Η βασική λειτουργία της στοάς περιλαμβάνει την "παγίδευση" του νερού και την καθοδήγησή του, με μόνη κινητήρια δύναμη αυτή της βαρύτητας, στις κατοικημένες (υδρευόμενες) ή αρδευόμενες περιοχές.

Πλεονέκτημα των υδρομαστευτικών στοών, έναντι άλλων μεθόδων εκμετάλλευσης, είναι το γεγονός ότι δεν είναι αναγκαία η οποιαδήποτε κατανάλωση ανθρώπινης ή μηχανικής ενέργειας για την μεταφορά του νερού, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Αντίθετα, μειονέκτημα είναι η μη δυνατότητα ρύθμισης των επιθυμητών παροχών.

3.1. Παραδοσιακές υδρομαστευτικές στοές

3.1.1. Qanat

Στις ασιατικές χώρες συναντώνται εκατοντάδες υδρομαστευτικές στοές που η αρχή της κατασκευής τους χάνεται στα βάθη των αιώνων. Μία τέτοια χώρα είναι το Ιράκ, όπου συναντά κανείς δίκτυο αποστραγγιστικών στοών τα οποία ονομάζονται "qanats". Η παροχή των στοών αυτών ποικίλει, ανάλογα με την εποχή του χρόνου.

Τα qanats διανοίγονταν κυρίως μέσα σε μη συμπαγοποιημένους υδροφόρους ορίζοντες (αλλούβια). Αυτό επιβαλλόταν από το γεγονός ότι η όλη διαδικασία διάνοιξης τους γινόταν χειρωνακτικά, επομένως ήταν αδύνατο να διανοιχτούν σε βράχο. Η τεχνική διάνοιξης τους είναι απλή ^[7].

Καταρχήν εξορύσσεται πηγάδι, το οποίο ονομάζεται "μητρικό" και έχει σκοπό να καθορίσει το βάθος της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα. Το μητρικό πηγάδι εξορύσσεται σε περιοχή τοπογραφικά υψηλότερη από αυτήν που επιθυμείται να υδρευτεί ή να αρδευτεί. Το πηγάδι αυτό αποτελεί και την αρχή του qanat. Η υδρομαστευτική στοά "κόβει" τον υδροφόρο ορίζοντα και κατεβάζει το νερό σε χαμηλότερα τοπογραφικά σημεία.

Η διάνοιξη του qanat ξεκινά από το σημείο εξόδου του νερού και κατευθύνεται προς το μητρικό πηγάδι. Είναι μια εργασία εξαιρετικά δύσκολη και επικίνδυνη, καθώς οι εργάτες μπορεί να βρεθούν ανά πάσα στιγμή αντιμέτωποι με το νερό. Κατά τη γραμμή διάνοιξης της στοάς εξορύσσονται, κάθε 15 – 30 m, κάθετα κανάλια, τα οποία συνδέουν την επιφάνεια με την στοά.

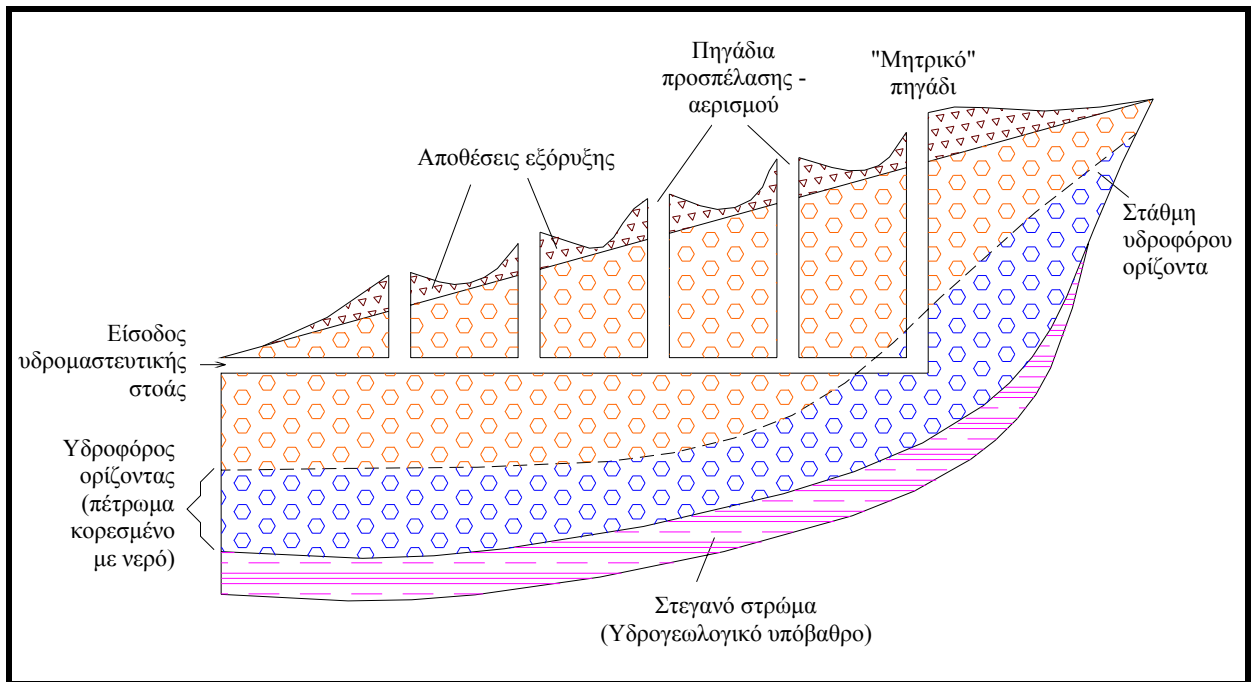
Οι εν λόγω κάθετες δίοδοι χρειάζονται, αφενός για να διευκολύνουν τον αερισμό και φωτισμό της στοάς και των εργατών, αφετέρου γιατί μέσω αυτών γίνεται η εναπόθεση στην επιφάνεια των όγκων χώματος που εξορύσσονται. Οι κάθετες δίοδοι χρησιμεύουν ακόμη και στη φάση λειτουργίας της στοάς, για να κάνουν πιο εύκολη την πρόσβαση σε διάφορα σημεία της στοάς, αν παραστεί ανάγκη ^[7].

Η μεταξύ αυτών των καναλιών απόσταση ποικίλει ανάλογα με την φύση του υδροφόρου ορίζοντα. Όσο λιγότερο συμπαγής είναι ένας υδροφόρος ορίζοντας, τόσο μικραίνει η οριζόντια απόσταση μεταξύ των κάθετων καναλιών.

Στο **Σχήμα 3.1** δίνεται σχηματική τομή ενός qanat. Σε αυτήν την τομή διακρίνονται η υδρομαστευτική στοά, το μητρικό πηγάδι και τα κάθετα κανάλια (πηγάδια, shafts) που προαναφέρθηκαν. Το σημείο εισόδου της υδρομαστευτικής στοάς είναι και το σημείο εξόδου του νερού που αποστραγγίζεται.

3.1.2. Karez

Ο όρος "karez" είναι περσική λέξη που εννοεί σχεδόν ακριβώς ότι και το qanat, ενώ στην Αφρική (στην Βόρεια κυρίως) χρησιμοποιείται ο όρος "foggaras". Τα karez στην Ασία αποτελούν συνήθως το κέντρο γύρω από το οποίο περιστρέφονται οι τοπικές κοινωνίες. Τα σπίτια χτίζονται κοντά στη στοά, ενώ κατοχυρωμένο μερίδιο στο νερό του karez αποτελεί λόγο κοινωνικής αποδοχής και αναγνώρισης.



Σχήμα 3.1: Σχηματική τομή ενός τυπικού qanat ^[65].

Το karez επιβλέπει ένα άτομο το οποίο είναι υπεύθυνο για τη σωστή κατανομή του νερού στους κατοίκους, οι οποίοι συμμετείχαν στην κατασκευή της στοάς. Αυτό το άτομο είναι συνήθως το ίδιο στο οποίο ανήκει η ιδέα κατασκευής του έργου, καθώς επίσης εκείνο που έδωσε το μεγαλύτερο μέρος της χρηματοδότησης. Σε ανταμοιβή των υπηρεσιών που προσφέρει ως υπεύθυνος του έργου δικαιούται επιπλέον 12 ώρες νερό χωρίς χρέωση, όπως επίσης και μεγαλύτερη έκταση γης για καλλιέργεια. Η ιδιότητα του "επιστάτη" του karez κληρονομείται και συνήθως την κληρονομεί ο πρωτότοκος γιος της οικογένειας ^[65].

Οι παροχές που δίνει ένα karez κυμαίνονται εποχιακά, όμοια με το qanat. Οι μεγαλύτερες παροχές σημειώνονται την άνοιξη, την εποχή δηλαδή που λιώνουν τα χιόνια. Επίσης, αύξηση παροχών των karez σημειώνεται και μετά από βροχοπτώσεις.

Υπάρχουν τέσσερα είδη karez ^[65]:

- Αλλουβιακά. Διανοίγονται μέσα σε αλλουβιακές αποθέσεις που αναπτύσσονται στους πρόποδες λόφων, εκεί δηλαδή όπου εξορύσσονται τα "μητρικά πηγάδια", προκειμένου να εντοπιστεί το βάθος της στάθμης του νερού. Είναι αυτά με τη μεγαλύτερη και μονιμότερη παροχή νερού, καθώς επίσης και με τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

- Διήθησης. Το νερό που συλλέγουν προέρχεται από ρήγματα ή γενικά σπασίματα των πετρωμάτων. Οι ποσότητες νερού που παρέχουν είναι χαμηλές, ενώ έχουν και μικρή διάρκεια ζωής.
- Βροχόπτωσης. Τροφοδοτούνται από το νερό της βροχής. Η ροή τους αρχίζει με τη βροχόπτωση και λήγει μερικές ημέρες μετά το πέρας της.
- Πηγής. Σε αυτά το νερό κάποιας πηγής διοχετεύεται στη στοά.

Η διάρκεια ζωής των karez ποικίλει ανάλογα με τον τύπο τους. Μπορεί να κυμαίνεται από δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες χρόνια. Τα karez διήθησης και πηγής έχουν μικρή διάρκεια ζωής, ενώ αυτά που συνδέονται με ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την διάρκεια ζωής τους είναι η συντήρησή τους. Θα πρέπει ανά περιόδους το karez να καθαρίζεται από τα χώματα που έχουν συσσωρευτεί μέσα σε αυτό, εξαιτίας της ροής του νερού.

Όταν το νερό βγει από την στοά στην επιφάνεια της γης, τότε με ένα δίκτυο καναλιών διοχετεύεται στην περιοχή που πρόκειται να υδροδοτηθεί ή να αρδευτεί. Τα περισσότερα karez διανοίγονταν από ιδιώτες – γαιοκτήμονες μιας φυλής, οι οποίοι χρειάζοντουσαν νερό για να ποτίσουν τις εκτάσεις τους. Στη διάνοιξη βοηθούσαν όλοι οι κάτοικοι της περιοχής και οι απολαβές τους σε νερό ήταν ευθέως ανάλογες της συνεισφοράς τους στην κατασκευή του έργου. Στη συνέχεια, αυτά τα οφέλη κληρονομούνταν στα παιδιά τους κ.ο.κ.

Επειδή το karez δεν ήταν δυνατό να γίνει αντικείμενο μοιράσματος, οι κληρονόμοι αρκούσαν στην από κοινού εκμετάλλευσή του. Το αποτέλεσμα ήταν, μέσα από το πέραςμα των γενεών, να αποτελεί ιδιοκτησία ολόκληρων χωριών. Οι μεριδιούχοι του νερού της στοάς πιέζονταν από την κοινωνία να μην πουλήσουν γη και επομένως και το αντίστοιχο νερό, προκειμένου να μην μπουν στην κοινωνία ξενόφερτα άτομα ^[65].

Το νερό διοχετεύεται σε κάθε μεριδιούχο τουλάχιστον μια φορά την εβδομάδα. Για την διευκόλυνση του σκοπού αυτού φτιάχτηκαν ειδικές μονάδες μέτρησης του χρόνου. Χαρακτηριστικά αναφέρονται τα hangam (= 12 h), neem hangam (= 6 h), tassu (= 3 h), abba (= 1,5 h) και tas (= 30 min).

Παλαιότερα, για να μπορούν οι μεριδιούχοι να υπολογίζουν τον χρόνο ποτίσματος, χρησιμοποιούσαν μία μπάλα διαμέτρου 3 in, με μια μικροσκοπική τρύπα

σε ένα σημείο της. Η μπάλα αυτή αφηνόταν να επιπλέει σε μια δεξαμενή νερού. Το νερό σιγά – σιγά έμπαινε από την τρύπα και γέμιζε την μπάλα, η οποία κάποια στιγμή βούλιαζε. Ο χρόνος που απαιτούνταν για να πληρωθεί με νερό η μπάλα και να βουλιάξει οριζόταν ως 1 tas.

Κανένas μεριδιούχος δεν υπάρχει περίπτωση να πάρει νερό για λιγότερο από 30 min εβδομαδιαίως (1 tas). Όταν έρχεται η σειρά του, ποτίζει τα χωράφια για όσο χρόνο του αναλογεί. Επειδή κάποιοι στα πλαίσια αυτού του κύκλου αναγκάζονται να ποτίζουν τα χωράφια τους πάντα νύχτα, κάθε φορά μετά το τέλος της συγκομιδής ο κύκλος αλλάζει ^[65].

Πολλά από τα παραδοσιακά karez που λειτουργούν μέχρι σήμερα μπορούν να βελτιωθούν. Η ευθυγράμμιση των στοών, ώστε να αποφεύγονται απώλειες λόγω κατείσδυσης, το σκέπασμα των πηγαδιών πρόσβασης, ώστε να μειωθούν όλα τα μπάζα που πέφτουν μέσω αυτών στις στοές και ο συστηματικός καθαρισμός των στοών, μπορεί να αυξήσει θεαματικά τις παροχές.

Τα karez σίγουρα αποτελούν παραδοσιακή μέθοδο, η οποία σε πολλές περιπτώσεις κρίνεται αναγκαίο να αντικατασταθεί από γεωτρήσεις. Παρόλα αυτά, σε επίσης πολλές περιπτώσεις, είναι χρήσιμο να συνεχιστεί η λειτουργία των, με ορισμένες βελτιώσεις, αφού είναι σε θέση να δώσουν ποσότητες νερού τέτοιες που η παραγωγή τους με τη μέθοδο των γεωτρήσεων θα προκαλούσε σημαντική επιβάρυνση του υδροφόρου ορίζοντα ^[65].

3.2. Σύγχρονες υδρομαστευτικές στοές

3.2.1. Γενικά

Υδρομαστευτική στοά (ή αποστραγγιστική στοά ή αποστραγγιστική σήραγγα) θεωρείται η "οποιασδήποτε περατότητας, οριζόντια ή κεκλιμένη σήραγγα μέσα στην οποία το νερό θα μπορεί να ρέει ελεύθερα ή να διηθείται από μία υπερκείμενη ή παρακείμενη πηγή". Με βάση αυτό τον ορισμό, τα "rock-lined υδραγωγεία" και οι "αγωγοί τύπου Maui" είναι υδρομαστευτικές στοές ^[9].

Βελτιωμένος λοιπόν ορισμός της αποστραγγιστικής στοάς είναι ο παρακάτω:

Οι αποστραγγιστικές στοές είναι υδροπερατές, οριζόντιες ή κεκλιμένες σήραγγες μέσα στις οποίες το νερό μπορεί να διηθείται από μία υπερκείμενη ή παρακείμενη πηγή. Κατασκευάζονται κάτω από την πιεζομετρική επιφάνεια του νερού

σε μια περιοχή όπου υπάρχει επαρκής επανατροφοδότηση, η οποία καλύπτει το ρυθμό άντλησης και όπου η υδροπερατότητα είναι επαρκής για να μεταφερθούν ποσότητες νερού μέσα στη στοά, κάτω από τις υπάρχουσες συνθήκες πιεζομετρίας.

Προφανώς δεν υπάρχει καμία συγκεκριμένη μέθοδος σχεδιασμού για ένα τόσο ευρύ φάσμα μορφών του έργου. Παρακάτω παρατίθενται σειρά παραδειγμάτων στοών αποστράγγισης και μεταφοράς νερού ανά τον κόσμο.

3.2.2. Σχεδιασμός υδρομαστευτικής στοάς κάτω από επιφανειακό ρεύμα

Κάτω από σταθερές συνθήκες ροής (steady flow), η παροχή μιας στοάς εξαρτάται από το πάχος του υδροφορέα και την περατότητα (**k**), το ποσό της διήθησης μέσω του στρώματος εδάφους και της επιφανειακής πηγής νερού, την διαθέσιμη πτώση στάθμης, την θερμοκρασία του νερού, το μήκος της στοάς, την "ενεργή" ακτίνα της στοάς και την απόσταση από τα θεωρητικά όρια επαναφόρτισης. Όλα αυτά τα δεδομένα μπορούν να ληφθούν από μία και μόνο δοκιμαστική άντληση [9].

Οι αποστραγγιστικές στοές μπορούν να κατασκευαστούν, είτε παράλληλα, είτε απευθείας κάτω από ένα επιφανειακό ρεύμα ή άλλο σώμα, από το οποίο θα γίνεται η επαναφόρτιση (επανατροφοδότηση). Η επιλογή που γίνεται εξαρτάται από την ποιότητα και την ποσότητα του νερού που απαιτείται και από το σχετικό κόστος κατασκευής. Μία στοά απευθείας κάτω από μία επιφανειακή πηγή θα φορτίζεται και από τις δύο πλευρές, και γι' αυτό θα παράγει περισσότερο νερό από μία που κατασκευάζεται από τη μία πλευρά, παράλληλα στην επαναφόρτιση.

Μετά από υπολογισμούς, η πραγματική παροχή μιας στοάς που κατασκευάζεται ανάντη και παράλληλα του ορίου επαναφόρτισης, μπορεί να προσεγγισθεί από την ακόλουθη μορφή της σχέσης "μη ισορροπίας" [9].

$$Q = \left(\frac{P \cdot m \cdot s \cdot L}{a} \right) + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot m \cdot s}{2,3 \cdot \log \frac{2 \cdot a}{r_e}} \right) \cdot \frac{V_1}{V_2} \quad (3.1)$$

όπου, **Q** παροχή της στοάς (gpd),

P περατότητα του υδροφόρου ορίζοντα (gpd/ft²),

m μέσο κορεσμένο πάχος του υδροφόρου ορίζοντα (ft),

s πτώση στάθμης της στοάς (ft),

- L συνολικό μήκος ανάπτυξης της στοάς (ft),
- a ενεργή απόσταση έως τη γραμμή κατείσδυσης (ft),
- r_e ενεργή ακτίνα του άκρου της στοάς (ft),
- V_1 συντελεστής διόρθωσης του ιξώδους, για τη θερμοκρασία της δοκιμής, και
- V_2 συντελεστής διόρθωσης του ιξώδους, για την θεωρούμενη θερμοκρασία στην οποία υπολογίζεται η παροχή.

Το Q αντιπροσωπεύει την ικανότητα του υδροφόρου να απελευθερώνει νερό στην στοά. Φυσικά, η ικανότητα αυτή δεν μπορεί να ξεπεράσει την ικανότητα της περιοχής επανατροφοδότησης να προμηθεύει με νερό τον υδροφόρο ορίζοντα.

3.2.3. "Αγωγοί τύπου *Maui*" στην *Hawaii*

Οι μεγαλύτερες πηγές νερού στην πολιτεία της *Hawaii* είναι φακοί κατεισδυόμενης βροχής που πλέουν πάνω στο θαλάσσιο νερό, εντός των κενών της λάβας των ηφαιστειακών δομών των νησιών. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται ιδιαίτερα εμφανές στα νησιά *Oahu* και *Maui* [30].

Η κατανόηση και εκμετάλλευση αυτών των μεγάλων πηγών νερού από τους πρωτοπόρους Χαβανέζους επιχειρηματίες των ζαχαροφυτειών, την περίοδο 1889 – 1900, ήταν ταυτόχρονη με την ευρωπαϊκή έρευνα στην οποία βασίστηκαν τα γραπτά των *Badon-Ghyben* (1889) και *Herzberg* (1901). Οι εργασίες κάθε ερευνητικής ομάδας συμπλήρωσαν η μία την άλλη, παρά την έλλειψη επικοινωνίας.

Η ερευνητική ομάδα στην *Hawaii* συνέλαβε και τελειοποίησε τεχνικές, σχετικά με την εκμετάλλευση του νερού, την πιο σημαντική παράμετρο για την μετέπειτα ανάπτυξη της πολιτείας. Οι τεχνικές αυτές πραγματοποιήθηκαν χωρίς ανάλογο όφελος και από το επιστημονικό πρόγραμμα που γινόταν στην Ευρώπη [112].

Οι "φακοί των *Ghyben – Herzberg*" εξηγούν πως είναι δυνατό νησιά που απέχουν περίπου 2.200 μίλια από μία ήπειρο να έχουν τόσο μεγάλες πηγές γλυκού νερού, ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλες φυτείες ζάχαρης, σημαντικές στρατιωτικές δραστηριότητες και να έχουν έναν ταχέως αυξανόμενο πληθυσμό.

Ο *Todd* είχε ανταλλάξει εμπειρίες με αυτούς που υπηρέτησαν ως μηχανικοί του Στρατού και του Ναυτικού των Η.Π.Α. κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και προσπάθησαν να εκμεταλλευθούν πηγές στην περιοχή του Ειρηνικού ωκεανού. Πολλοί

από αυτούς απέκτησαν μεγάλη οικειότητα με τους φακούς "γλυκού" ή χρησιμοποιήσιμου "υφάλμυρου" νερού σε ένα μεγάλο αριθμό νησιών.

Στην Βάση του Ναυτικού των Η.Π.Α. στην Hawaii, το υφάλμυρο νερό αποδείχθηκε επαρκές για να καλύψει τις μη υδρευτικές ανάγκες αρκετών χιλιάδων αντρών. Το νερό συλλέχθηκε από ατσάλινους υδατοστεγείς κυλίνδρους διαμέτρου 6 ft, οι οποίοι βυθίστηκαν στην άμμο, περίπου 2 ft πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Στο νησί Maui, ακολουθώντας το τοπικό μοντέλο, το Ναυτικό βύθισε έναν σωλήνα στο ηφαιστειακό πέτρωμα, ώστε να "τραβήξει" το νερό από τους φακούς, για τις ανάγκες της Ναυτικής βάσης Puunene. Στο Oahu, κατά τη διάρκεια του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου, ο Οργανισμός Νερού της Honolulu και το Ναυτικό των Η.Π.Α. ολοκλήρωσαν τρία προγράμματα με "αγωγούς τύπου Maui": α) τον άξονα "Navy Barber Point", β) τον άξονα "Red Hill", και γ) τον άξονα του Οργανισμού Ύδρευσης της Hawaii ^[112].

Οι Badon-Ghyben και Herzberg ανακάλυψαν, μετά από έρευνες κατά την περίοδο 1889 – 1901, ότι όταν το γλυκό νερό εντοπίζεται κάτω από τέτοιες συνθήκες, η συγκέντρωσή του, καθώς και το μίγμα γλυκού – θαλάσσιου νερού εκτείνεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, περίπου 40 φορές το ύψος πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Αδιαπέρατοι παράκτιοι σχηματισμοί (caprock), όπως στις περιοχές Honolulu – Pearl Harbor, παρεμποδίζουν την πορεία του νερού προς τη θάλασσα και μεγαλώνουν τον φακό "γλυκού" νερού, έτσι ώστε να μπορεί να ειπωθεί ότι αυτός επιπλέει πάνω στο θαλασσινό νερό, εντός των δομών της λάβας.

Έτσι, οι γεωτρήσεις που διανοίγονται στη Honolulu στα 20 ή 30 ft πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και εκτείνονται μέχρι το βάθος των 600 ft ή και περισσότερο, κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, παράγουν νερό κατάλληλο για οικιακή χρήση. Επίσης, ακόμα βαθύτερες γεωτρήσεις, στο Oahu, παράγουν νερό κατάλληλο για πότισμα καλαμιών ^[89].

Το 1898, ο Schussler, παρουσίασε τα αποτελέσματα από τις υδρογεωλογικές του έρευνες στο Maui. Διετύπωσε την άποψη ότι το ανατολικό και δυτικό Maui ήταν καταρχήν δύο ξεχωριστά νησιά. Κατά την διάρκεια των εκρήξεων του ηφαιστείου Haleakala, οι αληγείς άνεμοι βαθμιαία γέμισαν το κανάλι ανάμεσα στα νησιά με κίσηρη και στάχτες. Στη διαδικασία γεμίσματος του καναλιού προστέθηκαν και περιπτωσιακές ροές λάβας.

Επίσης, υποστήριξε ότι εντός του ισθμού μεταξύ των Haleakala και Puu Kukui (το βουνό του δυτικού Maui) υπήρχε ένας υδροφόρος ορίζοντας που τροφοδοτούνταν από βροχές στις πλαγιές του Haleakala. Εξέφρασε λοιπόν την πεποίθησή του σχετικά με την ύπαρξη μεγάλου σώματος "γλυκού νερού" μέσα στον ισθμό ^[89].

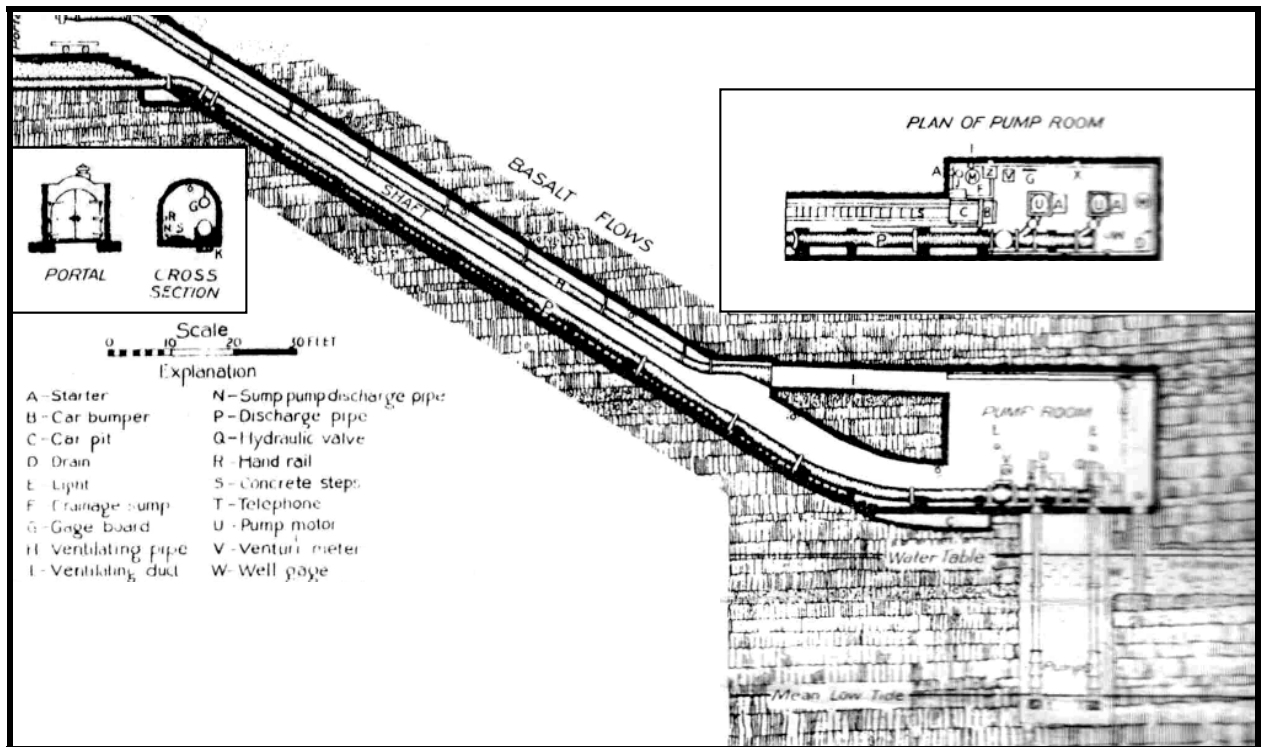
Εξαιτίας της θεωρίας του Schussler, αποφασίστηκε να εκσκαφθεί ένας κάθετος αγωγός από την ισοϋψή των 300 ft, κοντά στο Kihei, στο νότιο τμήμα του ισθμού. Οι εργασίες ήταν πολυδάπανες και μεγάλης δυσκολίας.

Όταν ο αγωγός έφτασε στο βασικό επίπεδο νερού, περίπου στα 6 ft πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, διανοίχτηκε ένας θάλαμος για τα αντλητικά μηχανήματα και στοά κάτω από το στατικό επίπεδο. Ένας ατμολέβητας εγκαταστάθηκε στην επιφάνεια και μία μηχανή απευθείας μετατόπισης ατμού εγκαταστάθηκε στον πυθμένα του αγωγού. Αυτός ο σταθμός, από τότε που ηλεκτροδοτήθηκε, παραμένει σε λειτουργία.

Το USGS ανέφερε τον τύπο ανάπτυξης Baldwin – Schussler ως "βασικό αγωγό νερού τύπου Maui" ^[112]. Στο **Σχήμα 3.2** απεικονίζεται "κεκλιμένη γεώτρηση (αγωγός) τύπου Maui".

Σήμερα βρίσκονται εν λειτουργία 56 "αγωγοί τύπου Maui" (από το 1964). Από τους 70 συνολικά σταθμούς, οι 18 είναι στο Oahu και οι υπόλοιποι στο Maui, στην Hawaii και στο Kauai. Στους σταθμούς του Oahu συμπεριλαμβάνονται και τρεις (3) αγωγοί του συστήματος της "Honolulu Board of Water Supply", για την τροφοδοσία των δημόσιων αγροτικών δραστηριοτήτων και πέντε (5) αγωγοί, οι οποίοι ελέγχονται από τον Στρατό και Ναυτικό των Η.Π.Α. ^[89].

Το μεγάλο προσόν των εγκαταστάσεων τύπου "Maui" είναι ότι παράγουν νερό με την ελάχιστη υφαλμύριση και το ελάχιστο κόστος μεταφοράς νερού. Όμως, παρόλο που οι εγκαταστάσεις αυτές έγιναν συνήθειες για τις μη αρτεσιανές περιοχές, φαίνεται ότι στο μέλλον θα κατασκευαστούν λίγες ακόμη, εκτός από περιπτώσεις όπου επιθυμείται υπερβολική παραγωγή νερού, της τάξης των 10^7 gpd.



Σχήμα 3.2: Τεχνικά μέρη "αγωγού τύπου Maui" [112].

Η δεύτερη μεγαλύτερη εκμετάλλευση υπόγειου νερού στη Hawaii είναι ο σταθμός "Waikapu" της Hawaiian Commercial and Sugar Co. στο Maui, στον οποίο 600 ft σήραγγας που φτιάχτηκε στο ύψος της θάλασσας παράγουν περίπου 40 mgd. Δηλαδή, κατά μέσο όρο 7 mgd ανά 100 ft σήραγγας, κάτω από τοπική επιφάνεια υδροφορέα 6 ft περίπου πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Κατά την κατασκευή τέτοιων σταθμών, οι σήραγγες, οι οποίες διανοίγονται με συμβατικές μεθόδους εξόρυξης, εκτείνονται σε μήκος τέτοιο, ώστε η πτώση στάθμης να φτάνει περίπου στα 2 – 3 ft έως 5 – 6 ft από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα, όταν οι προσωρινές αντλήσεις αποδίδουν περίπου 2 φορές το ρυθμό που είναι επιθυμητός για άντληση κάτω από κανονική λειτουργία [89].

3.2.4. Qanats στην κοιλάδα Varamin του Ιράν

Η κοιλάδα Varamin βρίσκεται στο Βόρειο Ιράν, 40 km νοτιοανατολικά της πρωτεύουσας Τεχεράνης και μεταξύ των απόκρημνων πρανών των βουνών Elburz και της ερήμου Great Kavir. Καλύπτει μία έκταση περίπου 1.300 km² και οφείλει την

ύπαρξη της στις αλλουβιακές αποθέσεις μορφής "μεγάλου κώνου", στο σημείο όπου ο Jajerud (ποταμός Jaj) αφήνει τη ζώνη του πόδα του λόφου.

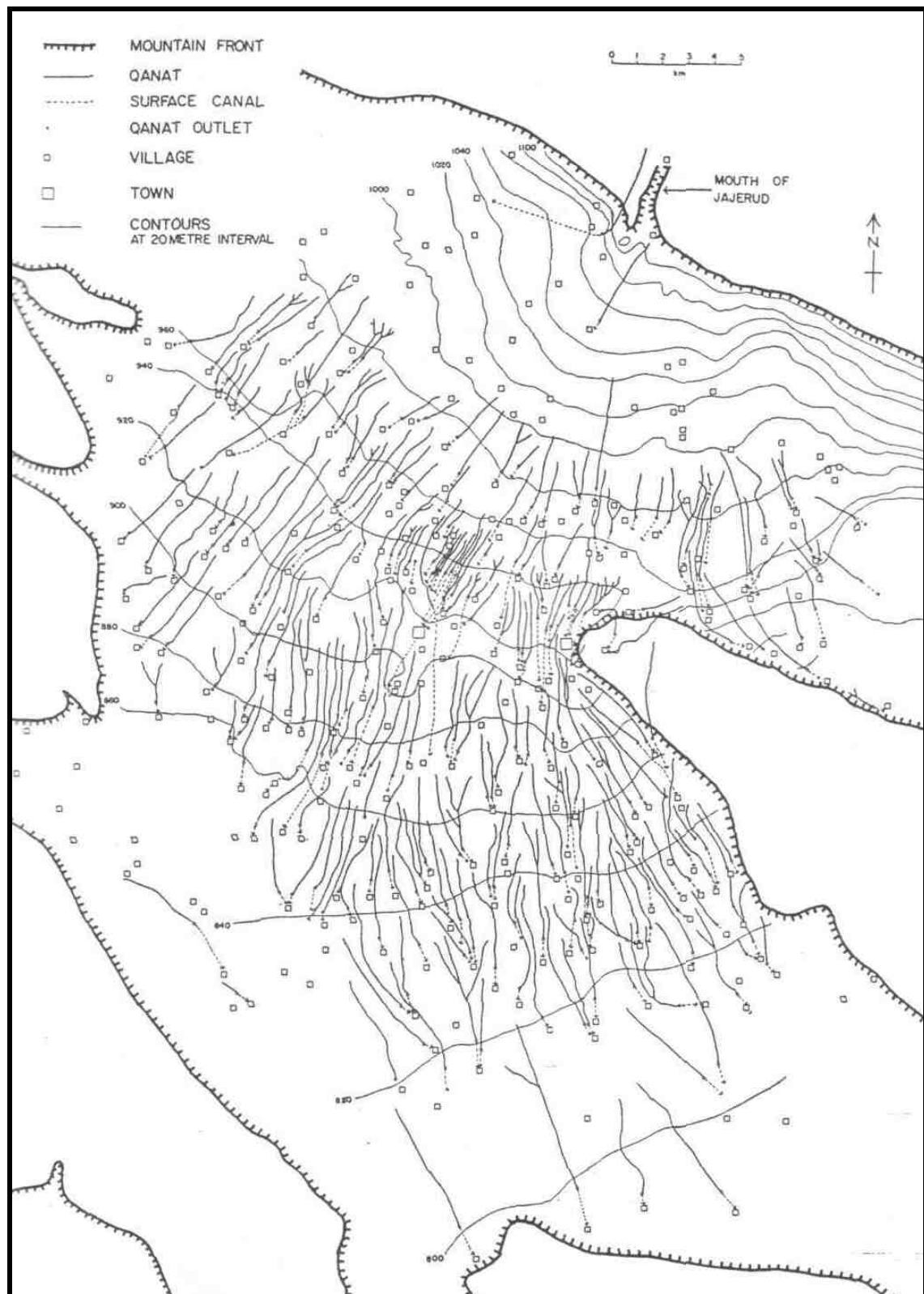
Το υψηλότερο σημείο της κοιλάδας φτάνει τα +1.110 m, στις εκβολές του ποταμού Jaj, ενώ το χαμηλότερο τα +800 m, 50 km νότια, στην άκρη της ερήμου. Η κοιλάδα είναι σχεδόν επίπεδη και η αποστράγγιση του εν λόγω ποταμού αποτελείται από ένα δαιδαλώδες σύστημα καναλιών που τέμνονται 1 – 5 m χαμηλότερα από το γενικό επίπεδο της κοιλάδας [7].

Το qanat (ή karez) εμφανίζεται να είναι περσική εφεύρεση και χρονολογείται πριν από 2.000 χρόνια [31]. Όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από μία σήραγγα, η οποία ξεκινάει κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα και καταλήγει σε μία έξοδο στην επιφάνεια του εδάφους. Κατά μήκος της σήραγγας το νερό ρέει με τη δύναμη της βαρύτητας (βλέπε Σχήμα 3.1).

Δεν υπάρχουν συγκεντρωτικές στατιστικές που να καλύπτουν το συνολικό αριθμό qanats που υπάρχουν στο Ιράν, αλλά εκτιμήσεις που υποστηρίζουν ότι ο αριθμός αυτών που βρίσκονται σε λειτουργία είναι της τάξης των 25.000. Η μεγάλη αυτή πυκνότητα των qanats φαίνεται χαρακτηριστικά στο **Σχήμα 3.3**. Λεπτομέρειες για τις μεθόδους κατασκευής των qanats, καθώς επίσης και για το κόστος τους, δίνονται από τους Noel (1944), Beckett (1953) και Cressey (1958).

Το μεγάλο πλεονέκτημα των qanats, έναντι των γεωτρήσεων, είναι ότι μπορεί να υπάρχει συνεχής λήψη του υπόγειου νερού χωρίς κατανάλωση ενέργειας. Η παροχή των qanats είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στον φρεάτιο ορίζοντα και στη μητρική γεώτρηση. Ο φρεάτιος ορίζοντας είναι το κάτω άκρο της περιοχής παραγωγής νερού. Αυτή η διαφορά υδραυλικού φορτίου είναι συνάρτηση του μήκους της σήραγγας κάτω από τον φρεάτιο ορίζοντα μέσα στον υδροφορέα και της υδραυλικής βαθμίδας που υπάρχει στην επιφάνεια του υδροφορέα [7].

Επειδή το qanat διατρυπά λίγα μόνο μέτρα κάτω από την επιφάνεια του φρεάτιου ορίζοντα, μικρές εποχιακές αυξομειώσεις στην ελεύθερη στάθμη του υδροφορέα μπορούν να προκαλέσουν αξιοσημείωτες μεταβολές στην παροχή του. Συνήθως η μεγαλύτερη παροχή λαμβάνεται στο τέλος του χειμώνα και την αρχή της άνοιξης και η χαμηλότερη στο τέλος του καλοκαιριού και το φθινόπωρο.



Σχήμα 3.3: Qanats στην κοιλάδα Varamin του Ιράν [7].

Το γεγονός ότι το qanat δίνει νερό κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου, ενώ η παροχή του δεν μπορεί να ρυθμιστεί, οδηγεί σε κατασπατάληση νερού κατά τους χειμερινούς μήνες, κατά τους οποίους οι ανάγκες για άρδευση δεν είναι μεγάλες.

3.2.5. Οριζόντια υδρομαστευτική στοά στην Αλάσκα

Το 1962 κατασκευάστηκε υδρομαστευτική στοά στην Αλάσκα, με σκοπό να μεταφέρει νερό στην περιοχή Ocean Cape. Το Ocean Cape είναι στο δυτικότερο άκρο της χερσονήσου Phipps, η οποία βρίσκεται μεταξύ του κόλπου της Αλάσκα και του χωριού Yakutat.

Η υδροδότηση του συγκεκριμένου απομακρυσμένου σημείου ήταν αναγκαία, για στρατιωτικούς σκοπούς. Το 1960 είχε διανοιχθεί γεώτρηση, η οποία τροφοδοτούσε την περιοχή ενδιαφέροντος με επαρκείς ποσότητες νερού. Κάποια στιγμή όμως η ποιότητα του νερού επιβαρύνθηκε ραγδαία (υφαλμύριση).

Η μόνη ορατή λύση ήταν η κατασκευή οριζόντιας στοάς για τη συλλογή νερού από λίμνη (μέσω αποστράγγισης) και τη μεταφορά του στο Ocean Cape. Η μελέτη και κατασκευή της στοάς ολοκληρώθηκε σε σχετικά σύντομο διάστημα.

Συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας (χλωριόντα) του νερού για πολλά χρόνια μετά την κατασκευή της έδειξε ότι αυτή παρέμεινε σχεδόν αμετάβλητη (22 – 34 ppm). Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ότι "η κατασκευή οριζόντιων στοών σε παράκτιες υδροφορίες αποτελεί ίσως την μόνη λύση διαρκείας" ^[47].

3.2.6. Σήραγγα αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην Αίγυπτο

Στις αρχές της δεκαετίας του '70 σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σήραγγα αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην Αίγυπτο, στην επαρχία Fayoum, η οποία βρίσκεται 90 km ΝΔ του Καΐρου και 35 km δυτικά του ποταμού Νείλου.

Η όλη περιοχή αρδεύεται μέσω συστήματος καναλιών, με κυριότερο το κανάλι Youssif. Το αποφορτιζόμενο νερό της περιοχής καταλήγει στη λίμνη Quagum. Οι ποσότητες που καταλήγουν στη λίμνη εξισορροπούνται από την εξάτμιση.

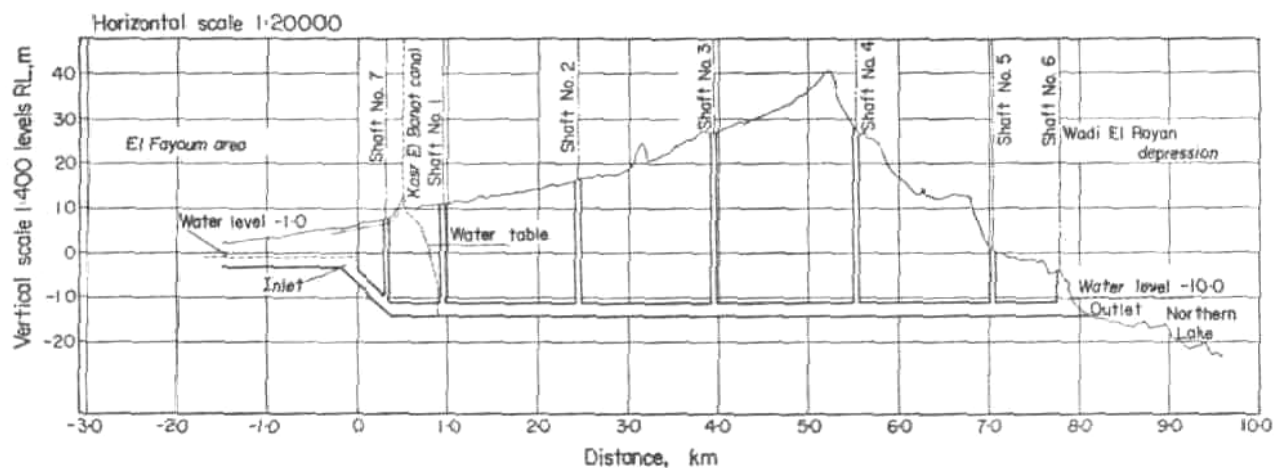
Στην περιοχή εφαρμόστηκε πρόγραμμα εγγείων βελτιώσεων, με αποτέλεσμα η καλλιεργήσιμη γη να αυξηθεί κατά 30.000 εκτάρια. Το πλεονάζον αποφορτιζόμενο νερό θα προκαλούσε ανύψωση της λίμνης και τελικά πλημμύρισμα κάποιων καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Έτσι, προτάθηκε το πλεονάζον νερό να αποστραγγίζεται

και να μεταφέρεται με σήραγγα στο γειτονικό βύθισμα "Wadi El Rayan", το οποίο συνορεύει με την επαρχία Fayoum και χωρίζεται από αυτή με τεκτονική ράχη [45].

Η γεωλογική έρευνα έδειξε ότι, η σήραγγα θα έπρεπε να διαπεράσει μια περιοχή ασβεστόλιθου, στους οποίους περικλείονταν "φακοί" και ενστρώσεις αργίλου (με σημαντική περιεκτικότητα σε μοντμοριλονίτη), γύψου και μάργας.

Εξορύχθηκαν, κατά μήκος της γραμμής της σήραγγας, 36 γεωτρήσεις και εντοπίστηκε νερό στις 11 από αυτές. Με αυτό τον τρόπο σχεδιάστηκε η πιεζομετρική επιφάνεια.

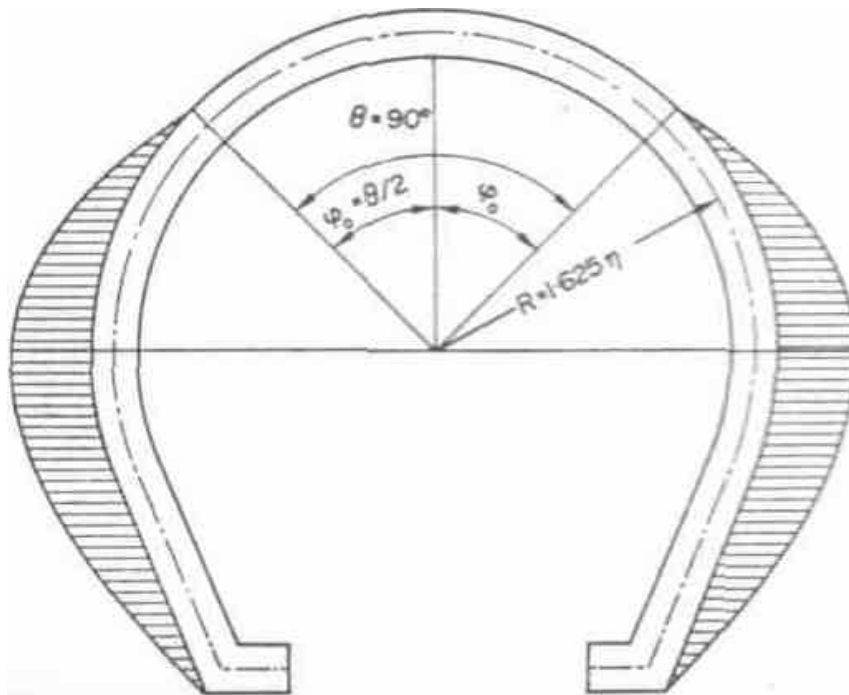
Στο **Σχήμα 3.4** διακρίνεται κάθετη τομή της διαδρομής της σήραγγας.



Σχήμα 3.4: Διαδρομή (κάθετη τομή) της σήραγγας αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην επαρχία Fayoum της Αιγύπτου [45].

Στη συνέχεια, έγινε υδροχημική εξέταση του νερού για να προσδιοριστούν οι περιεκτικότητες σε θειούχα και χλωρίοντα, προκειμένου να αποφευχθεί μελλοντική καταστροφή της σήραγγας λόγω καρστικοποίησης.

Τέλος, καθορίστηκαν οι διαστάσεις της σήραγγας, όπως αυτές φαίνονται στο **Σχήμα 3.5** (διατομή στοάς). Μήκος περίπου 7,7 km, διατομή σε σχήμα πετάλου εμβαδού $7,24 \text{ m}^2$ και μέση ταχύτητα ροής του νερού στο εσωτερικό του $1,65 \text{ m/sec}$.



Σχήμα 3.5: Διατομή της σήραγγας αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην επαρχία Fayoum της Αιγύπτου ^[45].

Η διαφορά φορτίου μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι 9 m. Κατά μήκος της σήραγγας υπάρχουν 7 γεωτρήσεις, μεταξύ των οποίων η διαφορά φορτίου είναι 1 m.

3.2.7. Σήραγγα αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην Φιλανδία

Η κατασκευή σήραγγας στην Φιλανδία αποφασίστηκε προκειμένου να αποστραγγίζεται και να μεταφέρεται νερό από τη λίμνη Raijanne στο Ελσίνκι. Το έργο έπρεπε να διαπεράσει τμήμα σχιστόλιθων της ζώνης Svecofennian.

Η γεωλογική έρευνα που έγινε για να επιλεγεί η κατάλληλη διεύθυνση της σήραγγας, ολοκληρώθηκε σε τρία στάδια ^[84]:

- Αρχική μελέτη χαρτών και αεροφωτογραφιών, με την οποία περιορίστηκε ο υποψήφιος αριθμός θέσεων.
- Μελέτη πεδίου, δηλαδή λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση κατά μήκος των εναλλακτικών διευθύνσεων, καθώς και σεισμικές δοκιμές σε κρίσιμες θέσεις.
- Οικονομική σύγκριση των διαφόρων εναλλακτικών διευθύνσεων.

Καταρχήν, επιλέχθηκαν όλες εκείνες οι διευθύνσεις μέσω των οποίων αποφεύγονται, κατά το δυνατό, τα τμήματα του στρώματος που θεωρούνται "αδύναμα". Επίσης, για τις υποψήφιες διευθύνσεις έπρεπε να ληφθούν υπόψη η διαφορετικότητα των πετρωμάτων που θα συναντήσει η σήραγγα, καθώς επίσης και η ανισοτροπία.

Οι επιτόπου παρατηρήσεις έγιναν με μεγάλη ακρίβεια για τις κρίσιμες θέσεις. Καθορίστηκε η γεωλογία που απαρτίζει τις διευθύνσεις, μέσω των οποίων μπορεί να διέλθει η σήραγγα (είδος πετρωμάτων, στρωματογραφία, σχιστότητα, ανισοτροπία κ.λπ.). Εντοπίστηκε το άνω όριο του βασικού στρώματος της σήραγγας.

Επίσης, εντοπίστηκαν, με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, ζώνες ρηγμάτωσης, εγκλείσματα, φακοί και φλέβες άλλων ορυκτών, τα οποία βρίσκονταν στη γραμμή διάνοιξης του έργου και μπορούσαν να προκαλέσουν τοπική αδυναμία του πετρώματος. Υπολογίστηκε, με ικανοποιητική ακρίβεια, η πιεζομετρική επιφάνεια του νερού, έτσι ώστε κατά τη διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας να αποφευχθούν προβλήματα απότομων και μεγάλων εισροών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρά τεχνικά προβλήματα και τραυματισμούς των εργαζομένων.

Στη συνέχεια, έγινε οικονομική αξιολόγηση μεταξύ όλων των πιθανών θέσεων. Τα στοιχεία που συγκρίθηκαν ήταν τα εξής ^[84]:

- Ο βαθμός ευκολίας διάνοιξης της σήραγγας, είτε με εκρηκτικά, είτε με διάτρηση, ανάλογα με το είδος των πετρωμάτων που απάρτιζαν κάθε υποψήφια διεύθυνση.
- Η διαδικασία και το κόστος για την εξυγίανση των "αδύναμων" τμημάτων, εντός των οποίων θα διέρχεται η σήραγγα.
- Η απόσταση και η θέση των κατακόρυφων στην σήραγγα πηγαδιών (shafts), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί χαμηλότερο κόστος.

3.2.8. Σήραγγα αποστράγγισης και μεταφοράς νερού στην Κολομβία

Η ιταλική εταιρεία Impregilo Sp.A. ανέλαβε την εξόρυξη σήραγγας που σκοπό είχε τον εφοδιασμό με υδρευτικό νερό της πόλης Μπογκοτά στην Κολομβία. Η σήραγγα είχε μήκος 9 km και η κατασκευή διήρκεσε 990 ημέρες. Το υψόμετρο στο οποίο κατασκευάστηκε έφτανε τα 2.800 m, περίπου.

Η διάμετρος εισόδου της σήραγγας ήταν 3,54 m και η διάμετρος εξόδου 2,8 m, ενώ, εκτός από την είσοδο και την έξοδο της σήραγγας, κατασκευάστηκαν άλλες δύο

προσβάσεις. Κατά την εξόρυξη, διατρήθηκαν κυρίως ψαμμιτικοί σχηματισμοί και σε μικρότερη έκταση αργιλοκοί σχιστόλιθοι [57].

Η εισροή υπόγειου νερού στη σήραγγα, ενώ αρχικά είχε υπολογιστεί μεταξύ των τιμών 6 lt/min έως 600 lt/min, ανά 100 m μήκους, τελικά έφτασε τα 1.200 lt/min έως 2.000 lt/min, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι ποσότητες νερού (20.000 lt/min) που εισέρευσαν από ζώνη ρηγμάτωσης.

Κατά την κατασκευή της σήραγγας σημειώθηκαν πολλά προβλήματα, τα οποία ήταν μη αναμενόμενα. Έτσι, ενώ αρχικά θεωρήθηκε ότι οι διογκούμενοι σχιστόλιθοι (lutites) θα δημιουργούσαν προβλήματα λόγω αστάθειας, τελικά τα προβλήματα προέκυψαν από τους ψαμμίτες.

Επίσης, η απότομη εισροή 22.000 lt/min νερού στην σήραγγα, όταν η εκσκαφή συνάντησε μεγάλη ζώνη ρηγμάτωσης, μετέφερε τόσο πολύ στερεό υλικό που το μηχάνημα εκσκαφής ουσιαστικά θάφτηκε κάτω από τα μπάζα. Χρειάστηκε να σταματήσουν οι εργασίες εκσκαφής για 45 ημέρες, προκειμένου να αντληθούν τα νερά και αν απομακρυνθούν τα χώματα, ώστε να ελευθερωθεί το μηχάνημα.

3.3. Σύγχρονες υδρομαστευτικές στοές στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, σε διάφορες περιοχές, ήδη από την αρχαιότητα, αναπτύχθηκε σύστημα υδρομαστευτικών στοών, οι οποίες κατασκευάσθηκαν με την τεχνική του qanat. Πολλά από αυτά τα qanat, παρά τα εκατοντάδες χρόνια που έχουν περάσει συνεχίζουν να λειτουργούν και να τροφοδοτούν με νερό για ύδρευση ή άρδευση πολλές περιοχές. Ακόμα και μεγάλες πόλεις (Αθήνα, Θεσσαλονίκη) τροφοδοτούνται, εν μέρει, από νερό που κυκλοφορεί μέσω qanat [129].

Τα qanat, ως μέθοδος συλλογής νερού, υπερίσχυσαν για τον απλό λόγο ότι μπορούν και φέρνουν νερό μέχρι την επιφάνεια του εδάφους χωρίς δαπάνη κανενός είδους ενέργειας. Επίσης, έχουν αποδειχθεί ως την πλέον μακροβιότερη λύση. Πολλά βέβαια είναι αυτά, τα οποία έχουν εγκαταλειφθεί γιατί έχουν στερέψει. Αυτό όμως, κατά κύριο λόγο, προέκυψε από την άναρχη διάνοιξη στοών, με αποτέλεσμα η κάθε μία από αυτές να αποστραγγίζει το νερό της άλλης.

Η λειτουργία των qanat ήταν βασικός παράγοντας ανάπτυξης μιας περιοχής. Οι οικισμοί αναπτύσσονταν γύρω από τα qanat, όπως και όλες οι επαγγελματικές

δραστηριότητες των κατοίκων. Πολλές περιοχές εγκαταλείφθηκαν όταν έπαψε η λειτουργία τους για κάποιο λόγο (π.χ. σεισμός).

Σήμερα βέβαια, η μέθοδος μοιάζει να έχει εγκαταλειφθεί. Εάν όμως σκεφτεί κανείς ότι αυτή τη στιγμή λειτουργούν δεκάδες qanat ανά την Ελλάδα, των οποίων η ηλικία ξεπερνάει κατά πολύ τον αιώνα και ότι αυτά συνεχίζουν να παρέχουν νερό όλα αυτά τα χρόνια, χωρίς ουσιαστικά να έχει γίνει τίποτα για την συντήρησή τους, συμπεραίνεται ότι πιθανόν η εφαρμογή παλαιών μεθόδων με νέες τεχνικές να δώσει ένα ανέλπιστα καλό αποτέλεσμα ^[129].

Στην επαρχία Φυλλίδας Σερρών έγινε εμπεριστατωμένη έρευνα σχετικά με τα qanat της περιοχής, με ιδιαίτερα εντυπωσιακά αποτελέσματα ^[129]. Τα qanat που βρίσκονται εντός των διοικητικών ορίων της εν λόγω επαρχίας και λειτουργούν σήμερα, είναι αυτά της Νέας Ζίχνης, της Μεσοράχης, της Δήμητρας, της Λευκοθέας, του Σιδηροδρομικού Σταθμού Αγγίστας, της Αγγίστας, της Κρηνίδας, της Ηλιοκώμης, της Κορμίστας, της Πρώτης, του Ροδολείβους, της Παλαιοκώμης, του Δραβείσκου, της Μυρίνης, του Μικρού Σουλίου, της Μονής Εικοσιφοινίσσης, της Μονής Αγίας Κυριακής και της Μονής Αγίας Παρασκευής.

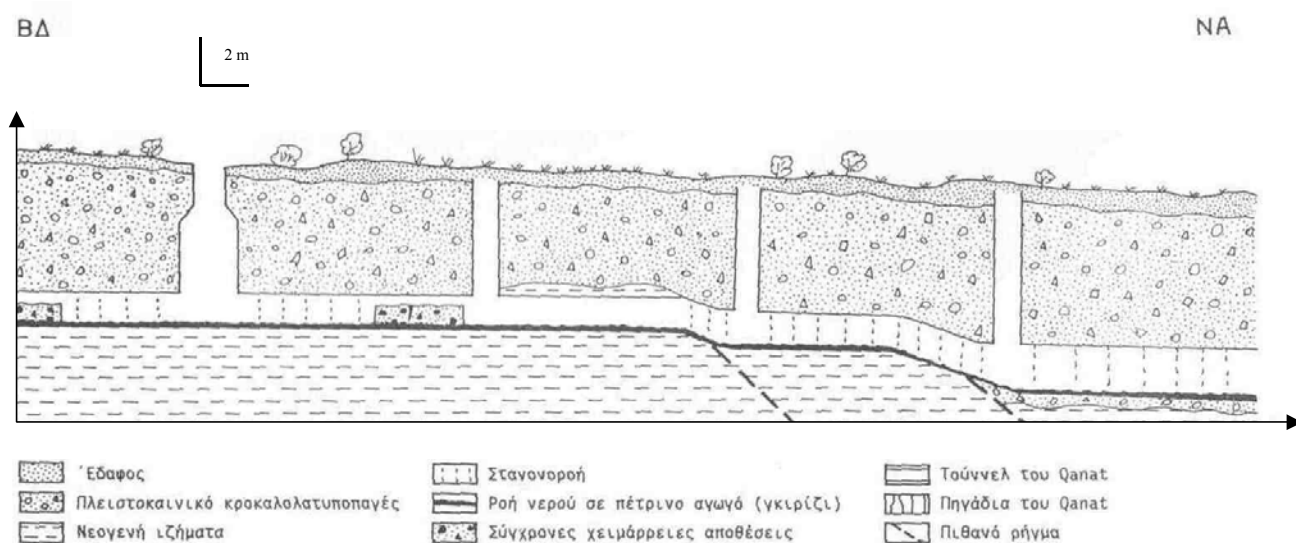
Τα μήκη των στοών που χαρτογραφήθηκαν κυμαίνονται από 35 m μέχρι και 4 km. Ανάλογα με την επιφανειακή μορφολογία και την υδρογεωλογική – υδρολιθολογική κατάσταση της ζώνης υδρομάστευσης, διακρίνονται οι παρακάτω τύποι qanat ^[129]:

- 1) Qanat Νέας Ζίχνης.
- 2) Qanat Ροδολείβους.
- 3) Qanat Σιδηροδρομικού Σταθμού Αγγίστας.
- 4) Qanat Αγγίστας.

3.3.1. Τύπος qanat Νέας Ζίχνης

Ο τύπος αυτός έχει κατασκευαστεί στον πυθμένα ξηρής κοιλάδας και με διεύθυνση $B \rightarrow N$. Διανοίχθηκε στην επαφή κροκαλοπαγών και αργιλικών ιζημάτων, σε βάθος 5,5 m από το έδαφος. Σε όλο το μήκος της στοάς υπάρχουν πηγάδια (στην πλειοψηφία τους φραγμένα), τα οποία χρησίμευαν για εξαερισμό και ευκολότερη πρόσβαση.

Στο **Σχήμα 3.6** δίνεται γεωλογική τομή στην θέση του qanat Νέας Ζίχνης. Πιθανότατα στην ίδια περιοχή υπάρχουν και άλλες υδρομαστευτικές στοές οι οποίες συνδέονται, ή όχι, με την παραπάνω και διαθέτουν επίσης πηγάδια (στο σχήμα παρουσιάζεται η μεγαλύτερη στοά). Έτσι, δικαιολογείται το γεγονός ότι στην περιοχή σημειώνονται κατά καιρούς σημειακές υποχωρήσεις του εδάφους [129].



Σχήμα 3.6: Σχηματική γεωλογική τομή στη ζώνη υδρομάστευσης του qanat Νέας Ζίχνης, Επαρχίας Φυλλίδας Σερρών [129].

Το νερό, με ελεύθερη ροή, οδηγείται σε σύγχρονους πλαστικούς σωλήνες, για να διανεμηθεί στη συνέχεια στον ομώνυμο οικισμό (Νέα Ζίχνη). Η μέση ετήσια παροχή του qanat είναι $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ($= 1.440 \text{ m}^3/\text{day}$), ενώ η ταχύτητα ροής του νερού μέσα στη στοά φτάνει τα 500 m/h .

3.3.2. Τύπος qanat Ροδολείβους

Ο εν λόγω τύπος διαφέρει από τον προηγούμενο, τόσο από μορφολογική – υδρολιθολογική, όσο και από τεχνική άποψη.

Η ζώνη υδρομάστευσης του qanat κατασκευάστηκε στην επαφή χαλαρών πλευρικών κορημάτων και σχιστόλιθων. Στον πυθμένα της στοάς, από ένα σημείο και

μετά, υπάρχει κανάλι, το οποίο συγκεντρώνει το νερό. Τα τοιχώματα της στοάς είναι καλυμμένα από αδιαπέρατο υλικό (υπό μορφή επένδυσης).

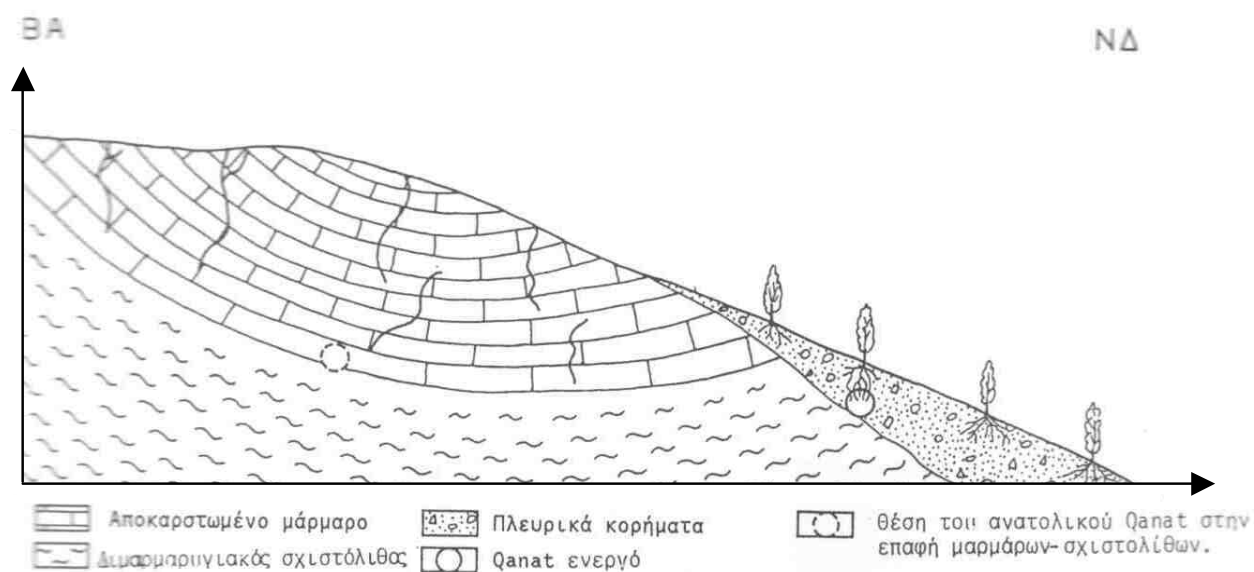
Το υψηλότερο άκρο της στοάς καταλήγει σε κατακόρυφο τοίχωμα που κατασκευάστηκε από μη συγκολλημένες μαρμάρινες πέτρες. Από το τοίχωμα αυτό ρέει νερό, το οποίο στη συνέχεια συγκεντρώνεται στο κανάλι του δαπέδου. Το νερό που εκρέει από το κατακόρυφο τοίχωμα πιστεύεται ότι προέρχεται από τον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα που σχηματίζεται στην επαφή μαρμάρων και σχιστόλιθων.

Σε μικρή απόσταση από αυτή την στοά (δυτική) ανακαλύφθηκε άλλη, "ανενεργή", η οποία διαμορφώνεται στην επαφή μαρμάρων – σχιστόλιθων και έχει υδροπερατά τοιχώματα (ανατολικό qanat). Οι δύο αυτές σήραγγες διασταυρώνονται, κατά πάσα πιθανότητα, στο σημείο που εντοπίστηκε το κατακόρυφο τοίχωμα, αλλά αυτό δεν έγινε δυνατό να επιβεβαιωθεί, διότι η πρόσβαση σε όλο το μήκος της δεύτερης στοάς είναι αδύνατη, καθώς μεγάλοι όγκοι του αποκαρστωμένου μαρμάρου διακόπτουν τη διέλευση ^[129].

Η άποψη ότι και η δυτική στοά αποστραγγίζει τα μάρμαρα ενισχύεται από το γεγονός ότι οι παροχές του qanat παρουσιάζουν μεγάλες αυξομειώσεις (την άνοιξη $70 \text{ m}^3/\text{h} = 1.680 \text{ m}^3/\text{day}$ και το φθινόπωρο $20 \text{ m}^3/\text{day}$). Η τροφοδοσία του qanat προέρχεται, τόσο από το νερό της βροχής, όσο και από την τήξη των χιονιών, η οποία διαρκεί μέχρι και τον Μάιο.

Οι θέσεις των δύο qanats Ροδολείβους, στις επαφές πλευρικών κορημάτων – σχιστόλιθων και μαρμάρων – σχιστόλιθων (δυτικό "ενεργό" και ανατολικό "ανενεργό", αντίστοιχα) παριστάνονται σχηματικά (χωρίς κλίμακα) στην γεωλογική τομή της περιοχής "Κεραμιδαριό", στο **Σχήμα 3.7**.

Επίσης, στο **Σχήμα 3.8** δίνεται φωτογραφία της στοάς του δυτικού qanat Ροδολείβους. Όπως προαναφέρθηκε, σε αντίθεση με το qanat Νέας Ζίχνης, τα τοιχώματά του είναι επενδυμένα με πέτρινο υλικό και επιχρισμένα με ασβεστοκονίαμα.



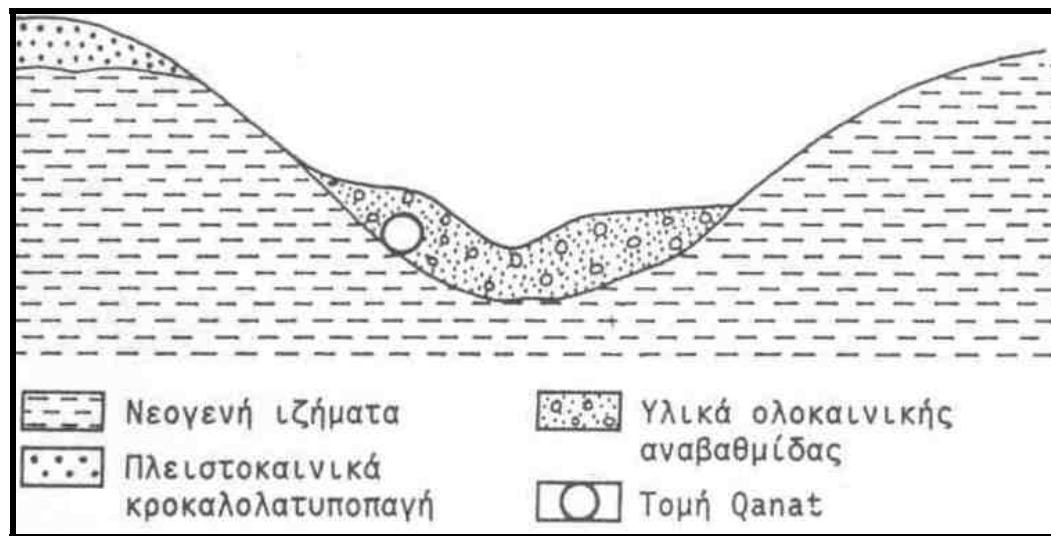
Σχήμα 3.7: Σχηματική γεωλογική τομή (σκίτσο) στην περιοχή "Κεραμιδαριό", ΝΑ του Ροδολείβους, Επαρχίας Φυλλίδας Σερρών [129].



Σχήμα 3.8: Η στοά του δυτικού qanat Ροδολείβους [129].

3.3.3. Τύπος qanat Σιδηροδρομικού Σταθμού Αγγίστας

Το qanat αυτό βρίσκεται στη δυτική αναβαθμίδα του ρέματος της Αγγίστας. Η ζώνη υδρομάστευσης είναι στην επαφή των υδροπερατών ποταμο-χειμαρρείων υλικών της αναβαθμίδας και των μη υδροπερατών Μειοκαινικών – Πλειοκαινικών αποθέσεων, όπως παριστάνεται σχηματικά (χωρίς κλίμακα) στο **Σχήμα 3.9**.



Σχήμα 3.9: Σχηματική γεωλογική τομή (σκίτσο) της ζώνης υδρομάστευσης του qanat Σιδηροδρομικού Σταθμού Αγγίστας, Επαρχίας Φυλλίδας Σερρών ^[129].

Το εν λόγω έργο είναι το νεώτερο της περιοχής και κατασκευάστηκε το 1895, προκειμένου να εξασφαλιστεί το απαιτούμενο νερό για τη λειτουργία των ατμομηχανών του σιδηροδρομικού σταθμού. Είναι το μόνο qanat του οποίου το νερό δεν φτάνει στην επιφάνεια, αλλά σε υπόγεια δεξαμενή. Με τη μεταφορά του σιδηροδρομικού σταθμού και την μεταγενέστερη ηλεκτροδότηση της περιοχής, σήμερα, το νερό αντλείται για την ύδρευση του οικισμού ^[129].

Παλαιότερα, η παροχή ήταν μεγαλύτερη από 30 m³/h (= 720 m³/day). Όμως, το 1972, ένα επιφανειακό έγκοιλο σε απόσταση 100 m από τη δεξαμενή, έγινε αιτία δραστηκής μείωσής της (τους θερινούς μήνες συχνά μηδενίζεται).

3.3.4. Τύπος qanat Αγγίστας

Από μορφολογική και υδρογεωλογική άποψη, το qanat Αγγίστας μοιάζει κατά πολύ με αυτό της Νέας Ζίχνης. Διαφέρει, όμως, ως προς την επιφανειακή μορφολογία. Συγκεκριμένα, ενώ βρίσκεται στον πυθμένα ξηρής κοιλάδας, δεν αναπτύσσεται παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα αυτής, αλλά κάθετα. Τέμνει τις ράχες σε μήκος περίπου 2 km [129].

Από τις κλιτύες της κοιλάδας το νερό μεταφερόταν στους υψηλότερους οικισμούς με πήλινους σωλήνες, οι οποίοι έχουν σήμερα αντικατασταθεί με πλαστικούς. Πρόκειται για το μεγαλύτερο σε μήκος qanat της περιοχής (> 4 km), αλλά και το βαθύτερο.

Η σημερινή παροχή του κυμαίνεται γύρω στα 50 m³/h (= 1.200 m³/day). Κατά την περίοδο της κατασκευής του η απόδοσή του πρέπει να ήταν μεγαλύτερη, αλλά από τότε ακολούθησαν σε πολλά σημεία κατακρημνίσεις της οροφής και των τοιχωμάτων που μείωσαν σημαντικά την παροχή του.

4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

4.1. Γενικά

Στόχος της υδρογεωλογικής έρευνας είναι να καθοριστεί το υδρογεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής ενδιαφέροντος, ώστε να ελεγχθεί η γενικότερη συμπεριφορά του υδροφορέα που τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού. Δηλαδή, να βρεθούν οι μηχανισμοί λειτουργίας των υδροφόρων στρωμάτων, η δυναμικότητα των υπαρχόντων υδατικών πόρων και η δυνατότητα περαιτέρω εκμετάλλευσης του υδροφορέα, μέσω υδρομαστευτικής στοάς.

Βέβαια, η εκτίμηση των διαθέσιμων αποθεμάτων της περιοχής ενδιαφέροντος, με δεδομένες τις συνθήκες όπου οι περίμετροι των υπόγειων (υδρογεωλογικών) λεκανών είναι άδηλοι (ανθρακικά πετρώματα), οι μηχανισμοί υφαλμύρισης της σημαντικότερης πηγής (Αλμυρού) χαρακτηρίζονται ασαφείς, οι μηχανισμοί διείσδυσης θαλασσινού νερού θεωρούνται αναπόδεικτοι και οι υδρογεωλογικές σχέσεις των διαφόρων λιθολογικών ενοτήτων της ευρύτερης περιοχής ακόμη απροσδιόριστες, συνιστά ένα πολύπλοκο ερευνητικό αντικείμενο.

Επομένως, η εξέταση τρόπων εκμετάλλευσης του υδροφορέα σημαίνει επίλυση ερωτημάτων που συνθέτουν βασική έρευνα και έρευνα υποδομής. Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η παρουσίαση στοιχείων τα οποία συνθέτουν την υδρογεωλογική συμπεριφορά του υδροφόρου ορίζοντα.

4.2. Γεωλογική περιγραφή της περιοχής ενδιαφέροντος

4.2.1. Μορφολογία

Η βόρεια περιοχή του Νομού Ηρακλείου ορίζεται από τον ορεινό όγκο του Ψηλορείτη, στην νοτιοδυτική πλευρά της, και χαρακτηρίζεται από έλλειψη πεδιάδων μεγάλης έκτασης. Η περιοχή ενδιαφέροντος (ευρύτερη περιοχή Δήμου Ηρακλείου) παρουσιάζει ιδιαίτερα ποικιλόμορφο ανάγλυφο, το οποίο οφείλεται σε διάφορα γεωλογικά φαινόμενα, κυρίως όμως στην έντονη επίδραση των νεοτεκτονικών κινήσεων που έδρασαν κατά την περίοδο του Μειόκαινου και του Πλειστοκαίνου, ενώ η λεπτομερέστερη μορφολογική της υφή έχει διαμορφωθεί από τις διαδικασίες της διάβρωσης και της αποσάθρωσης των πετρωμάτων.

Με βάση το υψόμετρο, η περιοχή μελέτης μπορεί να διακριθεί σε τρεις μορφολογικές ζώνες:

- Χαμηλή (πεδινή) ζώνη, από την ακτή (0 m) μέχρι +200 m.
- Ημιορεινή ζώνη, μεταξύ +200 m και +400 m.
- Ορεινή ζώνη, με υψόμετρα άνω των +400 m.

Από αεροφωτογραφίες, κλίμακας περίπου 1:30.000 (χρονολογία λήψης 1989), έγινε φωτογεωλογική αναγνώριση της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος. Κατά την πραγματοποίηση της φωτογεωλογικής εξέτασης, συγκρίθηκαν τα γεωλογικά δεδομένα που προέκυψαν από τους τοπογραφικούς και τους γεωλογικούς χάρτες, κλίμακας 1:50.000, με τα δεδομένα των αεροφωτογραφιών. Σκοπός της σύγκρισης ήταν:

- η εξοικείωση με τη φυσιογραφία της περιοχής,
- η επισημάνση ζωνών υδρογεωλογικού ενδιαφέροντος, και
- ο οπτικός έλεγχος προσπέλασης διαφόρων σημείων ενδιαφέροντος στον χάρτη.

Η μελέτη της φωτογεωλογίας χρησίμευσε και στο να ελεγχθούν και να επεκταθούν τοπικές παρατηρήσεις από επιτόπιες αναγνώρισεις και από αποτελέσματα ερευνητικών γεωτρήσεων και γεωφυσικών βυθοσκοπήσεων. Η εργασία αυτή αποτέλεσε και ουσιαστική προεργασία για την υπόδειξη υδατοπιθανών περιοχών στα πλαίσια του ερευνητικού έργου συνεργασίας Πολυτεχνείου Κρήτης και ΔΕΥΑΗ.

4.2.2. Γεωλογία

Στην περιοχή Ηρακλείου εμφανίζονται σχεδόν όλοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί της γεωλογικής δομής της Κρήτης, του αυτόχθονου συστήματος, του αλλόχθονου συστήματος και των ιζημάτων του Τριτογενούς και Τεταρτογενούς.

Η γεωλογική – τεκτονική δομή της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος ακολουθεί την πολυπλοκότητα των δομών της Κρήτης. Οι γεωλογικές ενότητες που συναντώνται στην περιοχή μελέτης, από τις νεώτερες προς τις παλαιότερες, έχουν ως ακολούθως:

α) Νεώτερες αποθέσεις

Οι αποθέσεις αυτές (Νεογενές – Τεταρτογενές) έχουν μεγάλες επιφανειακές αναπτύξεις, σε όλη την υπό έρευνα περιοχή. Το ανατολικό τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος καλύπτεται σχεδόν εξολοκλήρου από αυτούς τους σχηματισμούς.

Εξετάζοντας χωριστά τους σχηματισμούς του Τεταρτογενούς και του Νεογενούς διακρίνονται ^[135]:

- **Πλειστοκαινικές αποθέσεις (Τεταρτογενές).**

Τα ιζήματα του Τεταρτογενούς περιορίζονται σε μια στενή παράκτια ζώνη δυτικά της πηγής Αλμυρού και στις κοίτες του Αλμυρού ποταμού και του Γαζανού ποταμού. Το πάχος τους δεν υπερβαίνει τα 25 m.

- **Πλειοκαινικές – Μειοκαινικές αποθέσεις (Νεογενές).**

Τα ιζήματα του Πλειόκαινου (κροκαλοπαγή, αργιλομαργαϊκές αποθέσεις, άμμος κ.ά.) και του Μειόκαινου (βιογενείς ασβεστόλιθοι, μάργες, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, γύψοι κ.ά.), επικάθονται ασυμφώνως στους αλπικούς σχηματισμούς της περιοχής, καταλαμβάνοντας αρκετά μεγάλη έκταση. Επιφανειακά απαντώνται σε περιοχές που βρίσκονται στα ανατολικά τμήματα της περιοχής ενδιαφέροντος. Το συνολικό τους πάχος υπερβαίνει τα 300 m.

β) Αλλόχθονο σύστημα

Αποτελείται από γεωτεκτονικές σειρές, επωθημένες σε διαδοχικά λέπια. Στην περιοχή μελέτης οι γεωτεκτονικές σειρές που απαντώνται είναι τα καλύμματα των εσωτερικών ζωνών, η γεωτεκτονική ζώνη "Γαβρόβου – Τριπόλεως" και η σειρά "φυλλιτών – χαλαζιτών".

- **Καλύμματα εσωτερικών ζωνών.**

Πρόκειται για τεκτονικά καλύμματα των εσωτερικών γεωτεκτονικών ζωνών (Πελαγονική, Υποπελαγονική) που περιλαμβάνουν ποικίλους σχηματισμούς, όπως φλύσχη, φλυσχοειδή και αγκι-μεταμορφωμένα ή μεταμορφωμένα πετρώματα (φακοί μαρμάρων, οφιόλιθοι και σχιστόλιθοι). Το οφιολιθικό σύμπλεγμα αποτελεί το κύριο μέλος, από πλευράς ποσοστού ανάπτυξης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η επιφανειακή εμφάνιση των οφιολίθων στην περιοχή μελέτης είναι εξαιρετικά περιορισμένη, οριοθετείται από τεμνόμενα ρήγματα και βρίσκεται στο ΝΔ τμήμα της. Το πάχος του σχηματισμού φτάνει τα 80 m ^[135].

- **Γεωτεκτονική ζώνη "Γαβρόβου – Τριπόλεως".**

Η γεωτεκτονική αυτή ζώνη, στην περιοχή ενδιαφέροντος, έχει συνολικό πάχος μέχρι και 500 m και περιλαμβάνει, από τους νεώτερους προς τους παλαιότερους σχηματισμούς ^[135].

- Φλύσχη (Ηώκαινο – Ολιγόκαινο).
- Ασβεστόλιθους (δολομιτικούς, ωλιθικούς, ταινιώδεις) και δολομίτες Ανώτερου Ιουρασικού – Κατώτερου Κρητιδικού.
- Κρυσταλλικούς δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες Ανώτερου Τριαδικού – Μέσου Ιουρασικού.
- Αργιλικούς σχιστόλιθους Μέσου – Ανώτερου Τριαδικού. Μαζί με τους ραουβάκες (σειρά "Ραβδούχα", ηλικίας Λαδινίου – Καρνίου) αποτελούν τη βάση του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης, η οποία είναι επωθημένη πάνω στη "φυλλιτική – χαλαζιτική" σειρά.

Η εν λόγω γεωτεκτονική ζώνη καλύπτει επιφανειακά σχεδόν όλο το δυτικό ήμισυ της υπό έρευνας περιοχής.

• **Σειρά "φυλλιτών – χαλαζιτών".**

Η σειρά αυτή συνιστάται κυρίως από σχιστόλιθους, φυλλίτες και χαλαζίτες, με παρεμβολές ανθρακικών πετρωμάτων, μεταβασιτών κ.ά. Η γεωτεκτονική θέση της παραμένει άγνωστη. Ορισμένοι ερευνητές την θεωρούν υπόβαθρο της ζώνης Γαβρόβου – Τριπόλεως και άλλοι ανεξάρτητη μονάδα ^[165]. Το μέγιστο πάχος της σειράς υπολογίζεται περίπου στα 600 m. Στην περιοχή ενδιαφέροντος εμφανίζεται επιφανειακά μόνο στο Βόρειο τμήμα της.

γ) Αυτόχθονο σύστημα

Αναφέρεται και ως σειρά "Ταλέων Ορέων" ή ενότητα "Κρήτης – Μάνης". Η γεωτεκτονική της θέση δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμη. Πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι αποτελεί την μόνη αυτόχθονη σειρά στον Ελλαδικό χώρο και πάνω σε αυτήν επωθήθηκαν όλες οι άλλες. Άλλη άποψη, η οποία είναι και η επικρατέστερη, την θεωρεί τμήμα της Ιονίου ζώνης ^[165].

Η νεώτερη ενότητα του αυτόχθονου συστήματος αντιπροσωπεύεται από την χαρακτηριστική σειρά των "**Πλακωδών ασβεστόλιθων**" (Plattenkalk). Η σειρά αυτή αποτελείται από σκοτεινότεφρους και υπόλευκους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, έντονα πτυχωμένους και με πυριτικές ενστρώσεις ηλικίας Μέσου Ιουρασικού – Ηώκαινου. Το πάχος της είναι άγνωστο, αλλά δεν φαίνεται να υπερβαίνει τα 250 – 300 m. Στην περιοχή που εξετάζεται, η επιφανειακή εμφάνιση των Πλακωδών

ασβεστόλιθων είναι πολύ περιορισμένη σε έκταση, στο νότιο – νοτιοδυτικό τμήμα της, πλησίον του Γωνιανού Φαραγγιού [135].

Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζονται αναλυτικές στρωματογραφικές στήλες, στις οποίες παριστάνονται σχηματικά οι γεωλογικές ενότητες που εντοπίστηκαν στην περιοχή έρευνας.

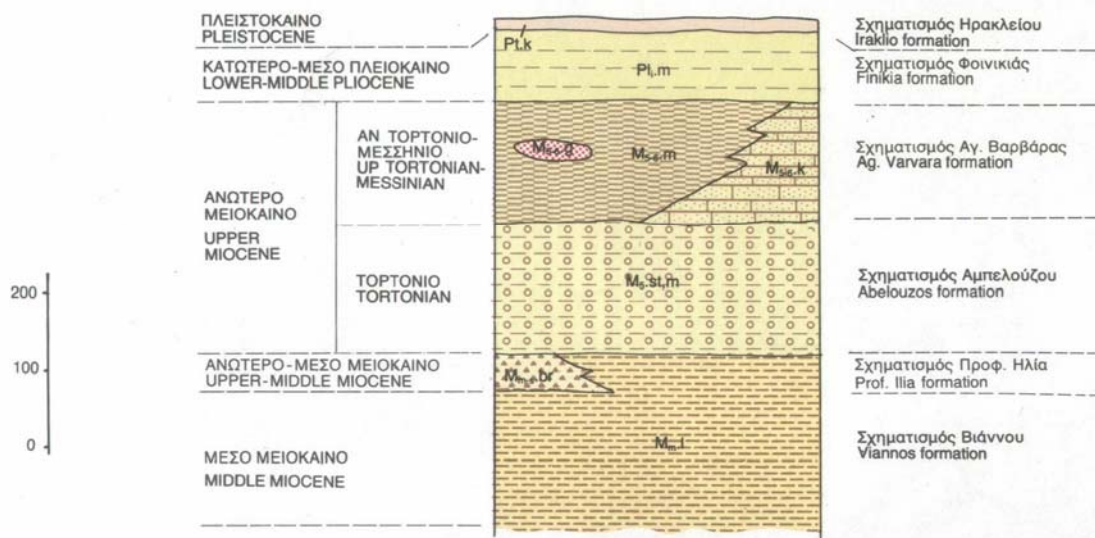
4.2.3. Τεκτονική

Οι τεκτονικές δομές της περιοχής ενδιαφέροντος χαρακτηρίζονται από όλα εκείνα τα στοιχεία που συνθέτουν την γενικότερη τεκτονική δομή της Κρήτης. Η αλπική τεκτονική δημιούργησε πτυχώσεις και ρήγματα, τα οποία διαμόρφωσαν την σημερινή εικόνα του νησιού.

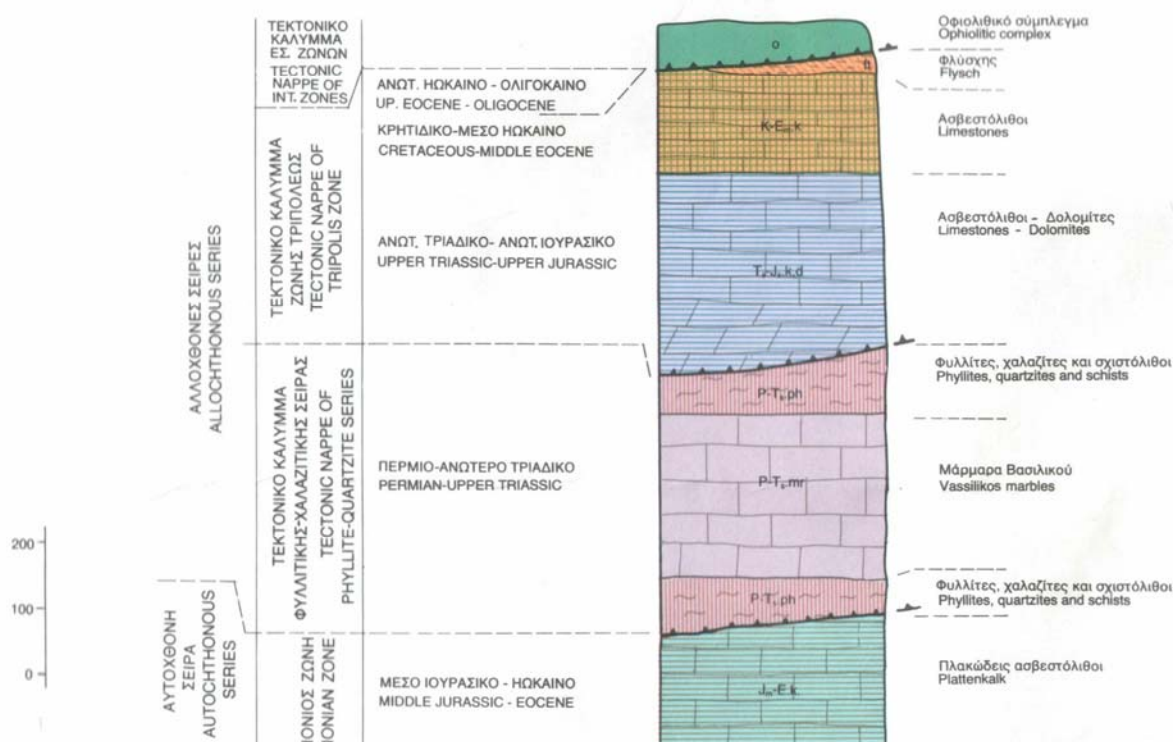
Οι πτυχογόνες δυνάμεις έδρασαν με διεύθυνση $B \rightarrow N$ και προκάλεσαν πτυχές, των οποίων η επικρατέστερη διεύθυνση των αξόνων τους είναι $A \rightarrow \Delta$, ενώ τα αξονικά επίπεδα κλίνουν προς τον Βορρά. Μετά την επώθηση των αλλόχθονων ενοτήτων συντελείται νέα φάση πτυχώσεων, η οποία χαρακτηρίζεται από πλήθος λεπιώσεων, έντονων παραμορφώσεων και πτυχών, με άξονες ποικίλων διευθύνσεων [170].

Κατά τη φάση ρηγμάτωσης της Κρήτης δημιουργήθηκε σειρά ρηγμάτων, με κύριες διευθύνσεις $B \rightarrow N$ και $A \rightarrow \Delta$. Τα ρήγματα αυτά δραστηριοποιούνταν μέχρι την περίοδο του Πλειστόκαινου, οπότε και ολοκληρώθηκε η ανύψωση των κύριων οροσειρών της Κρήτης. Κατά την περίοδο του Νεογενούς δημιουργήθηκαν νεώτερα ρήγματα, των οποίων οι διευθύνσεις ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή. Επικρατούν όμως εκείνα με διευθύνσεις $BA \rightarrow N\Delta$ και $NA \rightarrow B\Delta$ [170].

ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΝΕΟΓΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ STRATIGRAPHIC COLUMN OF NEOGENE FORMATIONS



ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΑΛΠΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ COMPOSITE STRATIGRAPHIC COLUMN OF ALPINE FORMATIONS



Σχήμα 4.1: Αναλυτικές τομές της γεωλογικής δομής της περιοχής ενδιαφέροντος (απόσπασμα από τον γεωλογικό χάρτη "Φύλλο Ηράκλειο", ΙΓΜΕ, 1996, κλίμακα 1:50.000).

4.3. Υδρογεωλογική περιγραφή της περιοχής ενδιαφέροντος

4.3.1. Υδρολιθολογία

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή ενδιαφέροντος, σε σχέση με την υδρολιθολογική τους συμπεριφορά, ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες: α) τις σύγχρονες και παλαιότερες προσχώσεις και τους νεογενείς σχηματισμούς, β) τα ανθρακικά πετρώματα, και γ) τους υδατοστεγανούς (πρακτικά αδιαπέρατους) σχηματισμούς [138].

Το μεγαλύτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον εντοπίζεται στα ανθρακικά πετρώματα. Αυτά περιλαμβάνουν ένα μεγάλο φάσμα λιθολογικών και ορυκτολογικών διαφοροποιήσεων μεταξύ ασβεστόλιθων, δολομιτών και μαρμάρων, με μεγάλη ποικιλία στον συντελεστή περατότητας και στον βαθμό καρστικοποίησης.

Για τις ανάγκες της ανά χείρας εργασίας, οι υδρολιθολογικές ενότητες, με βάση την αλληλουχία των διαδοχικών λεπιώσεων, διαχωρίστηκαν ως εξής:

α) Τεταρτογενές – Νεογενές

Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν τους καλύτερα εκφρασμένους κοκκώδεις σχηματισμούς της περιοχής ενδιαφέροντος και καταλαμβάνουν, φυσιογραφικά, πυθμένες κοιλάδων και γενικά τα χαμηλότερα τοπογραφικά σημεία της περιοχής.

Οι σύγχρονες Τεταρτογενείς αποθέσεις εμφανίζουν την κύρια ανάπτυξή τους στις παράκτιες ζώνες και στις κοίτες των ποταμών Γαζανού και Αλμυρού. Στις Τεταρτογενείς προσχώσεις φιλοξενούνται, κατά κύριο λόγο, τοπικοί φρεάτιοι ορίζοντες, όπως αυτοί στις κοιλάδες του μέσου και κάτω ρου του Γαζανού ποταμού. Αποτελούν, λόγω αυξημένου πορώδους, πολύ καλή υδρολιθολογική ενότητα, η οποία όμως έχει μικρή έκταση στην περιοχή που μελετάται.

Το Νεογενές αφορά καλά ανεπτυγμένους, σε έκταση και πάχος, κοκκώδεις υδροφόρους σχηματισμούς. Η ποικιλία των λιθολογικών σχηματισμών διαφοροποιεί την υδρογεωλογική τους συμπεριφορά (ασυνεχής), με σημαντικότερους (λόγω αυξημένου πορώδους και εμφανίσεων πηγών) τους βιογενείς μαργαϊκούς – οργανοκλαστικούς ασβεστόλιθους του Ανώτερου Μειόκαινου, τις Πλειοκαινικές ψαμμιτομάργες, τους γύψους και τα ποικίλης σύστασης λατυπο-κροκαλοπαγή της βάσης. Η επίσης μεγάλη ποικιλία των σχηματισμών στους οποίους επικάθονται τα

Νεογενή ιζήματα (ανθρακικά πετρώματα του υποβάθρου ή των καλυμμάτων στο οφιολιθικό σύμπλεγμα, φλύσχης Πίνδου, φυλλίτες – χαλαζίτες), καθορίζει εν μέρει την διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά τους.

β) Καλύμματα εσωτερικών ζωνών

Η γεωτεκτονική αυτή ενότητα δεν εξετάζεται χωριστά από υδρογεωλογική άποψη γιατί εμφανίζεται σε εξαιρετικά περιορισμένη έκταση στην περιοχή ενδιαφέροντος και γενικά χαρακτηρίζεται από μειωμένη υδροπερατότητα.

γ) Γεωτεκτονική ζώνη Τρίπολης

Σ' αυτή την υδρογεωλογική ενότητα περιλαμβάνονται τα ασβεστολιθικά πετρώματα της ζώνης "Γαβρόβου – Τριπόλεως", καθώς και ο φλύσχης της, ο οποίος συμμετέχει κατά θέσεις, αλλά γενικά σε μικρό ποσοστό.

Η ενότητα αυτή, λόγω της αξιόλογης γεωγραφικής της έκτασης (σχεδόν σε ολόκληρο το δυτικό ήμισυ της περιοχής ενδιαφέροντος), της ανάπτυξής της σε προσιτές γεωγραφικές – ορεογραφικές θέσεις, αλλά και της μεγάλης περατότητάς της, εξαιτίας του δευτερογενούς της πορώδους, αναδεικνύεται στην σημαντικότερη υδρογεωλογική ενότητα της περιοχής και γι' αυτό το λόγο εξετάστηκε κατά προτεραιότητα.

δ) Φυλλίτες – χαλαζίτες

Πρόκειται για εμφανίσεις, οι οποίες αποτελούν το φυσικό γεωλογικό (γεωτεκτονικό) υπόβαθρο της ζώνης Τρίπολης. Η υδροφορία που φιλοξενείται στην ενότητα αυτή είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

Ο κύριος υδρογεωλογικός τους ρόλος έγκειται στο ότι οριοθετούν το υπόβαθρο της καρστοποίησης των ανθρακικών πετρωμάτων της ζώνης Τρίπολης. Η επωθητική σχέση της ενότητας των φυλλιτών – χαλαζιτών σε σχέση με τους Πλακώδεις ασβεστόλιθους, διαχωρίζει τους τελευταίους από τους ασβεστόλιθους της Τρίπολης.

ε) Πλακώδεις ασβεστόλιθοι (Plattenkalk)

Οι σχηματισμοί αυτοί εμπλέκονται ενεργά στην υδροφορία, σε συνδυασμό με την υδροφορία της ζώνης Τρίπολης. Η κυκλοφορία νερού μέσα στους Πλακώδεις

ασβεστόλιθους γίνεται λιγότερο διάχυτα απ' ότι μέσα στους ασβεστόλιθους Τρίπολης, δίδοντας την γενική εντύπωση ότι οι σχηματισμοί αυτοί έχουν περισσότερο ετερογενή χαρακτήρα και υστερούν από πλευράς αποδόσεως (συνολικό πορώδες και μεταβιβαστικότητα).

Σημαντικό τους πάντως μειονέκτημα, σε σχέση με τα ανθρακικά πετρώματα Τρίπολης, όσον αφορά την εκμεταλλευσιμότητά τους μέσω γεωτρήσεων, είναι τα μεγάλα βάθη στα οποία εντοπίζεται η υδροφορία τους. Προσιτή περιοχή, λόγω χαμηλών υψομέτρων, είναι εκείνη του Γωνιανού Φαραγγιού.

4.3.2. Ανάπτυξη υδροφοριών

Η ανάπτυξη των υπόγειων υδροφοριών στους διαφόρους σχηματισμούς και στις διάφορες γεωλογικές ενότητες παρουσιάζει, όπως είναι φυσικό, διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή. Αυτό οφείλεται στις επιμέρους συνθήκες κάθε περιοχής (κυρίως τεκτονική) ή των υδρολιθολογικών ενοτήτων. Στα επόμενα γίνεται συνοπτική περιγραφή των σημαντικότερων υδροφοριών στην περιοχή ενδιαφέροντος.

α) Υδροφορίες προσχώσεων

Η σημαντικότερη εμφάνισή τους είναι στον Γαζανό "ποταμό" (χειμάρρος). Οι προσχώσεις αυτές είναι φερτά υλικά από τον ποταμό, με ποικίλο πάχος, ανάλογο του ρυθμού απόθεσής τους στην νεογενή λεκάνη. Η υδροφορία τους είναι ικανοποιητική και η τροφοδοσία εξασφαλίζεται, κατά κύριο λόγο, από δευτερογενείς διηθήσεις από τις επιφανειακές απορροές του κυρίως ποταμού και από τα άλλα ρέματα της περιοχής.

Στην έκταση των προσχώσεων υπάρχει πλήθος πηγαδιών βάθους έως 10 m, το νερό των οποίων χρησιμοποιείται για άρδευση. Όμως, ήδη παρατηρούνται φαινόμενα υφαλμύρισης περιοδικού χαρακτήρα σε ετήσια βάση ("χειμώνας" – "καλοκαίρι"), λόγω υπεραντλήσεων και επειδή τα ρέματα της περιοχής τροφοδοτούν τους υπόγειους υδροφορείς εποχιακά, αφού δεν διατηρούν επαρκείς επιφανειακές απορροές.

Η σταδιακή υφαλμύριση ολόκληρου του υδροφορέα είναι αναπόφευκτη και δεν μπορεί να αντιστραφεί πρακτικά, καθώς κάτι τέτοιο θα απαιτούσε το σταμάτημα των αντλήσεων για πολλά έτη. Ως μόνη λύση για να επανέλθει η ποιότητα των υπόγειων νερών σε ανεκτά επίπεδα διαφαίνεται πλέον η περίπτωση του τεχνητού

εμπλουτισμού του υδροφορέα με νερά της επιφανειακής απορροής και με κατάλληλα τεχνικά έργα.

β) Υδροφορίες Νεογενών αποθέσεων

Στις Νεογενείς αποθέσεις οι υπόγειες υδροφορίες αναπτύσσονται κατά περίπτωση στους αδρομερείς σχηματισμούς (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες), ενώ μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή των μαργαϊκών ασβεστόλιθων (συνήθως παχυστρωματώδεις και κατακερματισμένοι). Η ανάπτυξη αυτών των υδροφοριών εξαρτάται από την τοπική στρωματογραφία, την δυνατότητα τροφοδοσίας όταν ο υδροφορέας έχει κάποιο βάθος από την επιφάνεια και το στρωματογραφικό υπόβαθρο (φλύσχης, ανθρακικά, φυλλίτες – χαλαζίτες).

Το υδατικό δυναμικό των Νεογενών αποθέσεων είναι σχετικά μικρό, συγκριτικά με την έκταση και τον όγκο τους και σε σχέση με το δυναμικό των καρστικών υδροφοριών. Αυτό οφείλεται στη λιθολογική σύσταση του σχηματισμού η οποία χαρακτηρίζεται κυρίως από την παρουσία μάργων, οι οποίες μειώνουν την ικανότητα του σχηματισμού να αναπτύξει υδροφορία.

Κυριότερη λιθολογική μονάδα, στην οποία αναπτύσσονται κατά τόπους αξιόλογες υδροφορίες, είναι αυτή των μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους αναβλύζει μεγάλος αριθμός πηγών (κυρίως στις επαφές τους με τις υποκείμενες μάργες), με μικρές παροχές.

Με τις γεωτρήσεις που έχουν γίνει στα Νεογενή καλύπτονται υδρο-αρδευτικές ανάγκες, μικρής κυρίως έκτασης και συνήθως τοπικές (γεωτρήσεις βάθους γύρω στα 100 m από τον Δήμο Γαζίου κ.λπ.). Προβλήματα ποιότητας του υπόγειου νερού (υφαλμύριση) έχουν εντοπισθεί σε όλα τα παράκτια υδρομαστευτικά έργα.

γ) Καρστικές υδροφορίες

Στην ευρύτερη περιοχή Ηρακλείου, οι σημαντικότερες υδροφορίες, από άποψη δυναμικότητας και δυνατότητας κάλυψης αναγκών, είναι οι καρστικές. Γενικά, σε όλες τις ανθρακικές ενότητες της περιοχής, οι υπόγειες υδροφορίες διαμορφώνονται σε χαμηλά υψόμετρα, με αναφορά τη στάθμη της θάλασσας και μόνο όταν υπάρχουν λιθολογικές, στρωματογραφικές ή τεκτονικές ασυνέχειες, αυτές διαμορφώνονται σε

διαφορετικά επίπεδα. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρούνται υπερυψωμένες στάθμες και αναβλύσεις πηγών σε διάφορα υψόμετρα.

Στις βορειο-ανατολικές και ανατολικές υπώρειες του ορεινού συγκροτήματος Ψηλορείτη φιλοξενείται αξιόλογη καρστική υδροφορία, η οποία είναι εγκατεστημένη στα ανθρακικά πετρώματα της "Τρίπολης" και των "Πλακωδών ασβεστόλιθων". Η κύρια υδροφορία συνδέεται με το γεωμορφολογικό (φυσιογραφικό) επίπεδο βάσης (στάθμη θάλασσας) και σημαντικότερη επιφανειακή εκδήλωσή της είναι η πηγή Αλμυρού, η οποία βρίσκεται γύρω στο 1,5 km ενδοχώρια του μυχού του κόλπου Ηρακλείου, στα "ριζά" του υψώματος (λόφος) "Κέρη".

Η σημαντικότερη αυτή πηγή αναβλύζει σε υψόμετρο +1,5 έως +3,0 m, στην επαφή Νεογενών αποθέσεων με ασβεστόλιθους Τριπόλεως. Οι παροχές της είναι εντυπωσιακές, φτάνοντας τα 3,5 – 40 m³/sec, ανάλογα με την εποχή ("καλοκαίρι" – "χειμώνας") [151].

Ποιοτικά όμως, το νερό της πηγής είναι γενικά υφάλμυρο, ακατάλληλο για ύδρευση, αλλά και για άρδευση. Κατά την περίοδο των χαμηλών παροχών του καλοκαιριού και του φθινοπώρου η αλμυρότητα υπερβαίνει τα 5.000 ppm Cl⁻ [156].

Πάντως, σε υγρές περιόδους υψηλών παροχών το νερό της πηγής καθίσταται πρακτικά "γλυκό" και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (βλέπε κεφ. 2, παρ. 2.4.3). Σήμερα τα νερά της πηγής εκρέουν στη θάλασσα πρακτικά ανεκμετάλλευτα.

Ένας σημαντικός αριθμός γεωτρήσεων που έχουν εκτελεσθεί, με κύριο σκοπό την ύδρευση του Δήμου Ηρακλείου και των γύρω οικισμών, έχουν εξορυχθεί γεωγραφικά και υδρογεωλογικά ανάντη της πηγής Αλμυρού και κατά μήκος των βορειο-ανατολικών και ανατολικών υπωρειών του Ψηλορείτη. Από τις γεωτρήσεις αυτές, οι οποίες έγιναν στο παρελθόν από διάφορους φορείς, αλλά και πρόσφατα (τα τελευταία 15 χρόνια) από την ΔΕΥΑΗ (πλέον των 50 γεωτρήσεων), πιστοποιείται ότι υπάρχει άφθονη καρστική υδροφορία που συναντάται περί την στάθμη της θάλασσας και αναπτύσσεται σε μεγάλο και άγνωστο βάθος.

Υδρογεωλογικά, οι γεωτρήσεις έχουν διατρήσει τα ανθρακικά πετρώματα των ζωνών της "Τρίπολης" και των "Πλακωδών ασβεστόλιθων", ξεκινώντας πολλές φορές από σχετικά μικρού πάχους στρωματογραφικά καλύμματα νεωτέρων σχηματισμών (Νεογενή, Τεταρτογενή). Η συναντώμενη υδροφορία, μέσα στα ανθρακικά πετρώματα των αλπικών γεωτεκτονικών ζωνών αποτελεί την κύρια υδροφορία που συνδέεται με το τοπικό γεωμορφολογικό επίπεδο βάσης (στάθμη θάλασσας).

Η γεωτεκτονική υποζώνη Τρίπολης αποτελεί σαφώς την σημαντικότερη ενότητα υδρογεωλογικού και οικονομοτεχνικού ενδιαφέροντος, καθώς περιλαμβάνει μεγάλες υδροαποθεματικές ζώνες, σε "λογικά" βάθη υδροφορίας. Η υδροφορία των περισσότερων γεωτρήσεων είναι εγκατεστημένη στα ανθρακικά πετρώματά της.

Αντίθετα, η υδρογεωλογικά εξίσου ενδιαφέρουσα ενότητα των Πλακωδών ασβεστόλιθων μειονεκτεί, όσον αφορά τα βάθη συνάντησής της. Τα ανθρακικά του αυτόχθονου συστήματος αναπτύσσονται σε σχετικά μεγάλα βάθη (επίπεδο αναφοράς στην επιφάνεια της θάλασσας), αλλά στις λίγες προσιτές περιοχές (πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού) έχουν δώσει πολύ καλά αποτελέσματα.

Όλες σχεδόν οι γεωτρήσεις έχουν συναντήσει ικανοποιητική υδροφορία (ποσοστό επιτυχίας πλέον του 95%), με στάθμη ηρεμίας από λίγα, για τις πλέον βόρειες, μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, για τις πλέον ενδοχώριες. Η υδροφορία συνεχίζει σε μεγάλο και άγνωστο βάθος κάτω από τη στάθμη της θάλασσας (άγνωστο υδρογεωλογικό υπόβαθρο του καρστ ή επίπεδο βάσης της καρστικής διάβρωσης). Η στάθμη ηρεμίας των βορειότερων γεωτρήσεων κυμαίνεται περί τα 6 – 12 m, ενώ για τις νοτιότερες και πλέον ενδοχώριες θέσεις υπερβαίνει τα 50 m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας [160].

Ποιοτικά, μετά από παρατεταμένες αντλήσεις παραγωγής, τα νερά των βορειότερων γεωτρήσεων είναι σε ποικίλο βαθμό επηρεασμένα από τη θάλασσα (πεδία άντλησης Κέρης και Τυλίσου, 2 – 7 km από την ακτή), ενώ των πλέον ενδοχώριων σταθερά "γλυκά" (πεδία Γωνιανού Φαραγγιού και Αγίου Μύρωνα).

Γενικά, οι εμφανίσεις των ανθρακικών πετρωμάτων κατέχουν, στο σύνολό τους, ευνοϊκές θέσεις σε ότι αφορά την θάλασσα. Κατά τόπους όμως, υφίστανται μέτωπα υφαλμύρινσης των υδροφοριών που καθιστούν τα νερά αυτών ακατάλληλα για ύδρευση ή και άρδευση. Πάντως, η υφαλμύριση που παρατηρείται τόσο στο πεδίο Κέρης (σε κάποιες γεωτρήσεις), όσο και στο πεδίο Τυλίσου (σε όλη του την έκταση), οφείλεται κυρίως στις εκτεταμένες υπεραντλήσεις του παρελθόντος.

4.4. Απογραφή σημείων νερού

Για την ολοκλήρωση της υδρογεωλογικής έρευνας, απογράφηκαν πλέον των 70 γεωτρήσεων, οι οποίες έχουν ανορυχθεί έως σήμερα από ιδιώτες ή φορείς με σκοπό να καλύψουν υδρευτικές ή αρδευτικές ανάγκες (περιοχές Κέρης, Τυλίσου, Γωνιανού

Φαραγγιού, Καβροχωρίου – Γαζίου, Κρουσώνα – Λουτρακίου, Αγίου Μύρωνα κ.ά.). Η απογραφή των σημείων νερού έγινε την διετία 1996-97, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος συνεργασίας μεταξύ ΔΕΥΑΗ και Πολυτεχνείου Κρήτης (έργο: "Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού Ποταμού").

Οι γεωτρήσεις κατανέμονται γεωγραφικά αμέσως ανάντη της πηγής Αλμυρού, στην περιοχή της Κέρης, μέχρι μερικά χιλιόμετρα ενδοχώρια, στις περιοχές Κρουσώνα και Αγίου Μύρωνα (πλέον των 16 km από την ακτή, σε ευθεία γραμμή). Σημαντικός αριθμός αυτών αναπτύσσεται κατ' άξονα Β – Ν, κατά μήκος των βορειο-ανατολικών και ανατολικών υπωρειών του Ψηλορείτη, σε υψόμετρα από 150 μέχρι και > 450 m.

Οι γεωτρήσεις στις οποίες επικεντρώθηκε το ενδιαφέρον ήταν αυτές που ήδη εκμεταλλεύεται ή παρακολουθεί η ΔΕΥΑΗ ή άλλοι φορείς, κοντά στις προτεινόμενες θέσεις για κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς, δηλαδή στα πεδία Κέρης, Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού. Οι γεωτρήσεις αυτές μπόρεσαν να αντιστοιχηθούν σε γεωλογικές τομές ("Τεχνικά Τεύχη" προόδου εργασιών) σε ποσοστό περίπου 80%. Για τις υπόλοιπες συγκεντρώθηκαν προφορικές κυρίως πληροφορίες από στελέχη της ΔΕΥΑΗ.

Συντεταγμένες και στοιχεία υδροφορίας των παραπάνω γεωτρήσεων, όπως και της πηγής Αλμυρού δίνονται στο Παράρτημα – Μέρος Β, στον **Πίνακα Β.1 (α – γ)**. Επίσης, στα **Σχήματα Β.1** έως και **Β.15** παρουσιάζονται διατιθέμενα στοιχεία λειτουργίας των γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΗ σε μορφή διαγραμμάτων.

4.5. Αποτύπωση έρευνας σε θεματικούς χάρτες

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της γεωλογικής – υδρογεωλογικής έρευνας και των απογραφών, κατά τρόπο συνολικό και συνδυασμένο.

Η παρουσίαση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ψηφιοποιητή (digitizer) και του σχεδιαστικού πακέτου AutoCAD 2000, σε τρεις θεματικές ενότητες:

- 1) Τοπογραφία – Σημεία νερού,
- 2) Γεωλογία – Υδρογεωλογία,
- 3) Επανατροφοδότηση.

4.5.1. Τοπογραφία – Σημεία νερού

Στο **Σχήμα 4.2** αποδίδεται η φυσιογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος (ευρύτερη περιοχή του Δήμου Ηρακλείου) με ισοϋψείς των 100 m, το βασικό υδρογραφικό δίκτυο (χείμαρροι), το κύριο οδικό δίκτυο και οι οικισμοί. Στον ίδιο χάρτη εμφανίζονται και τα υδρομαστευτικά έργα (γεωτρήσεις και προτεινόμενες θέσεις υδρομαστευτικής στοάς) της ΔΕΥΑΗ, στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως και η πηγή Αλμυρού.

Ο προαναφερόμενος χάρτης προέκυψε από επεξεργασία των τοπογραφικών χαρτών "Ηράκλειο" και "Ανώγεια", κλίμακας 1:50.000, έκδοσης Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ).

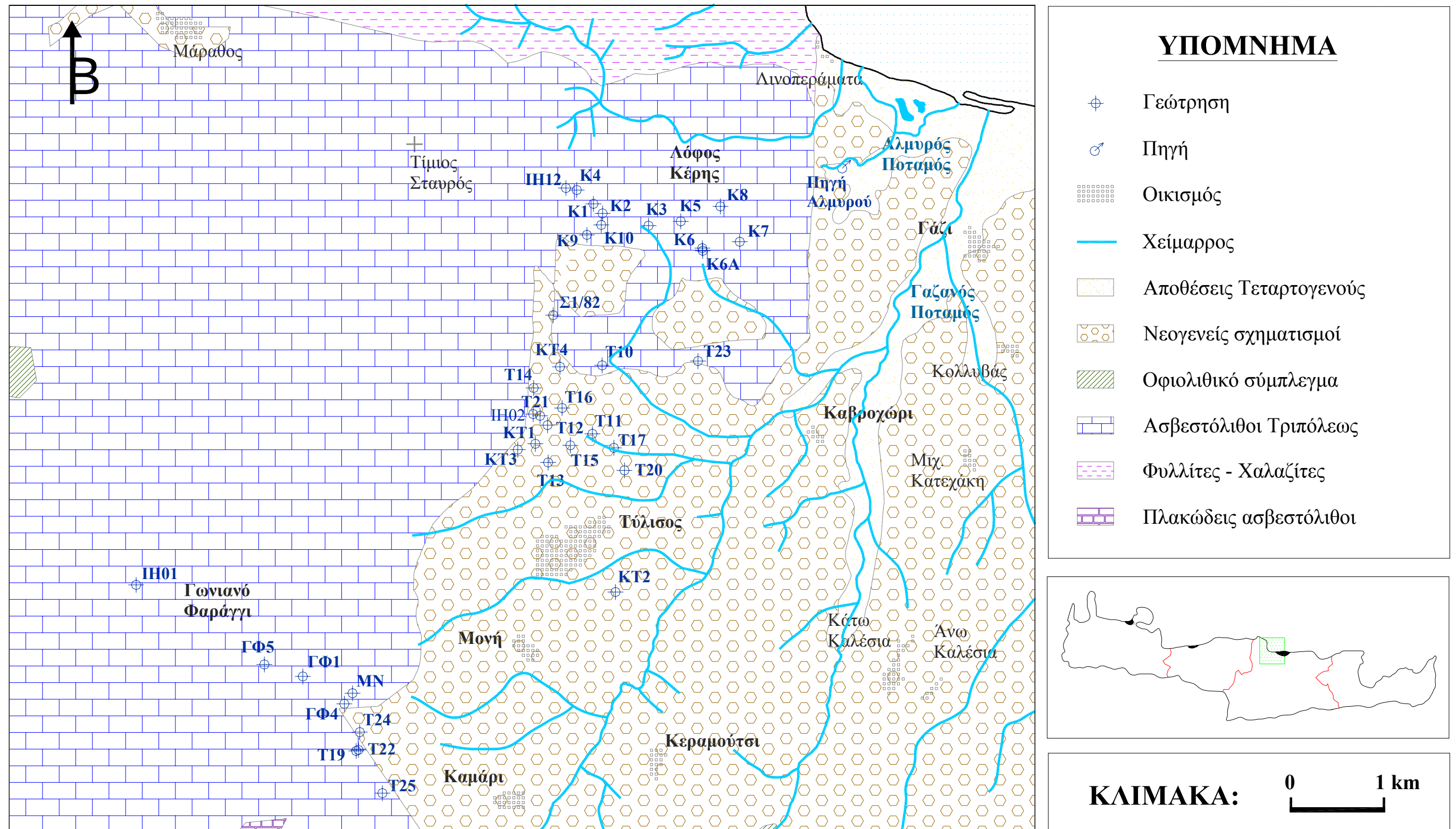
Η σύνταξη του χάρτη κρίθηκε σκόπιμη προκειμένου να είναι εύκολα αναγνωρίσιμη η φυσιογραφία κάθε περιοχής, η ευχέρεια προσπέλασης και κυρίως το απόλυτο υψόμετρο κάθε θέσης. Το τελευταίο αποτελεί βασικό κριτήριο για την εκμετάλλευση υδροφόρων οριζόντων με υδρομαστευτικά έργα.

Επιπροσθέτως, κατασκευάστηκε ο χάρτης του **Σχήματος Γ.1** του Παραρτήματος – Μέρος Γ, στον οποίο απεικονίζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της περιοχής ενδιαφέροντος ανά 20 m (αναλυτικότερη τοπογραφία).

Από τον χάρτη αυτόν προέκυψε η μορφή του ανάγλυφου της περιοχής ενδιαφέροντος που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση της ροής μέσω ModFlow (βλέπε κεφ. 6). Για το λόγο αυτό, στις περιοχές που κρίθηκε σκόπιμο, οι ισοϋψείς καμπύλες πυκνώθηκαν ακόμη περισσότερο (ανά 10 m) μέσω του AutoCAD.

4.5.2. Γεωλογία – Υδρογεωλογία

Στο **Σχήμα 4.3** έχουν συνοψισθεί οι υδρογεωολογικοί σχηματισμοί της περιοχής ενδιαφέροντος. Ο χάρτης αυτός προέκυψε από την επεξεργασία των γεωολογικών χαρτών (φύλλα) "Ηράκλειο", κλίμακας 1:50.000, και "Ανατολική Κρήτη", κλίμακας 1:200.000, εκδόσεως Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ).



Επισημαίνεται ότι, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται ενοποιημένοι σχηματισμοί με βάση την υδρογεωλογική τους σημασία. Δηλαδή, αποδίδονται υδρολιθολογικές ενότητες (βλέπε παράγραφο 4.3.1) και όχι γεωτεκτονικές μονάδες.

Στα **Σχήματα 4.4** έως και **4.23** παρουσιάζονται γεωλογικές τομές, οι οποίες κατασκευάστηκαν προκειμένου να περιγράψουν το υπόγειο ανάγλυφο της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι θέσεις των τομών αυτών δίνονται στον χάρτη του **Σχήματος Γ.2** στο Παράρτημα – Μέρος Γ.

Οι παραπάνω 20 τομές δημιουργήθηκαν με βάση τον προηγούμενο χάρτη (Σχήμα 4.3), τις γεωλογικές τομές των γεωτρήσεων από τα "Τεχνικά Τεύχη" προόδου εργασιών και επί τόπου παρατηρήσεις.

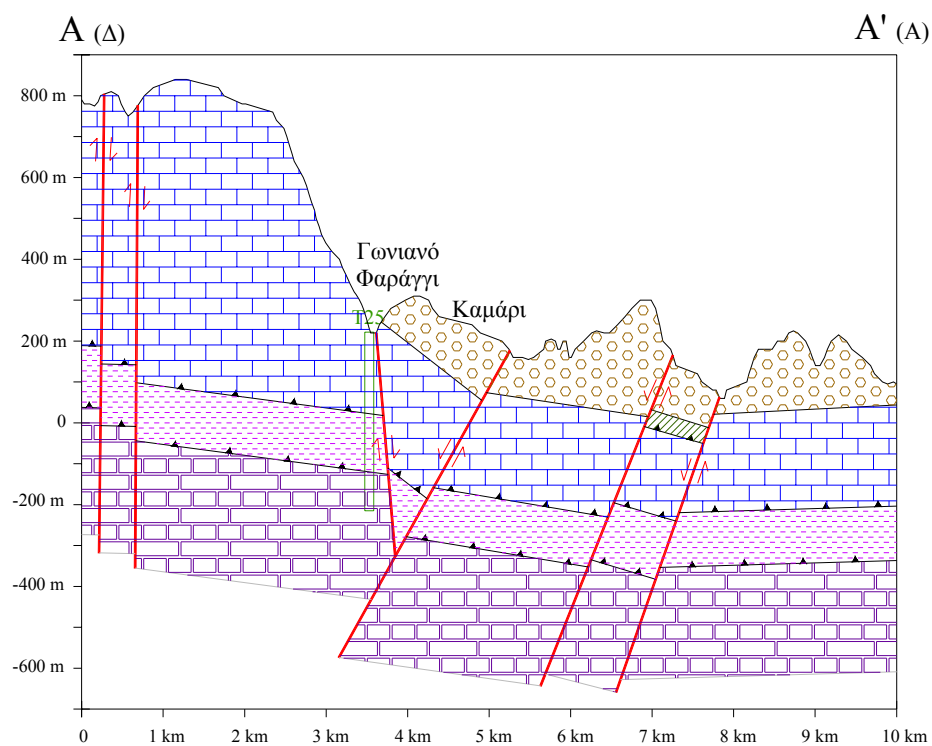
Οι γεωλογικές τομές AA', BB', ΓΓ', ΔΔ', ΕΕ', ΣτΣτ', ΖΖ', ΗΗ', ΘΘ', ΙΙ', ΙαΙα', ΙβΙβ', ΙγΙγ', ΙδΙδ', ΙεΙε', ΙστΙστ' και ΙζΙζ' (Σχήματα 4.4 έως και 4.20) επιλέχθηκαν παράλληλες, με διεύθυνση $\Delta \rightarrow A$ και απόσταση 500 m η μία από την άλλη. Με τον τρόπο αυτό καλύφθηκε όλη η περιοχή ενδιαφέροντος και κατασκευάστηκαν τα υπόγεια ανάγλυφα κάθε υδρολιθολογικού σχηματισμού, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση της ροής μέσω ModFlow (κεφ. 6).

Επιπλέον των ανωτέρω γεωλογικών τομών κατασκευάστηκαν και οι τομές ΙηΙη', ΙθΙθ' και ΚΚ' (Σχήματα 4.21, 4.22 και 4.23), οι οποίες έχουν διευθύνσεις $B\Delta \rightarrow N\Delta$, $N\Delta \rightarrow B\Delta$ και $B \rightarrow N$, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα Γ.2 του Παραρτήματος – Μέρος Γ. Οι τρεις αυτές τομές χρησιμοποιήθηκαν για συγκριτικούς και μόνο σκοπούς, προκειμένου να πιστοποιήσουν την ορθότητα των προηγούμενων 17 "βασικών".

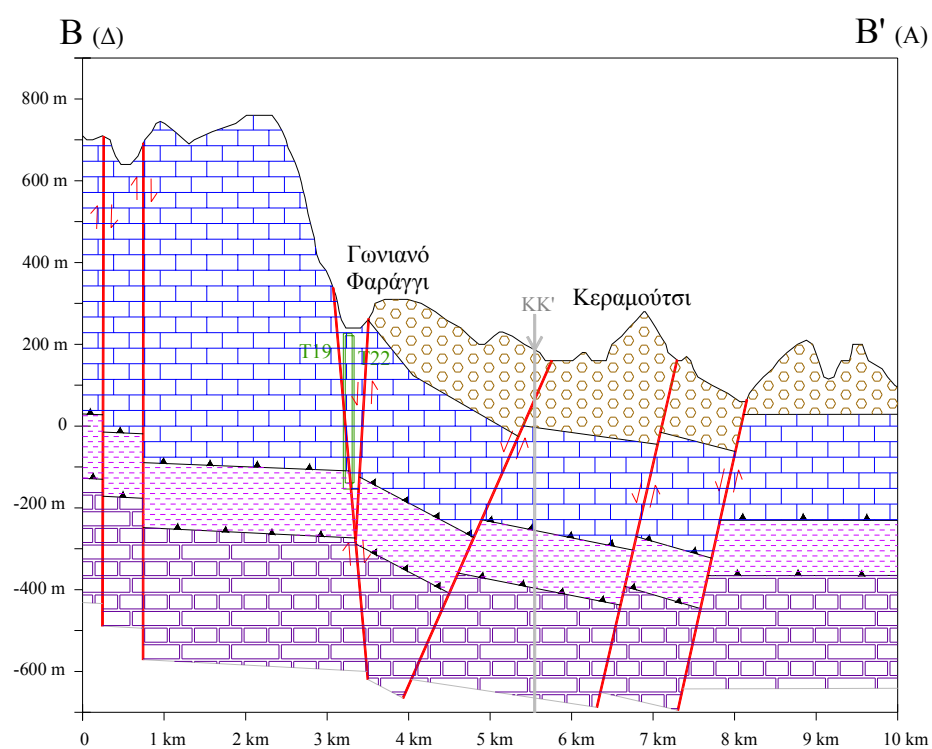
Σημειώνεται ότι, το βάθος των Πλακωδών ασβεστόλιθων στις γεωλογικές τομές είναι ενδεικτικό. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε (σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ που αφορούν στην περιοχή ενδιαφέροντος) ότι το πάχος του συγκεκριμένου υδροφόρου στρώματος κυμαίνεται μεταξύ 250 και 350 m, καθώς είναι αδύνατη η έστω και πρόχειρη εκτίμησή του (ανυπαρξία γεωτρήσεων μέχρι το δάπεδο του σχηματισμού).

Επίσης, το πάχος των Πλακωδών ασβεστόλιθων είναι αντιστρόφως ανάλογο του πάχους της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς (μεγάλο πάχος φυλλιτών – χαλαζιτών συνιστά μικρό πάχος Πλακωδών ασβεστόλιθων).

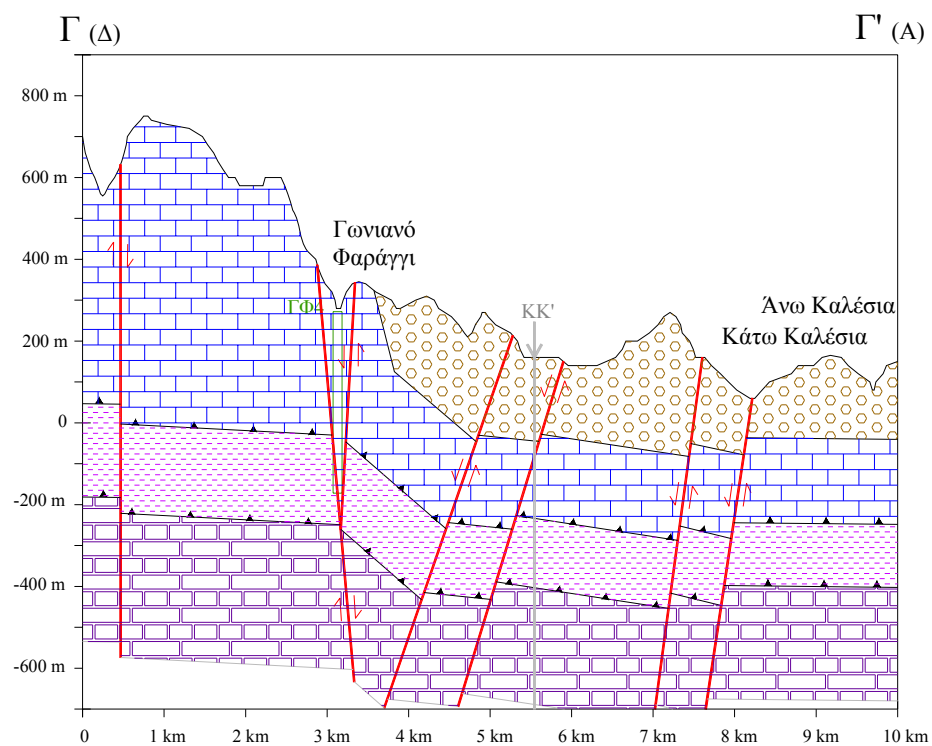
Το (κοινό) υπόμνημα όλων των παραπάνω γεωλογικών τομών (Σχήματα 4.4 έως και 4.23) παρουσιάζεται στην σελ. 80.



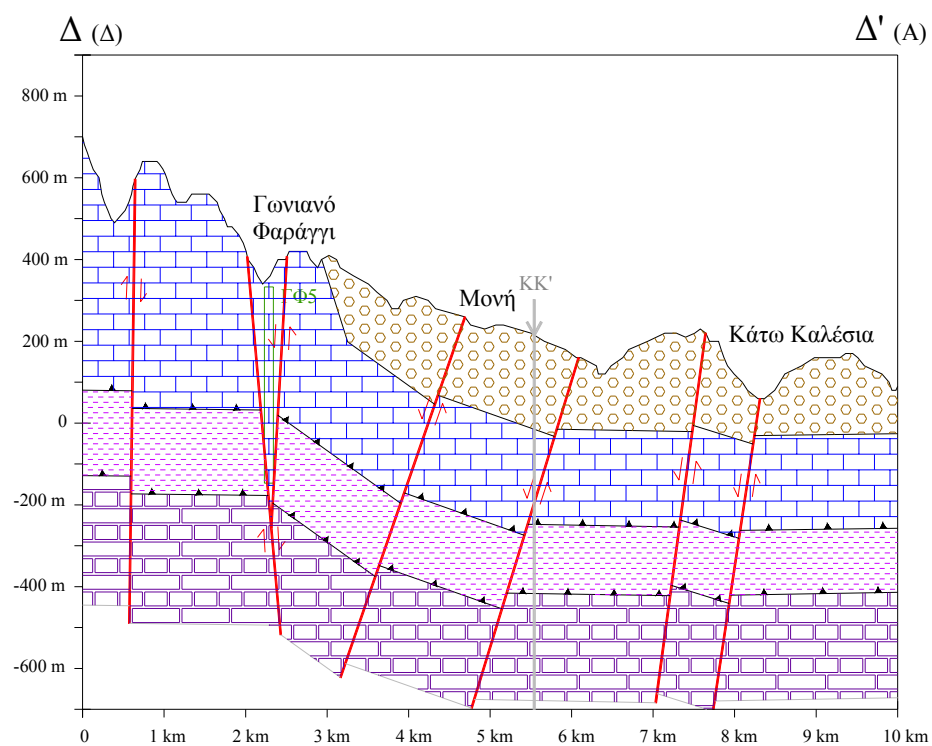
Σχήμα 4.4: Γεωλογική τομή AA'.



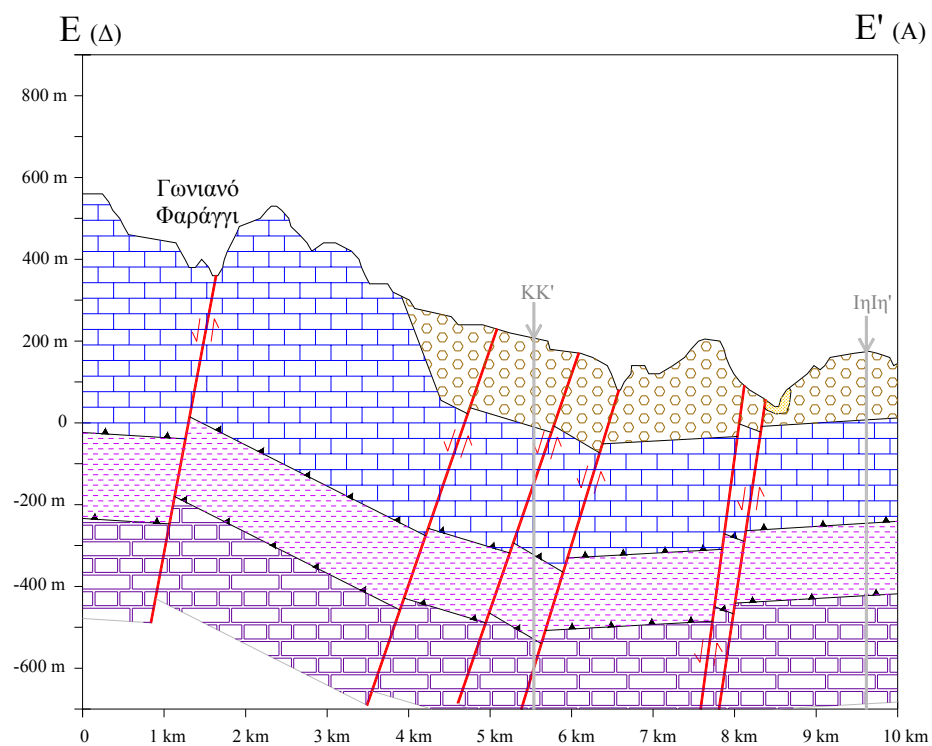
Σχήμα 4.5: Γεωλογική τομή BB'.



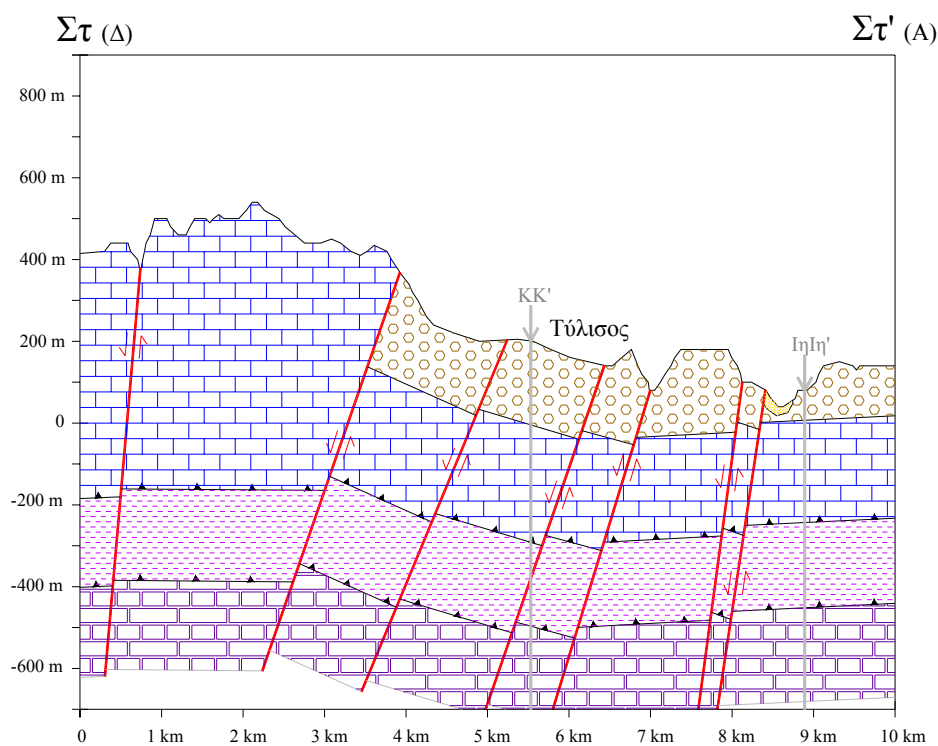
Σχήμα 4.6: Γεωλογική τομή ΓΓ'.



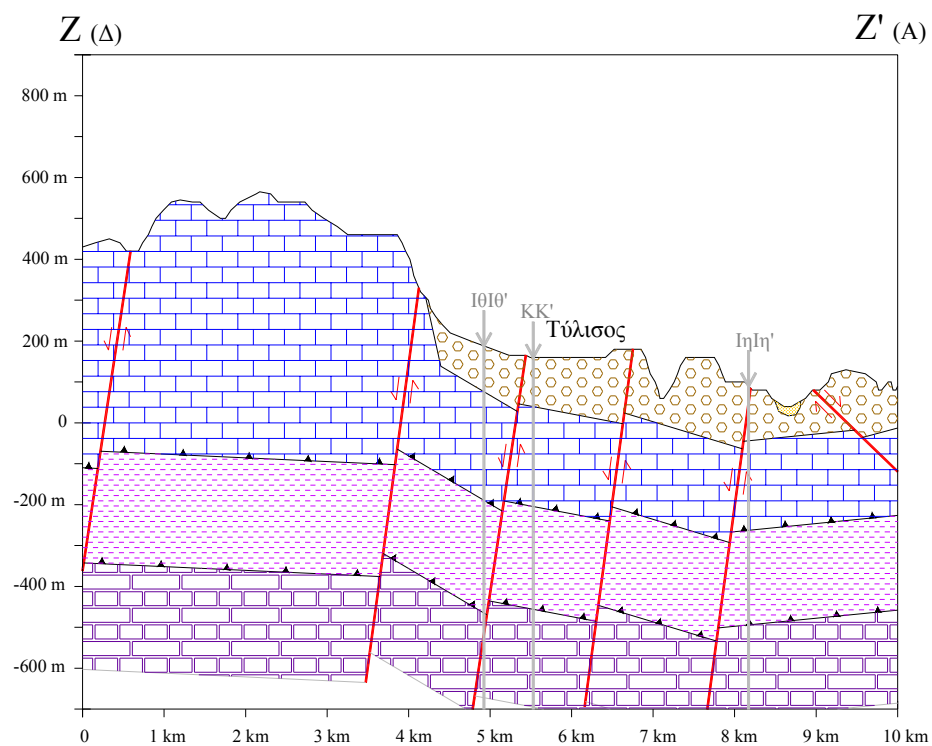
Σχήμα 4.7: Γεωλογική τομή ΔΔ'.



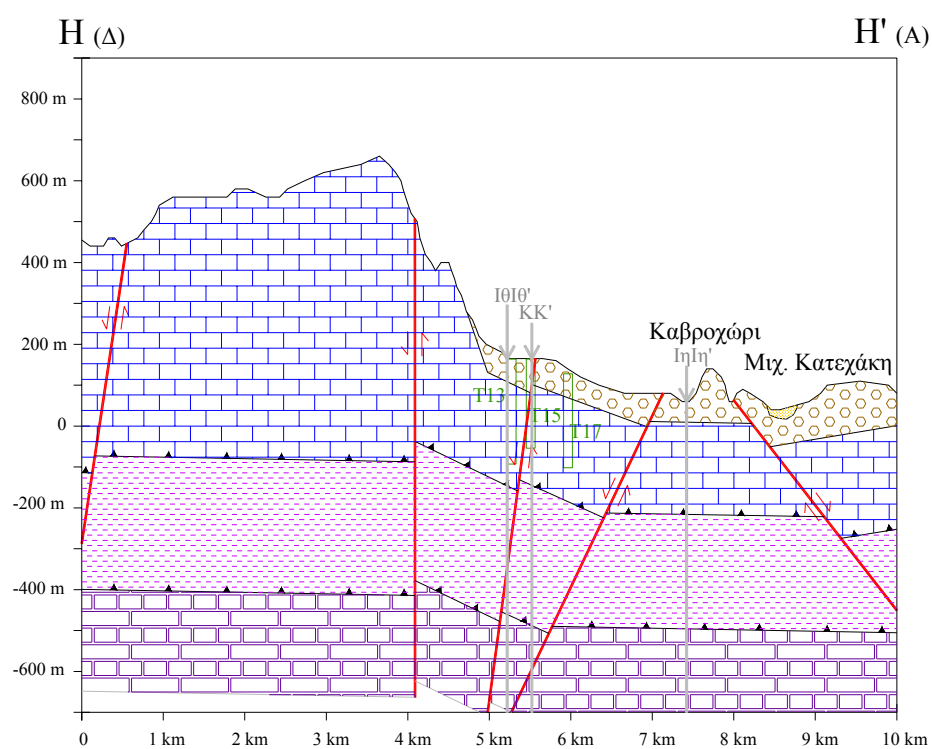
Σχήμα 4.8: Γεωλογική τομή ΕΕ'.



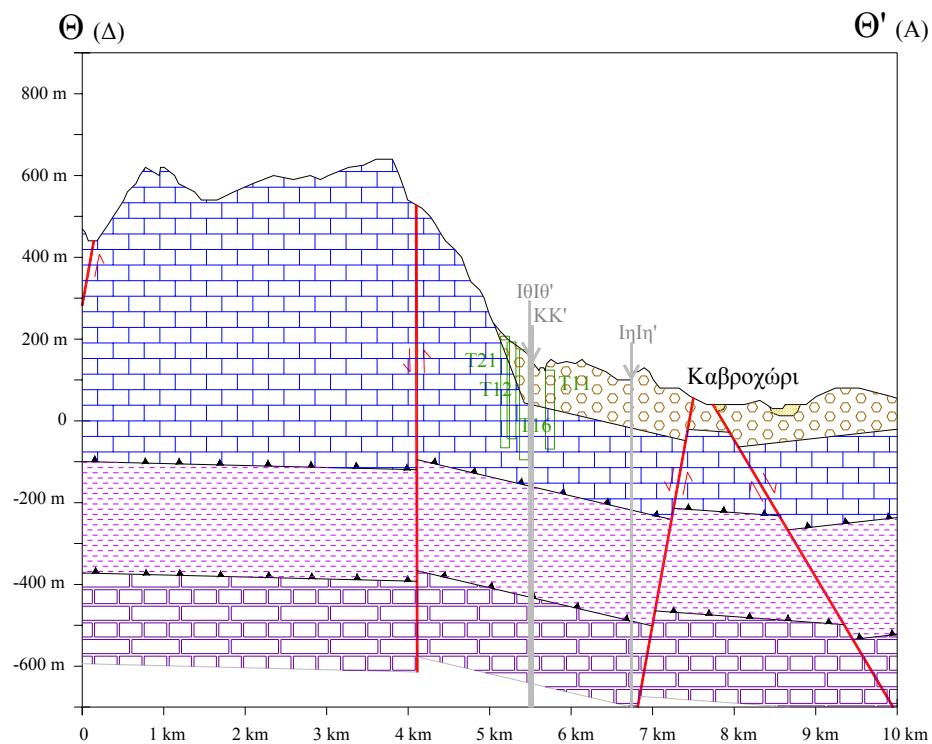
Σχήμα 4.9: Γεωλογική τομή ΣτΣτ'.



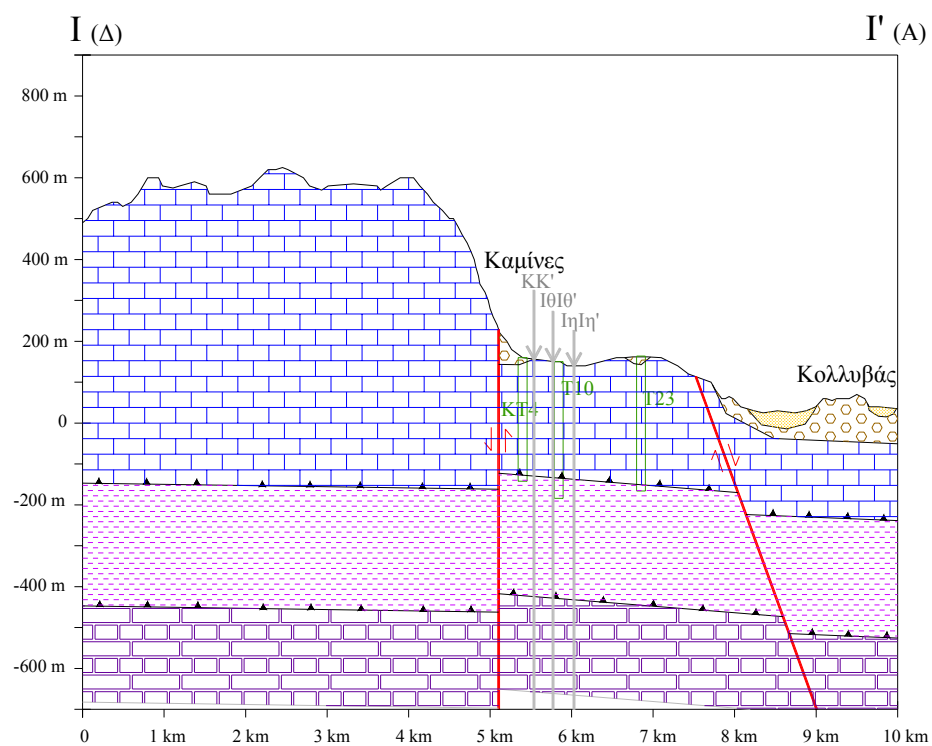
Σχήμα 4.10: Γεωλογική τομή ZZ'.



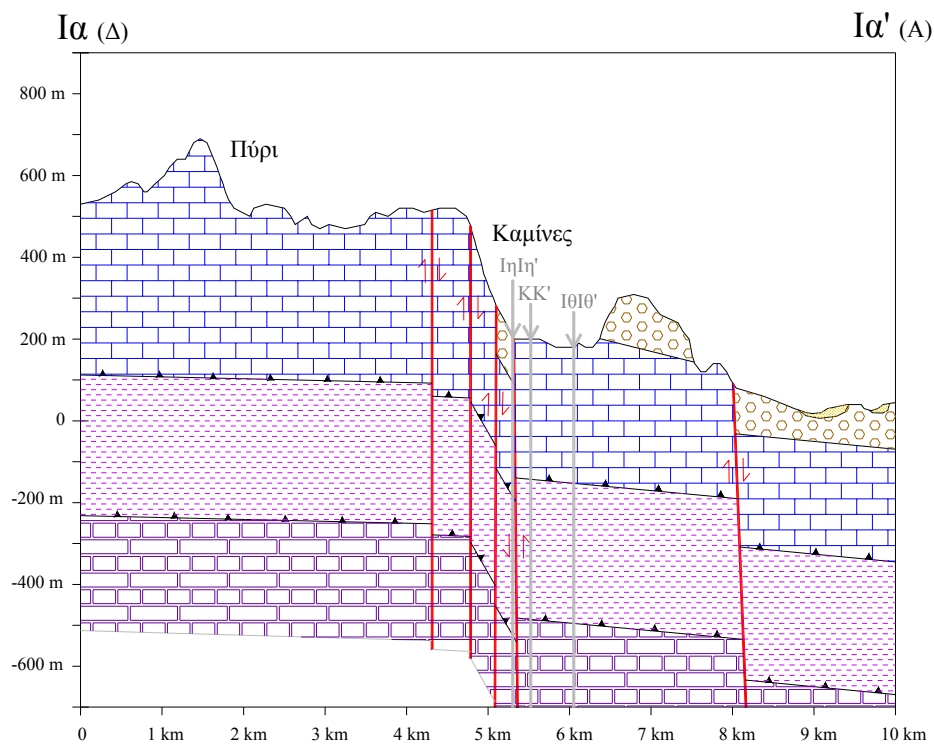
Σχήμα 4.11: Γεωλογική τομή HH'.



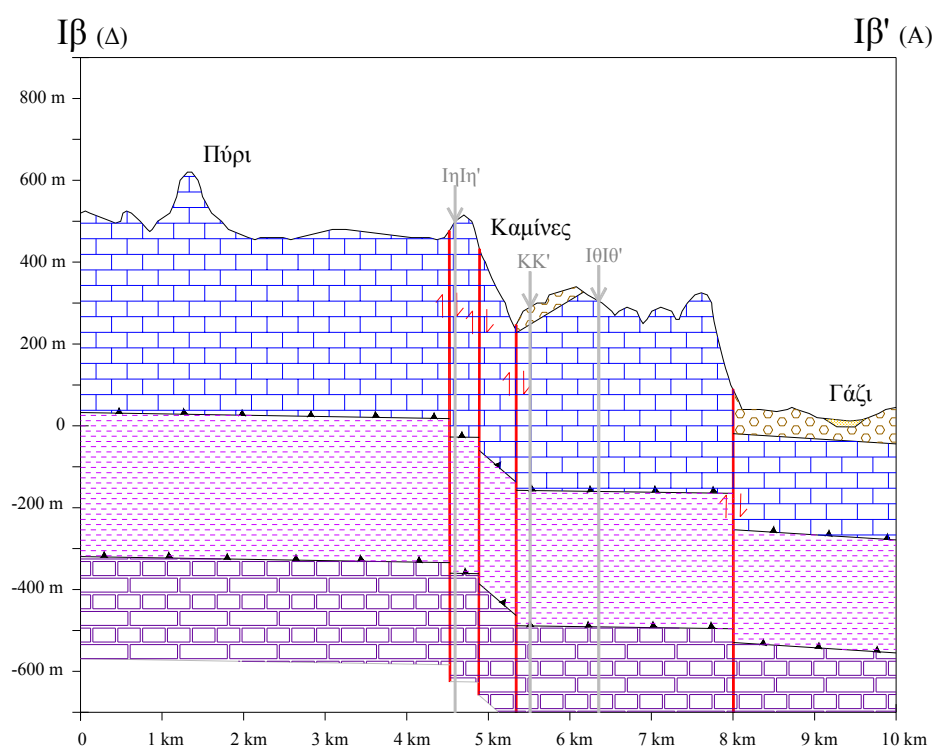
Σχήμα 4.12: Γεωλογική τομή $\Theta\Theta'$.



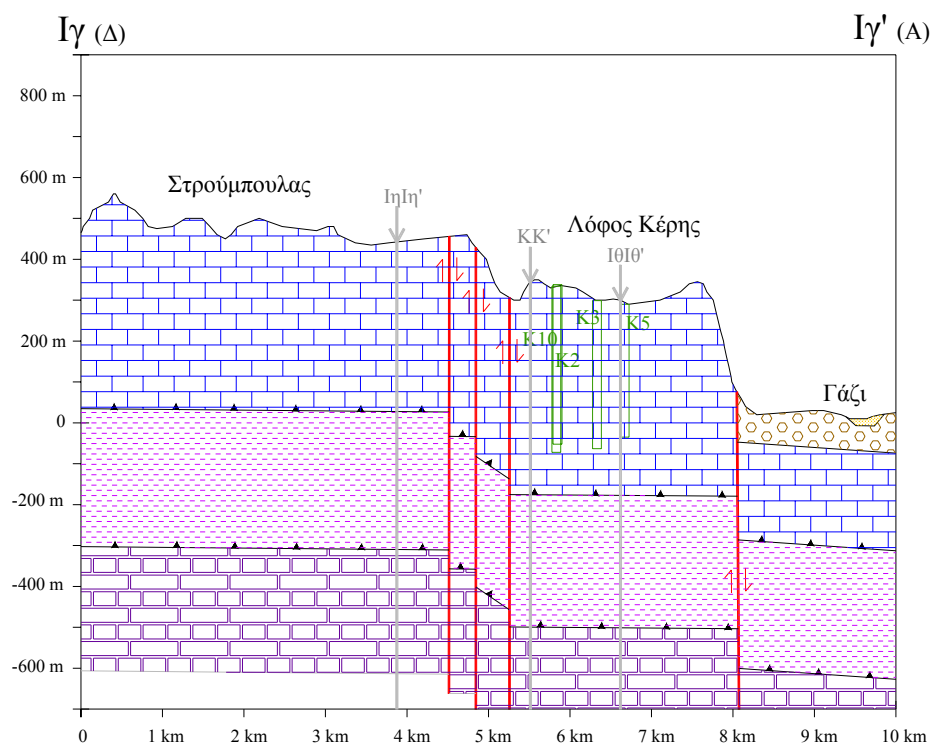
Σχήμα 4.13: Γεωλογική τομή $\text{I}\text{I}'$.



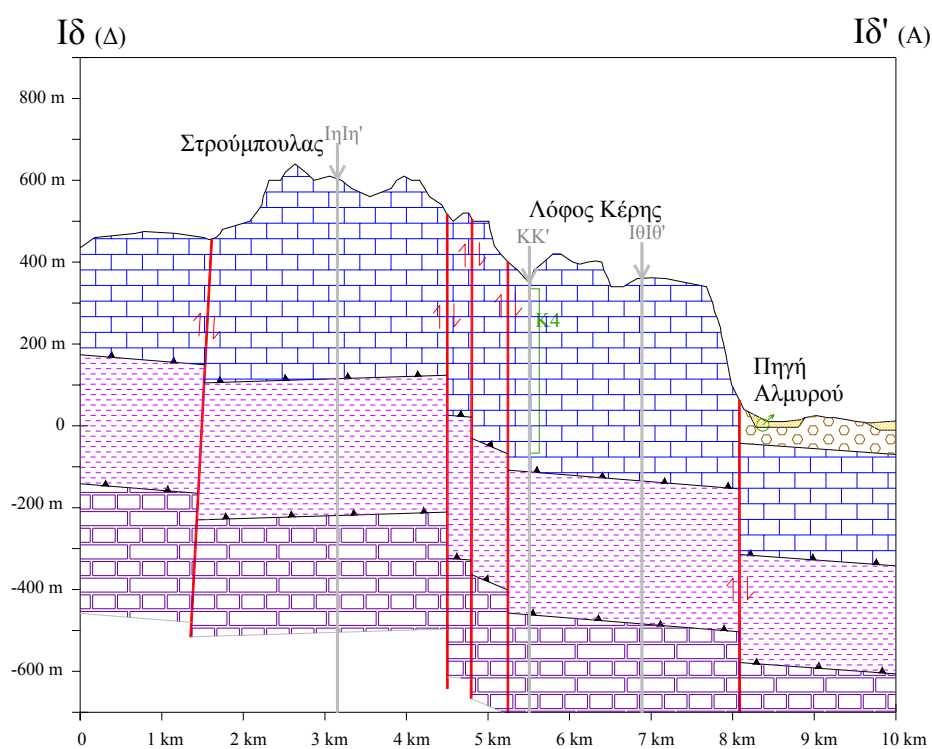
Σχήμα 4.14: Γεωλογική τομή ΙαΙα'.



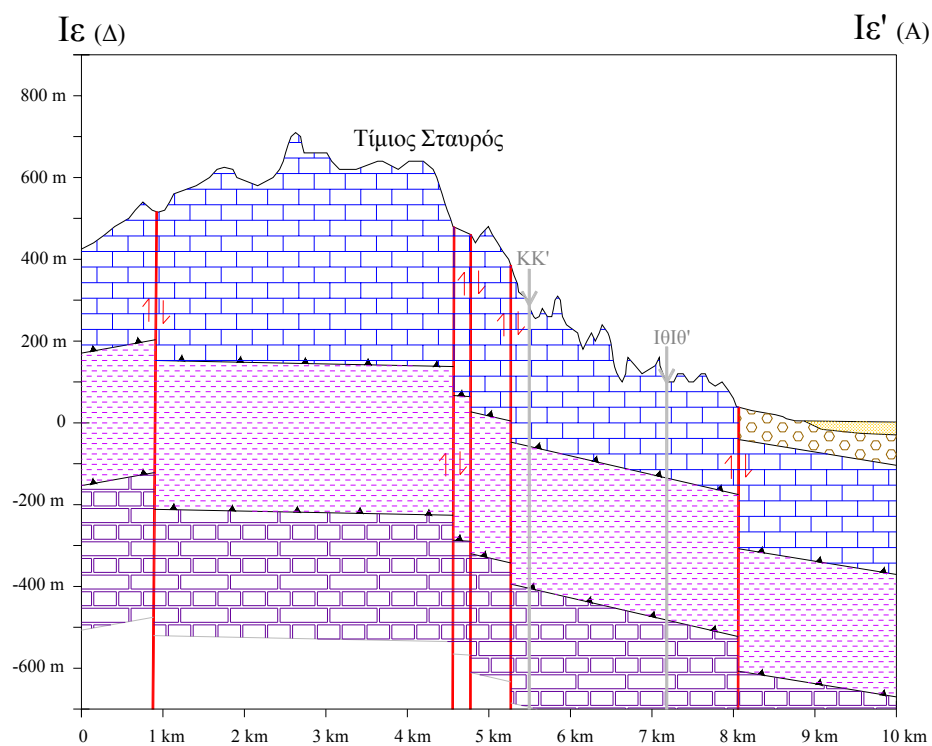
Σχήμα 4.15: Γεωλογική τομή ΙβΙβ'.



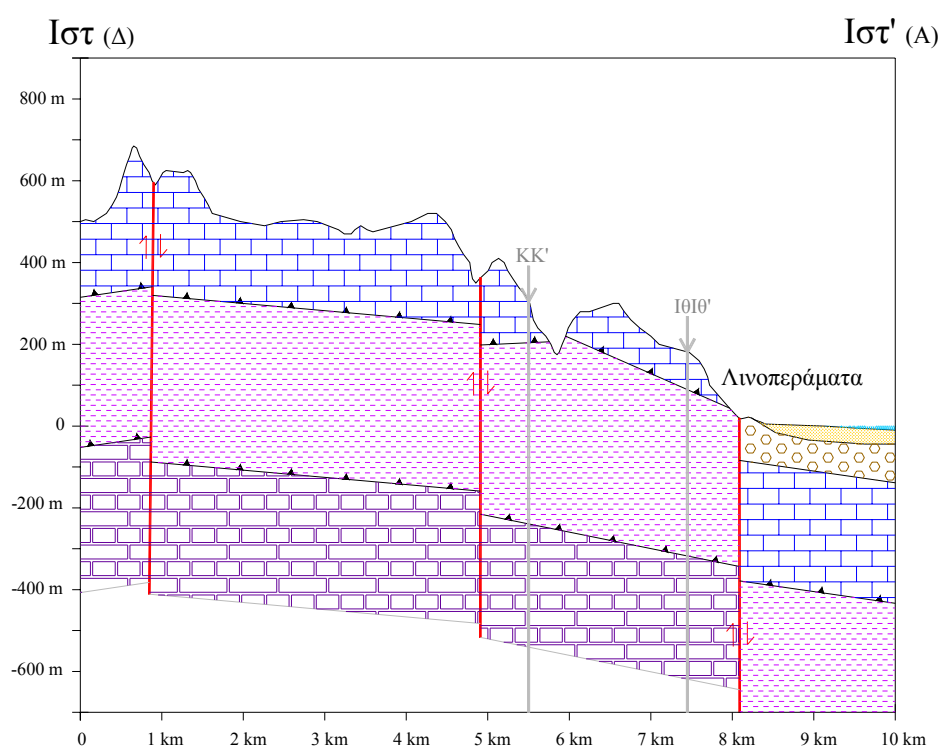
Σχήμα 4.16: Γεωλογική τομή IγIγ'.



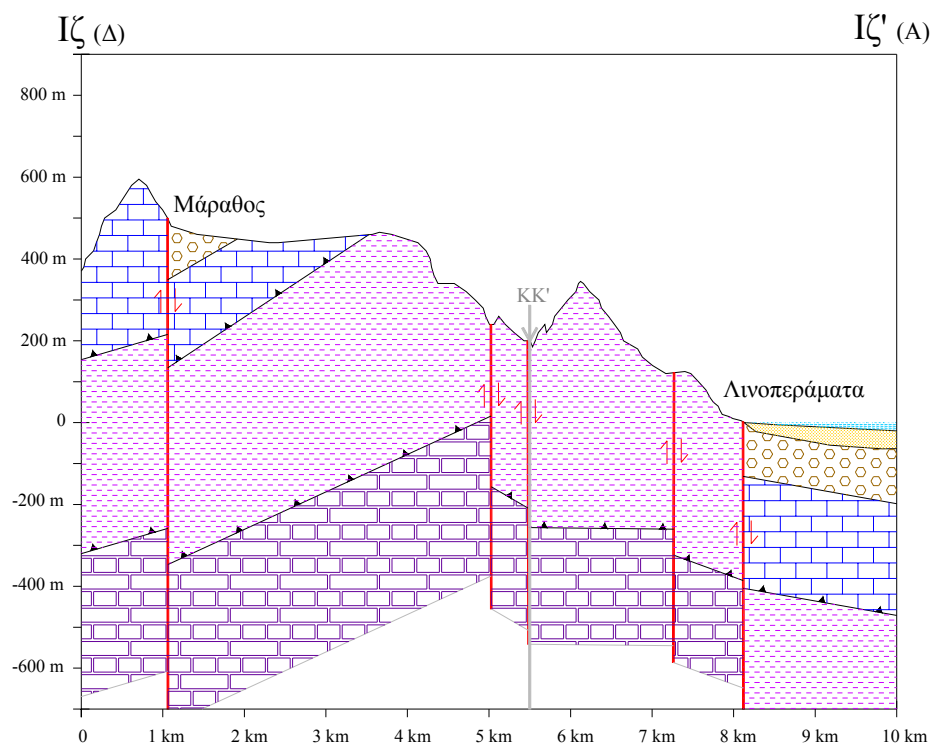
Σχήμα 4.17: Γεωλογική τομή IδIδ'.



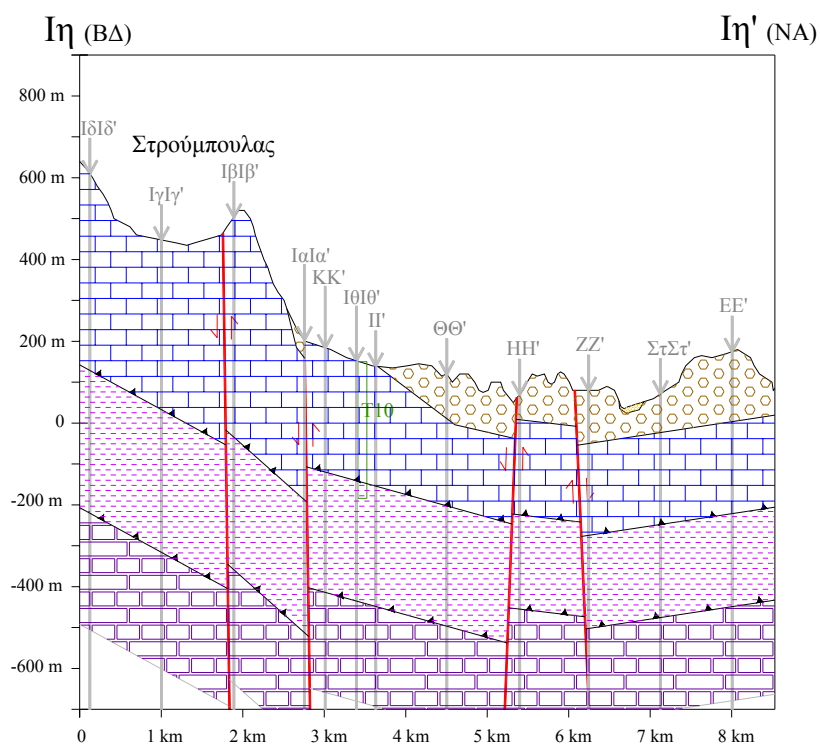
Σχήμα 4.18: Γεωλογική τομή ΙεΙε'.



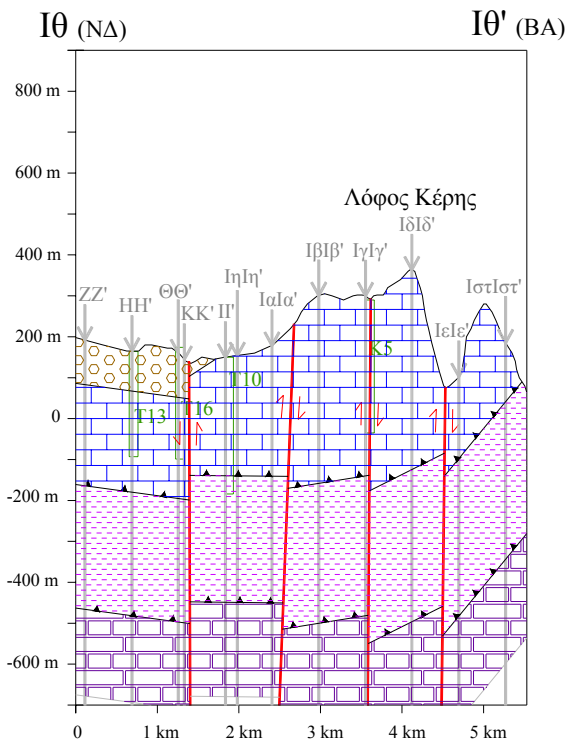
Σχήμα 4.19: Γεωλογική τομή ΙστΙστ'.



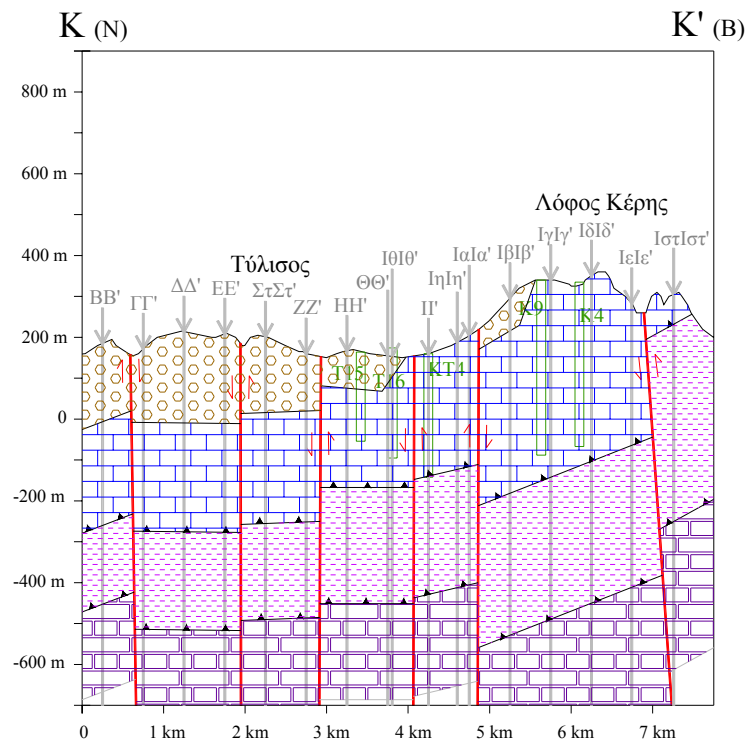
Σχήμα 4.20: Γεωλογική τομή ΙζΙζ'.



Σχήμα 4.21: Γεωλογική τομή ΙηΙη'.



Σχήμα 4.22: Γεωλογική τομή ΙΘΙΘ'.



Σχήμα 4.23: Γεωλογική τομή ΚΚ'.

Υπόμνημα (Σχήματα 4.4 έως και 4.23)

	Αποθέσεις Τεταρτογενούς
	Νεογενείς σχηματισμοί
	Οφιολιθικό σύμπλεγμα
	Ασβεστόλιθοι Τριπόλεως
	Φυλλίτες - χαλαζίτες
	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
	Ρήγμα
	Επώθηση
	Προβολή γεώτρησης
	Προβολή πηγής Αλμυρού
	Τέμνουσα γεωλογική τομή

4.5.3. Επανατροφοδότηση

Η μελέτη της διαίτας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι απαραίτητη, προκειμένου να καθοριστεί ο ετήσιος ρυθμός επανατροφοδότησης (recharge) του υδροφόρου ορίζοντα που τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού. Οι τιμές των βροχοπτώσεων που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την επεξεργασία (έλεγχος, διόρθωση και συμπλήρωση) στοιχείων της 20ετίας 1975-95 εννέα (9) βροχομετρικών σταθμών της βόρειας – κεντρικής Κρήτης, με την μέθοδο της "διπλής μάζας".

Στο **Σχήμα Γ.3** του Παραρτήματος – Μέρος Γ παρουσιάζονται όλοι οι βροχομετρικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής του Νομού Ηρακλείου. Στον ίδιο χάρτη φαίνονται οι θέσεις και των υπολοίπων βροχομετρικών σταθμών, οι οποίοι απορρίφθηκαν από την επεξεργασία, είτε γιατί ήταν "μακριά" από την περιοχή έρευνας (από άποψη απόστασης, αλλά και κλιματικής συμπεριφοράς), είτε γιατί τα δεδομένα τους δεν ήταν πλήρη στην εξεταζόμενη 20ετία (σταθμός Φοινικιάς).

Στον **Πίνακα 4.1** καταγράφονται οι τελικές τιμές (μετά την επεξεργασία και συμπλήρωση αυτών) των 9 βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.1: Μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις περιόδου 1975-95 των 9 βροχομετρικών σταθμών γύρω από την υπό μελέτη περιοχή.

Βροχομετρικοί σταθμοί	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	Αποκλίσεις από τη μέση ευθεία (mm)
Αβδού (ΠΔΕΒ)	230	813	-124
Ανώγεια (ΠΔΕΒ)	740	1030	+83
Βόννη (ΠΔΕΒ)	330	747	+25
Βυζάρι (ΠΔΕΒ)	310	747	+9
Ηράκλειο (ΕΜΥ)	39	478	+52
Ηράκλειο (ΠΔΕΒ)	39	483	+47
Καστέλλι (ΠΔΕΒ)	340	730	+51
Κρουσώνας (ΠΔΕΒ)	440	1029	-165
Πρ. Ηλίας (ΠΔΕΒ)	340	759	+22

Στη συνέχεια, με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 4.1, κατασκευάστηκε διάγραμμα (**Σχήμα 4.24**), στο οποίο απεικονίζονται γραφικά τα ζεύγη τιμών βροχόπτωσης και υψομέτρου των επιλεγμένων βροχομετρικών σταθμών. Από το σχήμα αυτό, προέκυψε ότι η μέση σχέση βροχόπτωσης (υετού) – υψομέτρου δίνεται από την εξίσωση:

$$B = 0,8319 \cdot Y + 497,79 \quad (4.1)$$

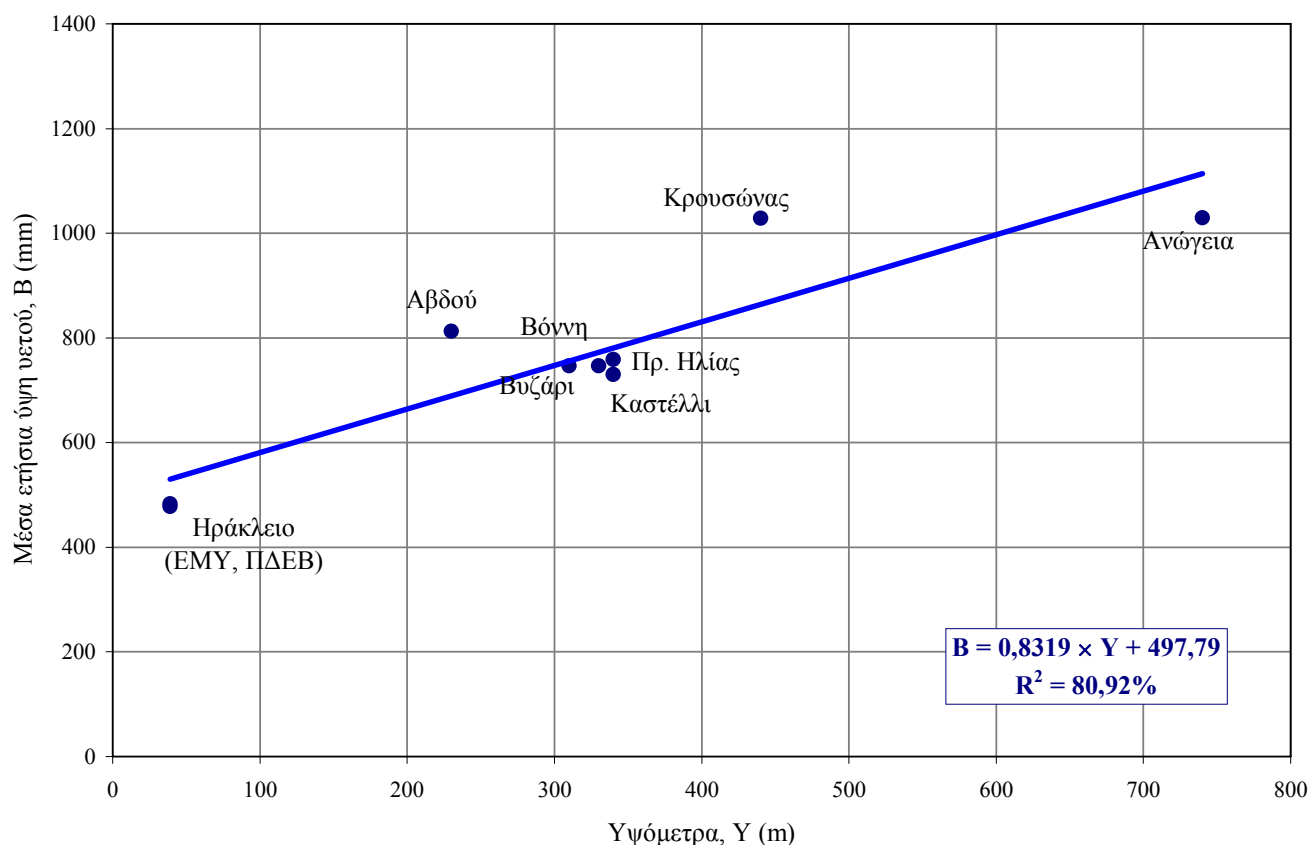
όπου, **B** μέση ετήσια βροχόπτωση σε συγκεκριμένη θέση (mm), και
Y υψόμετρο στην ίδια θέση (m).

Έτσι, από τον χάρτη του Σχήματος 4.2 (ισοϋψείς καμπύλες) και την σχέση 4.1, κατασκευάστηκε ο χάρτης στο **Σχήμα 4.25**, ο οποίος περιγράφει τις μέσες ετήσιες κατακρημνίσεις (ισοϋετες καμπύλες ανά 100 mm/year) στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Προκειμένου να βρεθεί η μέση ετήσια επανατροφοδότηση (recharge, **R**) των υδροφόρων σχηματισμών της περιοχής ενδιαφέροντος, χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$R = \kappa \cdot Y \quad (4.2)$$

όπου, **Y** τιμή ισοϋετης καμπύλης (mm),
κ συντελεστής κατείσδυσης (%).

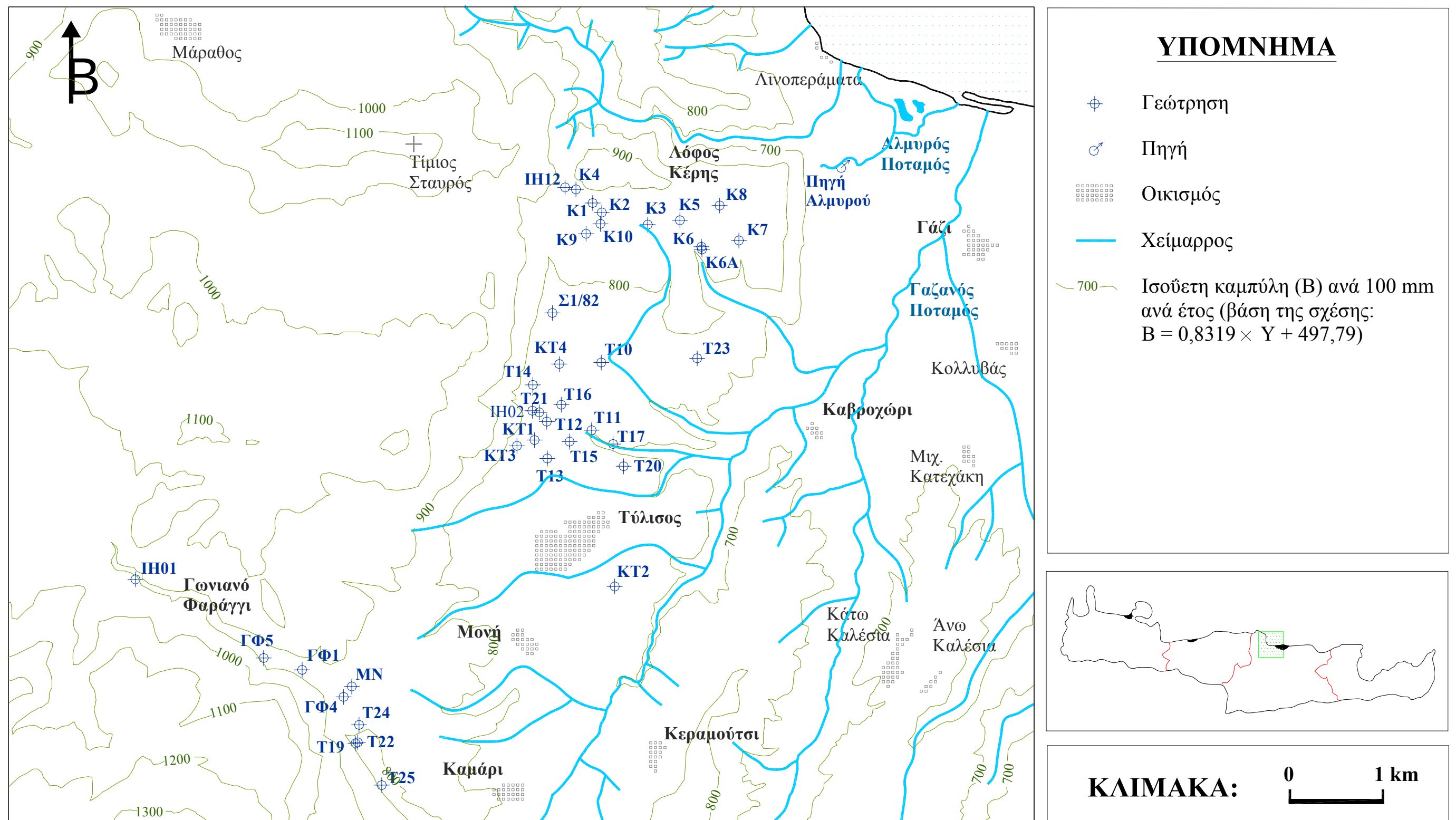


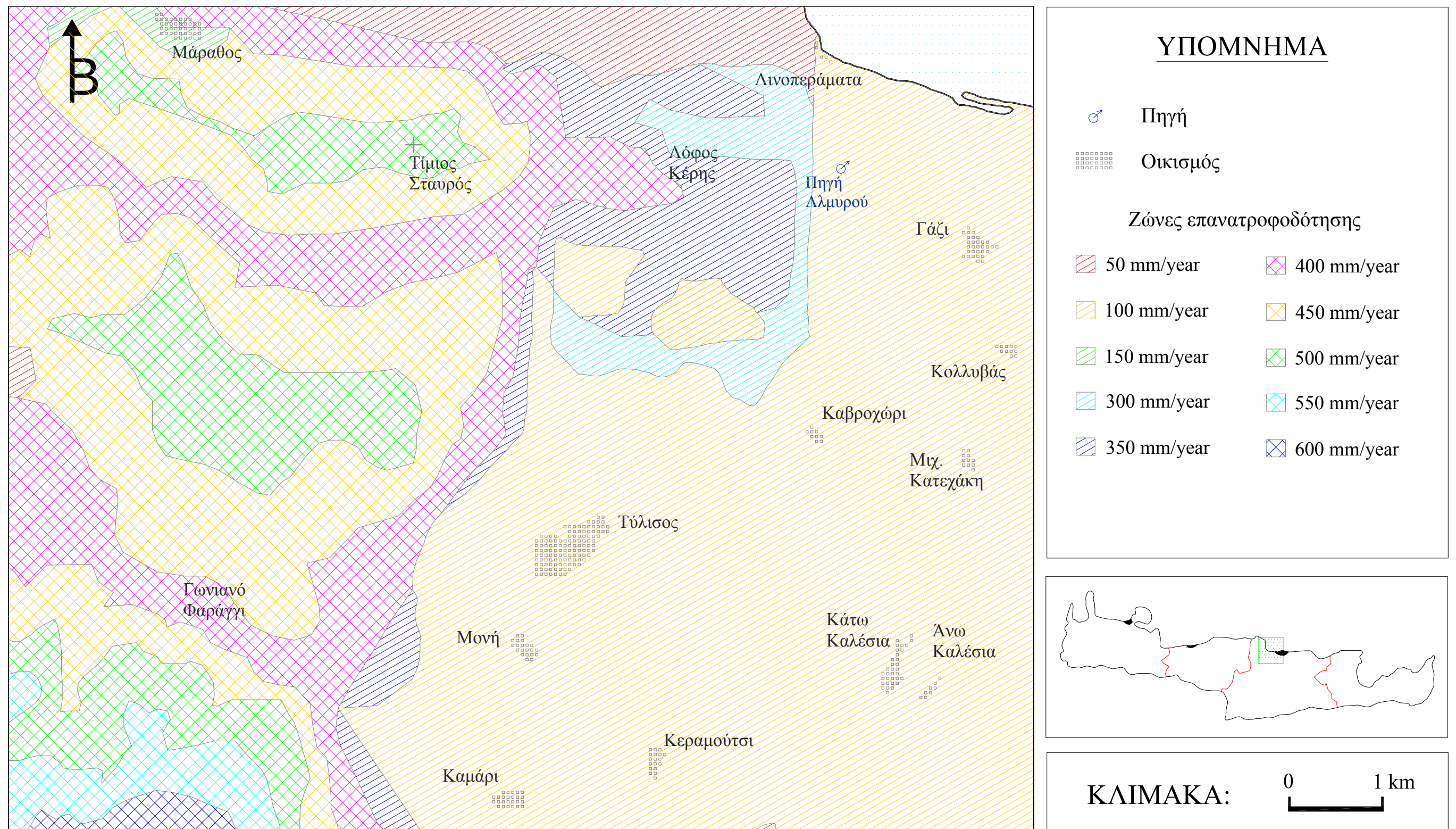
Σχήμα 4.24: Σχέση βροχόπτωσης – υψομέτρου στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

Ο συντελεστής κατείσδυσης εξαρτάται από τον τύπο του σχηματισμού που δέχεται την βροχόπτωση (επιφανειακά) και βρέθηκε βιβλιογραφικά. Έτσι, για τα ανθρακικά πετρώματα (υποζώνη Τρίπολης και Πλακώδεις ασβεστόλιθοι) προτείνεται $\kappa = 40\%$, για τις προσχώσεις του Τεταρτογενούς και τις αποθέσεις του Νεογενούς $\kappa = 15\%$, ενώ για τους πρακτικά αδιαπέρατους φυλλίτες – χαλαζίτες $\kappa = 5\%$ [140],[147].

Με βάση τα παραπάνω, έγινε συγκριτική ανάλυση των Σχημάτων 4.3 και 4.25 και τελικά κατασκευάστηκε ο χάρτης του **Σχήματος 4.26**, με την θεωρητική κατανομή της επανατροφοδότησης των υδροφόρων σχηματισμών.

Επειδή σε κάθε επιφανειακή εμφάνιση σχηματισμού αντιστοιχούσαν περισσότερες από μία ισοϋστες καμπύλες, άρα περισσότερες από μία καμπύλες ίσης επανατροφοδότησης, ο χάρτης χωρίστηκε σε περιοχές (ζώνες) περίπου ίσης ετήσιας επανατροφοδότησης. Σε κάθε μία από αυτές τις "ζώνες επανατροφοδότησης" οι πραγματικές τιμές **R** κυμαίνονται ± 25 mm από τις αναγραφόμενες μέσες.





Σχήμα 4.26: Χάρτης ζωνών επανατροφοδότησης περιοχής ενδιαφέροντος.

4.6. Γεωτρητική έρευνα – Προσδιορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων των υδροφόρων σχηματισμών

Όπως προαναφέρθηκε, στοχεύοντας στην αξιοποίηση των υπόγειων νερών για την κάλυψη υδρευτικών αναγκών, η ΔΕΥΑΗ και άλλοι φορείς κατασκεύασαν δίκτυα παραγωγικών υδρογεωτρήσεων κατανεμημένα σε πεδία εκμετάλλευσης ανάντη της πηγής Αλμυρού.

Συνολικά διανοίχθηκαν 78 γεωτρήσεις. Από τις γεωτρήσεις αυτές, οι 57 κατασκευάστηκαν από την ίδια τη ΔΕΥΑΗ και παρέμειναν στη δικαιοδοσία της ή παραχωρήθηκαν σε άλλους φορείς (Κοινότητες). Οι υπόλοιπες 21 γεωτρήσεις διανοίχθηκαν από τρίτους (ΥΕΒ, ΙΓΜΕ, Κοινότητες, Ιδιώτες).

Σχεδόν όλες οι γεωτρήσεις διέτρησαν ανθρακικά πετρώματα της υποζώνης "Τρίπολης" και σε ορισμένες περιπτώσεις έφτασαν και στους τεκτονικά υποκείμενους "Πλακώδεις ασβεστόλιθους". Σημαντικός αριθμός γεωτρήσεων έχει διατρήσει αρχικά κλαστικά ιζήματα και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς πριν φτάσει στους υποκείμενους ανθρακικούς αλπικούς σχηματισμούς.

Γενικά, η κύρια υδροφορία είναι εγκατεστημένη στους ασβεστόλιθους και στους δολομίτες "Τρίπολης" ή / και στους "Πλακώδεις Ασβεστόλιθους" (πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού). Σπάνιες είναι οι περιπτώσεις υδροφορίας σε Νεογενή ή ακόμη και φλύσχη.

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου συνεργασίας μεταξύ Πολυτεχνείου Κρήτης (Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας) και ΔΕΥΑΗ υποβλήθηκαν τρεις εκθέσεις, την τριετία 1995-97, οι οποίες περιλάμβαναν τα αποτελέσματα επεξεργασίας των δοκιμαστικών αντλήσεων στις υδρογεωτρήσεις των περιοχών Κέρης, Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού, Κρουσώνα, Αγίου Μύρωνα και λοιπών πεδίων μικρότερης σημασίας (Βασιλειές κ.λπ.).

Η επαναξιολόγηση των δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων των γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΗ (μερική αξιολόγηση είχε γίνει από τους ανάδοχους της εκτέλεσης των γεωτρήσεων, τα συμπεράσματα των οποίων καταχωρούνται στα "Τεχνικά Τεύχη" προόδου εργασιών), κρίθηκε σκόπιμη για δύο κύρια λόγους:

- να επιβεβαιωθεί και να συμπληρωθεί η αξιολόγηση με δόκιμες εναλλακτικές μεθόδους, και
- να προκύψουν ομοιόμορφα και ομοιογενή αριθμητικά αποτελέσματα, ώστε να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους, όπως επίσης και με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας.

4.6.1. Προσδιορισμός μεταβιβαστικότητας και υδροπερατότητας

Η επεξεργασία των στοιχείων έγινε με τις μεθόδους "επαναφοράς στάθμης", "Cooper – Jacob" και "ισορροπίας" (Dupuit). Όλες οι μέθοδοι έδωσαν παρεμφερείς ή συγκρίσιμες τιμές, ενώ οι εναλλακτικές λύσεις τους έδωσαν τιμές σχεδόν ταυτόσημες.

Στον Πίνακα 4.3 (α – β) δίδονται οι τιμές μεταβιβαστικότητας (T) και υδροπερατότητας (k), όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων [150],[154],[159].

Οι τιμές T κυμάνθηκαν από πολύ μεγάλες (τάξη μεγέθους 10^{-1}) μέχρι μέτριες ή και μικρές (10^{-6}) με συνηθέστερες τιμές από 10^{-2} μέχρι 10^{-4} (m^2/sec). Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στα πεδία Κέρης – Τυλίσου και οι μικρότερες στο πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού. Οι τιμές k , κατ' ανάλογο τρόπο, κυμάνθηκαν από τάξη μεγέθους 10^{-3} μέχρι 10^{-8} με συνηθέστερες τιμές (επίσης τάξη μεγέθους) μεταξύ 10^{-4} και 10^{-6} m/sec .

Οι τιμές T και k που υπολογίσθηκαν με την μέθοδο "Cooper – Jacob" βρέθηκαν κατά κανόνα κατά τι μεγαλύτερες απ' ότι με τις δύο άλλες μεθόδους, οι οποίες προσεγγίζονται μεταξύ τους τελειότερα. Το φαινόμενο αποδίδεται στο γεγονός ότι δεν συνέτρεχαν ορισμένες προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου.

Στατιστικά οι μεγαλύτερες τιμές k (και T) εντοπίζονται συχνότερα στους σχηματισμούς "Τρίπολης" και σπανιότερα στους "Πλακώδεις ασβεστόλιθους". Αναλυτικότερα, οι μέσες τιμές περατότητας, ανά γεωτρητικό πεδίο, έχουν ως εξής (θεωρώντας την μέθοδο "επαναφοράς" και όπου χρειάζεται την μέθοδο "ισορροπίας" ως τις αντιπροσωπευτικότερες):

- Τύλισος: $k = 1,88 \times 10^{-4}$ m/sec ,
- Γωνιανό Φαράγγι: $k = 6,55 \times 10^{-5}$ m/sec ,
- Κέρη: $k = 3,20 \times 10^{-4}$ m/sec ,
- Κρουσώνας – Λουτράκι: $k = 2,14 \times 10^{-4}$ m/sec , και
- Άγιος Μύρωνας: $k = 1,40 \times 10^{-4}$ m/sec .

Πίνακας 4.3 (α): Τιμές T και k από την επεξεργασία δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων.

Γεωτρήσεις	Μεταβιβαστικότητα, T (m ² /sec)			Περατότητα, k (m/sec)		
	Μέθοδος επαναφοράς	Μέθοδος Cooper-Jacob	Μέθοδος ισορροπίας	Μέθοδος επαναφοράς	Μέθοδος Cooper-Jacob	Μέθοδος Ισορροπίας
Πεδίο Τυλίσου						
T11	$2,1 \times 10^{-2}$	-	-	$2,5 \times 10^{-4}$	-	-
T12	$6,3 \times 10^{-2}$	-	-	$1,1 \times 10^{-3}$	-	-
T13	$2,8 \times 10^{-3}$	-	-	$2,8 \times 10^{-5}$	-	-
T15	$9,3 \times 10^{-4}$	$8,3 \times 10^{-3}$	-	$1,4 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$	-
T16	$7,5 \times 10^{-6}$	-	-	$6,9 \times 10^{-8}$	-	-
T17	$7,1 \times 10^{-3}$	-	-	$6,0 \times 10^{-5}$	-	-
T21	$1,6 \times 10^{-2}$	-	-	$2,3 \times 10^{-4}$	-	-
T23	$1,5 \times 10^{-3}$	-	-	$9,4 \times 10^{-6}$	-	-
KT4	$7,9 \times 10^{-5}$	-	-	$1,2 \times 10^{-6}$	-	-
Πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού						
ΓΦ4	$2,6 \times 10^{-5}$	-	-	-	-	-
T19	$3,0 \times 10^{-2}$	-	-	$1,9 \times 10^{-4}$	-	-
T22	$6,0 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-4}$	$4,2 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-6}$
Πεδίο Κέρης						
K1	$1,0 \times 10^{-1}$	-	-	$2,3 \times 10^{-3}$	-	-
K2	$1,4 \times 10^{-2}$	-	-	$2,5 \times 10^{-4}$	-	-
K3	$6,0 \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-2}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$8,9 \times 10^{-5}$	$7,8 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-5}$
K4	$1,3 \times 10^{-3}$	-	-	$2,1 \times 10^{-5}$	-	-
K5	-	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-3}$	-	$8,2 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-4}$
K6	$6,1 \times 10^{-3}$	-	-	$1,3 \times 10^{-4}$	-	-
K6A	$6,6 \times 10^{-3}$	-	-	$1,4 \times 10^{-4}$	-	-
K7	$1,6 \times 10^{-2}$	-	-	$3,8 \times 10^{-4}$	-	-
K8	$7,3 \times 10^{-4}$	-	-	$1,1 \times 10^{-5}$	-	-
K9	$1,1 \times 10^{-2}$	-	-	$1,1 \times 10^{-4}$	-	-
K10	$3,7 \times 10^{-4}$	-	-	$4,4 \times 10^{-6}$	-	-

Πίνακας 4.3 (β): Τιμές T και k από την επεξεργασία δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων.

Γεωτρήσεις	Μεταβιβαστικότητα, T (m ² /sec)			Περατότητα, k (m/sec)		
	Μέθοδος επαναφοράς	Μέθοδος Cooper-Jacob	Μέθοδος ισορροπίας	Μέθοδος επαναφοράς	Μέθοδος Cooper-Jacob	Μέθοδος Ισορροπίας
Πεδίο Κρουσώνα – Λουτρακίου						
KP1	$5,3 \times 10^{-5}$	-	-	$3,1 \times 10^{-7}$	-	-
KP2	$5,0 \times 10^{-3}$	-	-	$4,2 \times 10^{-5}$	-	-
KP2A	$1,6 \times 10^{-2}$	-	-	$1,3 \times 10^{-4}$	-	-
KP3	$8,2 \times 10^{-3}$	-	-	$7,4 \times 10^{-5}$	-	-
KP4	$1,2 \times 10^{-4}$	-	-	$1,7 \times 10^{-6}$	-	-
KP5	$3,4 \times 10^{-4}$	-	-	$3,2 \times 10^{-6}$	-	-
KP6	$7,0 \times 10^{-4}$	-	-	$4,8 \times 10^{-6}$	-	-
KP7	$1,4 \times 10^{-3}$	-	-	$7,0 \times 10^{-6}$	-	-
KP8	$2,0 \times 10^{-2}$	-	-	$3,8 \times 10^{-4}$	-	-
KP9	$2,5 \times 10^{-1}$	-	-	$2,0 \times 10^{-3}$	-	-
KP12	$3,9 \times 10^{-4}$	-	-	$3,0 \times 10^{-6}$	-	-
KP13	$1,8 \times 10^{-2}$	-	-	$1,3 \times 10^{-4}$	-	-
KP16	$4,0 \times 10^{-4}$	-	-	$3,7 \times 10^{-6}$	-	-
Πεδίο Αγίου Μύρωνα						
AM1	$2,0 \times 10^{-2}$	-	-	$1,4 \times 10^{-4}$	-	-

Όλες οι γεωτρήσεις έχουν την υδροφορία τους εγκατεστημένη στους ασβεστόλιθους "Τρίπολης", εκτός από τις ΓΦ4, T19, T22 και KP1 ("Πλακώδεις ασβεστόλιθοι"), τις KP4 και KP5 (Νεογενή) και την KP16 (φλύσχης "Τρίπολης"). Έτσι, η κατανομή της περατότητας, ανά υδροφόρο σχηματισμό, έχει ως εξής:

- Ασβεστόλιθοι "Τρίπολης": $k = 2,71 \times 10^{-4}$ m/sec,
- "Πλακώδεις ασβεστόλιθοι": $k = 4,92 \times 10^{-5}$ m/sec,
- Νεογενή: $k = 2,45 \times 10^{-6}$ m/sec, και
- Φλύσχης "Τρίπολης": $k = 3,70 \times 10^{-6}$ m/sec.

4.6.2. Εξέλιξη αποκάρστωσης με το βάθος

Όλες οι γεωτρήσεις έχουν συναντήσει την καρστική υδροφορία περί τη στάθμη της θάλασσας. Η διαπίστωση υδροφορίας κατά την διάρκεια της διάτρησης γινόταν συνήθως αιφνίδια και ταυτόχρονα με τη συνάντηση ζωνών κατακερματισμού ή αποκάρστωσης και την εγκατάσταση στάθμης ηρεμίας λίγα ή περισσότερα μέτρα υψηλότερα από το βάθος διάτρησης εκείνης της στιγμής.

Κατά την συνέχιση της διάτρησης σε βάθος ήταν σύνηθες το φαινόμενο των ισχυρών διακυμάνσεων της στάθμης ηρεμίας σε συνάρτηση με την κατάσταση του πετρώματος. Κατ' ανάλογο τρόπο φαινόταν να αυξάνει και η υδροφορία του σχηματισμού ασυνεχώς με το βάθος προχώρησης. Η σχετική διαπίστωση γινόταν συνήθως εμπειρικά, με βάση τη συμπεριφορά της γεώτρησης κατά την διάτρηση.

Τα παραπάνω φαινόμενα είναι συνήθη σε καρστικούς σχηματισμούς και αποδίδονται στην ανάπτυξη προνομιακών ζωνών υδροφορίας, οι οποίες οφείλονται σε διάφορους λόγους, όπως στην στρωματογραφία, την τεκτονική, την αποκάρστωση, την παλαιογεωγραφία κ.λπ. Η επιλογή των θέσεων των γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΗ έχει γίνει με γεωλογικά και παλαιογεωγραφικά κριτήρια και όχι τυχαία.

Κατ' αυτό τον τρόπο, στατιστική ανάλυση των ευρημάτων των γεωτρήσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η γεωγραφική κατανομή της αποκάρστωσης, δεν θα προσέφερε αντικειμενικά και ανεπηρέαστα αποτελέσματα. Αντίθετα, η εξέλιξη της αποκάρστωσης (= υδροπερατότητα) σε συνάρτηση με το βάθος αποτελεί σημαντική και χρήσιμη πληροφορία για την αξιολόγηση ενός παράκτιου καρστικού υδροφορέα που είναι επιδεκτικός σε αλμύριση.

Έτσι, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, διερευνήθηκε στατιστικά η μεταβολή της περατότητας των καρστικών σχηματισμών σε συνάρτηση με το βάθος. Ο συσχετισμός έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και περιέλαβε τις τιμές **k** κάθε γεώτρησης σε σχέση με το συνολικό σωληνωμένο μέρος της γεώτρησης (φαινόμενο πάχος) που βρίσκεται εν καταδύσει (κάτω από τη στάθμη ηρεμίας).

Έγινε διερεύνηση συσχετισμού τόσο του συνόλου των γεωτρήσεων με την υδροπερατότητα του σχηματισμού όσο των γεωτρήσεων ανά πεδίο εκμετάλλευσης με την υδροπερατότητα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Τυχόν συσχετισμός υδροπερατότητας (= ενεργός αποκάρσωση) και φαινομένου πάχους υδροφορέα αποδεικνύεται πρακτικά ανύπαρκτος. Η μαθηματική ανάλυση απέδωσε πολύ χαμηλούς συντελεστές συσχετισμού, για τα συγκεκριμένα βάθη διάτρησης. Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψη ότι δεν υπάρχει "διαγνώσιμη" μεταβολή αποκάρσωσης σε συνάρτηση με το βάθος.
- Από την παραπάνω διαπίστωση συμπεραίνεται ότι η ύπαρξη μεγάλης υδροπερατότητας (**k**) σε ένα σημείο του υπόγειου καρστικού υδροφορέα δεν οφείλεται στο βάθος του, αλλά κυρίως στην τυχαία συνάντηση καρστικού αγωγού.
- Έτσι, μία υπο-οριζόντια γεώτρηση (υδρομαστευτική στοά) έχει τις ίδιες πιθανότητες συνάντησης αξιόλογης υδροφορίας με μία κατακόρυφη γεώτρηση.

4.7. Πηγή Αλμυρού – Υδρογεωλογικές παράμετροι

Το εξεταζόμενο καρστικό σύστημα (υδροφορέας) αναπτύσσεται μέσα στην ανθρακική μάζα του ορεινού συγκροτήματος Ψηλορείτη – Ταλέων ορέων, έκτασης περίπου 600 km² και εκφορτίζεται περιμετρικά μέσω πηγών σε διάφορα υψόμετρα. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η περιοδικά υφάλμυρη πηγή Αλμυρού και οι εσταβέλλες Μπαλίου, που εκφορτίζονται στο επίπεδο της θάλασσας (ενδοχώρια, παράκτια και υποθαλάσσια).

Η πηγή Αλμυρού η οποία βρίσκεται εντός των ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος, αφενός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποφόρτιση του υδροφορέα και αφετέρου βρίσκεται σε άμεση γειτονία με μία από τις προτεινόμενες υδρομαστευτικές στοές. Για τους παραπάνω λόγους η όσο το δυνατό διεξοδική εξέταση της είναι αναγκαία.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό της υφάλμυρης καρστικής πηγής Αλμυρού είναι οι μεγάλες παροχές της, οι οποίες μεταβάλλονται εποχιακά. Πέραν τούτου, έχει διαπιστωθεί αλλαγή της υδρολογικής συμπεριφοράς της (παροχές – ποιότητα νερών) από την στιγμή που κατασκευάσθηκε ρυθμιστικό φράγμα κατάντη της απορροής, προκειμένου να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο μπορεί να βελτιωθεί η ποιότητα του νερού της (βλέπε κεφ. 2, παρ. 2.4.2). Γι' αυτό το λόγο οι υδρολογικές της παράμετροι θα πρέπει να εξετάζονται χωριστά, υπό "συνθήκες φυσικής ροής" και υπό "συνθήκες τεχνητών παρεμβάσεων" ^[153].

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της πηγής είναι οι έντονες μεταβολές στην ποιότητα του νερού που εκφορτίζει (συνήθως κυμαίνεται από 100 έως και πάνω από 5.000 ppm Cl⁻). Κάποιες ημέρες το χρόνο εκφορτίζει "γλυκό νερό", δηλαδή νερό με μειωμένες συγκεντρώσεις χλωριόντων, πολλές φορές μέσα στα όρια ποσιμότητας.

Το φαινόμενο αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία εφόσον συνδέεται με μεγάλες παροχές και κατά καιρούς έγινε αντικείμενο προτάσεων εκμετάλλευσής του (βλέπε κεφ. 2, παρ. 2.4.3).

4.7.1. Υδρογεωλογικές παράμετροι της πηγής

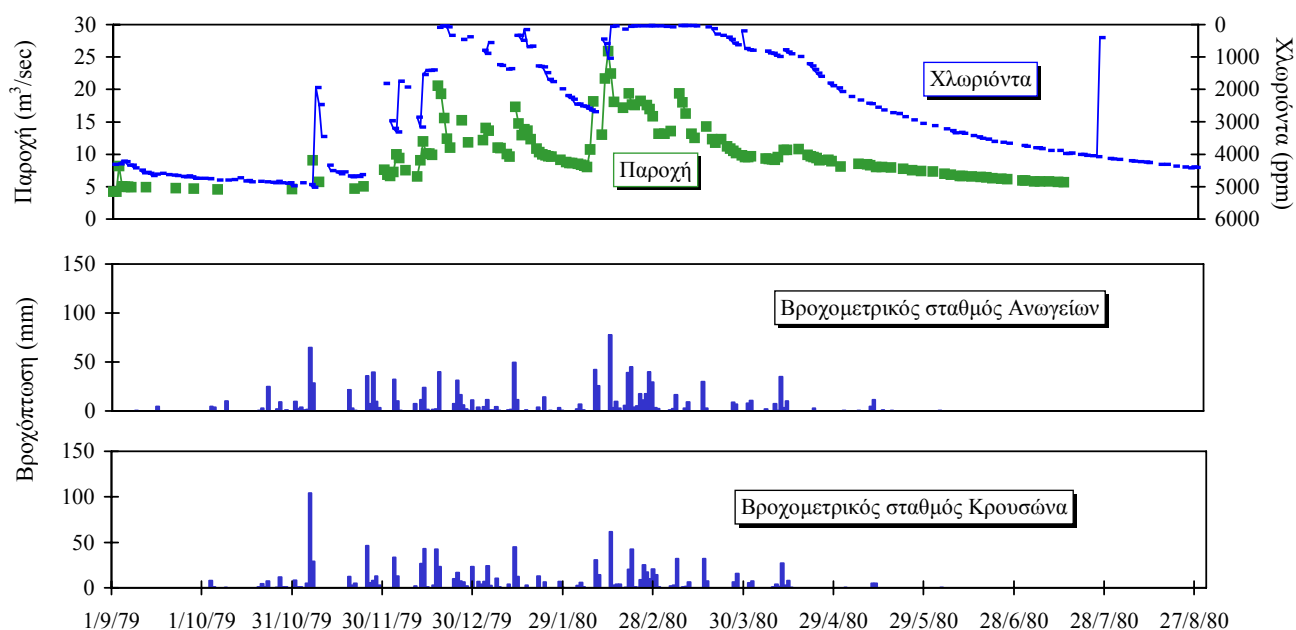
Τα συνολικά διατιθέμενα στοιχεία (από ΠΔΕΒ και ΔΕΥΑΗ) αφορούν την περίοδο των υδρολογικών ετών 1967-68 έως και 1993-94. Για κάθε υδρολογικό έτος κατασκευάστηκε διάγραμμα που απεικονίζει τις μεταβολές της παροχής της πηγής και τις αντίστοιχες μεταβολές της συγκέντρωσης χλωριόντων, συναρτήσει του χρόνου.

Τα διπλά αυτά διαγράμματα παραλληλίσθηκαν χρονικά με τα αντίστοιχα ετήσια ιστογράμματα των βροχομετρικών σταθμών Ανωγείων και Κρουσώνα, οι οποίοι θεωρήθηκαν ως οι αντιπροσωπευτικότεροι της δίαιτας των βροχοπτώσεων στην ευρύτερη περιοχή Αλμυρού. Παράδειγμα των παραπάνω διαγραμμάτων φαίνεται στο **Σχήμα 4.27** (υδρολογικό έτος 1979-80).

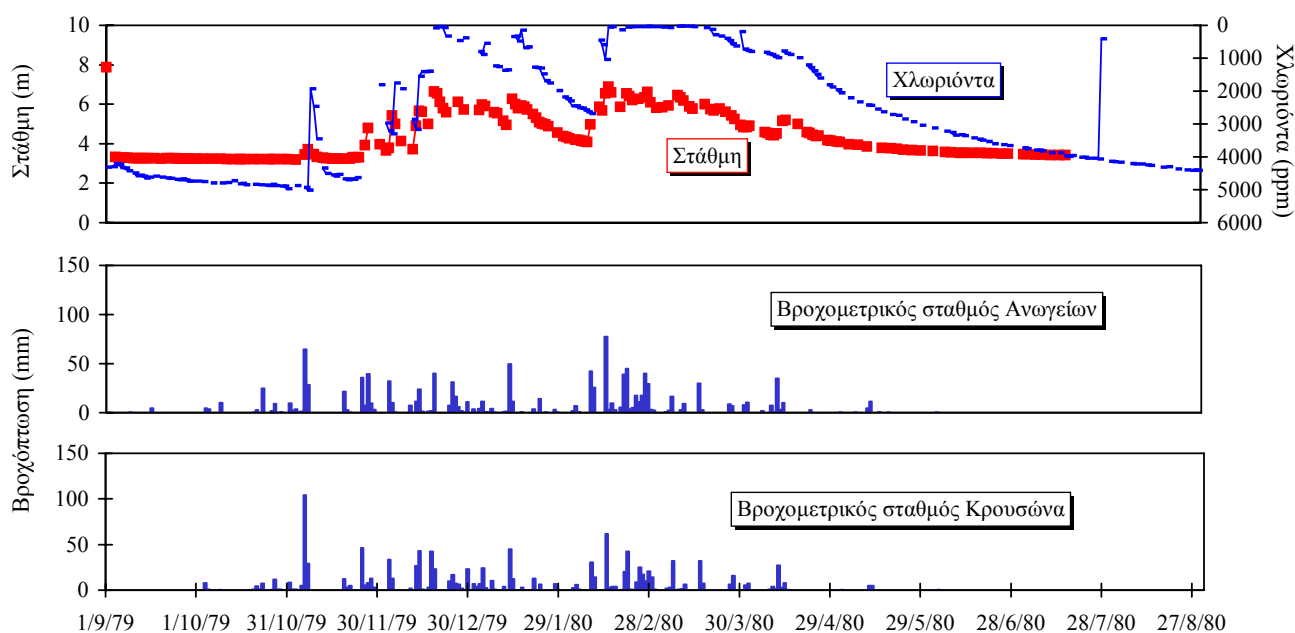
Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι οι μεταβολές της ποιότητας ακολουθούν με μικρή χρονική καθυστέρηση τις μεταβολές της παροχής της πηγής. Η αύξηση της παροχής συνεπάγεται βελτίωση της ποιότητας του νερού (μείωση συγκέντρωσης χλωριόντων) και αντίθετα η μείωση παροχής συνδέεται με χειροτέρευση της ποιότητας (αύξηση συγκέντρωσης χλωριόντων).

Από τη χρονική ταύτιση του διαγράμματος με τα ιστογράμματα των βροχοπτώσεων γίνεται εμφανές ότι η αύξηση της παροχής της πηγής είναι ομόρροπη συνάρτηση της έντασης των βροχοπτώσεων. Η αύξηση της παροχής εμφανίζεται με καθυστέρηση ημερών από την "ημέρα αιχμής" της ισχυρής βροχόπτωσης.

Κατ' ανάλογο τρόπο, για κάθε υδρολογικό έτος κατασκευάστηκε διάγραμμα που απεικονίζει τις χρονικές μεταβολές της στάθμης λίμνης της πηγής και τις αντίστοιχες μεταβολές της συγκέντρωσης χλωριόντων (παράδειγμα στο **Σχήμα 4.28**).



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα παροχής – ποιότητας – βροχοπτώσεων για το υδρολογικό έτος 1979-80 [151].



Σχήμα 4.28: Διάγραμμα στάθμης λίμνης – ποιότητας – βροχοπτώσεων για το υδρολογικό έτος 1979-80 [151].

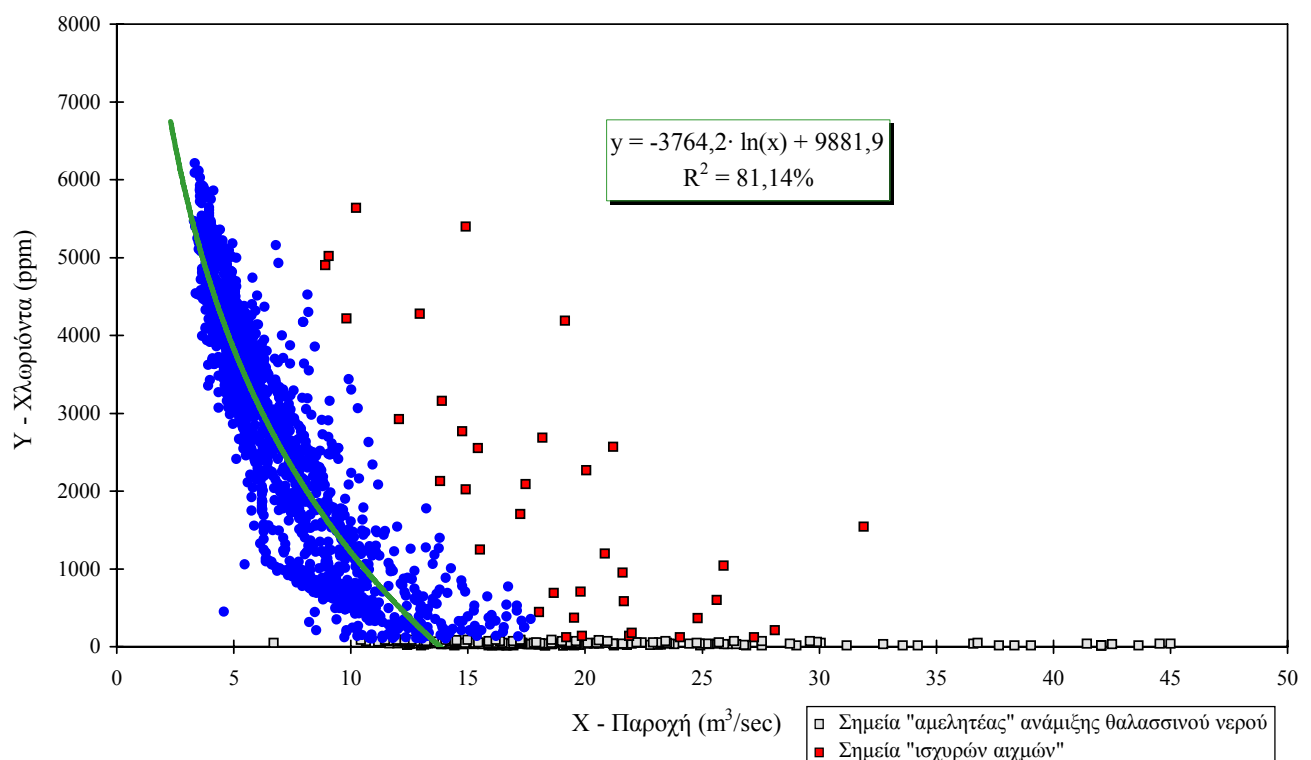
Από το τελευταίο διάγραμμα προκύπτει ότι οι μεταβολές στη στάθμη της λίμνης δεν συνδέονται πάντα με τον ίδιο τρόπο με την συγκέντρωση χλωριόντων στην πηγή.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεταβολές της στάθμης οφείλονται τόσο σε φυσικά (π.χ. βροχοπτώσεις) όσο και σε τεχνητά αίτια (θέση θυροφραγμάτων).

Η ανύψωση της στάθμης της λίμνης που οφείλεται σε φυσικά αίτια επιφέρει βελτίωση της ποιότητας του νερού, ενώ δεν παρατηρείται εμφανώς το ίδιο φαινόμενο στην περίπτωση που η αύξηση της στάθμης οφείλεται σε τεχνητά αίτια. Επομένως, είναι αναγκαίο να γίνει διαχωρισμός των μεταβολών της στάθμης που οφείλονται σε φυσικά, από αυτές που οφείλονται σε τεχνητά αίτια και στη συνέχεια να υπάρξει συσχετισμός με τις αντίστοιχες μεταβολές της συγκέντρωσης των χλωριόντων.

Για να διαπιστωθεί τυχόν ύπαρξη μαθηματικής σχέσης ανάμεσα στην παροχή και στην ποιότητα, κατασκευάστηκαν διαγράμματα παροχής – συγκέντρωσης χλωριόντων για κάθε υδρολογικό έτος. Μετά από επεξεργασία των παραπάνω διαγραμμάτων βρέθηκε η βέλτιστη αντιπροσωπευτική καμπύλη των σημείων.

Στο **Σχήμα 4.29** δίνεται το συνολικό διάγραμμα παροχής – συγκέντρωσης χλωριόντων όλων των διατιθέμενων υδρολογικών ετών.



Σχήμα 4.29: Διάγραμμα παροχής – ποιότητας για τα υδρολογικά έτη 1967-68 έως και 1993-94 ^[151].

Σημειώνεται ότι τα σημεία που αντιπροσωπεύουν μετρήσεις συγκέντρωσης χλωριόντων κάτω των 100 ppm θεωρήθηκε ότι δεν ακολουθούν την λογαριθμική εξίσωση. Η παραδοχή αυτή έγινε εξαιτίας της διαπίστωσης ότι η διάταξη των σημείων στο διάγραμμα δείχνει σταθεροποίηση της ποιότητας σε σχέση με την παροχή κάτω από κάποια τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων. Η τιμή των 100 ppm επιλέχθηκε αφενός γιατί βελτιστοποιεί το συντελεστή συσχετισμού για τα σημεία πάνω απ' αυτή (τουλάχιστον για τα περισσότερα υδρολογικά έτη), αφετέρου επειδή η τιμή αυτή θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε αμελητέα ανάμιξη θαλασσινού νερού.

Επίσης, για μικρές χρονικές περιόδους έντονων μεταβολών της παροχής (αιχμές = peaks) τα ζεύγη τιμών "παροχή-ποιότητα" δεν συγχρονίζονται λόγω του προαναφερθέντος φαινομένου της καθυστέρησης, με αποτέλεσμα να αποκλίνουν σημαντικά από την μέση καμπύλη συσχετισμού των δύο τιμών. Για τον λόγο αυτό, κατά την χάραξη της καμπύλης κρίθηκε σκόπιμο να εξαιρεθούν τα ζεύγη τιμών που εμπίπτουν στις βραχυχρόνιες αυτές έντονες ανωμαλίες (σημεία "ισχυρών αιχμών").

Η επιλογή του τύπου της καμπύλης του Σχήματος 4.29 έγινε με κριτήριο τον συντελεστή συσχετισμού (**R**). Βέλτιστος συσχετισμός προέκυψε για τη σχέση:

$$y = \alpha \cdot \ln(x) + \beta \quad (4.3)$$

όπου, **y** συγκέντρωση χλωριόντων (ppm),

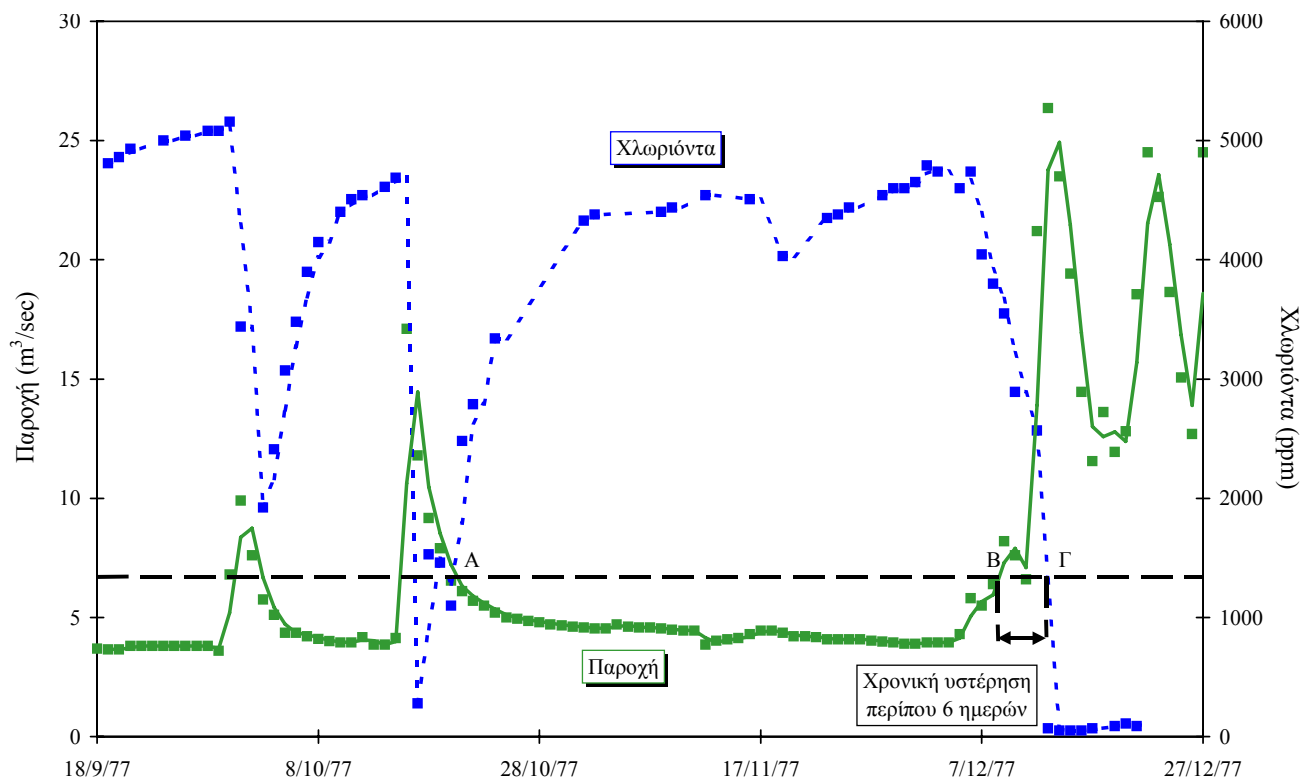
x παροχή (m³/sec), και

α, β αριθμητικές παράμετροι διαφορετικές ανά υδρολογικό έτος.

Έχει παρατηρηθεί και από προγενέστερες έρευνες, ότι δεδομένη ποιότητα νερού της πηγής συνδυάζεται χρονικά με διαφορετικές τιμές παροχών κατά τις περιόδους αύξησης (φόρτιση) και τις περιόδους μείωσης (εκφόρτιση) των εκροών της πηγής. Το φαινόμενο θα ήταν δυνατόν να αποδοθεί και σαν χρονική υστέρηση επανεμφάνισης της ίδιας ποιότητας νερού, για δεδομένη παροχή, μεταξύ της περιόδου "εκφόρτισης" και "φόρτισης" του υδροφορέα.

Για τον λόγο αυτό, το γεγονός ερμηνεύεται σαν διαφορά χρόνου εξέλιξης του φαινομένου της επανεγκατάστασης της αλμυρότητας στους καρστικούς αγωγούς, οι οποίοι τροφοδοτούν την πηγή Αλμυρού κατά την περίοδο της εκφόρτισης και του χρόνου εξέλιξης του αντίστροφου φαινομένου της "έκπλυσης" των αγωγών κατά την περίοδο της φόρτισης.

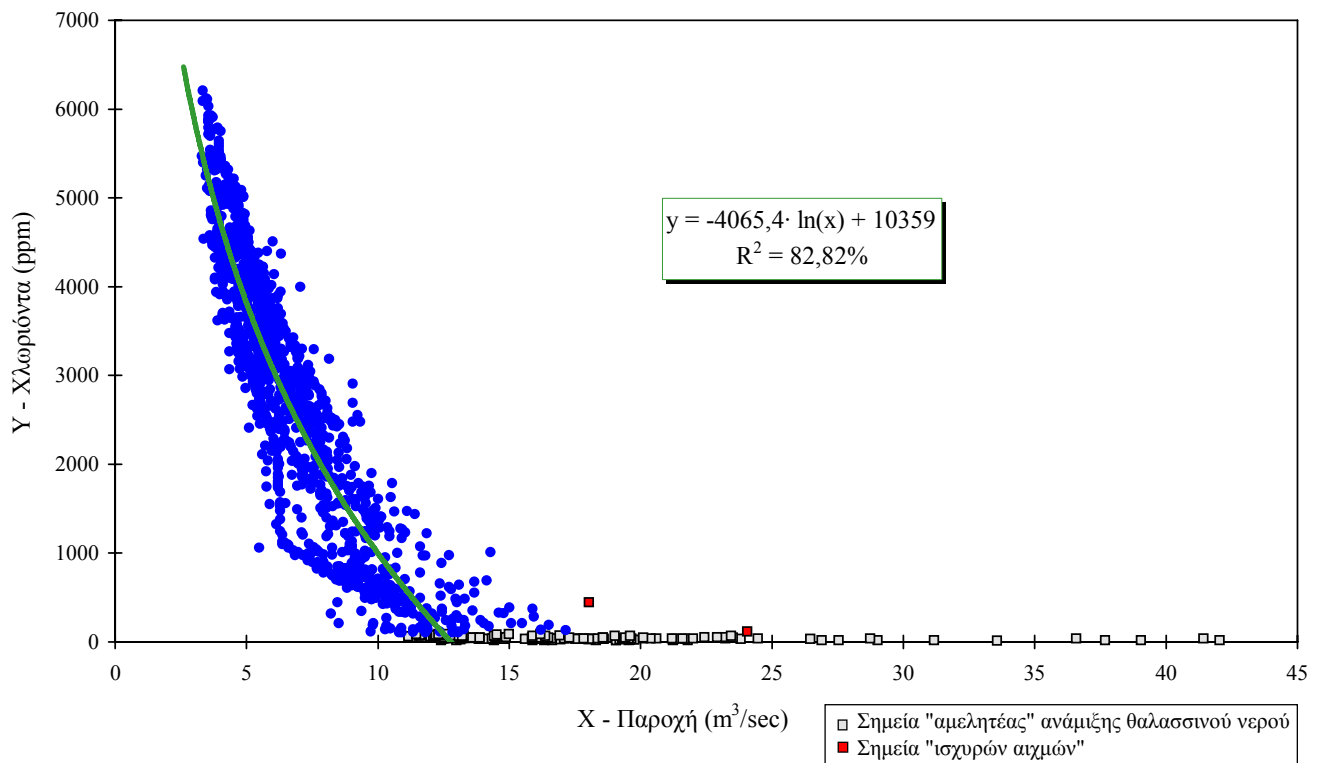
Έτσι, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.30**, η ποιότητα στο σημείο "Α" επανεμφανίζεται στο "Γ" με χρονική υστέρηση 6 ημερών από το "Β", δηλαδή από το σημείο επανεμφάνισης της παροχής του "Α".



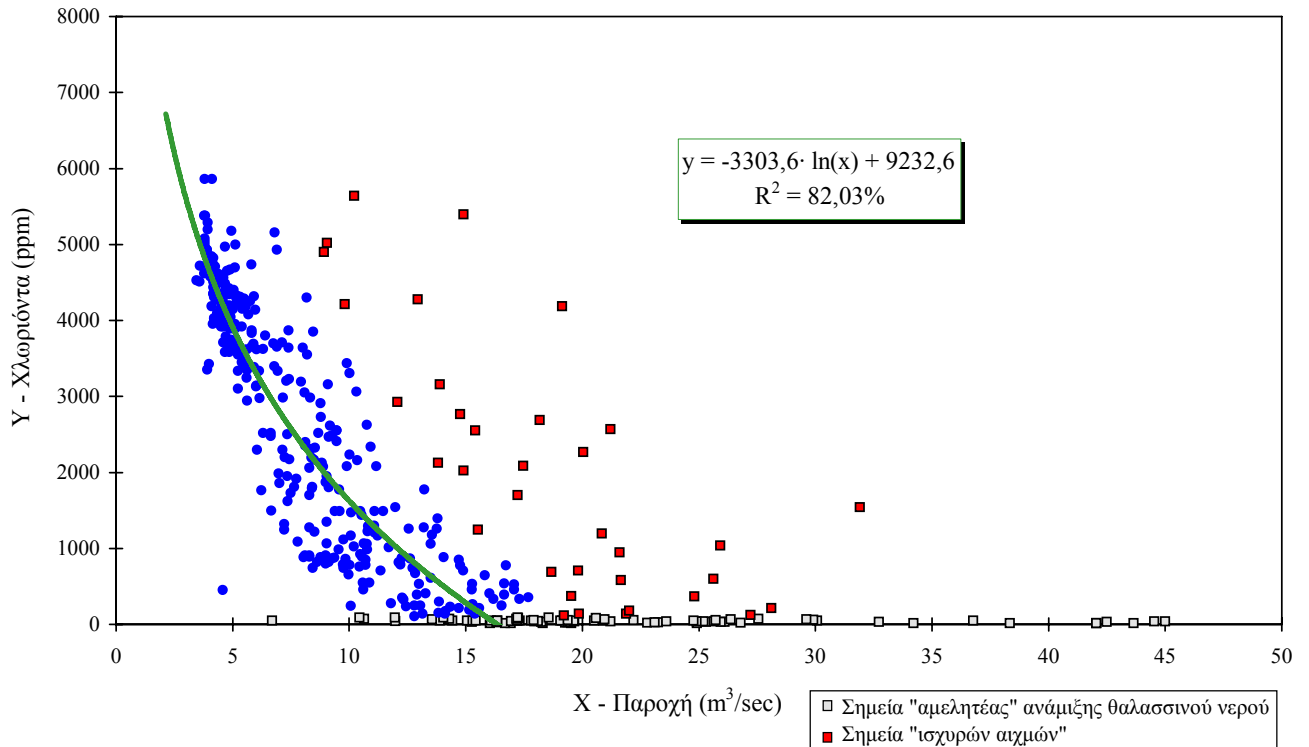
Σχήμα 4.30: Χρονική υστέρηση επανεμφάνισης νερού ίδιας ποιότητας [151].

Με αφορμή την παρατήρηση της χρονικής υστέρησης κρίθηκε σκόπιμο να ερευνηθεί το ενδεχόμενο της ύπαρξης άλλης καμπύλης συσχετισμού παροχής – ποιότητας για τις περιόδους αύξησης και άλλης, ανάλογης καμπύλης, για τις περιόδους μείωσης των παροχών της πηγής (βλέπε **Σχήματα 4.31** και **4.32**). Οι βέλτιστες καμπύλες για κάθε υδρολογικό έτος, είναι και πάλι της μορφής: $y = \alpha \cdot \ln(x) + \beta$.

Το ότι ο συντελεστής συσχετισμού της ενιαίας καμπύλης (Σχήμα 4.29) είναι σχετικά μικρότερος των αντίστοιχων συντελεστών των μεμονωμένων καμπυλών (Σχήματα 4.31 και 4.32) είναι γεγονός αναμενόμενο και επιβεβαιώνει έμμεσα ότι οι μηχανισμοί ή τουλάχιστο οι χρόνοι εξέλιξης του φαινομένου της "έκπλυσης" και της "επανεγκατάστασης" της αλμυρότητας στους καρστικούς αγωγούς είναι διαφορετικοί.



Σχήμα 4.31: Διάγραμμα παροχής (μείωση) – ποιότητας ^[151].

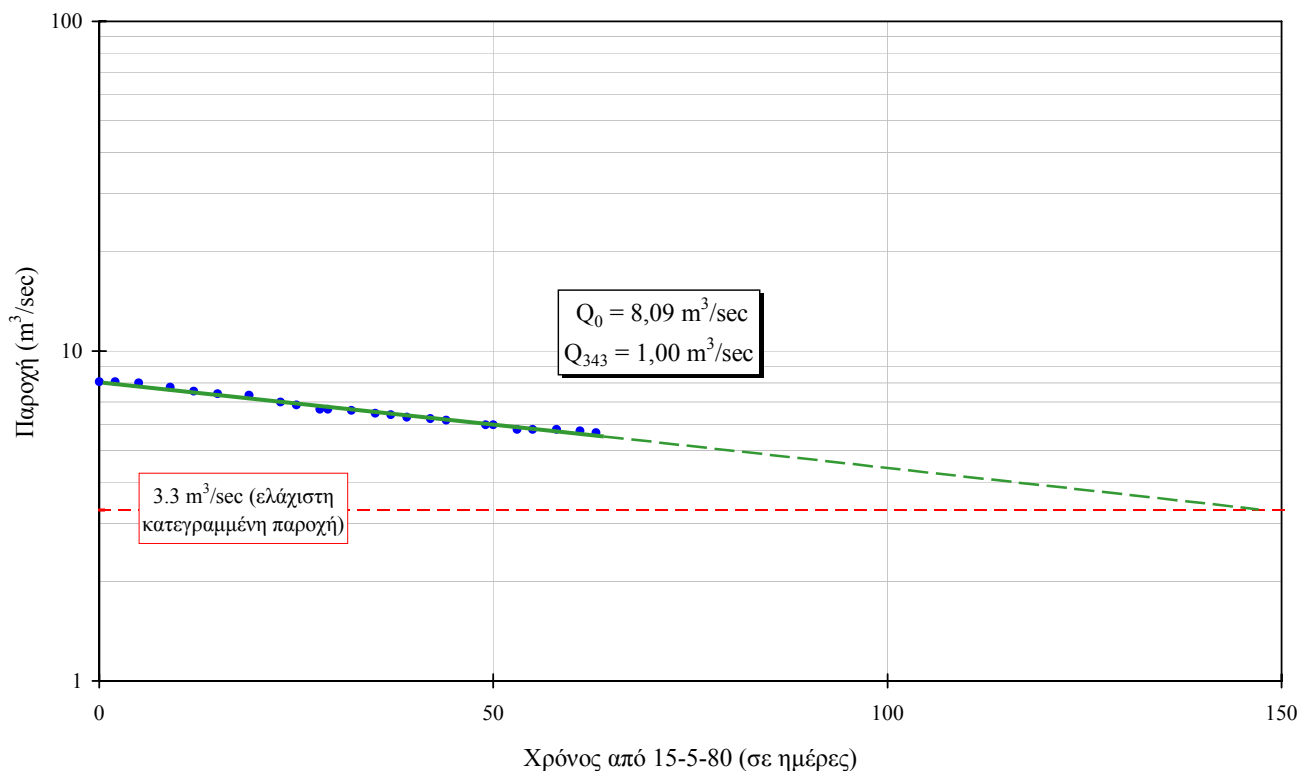


Σχήμα 4.32: Διάγραμμα παροχής (αύξηση) – ποιότητας ^[151].

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι καμπύλες των διαγραμμάτων της περιόδου μείωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερο (ικανοποιητικότερο) συντελεστή συσχετισμού από αυτές των διαγραμμάτων της περιόδου αύξησης της παροχής.

Το γεγονός αποδίδεται στο ότι η εκφόρτιση του υδροφορέα γίνεται συγκριτικά "αβίαστα", ενώ η τροφοδοσία του (φόρτιση) επηρεάζεται σημαντικά από την ποικίλλουσα γεωγραφική και χρονική κατανομή, καθώς και την ένταση των εκάστοτε βροχοπτώσεων. Ως πρόσθετος λόγος θα ήταν δυνατόν να αναφερθεί το γεγονός της διάθεσης μικρότερου αριθμού μετρήσεων στις περιόδους αύξησης της παροχής σε σχέση με αυτές της μείωσής της.

Για την εύρεση της καμπύλης στείρευσης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Maillet, σύμφωνα με την οποία σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα χρόνου – παροχής (η παροχή στην λογαριθμική κλίμακα) ο συντελεστής στείρευσης αντιπροσωπεύει την "κλίση" της ευθείας που προκύπτει (βλέπε παράδειγμα στο **Σχήμα 4.33**).



Σχήμα 4.33: Καμπύλη στείρευσης υδρολογικού έτους 1979-80 ^[151].

Από τα διαγράμματα στείρευσης προσδιορίστηκε ο χρόνος που χρειάζεται για να συναντήσει η καμπύλη στείρευσης την "παροχή βάσης". Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν οι παροχές της έναρξης της ξηρής περιόδου κάθε υδρολογικού έτους (τέλος βροχοπτώσεων). Θεωρήθηκε λοιπόν αυθαίρετα ως "παροχή βάσης" η τιμή του $1 \text{ m}^3/\text{sec}$, ενώ η ελάχιστη καταγραφισμένη παροχή είναι ίση με $3,3 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Στη συνέχεια, από τη σχέση Maillet ($Q_t = Q_0 \cdot e^{-at}$, όπου Q_t παροχή σε χρόνο t (m^3/sec), και Q_0 παροχή κατά την έναρξη της στείρευσης) βρέθηκε ο συντελεστής στείρευσης (a). Με την εύρεση του συντελεστή στείρευσης είναι δυνατόν να προσδιορισθούν τα δυναμικά αποθέματα ανά έτος ($W = Q_0/a$) μέχρι, θεωρητικά, η παροχή της πηγής να φτάσει την "παροχή βάσης".

Στον **Πίνακα 4.4** δίνονται οι τιμές των δυναμικών αποθεμάτων (W) που εκτιμήθηκαν για τα αντίστοιχα υδρολογικά έτη. Από τον πίνακα αυτόν συμπεραίνεται ότι τα δυναμικά αποθέματα κυμαίνονται ευρύτατα (από 47 μέχρι 462 εκατ. m^3/year), χωρίς να είναι ευχερής ο σχολιασμός αυτών των διακυμάνσεων με βάση αντικειμενικά κριτήρια (π.χ. βροχερά ή ξηρά υδρολογικά έτη).

Η εξίσωση Maillet δεν είναι η καταλληλότερη για να αποδώσει αξιόπιστη, μονοσήμαντη και εύκολα ερμηνεύσιμη παράμετρο της δίαιτας μιας πηγής. Για το λόγο αυτό, προτείνεται όπως ο συντελεστής στείρευσης (a) και τα δυναμικά αποθέματα (W) χρησιμοποιούνται σαν μέσοι όροι μακροτέρων χρονικών περιόδων (όχι σε μεμονωμένα υδρολογικά έτη) και μόνο σαν ενδεικτικές παράμετροι.

4.7.2. Ημέρες "γλυκού νερού"

Όπως προαναφέρθηκε, η πηγή Αλμυρού λειτουργεί περιοδικά και για μικρά χρονικά διαστήματα ως πηγή "γλυκού νερού" (συγκεντρώσεις χλωριόντων και κάτω των 100 ppm). Επειδή οι ημέρες "γλυκού νερού" συνδέονται με την περίοδο εμφάνισης των υψηλότερων παροχών, το ενδεχόμενο της εκμετάλλευσης του φαινομένου παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης σημαντικών όγκων νερού καλής ποιότητας.

Προκειμένου να εξετασθεί το φαινόμενο, υπολογίσθηκε η διάρκειά του, για μέσο υδρολογικό έτος της περιόδου 1968-93 και προσδιορίστηκε η μαθηματική σχέση που συνδέει τον αριθμό ημερών "γλυκού νερού" με το ύψος των βροχοπτώσεων.

Πίνακας 4.4: Δυναμικά αποθέματα πηγής Αλμυρού  ^[151].

Υδρολογικά έτη	Q_0 (m ³ /sec)	t_{base} (days)	a (days ⁻¹)	W (m ³)
1968-69	6,05	542	0,0033	157.391.705
1969-70	4,86	791	0,0020	210.079.689
1970-71	6,57	438	0,0043	132.073.305
1971-72	5,77	474	0,0037	134.824.007
1972-73	6,30	376	0,0049	111.197.392
1973-74	5,54	714	0,0024	199.627.034
1974-75	5,16	513	0,0032	139.376.326
1975-76	8,98	478	0,0046	168.959.834
1976-77	6,50	268	0,0070	80.408.497
1977-78	6,30	737	0,0025	217.958.719
1978-79	5,23	637	0,0026	173.984.829
1979-80	8,09	343	0,0061	114.677.831
1980-81	5,65	1640	0,0011	462.321.968
1981-82	5,76	565	0,0031	160.588.350
1982-83	5,81	751	0,0023	214.249.913
1983-84	6,75	690	0,0028	210.735.293
1984-85	6,25	897	0,0020	264.315.671
1987-88	5,95	510	0,0035	147.012.499
1988-89	5,68	808	0,0021	228.289.435
1991-92	7,27	148	0,0134	46.862.079
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	6,22	616	0,0038	170.319.463

(*) Τα υδρολογικά έτη 1985-86, 1986-87, 1989-90, 1990-91, 1992-93 και 1993-94 δεν λήφθηκαν υπόψη λόγω έλλειψης επαρκών στοιχείων. Q_0 = παροχή έναρξης της στείρευσης, t_{base} = απαιτούμενος χρόνος ώστε $Q = 1$ m³/sec (= παροχή βάσης).

Τελικά συντάχθηκε νομόγραμμα με το οποίο συσχετίζονται οι ημέρες "γλυκού νερού" με το ύψος των βροχοπτώσεων, σε συνδυασμό με διάφορα επίπεδα (βαθμίδες) συγκέντρωσης χλωριόντων στο νερό της πηγής.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καθιστούν την εκροή "γλυκού νερού" προβλέψιμη στις περισσότερες διαστάσεις της (χρονική στιγμή εμφάνισης, παροχή, ποιότητα, συχνότητα, διάρκεια) και ως εκ τούτου ορθολογικά εκμεταλλεύσιμη.

Ο χαρακτηρισμός "γλυκό νερό" αφορά νερό της πηγής του οποίου η περιεκτικότητα σε ιόντα Cl βρίσκεται κάτω από ένα επιθυμητό όριο. Ημέρα "γλυκού νερού" λογίζεται η ημέρα κατά την οποία η μέτρηση (δειγματοληψία) έδωσε συγκέντρωση χλωριόντων μικρότερη του επιθυμητού ορίου. Είναι εύλογο και αναμενόμενο ότι ο αριθμός ημερών "γλυκού νερού", για το ίδιο υδρολογικό έτος, είναι μικρότερος, όσο το επιθυμητό όριο συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου μετατοπίζεται σε χαμηλότερες τιμές.

Από τα προηγούμενα διαφαίνεται, χωρίς να έχει συνδεθεί με αριθμητική σχέση, ότι η συχνότητα και η διάρκεια (αριθμός ημερών) εκροής "γλυκού νερού" είναι συνάρτηση όχι μόνο της έντασης και της διάρκειας της βροχόπτωσης αλλά κύρια του συνολικού ύψους βροχής του αντίστοιχου υδρολογικού έτους. Επίσης, επειδή κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (ξηρή περίοδος) δεν παρατηρούνται ημέρες "γλυκού νερού", αδιακρίτως έντασης και διάρκειας βροχόπτωσης, γίνεται η σκέψη ότι οι θερινές βροχοπτώσεις είναι λιγότερο αποτελεσματικές, συνεπώς θα μπορούσαν να μη ληφθούν υπόψη στο συνολικό ύψος βροχής του αντίστοιχου υδρολογικού έτους ^[156].

Θεωρήθηκε ότι κάθε μεμονωμένη μέτρηση καλύπτει στατιστικά χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας, δηλαδή 3 ημέρες πριν και 3 μετά την μέτρηση. Ημέρες της "περιόδου βροχών" ("χειμώνας" = Νοέμβριος – Απρίλιος) που δεν καλύπτονται από αυτή την πυκνότητα χαρακτηρίζονται ως "ελλείψεις". Έτσι, 8 υδρολογικά έτη χαρακτηρίστηκαν "πλήρη" (ελλείψεις < 5%), 6 "ελλιπή" (ελλείψεις από 5% έως 30%) και 13 "λίαν ελλιπή" (ελλείψεις > 30%).

Οι μεμονωμένες παρατηρήσεις ελέγχθηκαν, όσον αφορά την πυκνότητά τους και "διορθώθηκαν" κατά τον πιθανό αριθμό ημερών που διαρκεί το φαινόμενο, πριν και μετά την ημέρα που συνέπεσε η μέτρηση. Επίσης, θεωρήθηκε ως "γλυκό νερό" αυτό που περιέχει λιγότερο από 300 mg/lit χλωριόντα.

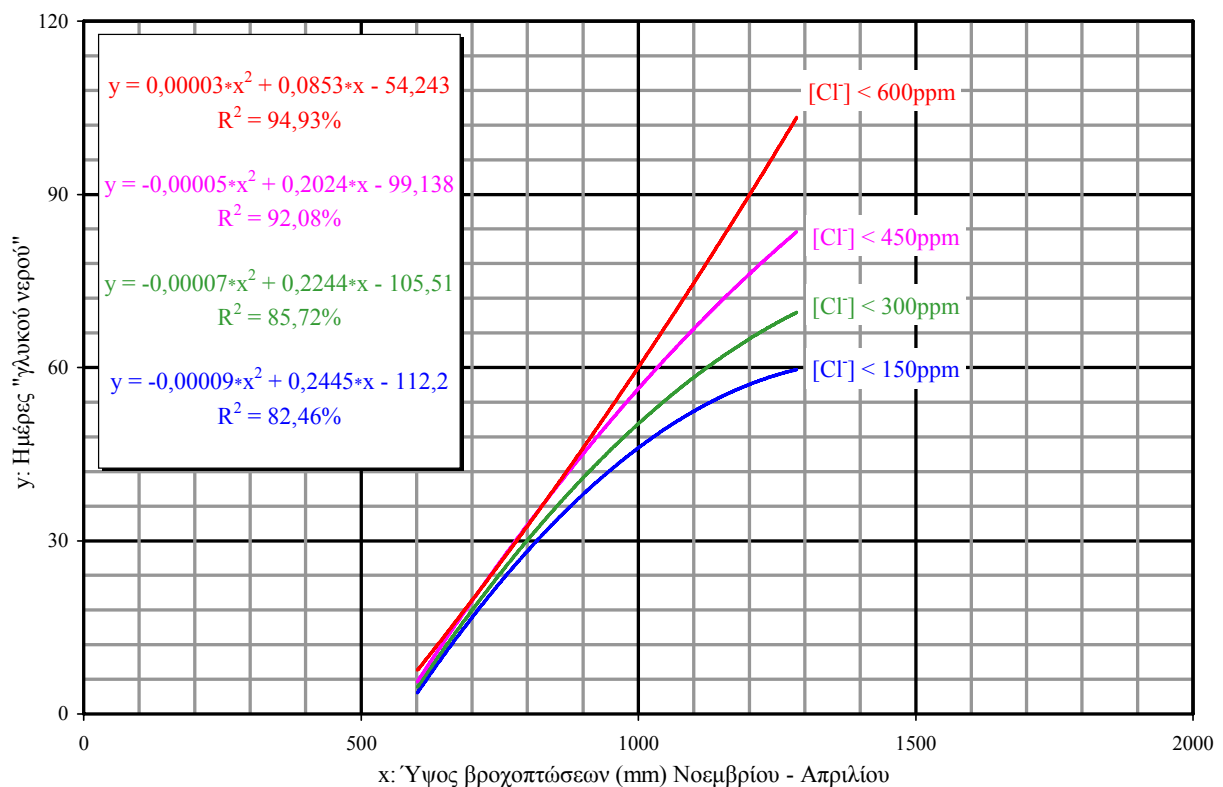
Σημειώνεται ότι, τελικά χρησιμοποιήθηκαν 25 υδρολογικά έτη, αφού για τα υδρολογικά έτη 1967-68 και 1993-94 δεν διατίθενται βροχομετρικά στοιχεία.

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία, ο μέσος συνολικός αριθμός ημερών "γλυκού νερού" ανά υδρολογικό έτος είναι 46,50 ημέρες για τα 8 "πλήρη" υδρολογικά έτη, 24,67 ημέρες για τα 6 "ελλιπή" υδρολογικά έτη και 35,55 ημέρες για τα 11 "λίαν ελλιπή" υδρολογικά έτη. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι καθώς μειώνεται η πληρότητα των υδρολογικών ετών μειώνεται και το ποσοστό διόρθωσης, ενώ αυξάνει το ποσοστό συμπλήρωσης (μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος). Δηλαδή, η ακρίβεια πρόβλεψης

του αριθμού ημερών "γλυκού νερού" γίνεται μέγιστη για τα 8 "πλήρη" υδρολογικά έτη και μειώνεται στην 25ετία (ένταξη "ελλιπών" και "λίαν ελλιπών" υδρολογικών ετών).

Στα προηγούμενα θεωρήθηκε "γλυκό νερό" το νερό της πηγής του οποίου η συγκέντρωση χλωριόντων είναι μικρότερη από 300 ppm. Εάν δεν εξειδικευθεί τη χρήση του πηγαιού νερού, θα ήταν δυνατόν να θεωρηθούν ημέρες "γλυκού νερού" και χρονικές περίοδοι όπου η συγκέντρωση χλωριόντων βρίσκεται σε υψηλότερα ή χαμηλότερα επίπεδα, ανάλογα με την επιδιωκόμενη χρήση. Αυτονόητο είναι ότι, για το ίδιο υδρολογικό έτος, όσο το επίπεδο συγκέντρωσης χλωριόντων είναι υψηλότερο (> 300 ppm), τόσο οι ημέρες "γλυκού νερού" είναι περισσότερες και αντίστροφα.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη ημερών "γλυκού νερού" σε συνδυασμό με τα εκάστοτε επιθυμητά επίπεδα συγκέντρωσης χλωριόντων, κατασκευάστηκε το νομόγραμμα του **Σχήματος 4.34**.



Σχήμα 4.34: Σχέση βροχοπτώσης και ημερών "γλυκού νερού" (διάφορες ποιότητες) για "πλήρη" υδρολογικά έτη ^[161].

Στον ένθετο πίνακα του σχήματος παρατηρείται μείωση του συντελεστή συσχετισμού σε χαμηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης χλωριόντων, οπότε περιορίζεται και ο αριθμός ημερών "γλυκού νερού". Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, το νομόγραμμα είναι αξιόπιστο για ύψη βροχοπτώσεων της "περιόδου βροχών" που κυμαίνονται μεταξύ των 600 και 1300 mm/year.

4.8. Υπερετήσια συμπεριφορά του υδροφορέα

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να αξιοποιήσει τα υπόγεια νερά για την κάλυψη υδρευτικών αναγκών, η ΔΕΥΑΗ κατασκεύασε δίκτυα παραγωγικών υδρογεωτρήσεων, καταναμημένα σε πεδία ανάντη της πηγής Αλμυρού. Όμως, από το σύνολο των 63 αρχικών γεωτρήσεων, μόνο οι 16 παράγουν νερό για την ύδρευση του Δήμου Ηρακλείου (5 στην Τύλισο, 2 στο Γωνιανό Φαράγγι, 7 στην Κέρη και 2 στον Άγιο Μύρωνα).

Σημειώνεται ότι δεν γίνεται λόγος για τις υπόλοιπες γεωτρήσεις που εκμεταλλεύεται η ΔΕΥΑΗ στα πεδία Θραψανού, Μαλλίων, Βασιλειών κ.λπ. επειδή αυτές βρίσκονται εκτός της επιλεγμένης περιοχής ενδιαφέροντος. Θεωρήθηκε, δηλαδή, ότι δεν είναι δυνατόν να επηρεάσουν την συμπεριφορά του εξεταζόμενου υδροφόρου ορίζοντα και επομένως την λειτουργία της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.

Το ίδιο δεν συμβαίνει με τα πεδία Κρουσώνα – Λουτρακίου (ανενεργό) και Αγίου Μύρωνα, τα οποία βρίσκονται στον "δρόμο" τροφοδοσίας του υδροφορέα από το ορεινό συγκρότημα του Ψηλορείτη και άρα ενδιαφέρουν άμεσα στην εκτίμηση της υπερετήσιας συμπεριφοράς του. Εξετάζονται λοιπόν ενιαία, μαζί με τα πεδία εκμετάλλευσης της Τυλίσου, του Γωνιανού Φαραγγιού και της Κέρης, παρ' ότι βρίσκονται μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος (περιοχή μοντελοποίησης).

Επίσης, στις προαναφερόμενες αντλούμενες γεωτρήσεις θα πρέπει να προστεθούν και άλλες, οι οποίες είτε έγιναν από την ΔΕΥΑΗ και παραχωρήθηκαν σε άλλο φορέα για εκμετάλλευση (π.χ. T17), είτε αναπτύχθηκαν από άλλους φορείς και παράγουν γι' αυτούς (π.χ. ΥΕΒ-Γ2 για τον Δήμο Γαζίου). Στοιχεία για όλες αυτές τις γεωτρήσεις δεν ήταν δυνατόν να βρεθούν, εκτός από κάποιες μεμονωμένες περιπτώσεις, κατά την "απογραφή των σημείων νερού" (1996-97).

4.8.1. Η υφαλμύρινη ως συνέπεια εκμετάλλευσης

Ο εξεταζόμενος παράκτιος καρστικός υδροφορέας τέθηκε σε συστηματική εκμετάλλευση αρχίζοντας από το πεδίο Τυλίσου, το 1987. Στη συνέχεια οι απολήψεις αυξήθηκαν με την ένταξη των πεδίων Κέρης (1991), Γωνιανού Φαραγγιού (1992) και Αγίου Μύρωνα (1998).

Αμέσως μετά την έναρξη της λειτουργίας του πεδίου Τυλίσου, παρουσιάστηκε προοδευτική υποβάθμιση της ποιότητας (αλμύρινη) του τοπικού υδροφορέα. Η σταδιακή εντατικοποίηση της εκμετάλλευσης συνοδεύθηκε από άμεση και σαφή ταπείνωση της στάθμης και υποβάθμιση της ποιότητας των αντλούμενων γεωτρήσεων.

Με την συνέχιση των αντλήσεων το φαινόμενο εξελίχθηκε ταχύτατα με σαφή τάση σταθεροποίησης στα μετέπειτα έτη. Τελικά, η υφαλμύρινη πήρε σοβαρές διαστάσεις την περίοδο των "ξηρών" ετών 1989 και 1990. Η διετία αυτή συμπίπτει και με περίοδο μεγίστων απολήψεων από το συγκεκριμένο πεδίο.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι η ένταση της ρύπανσης κατανέμεται ετερογενώς από γεώτρηση σε γεώτρηση και διαφάνηκε ότι το πρόβλημα δεν θα επιλύονταν μόνο με παρεμβάσεις στους ρυθμούς άντλησης σε μεμονωμένες γεωτρήσεις, διότι η επιδείνωση επεκτείνονταν σε ολόκληρη την έκταση του πεδίου. Δηλαδή, παρεμβάσεις στους ρυθμούς άντλησης σε μεμονωμένες γεωτρήσεις (μείωση ή αύξηση των ρυθμών άντλησης), περισσότερο ή λιγότερο επιδεκτικών σε αλμύρινη, δεν βελτίωσαν την γενική εικόνα της θαλάσσιας διείδυσης, αφού λόγω λειψυδρίας οι συνολικές απολήψεις έπρεπε να παραμείνουν στο ίδιο επίπεδο ή και να αυξηθούν.

Έτσι, οι μετέπειτα προσπάθειες στράφηκαν στην γεωγραφική επέκταση των δικτύων με κατασκευή νέων γεωτρήσεων και σε άλλες περιοχές (Κέρη, Γωνιανό Φαράγγι, Κρουσώνας, Άγιος Μύρωνας κ.λπ.), σε συνδυασμό με την επανεξέταση των ρυθμών εκμετάλλευσης (μείωση των ρυθμών εκμετάλλευσης στο αρχικό πεδίο Τυλίσου). Σήμερα (2001) η εκμετάλλευση των πεδίων Τυλίσου, Κέρης και Γωνιανού Φαραγγιού είναι ελεγχόμενη, με ρυθμούς άντλησης (ημερήσιες παροχές) πολύ μικρότερους από τους προτεινόμενους (ενδεικτικούς) από τις δοκιμαστικές αντλήσεις.

Οι παραπάνω προσπάθειες, ευνοημένες και από το γεγονός ότι τα μετέπειτα έτη (1991-97) ήταν λιγότερο ξηρά, επέφεραν εντυπωσιακή μείωση και σαφή τάση σταθεροποίησης της ρύπανσης. Με την ένταξη και των πεδίων Κρουσώνα –

Λουτρακίου και Αγίου Μύρωνα (σε όλη του την έκταση) αναμένεται να δοθούν λύσεις, έστω και παροδικές, στο υδρευτικό πρόβλημα του Δήμου Ηρακλείου ^[160].

4.8.2. Κατασκευή ισοπιεζομετρικών και ισοχλώριων χαρτών

Προκειμένου να μελετηθεί και να επισημανθεί η υπερετήσια συμπεριφορά του υδροφορέα, να εκτιμηθεί η απόδοση της εκμετάλλευσής του (με γεωτρήσεις) και να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης της υπεράντλησης, σχεδιάσθηκαν ισοπιεζομετρικές και ισοχλώριες παραστάσεις (χάρτες) για διάφορες χρονικές περιόδους.

Για την πληρέστερη αντιπροσώπευση της κατανομής των αντλήσεων, τα διατιθέμενα δεδομένα εμπλουτίστηκαν με στοιχεία (όταν υπήρχαν) από γεωτρήσεις που εκτέλεσαν τρίτοι φορείς, πλην της ΔΕΥΑΗ (Δήμος Γαζίου, ΙΓΜΕ, ΠΔΕΒ κ.λπ.).

Οι χάρτες που τελικά κατασκευάστηκαν βασίζονται σε σημειακές μετρήσεις (από τις γεωτρήσεις) και με δεδομένη την ετερογένεια του σχηματισμού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ενδεικτικά. Επίσης, η περιοχή θεωρήθηκε υδρογεωλογικά ενιαία, καθώς δεν υπήρχαν μετρήσεις στα όρια των υδρολιθολογικών ενοτήτων.

Επιλογή χρονικών "παραθύρων"

Για την εξέταση της συμπεριφοράς (κατανομή στάθμης και ποιότητας) ενός υδροφορέα είναι αναγκαία η μελέτη των οριακών συνθηκών του. Οι συνθήκες αυτές αφορούν την εμφάνιση της υψηλότερης και της χαμηλότερης στάθμης ανά γεώτρηση.

Η "αποτύπωση" του υδροφορέα για δεδομένη στιγμή απαιτεί την διάθεση ταυτόχρονων ή περίπου ταυτόχρονων μετρήσεων σε όλη την έκτασή του. Διαδοχικές τέτοιες παρατηρήσεις και αποτυπώσεις είναι δυνατόν να δώσουν την εξέλιξη του υδροφορέα για δεδομένο καθεστώς εκμετάλλευσης ^[160].

Προκειμένου λοιπόν να γίνει αυτή η παρακολούθηση αναζητήθηκαν, ανά υδρολογικό έτος, ταυτόχρονες μετρήσεις (στάθμη και ποιότητα) για την περίοδο των "υψηλών" και των "χαμηλών νερών". Επειδή όμως, πραγματικά ταυτόχρονες μετρήσεις προσφέρονται σε ελάχιστα σημεία παρατήρησης (γεωτρήσεις), αναζητήθηκε χρονικό "παράθυρο" μέσα στο οποίο διατίθεται εύλογος αριθμός παρατηρήσεων ανά πεδίο.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό επελέγησαν, ανά υδρολογικό έτος, χρονικές περίοδοι ("παράθυρα") εύρους 10 ημερών, κατά την διάρκεια των οποίων υπήρχαν ανάλογες μετρήσεις. Η επιλογή των "παραθύρων", όσον αφορά τη διάρκεια και τη

δεδομένη χρονική στιγμή αναφοράς τους, έγινε έτσι ώστε να πληρούνται δύο βασικές προϋποθέσεις ^[160]:

- να περιέχουν επαρκή αριθμό παρατηρήσεων για περαιτέρω επεξεργασία (σχεδίαση χαρτών ισοκαμυλών), και
- να εμπίπτουν σε ευρύτερες περιόδους στις οποίες επικρατούν γενικά "χαμηλές" ή "υψηλές" στάθμες, χωρίς απαραίτητα να ταυτίζονται με τις πλέον χαμηλές ή τις πλέον υψηλές, ανά γεώτρηση και υδρολογικό έτος.

Το χρονικό "παράθυρο υψηλής στάθμης" αναζητήθηκε στο δίμηνο Μαρτίου – Απριλίου, με μόνη εξαίρεση το υδρολογικό έτος 1994-95 (Ιανουάριος). Το "παράθυρο χαμηλής στάθμης" αναζητήθηκε στο τρίμηνο Ιουλίου – Σεπτεμβρίου. Σε ορισμένα έτη δεν ήταν δυνατόν, με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις, να ορισθεί σαφώς το "παράθυρο υψηλής στάθμης", ενώ σε άλλα έτη ορίσθηκε και δεύτερο "παράθυρο χαμηλής στάθμης" κατά το δίμηνο Οκτωβρίου – Νοεμβρίου.

Τέλος, σε επιλεγμένες περιπτώσεις γεωτρήσεων εκτός περιοχών άντλησης που στερούνταν μετρήσεων μέσα στο συγκεκριμένο χρονικό "παράθυρο", λήφθηκαν υπόψη οι χρονικά πλησιέστερες. Επίσης, σε περιπτώσεις που για την ίδια γεώτρηση υπήρχαν περισσότερες από μία μετρήσεις μέσα στην επιλεγμένη χρονική περίοδο, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος αριθμητικός όρος αυτών των μετρήσεων.

Σύνταξη χαρτών

Η επεξεργασία των στοιχείων στάθμης και ποιότητας (συγκεντρώσεις χλωριόντων), για κάθε χρονικό "παράθυρο", έγινε με τα προγράμματα Gridzo και RockBase του γεωτεχνικού πακέτου RockWorks. Οι κατανομές της πιεζομετρίας και της ρύπανσης (ποιότητα) στην περιοχή ενδιαφέροντος προσδιορίστηκαν με τη γεωστατιστική μέθοδο Kriging που περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα Gridzo.

Η μέθοδος Kriging χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένα δίκτυο τιμών για ένα σύνολο δεδομένων. Η διαδικασία στηρίζεται στην δημιουργία βαριογραμμάτων που παρουσιάζουν τη μεταβολή των δεδομένων με την απόσταση και κατά μήκος καθορισμένων διευθύνσεων.

Μετά από τον καθορισμό διαφόρων παραμέτρων, τα δεδομένα προσαρμόζονται σε κάθε ένα από τα έξι διακεκριμένα πρότυπα βαριογράμματα και επιλέγεται το πρότυπο που προσεγγίζεται καλύτερα (δηλαδή, με τον υψηλότερο συντελεστή

συσχετισμού). Στη συνέχεια κατασκευάζεται το δίκτυο τιμών χρησιμοποιώντας τους συντελεστές της εξίσωσης που αντιπροσωπεύει το επιλεγμένο βαριόγραμμα, καθώς και ένα δίκτυο σφάλματος, που παρουσιάζει την αβεβαιότητα του δικτύου τιμών.

Με την εφαρμογή της μεθόδου Kriging συντάχθηκαν οριζοντιογραφίες (χάρτες) που παρουσιάζουν τις ισοπιεζομετρικές και ισοχλώριες καμπύλες του υδροφορέα, για τα επιλεγμένα χρονικά "παράθυρα" κάθε υδρολογικού έτους. Στην παρούσα διατριβή δεν είναι δυνατό να παρουσιαστεί το σύνολο των χαρτών αλλά οι αντιπροσωπευτικότεροι από αυτούς.

Για την κατασκευή του δικτύου, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση των καμπυλών, χρησιμοποιήθηκε κυψελίδα 100×100 m. Σε όλες τις παραστάσεις τα δεδομένα προσαρμόστηκαν στα βαριογράμματα με ικανοποιητικούς συντελεστές συσχετισμού που ξεπερνούν το 95%.

Θα πρέπει τέλος να τονιστεί ότι για τεχνικούς περιορισμούς (από το πρόγραμμα Gridzo), αλλά και για πρακτικούς λόγους (ευκολία σύγκρισης των χαρτών μεταξύ τους) χρησιμοποιήθηκε η ίδια "βάση" σχεδίασης για όλα τα χρονικά "παράθυρα". Αυτή περιλαμβάνει την ευρύτερη επιφάνεια που καλύπτει όλα τα εξεταζόμενα πεδία, μαζί με όλες τις διατιθέμενες γεωτρήσεις (78), ασχέτως χρονολογίας κατασκευής, ή κατάστασης κατά την χρονική περίοδο του "παραθύρου". Καθώς όμως δεν ήταν διαθέσιμος ο ίδιος αριθμός δεδομένων (γεωτρήσεις παρατήρησης) για το κάθε χρονικό παράθυρο, η σχεδίαση των καμπυλών περιορίζεται ανά περίπτωση στην περιοχή που θεωρητικά επηρεάζεται από τις δεδομένες μετρήσεις.

Έτσι, στα πρώτα εξεταζόμενα υδρολογικά έτη αν και δεν έχουν ακόμα κατασκευασθεί οι γεωτρήσεις Κρουσώνα – Λουτρακίου, Αγίου Μύρωνα κ.λπ., αυτές παρουσιάζονται στους χάρτες, χωρίς βέβαια να συμμετέχουν στη σχεδίαση των ισοκαμπυλών. Επίσης, γεωτρήσεις όπως οι K6, T20, KP10, οι οποίες κάποια στιγμή καταστράφηκαν, εξακολουθούν να παρουσιάζονται στους χάρτες.

Για κάθε χάρτη θα πρέπει να σημειωθούν τα εξής:

- Με κυκλικά στίγματα συμβολίζονται όλες οι γεωτρήσεις για τις οποίες διατίθενται πληροφορίες, έστω και ασυνεχώς.
- Με πλήρεις κύκλους συμβολίζονται οι γεωτρήσεις παρατήρησης, δηλαδή εκείνες για τις οποίες διατίθενται μετρήσεις της αντίστοιχης χρονικής περιόδου ("παράθυρο"), για την οποία έχει σχεδιασθεί ο χάρτης.

- Η ισοδιάσταση των ισοπιεζομετρικών καμπυλών είναι ανά 5 m.
- Η ισοδιάσταση των ισοχλώριων καμπυλών είναι ανά 500 ppm (mg/l).

Η σχεδίαση των ισοκαμπυλών έγινε με την προϋπόθεση ότι η περιοχή ενδιαφέροντος αφορά ενιαία υδρογεωλογική ενότητα. Όμως, η ποικίλη λιθολογική σύσταση ("Πλακώδεις ασβεστόλιθοι", ανθρακικά πετρώματα "Τρίπολης", κ.ά.) και η έντονη τεκτονική της περιοχής, συνθέτουν μια πολυπλοκότερη εικόνα, όπου οι υδρολιθολογικές ενότητες συνεχονται μεταξύ τους πλευρικά ή και κατακόρυφα.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη την ετερογένεια του υδροφόρου σχηματισμού, την ανομοιογένεια στην ανάπτυξη των γεωτρήσεων, καθώς και τους διαφορετικούς ρυθμούς εκμετάλλευσης, οι παραστάσεις των καμπυλών (ισοπιεζομετρικές και ισοχλώριες) δεν θα πρέπει να λογίζονται σαν απόλυτες τιμές, αλλά ενδεικτικά, αποδίδοντας γενικές τάσεις πιεζομετρίας και ποιότητας. Επίσης, οι διαδοχικοί χάρτες δεν είναι ισότιμης αξιοπιστίας και απόλυτα συγκρίσιμοι, μη διαθέτοντας πάντοτε τον ίδιο αριθμό μετρήσεων και τις ίδιες θέσεις παρατηρήσεων (γεωτρήσεις).

Για την ερμηνεία των παραστάσεων, πέρα από το παραπάνω πλαίσιο ανοχών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι γεωλογικές συνθήκες στο επίπεδο υδροφορίας, οι οποίες δημιουργούν "οριακές συνθήκες" (ασυνέχειες), όσον αφορά τον τρόπο διάδοσης της πιεζομετρίας και της ποιότητας του υπόγειου νερού. Για το λόγο αυτό, στο τοπογραφικό υπόβαθρο τοποθετήθηκαν τα βασικά γεωλογικά ρήγματα της περιοχής, τα οποία (καθ' υπόθεση) οριοθετούν υδρολιθολογικές ενότητες.

Ο χάρτης που αναπαριστά τα βασικά γεωλογικά ρήγματα της περιοχής, σχεδιάστηκε σε τράπεζα ψηφιοποίησης (digitizer) με βάση τα γεωλογικά φύλλα "Ηράκλειο", "Τυμπάκι" και "Επάνω Αρχάνες", κλίμακας 1:50.000, έκδοσης ΙΓΜΕ και μεταφέρθηκε στην κλίμακα των κατασκευασμένων παραστάσεων με το πρόγραμμα Digitize του γεωτεχνικού πακέτου RockWorks.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι ποιοτικά προσεγγίσιμες, αλλά όχι πάντοτε υπολογίσιμες. Ιδανική κατάσταση για την ερμηνεία των ισοπιεζομετρικών και ισοχλώριων παραστάσεων θα ήταν να υπήρχαν γεωτρήσεις παρατήρησης στα όρια των υδρολιθολογικών ενοτήτων. Χωρίς αυτές η εικόνα του κάθε χάρτη είναι αλλοιωμένη.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό επιχειρήθηκαν κάποιες διορθωτικές παρεμβάσεις στους χάρτες και ιδιαίτερα στις ισοχλώριες καμπύλες, οι οποίες κατά κανόνα κατασκευάστηκαν από λιγότερες μετρήσεις. Οι παρεμβάσεις αυτές έγιναν σε 8

χάρτες (4 με ισοπιεζομετρικές και 4 με ισοχλώριες καμπύλες) και αφορούν συμπλήρωση των δεδομένων κάθε χρονικού "παραθύρου" με αναμενόμενες (διαχρονικά σχεδόν σταθερές) τιμές στάθμης και συγκέντρωσης χλωριόντων σε γεωτρήσεις, κοντά στα όρια των υδρολιθολογικών ενοτήτων.

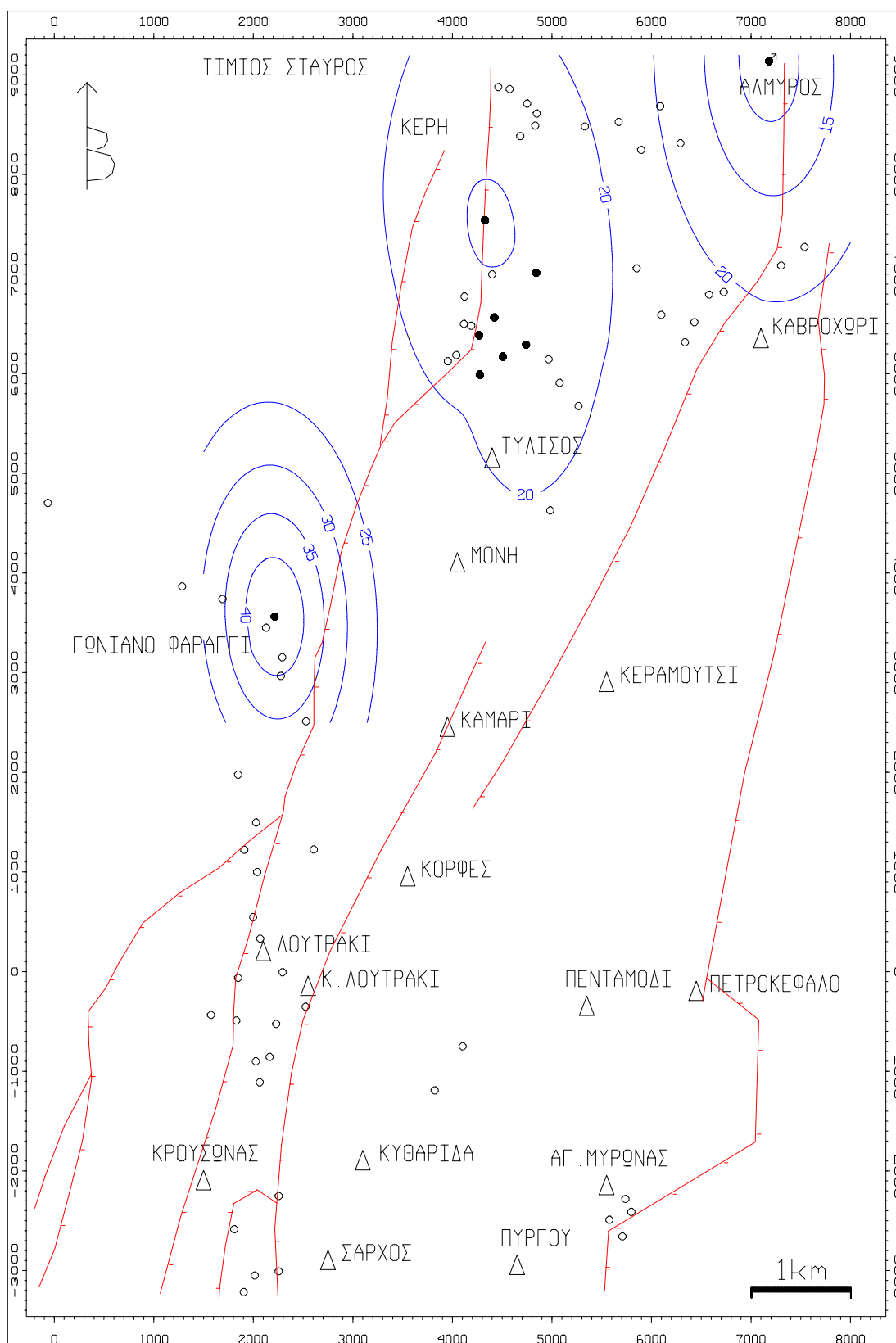
Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε η συγκριτική ερμηνεία της σειράς των διαδοχικών χαρτών της περιόδου 1987 – 1997, στοχεύοντας να διαφανεί η διαχρονική εξέλιξη της ποιότητας και της πιεζομετρίας του ευρύτερου υδροφορέα που συμβάλλει στην υδροφορία της πηγής Αλμυρού, κάτω από συνθήκες εκμετάλλευσης. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στους 8 διορθωμένους χάρτες που προαναφέρθηκαν, παρά το γεγονός ότι οι παρεμβάσεις που έγιναν είναι προσεγγιστικές και δεν αποδίδουν με ακρίβεια την πραγματική εικόνα των παραστάσεων.

4.8.3. Ερμηνεία ισοπιεζομετρικών καμπυλών

Το υδρολογικό έτος 1987-88 (βλέπε **Σχήμα 4.35**, χαμηλές στάθμες) ενεργοποιείται προοδευτικά το πεδίο άντλησης Τυλίσου, ενώ μέχρι εκείνη τη στιγμή δεν είναι ακόμη γνωστή καμία αξιόλογη εκμετάλλευση. Η περιοχή του Γωνιανού Φαραγγιού διακρίνεται για τις υψηλές στάθμες της, γεγονός που θα μπορούσε να ερμηνευθεί ως περιοχή τροφοδοσίας ή / και σαν ζώνη μικρότερης περατότητας, καθώς η υδροφορία είναι εγκατεστημένη στους "Πλακώδεις ασβεστόλιθους".

Αντίθετα στο πεδίο Τυλίσου και στην κατάντη περιοχή η υδροφορία εντοπίζεται μέσα στα ανθρακικά πετρώματα "Τρίπολης". Το "βύθισμα" γύρω από το πεδίο Τυλίσου αποδίδεται στις ήδη υπό παραγωγή γεωτρήσεις, ενώ το "βύθισμα" στον Αλμυρό σκιαγραφεί το φυσικό σημείο εκφόρτισης του υδροφορέα μέσω της πηγής.

Στα επόμενα υδρολογικά έτη (1988-89 και 1989-90) η εικόνα δεν αλλάζει ουσιαστικά. Το "βύθισμα" της Τυλίσου γίνεται εντονότερο, αποτέλεσμα της εντατικοποίησης της εκμετάλλευσης του πεδίου. Δύο μικρά "υβώματα" στην ίδια περιοχή υποδηλώνουν την ανομοιογένεια του καρστικού υδροφορέα που επιφυλάσσει προνομιακές ή μη ροές.



Σχήμα 4.35: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες υδρολογικού έτους 1987-88, χαμηλές στάθμες ^[160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).

Στο υδρολογικό έτος 1990-91 (βλέπε **Σχήμα 4.36**, χαμηλές στάθμες) εκτός από τη συνεχιζόμενη εκμετάλλευση του πεδίου Τυλίσου έχει αρχίσει και η προοδευτική ενεργοποίηση των γεωτρήσεων του πεδίου Κέρης. Ως εκ τούτου, είναι διαθέσιμα περισσότερα σημεία παρατήρησης (γεωτρήσεις) με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αξιοπιστία και πληρέστερη κατ' έκταση εικόνα. Από την παράσταση αυτή δεν παύουν να επαληθεύονται τα δεδομένα των προηγούμενων ετών.

Επισημαίνεται επίσης ότι, το "βύθισμα" Τυλίσου μετατοπίζεται ΝΑ, γεγονός που μαρτυρεί ότι η ΝΑ περιοχή του πεδίου Τυλίσου δέχεται τροφοδοσία από το Γωνιανό Φαράγγι, δηλαδή από δυτικά και ΝΔ.

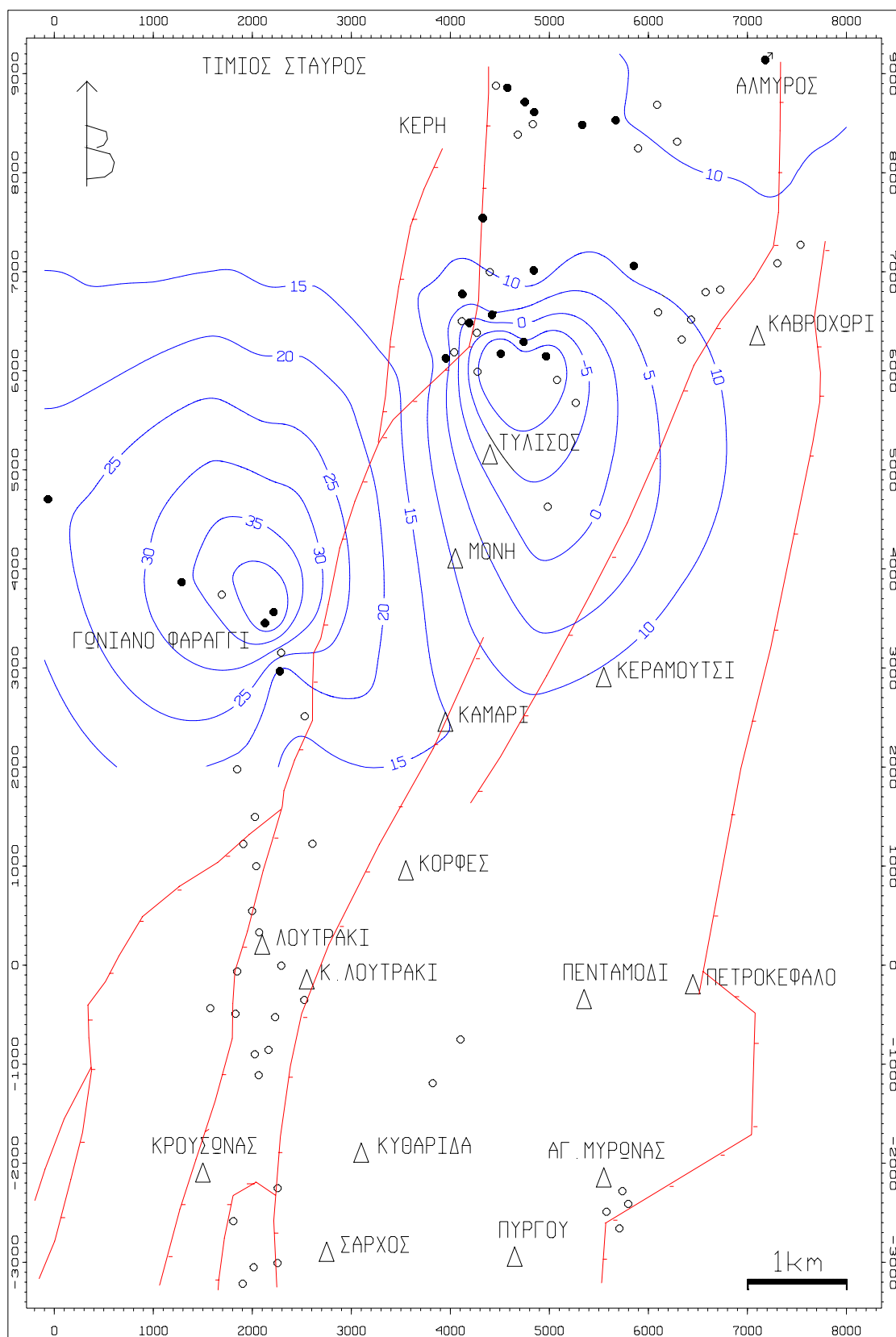
Επίσης, το μικρό "ύβωμα" προνομιακής ροής της Τυλίσου που παρατηρήθηκε και στα προηγούμενα υδρολογικά έτη εμφανίζεται σαφώς διευρυμένο και έχει μετακινηθεί σημαντικά προς τα Βόρεια (Νότια ζώνη πεδίου Κέρης), υποδηλώνοντας ότι όλο και λιγότερες γεωτρήσεις της Τυλίσου ανθίστανται στον υποβιβασμό της πιεζομετρίας.

Η ίδια εικόνα συνεχίζει, με μικρές παραλλαγές, να εμφανίζεται τόσο στις χαμηλές, όσο και στις υψηλές στάθμες των υδρολογικών ετών που ακολουθούν (1991-92 και 1992-93).

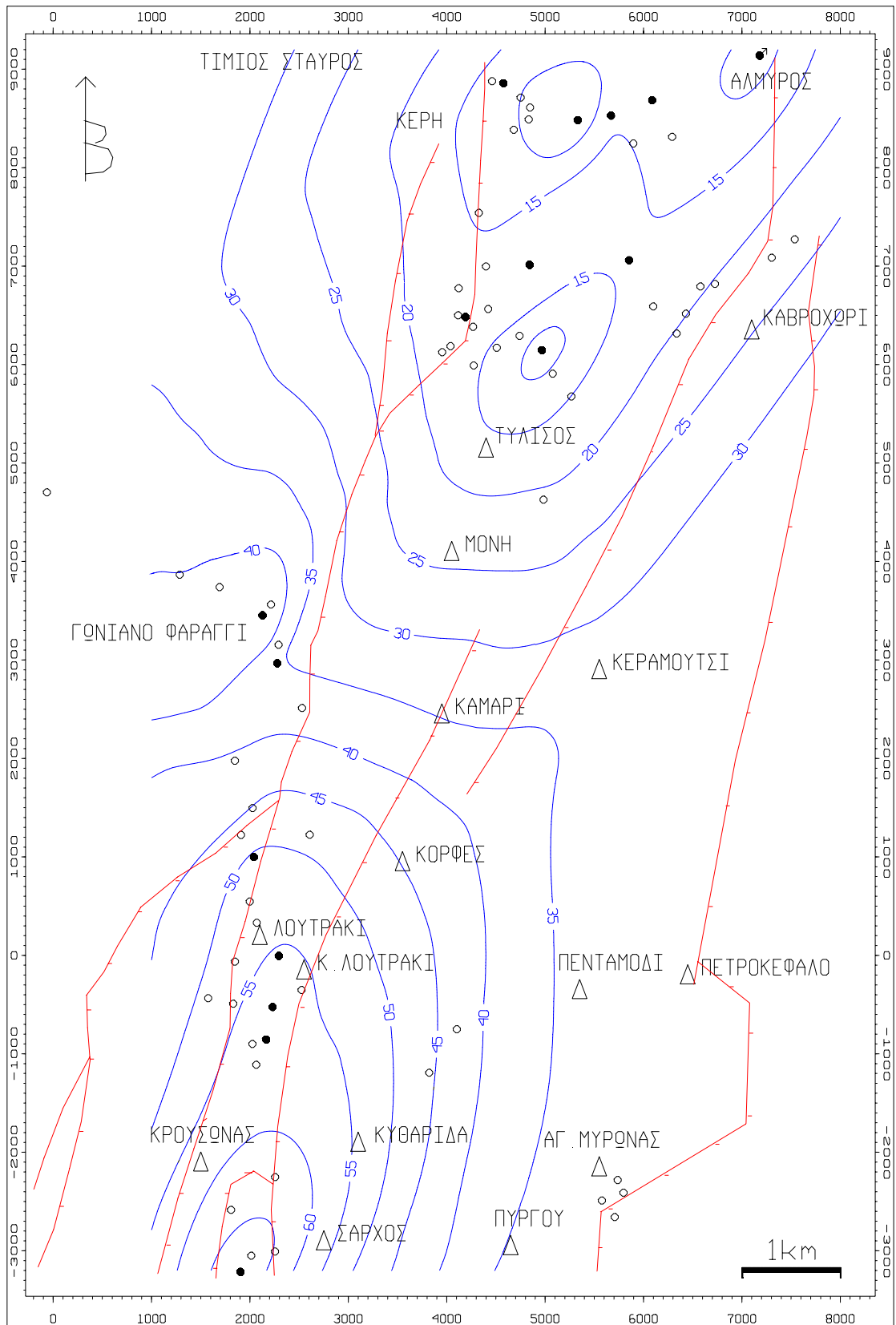
Στο μεταξύ, η ένταξη ικανού αριθμού γεωτρήσεων του πεδίου Κέρης στην εκμετάλλευση έχει δημιουργήσει νέο "βύθισμα" στην περιοχή, εκεί που άλλοτε υπήρχε "πιεζομετρικό ύβωμα".

Στο υδρολογικό έτος 1993-94 (**Σχήμα 4.37**, υψηλές στάθμες), οι μετρήσεις που πλέον διατίθενται και από την περιοχή Λουτρακίου – Κρουσώνα, δείχνουν σαφώς ότι η γενική τροφοδοσία προέρχεται από νότιες και δυτικές κατευθύνσεις, για να καταλήξει στην πηγή Αλμυρού. Το μικρό "ύβωμα" που εντοπίζεται μεταξύ των "βυθισμάτων" Κέρης και Τυλίσου μαρτυρεί τοπικά μια μερική τροφοδοσία από δυτικά, δηλαδή από την κατεύθυνση του υψώματος "Τίμιος Σταυρός".

Η παρατηρούμενη τάση ομαλοποίησης του "βυθίσματος" ΝΑ του πεδίου Τυλίσου αποδίδεται: α) στην εποχική μεταβολή, β) στα λιγότερο ξηρά έτη, και γ) στην μείωση του ρυθμού των σημειακών αντλήσεων, παρά την αύξηση των απολήψεων μέσω γεωγραφικής επέκτασης των πεδίων.



Σχήμα 4.36: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες υδρολογικού έτους 1990-91, χαμηλές στάθμες ^[160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).



Σχήμα 4.37: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες υδρολογικού έτους 1993-94, υψηλές στάθμες ^[160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).

Στα υδρολογικά έτη που ακολουθούν (1994-95 και 1995-96) οι υψηλότερες στάθμες εντοπίζονται στο πεδίο Κρουσώνα – Λουτρακίου. Στην Κέρη παρατηρείται "βύθισμα", ενώ στην Τύλισο υπάρχει σαφής ύφεση των ανωμαλιών. Στο Γωνιανό Φαράγγι εντοπίζεται σημαντικό "ύβωμα". Όμως, στην ίδια περιοχή, παρατηρείται και απότομο "βύθισμα" που οφείλεται στην άντληση των γεωτρήσεων T19 και T22.

Στο υδρολογικό έτος 1996-97 (**Σχήμα 4.38**, χαμηλές στάθμες), όπου πλέον και για τα τρία πεδία (Κέρη, Τύλισος και Γωνιανό Φαράγγι) έχει παρέλθει σημαντικός χρόνος από την ενεργοποίησή τους, διαφαίνονται σαφείς τάσεις εξομάλυνσης και σταθεροποίησης. Το "βύθισμα" της πιεζομετρικής επιφάνειας δείχνει πλέον να σταθεροποιείται απωθούμενο προς τις περιοχές Κέρης και πηγής Αλμυρού.

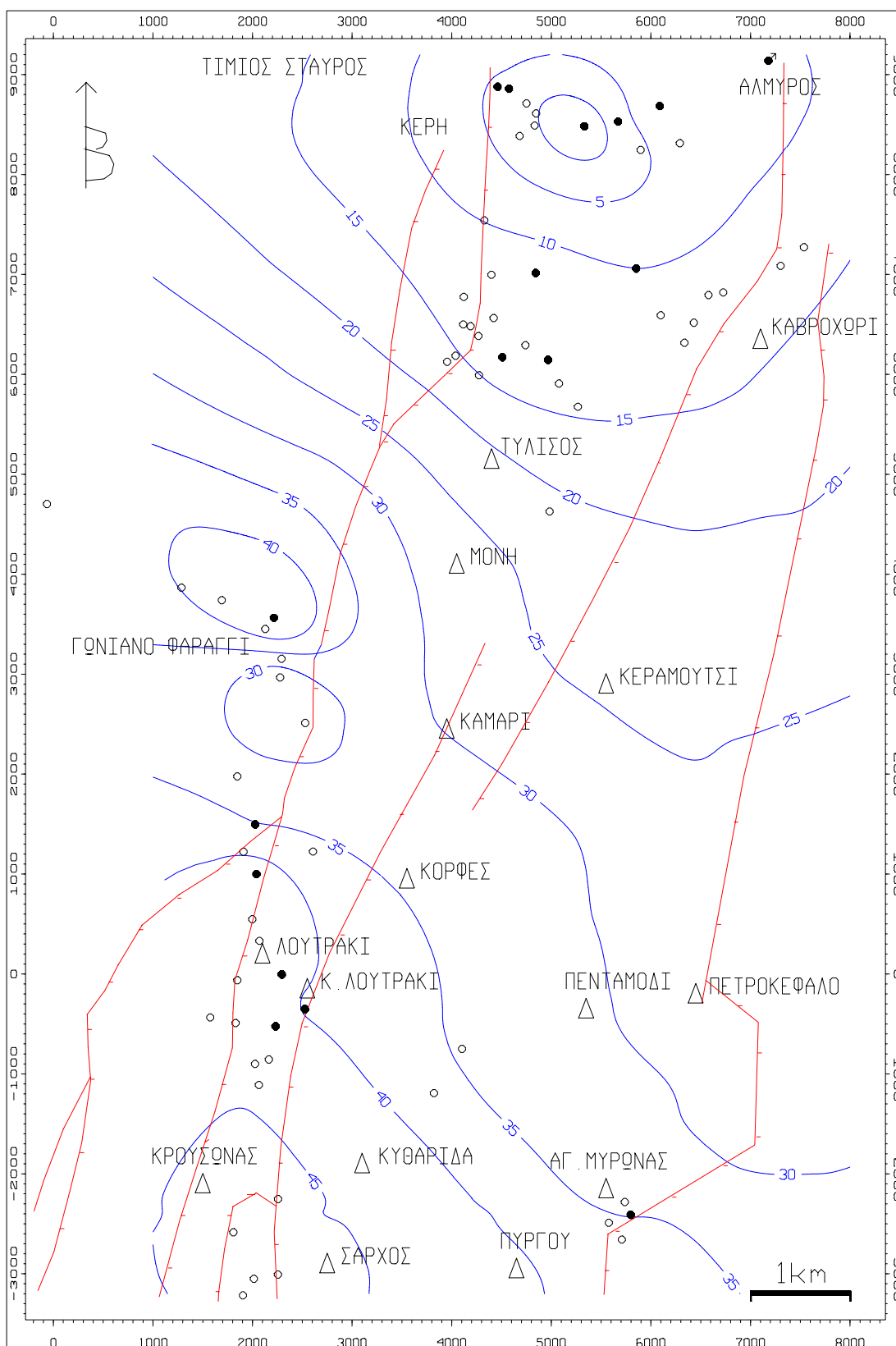
4.8.4. Ερμηνεία ισοχλώριων καμπυλών

Ο σχετικά μικρός αριθμός μετρήσεων που διατίθενται για το υδρολογικό έτος 1988-89, προσφέρει ισοχλώριες καμπύλες (βλέπε **Σχήμα 4.39**, χαμηλές στάθμες) βάσει των οποίων το πρόβλημα της ποιοτικής υποβάθμισης εντοπίζεται σχεδόν αποκλειστικά περί τη ζώνη ανάβλυσής της πηγής Αλμυρού.

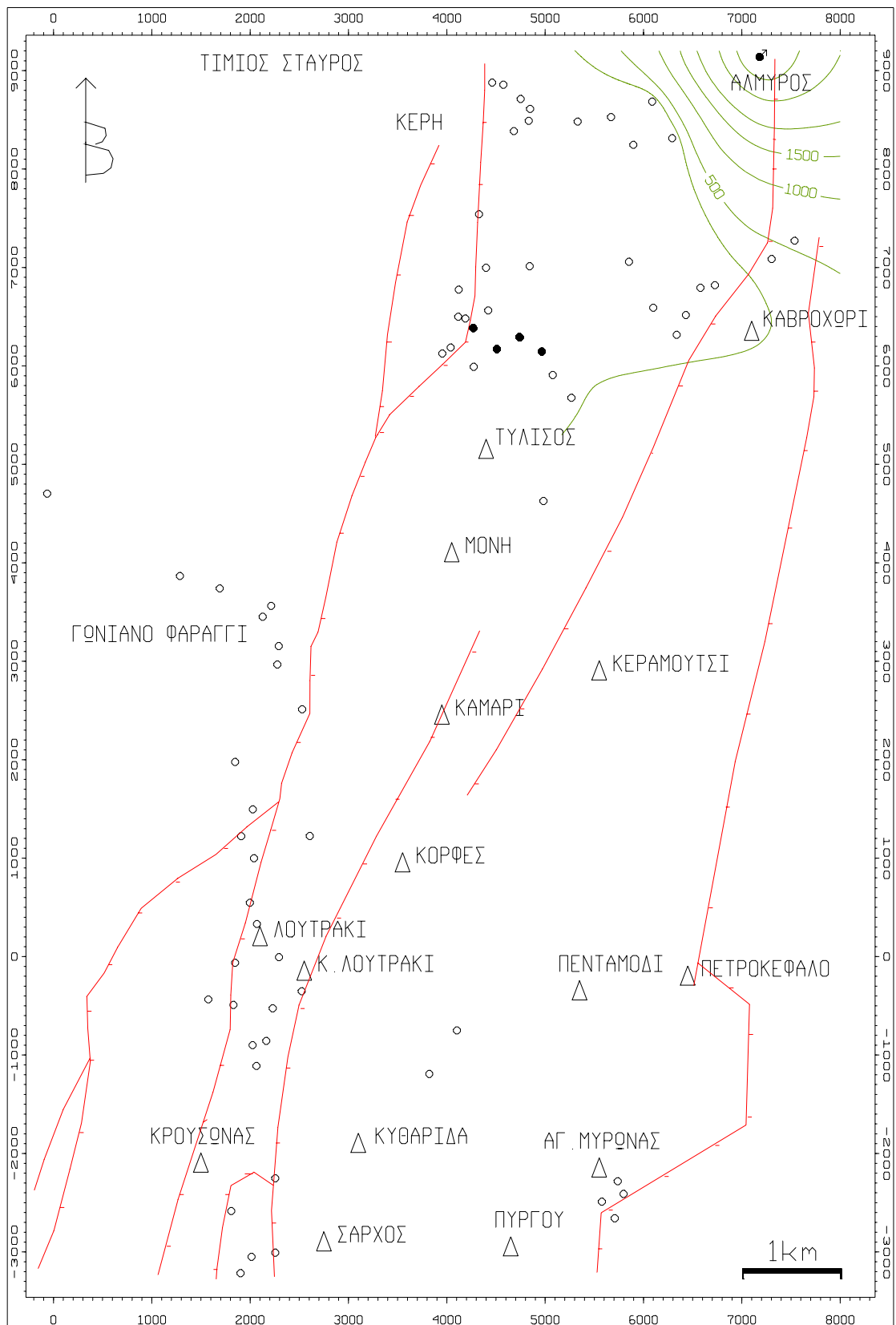
Έτσι, παρότι οι αντλήσεις στο πεδίο Τυλίσου έχουν σταδιακά αρχίσει από το προηγούμενο υδρολογικό έτος, παρασύροντας τις αρχικές συγκεντρώσεις χλωριόντων (35 – 45 ppm) σε μεγαλύτερα ύψη, η ποιότητα στην περιοχή παραμένει ικανοποιητική. Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και στο υδρολογικό έτος 1989-90 με την κάμψη της ποιότητας να επεκτείνεται γεωγραφικά.

Στο υδρολογικό έτος 1990-91, με την επέκταση των παρατηρήσεων και στην περιοχή Γαζίου – Καβροχωρίου (**Σχήμα 4.40**, χαμηλές στάθμες), φαίνεται ότι η κάμψη της ποιότητας, λόγω ξηρασίας αλλά και εντατικών αντλήσεων από το πεδίο Τυλίσου, διαδίδεται σε ακόμη μεγαλύτερη γεωγραφική έκταση. Παρατηρείται επίσης τάση αύξησης των χλωριόντων, όχι μόνο στην πηγή Αλμυρού αλλά και ΝΑ της Τυλίσου.

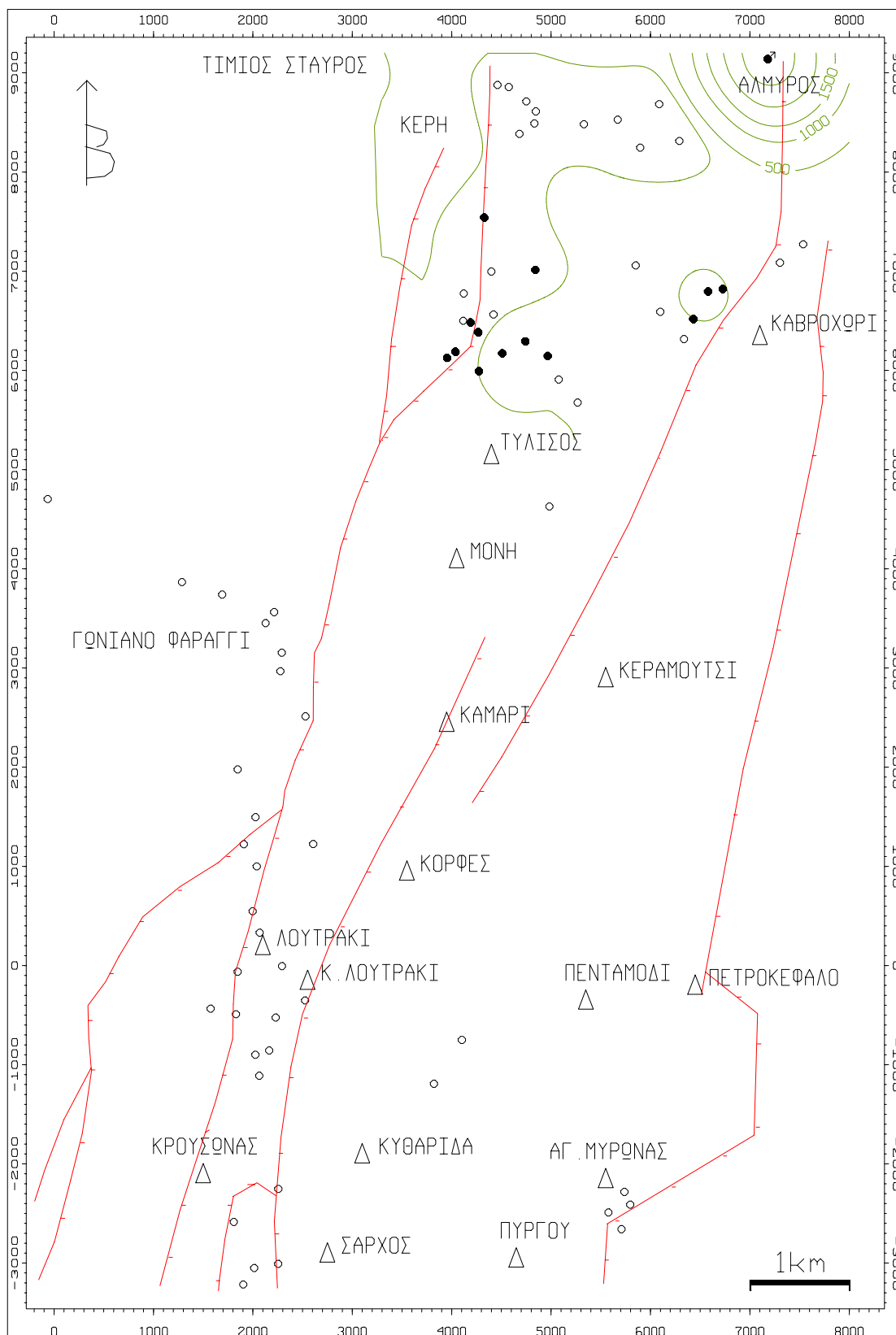
Στο υδρολογικό έτος 1991-92 δεν παρουσιάζονται αξιοσημείωτες διαφορές από το προηγούμενο, με εξαίρεση την εντονότερη υφαλμύριση ΝΑ του πεδίου Τυλίσου (η ζώνη καλής ποιότητας μετακινείται Βόρεια). Μεγάλη υποβάθμιση της ποιότητας παρατηρείται για πρώτη φορά και στο πεδίο Κέρης (αντλείται).



Σχήμα 4.38: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες υδρολογικού έτους 1996-97, χαμηλές στάθμες ^[160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).



Σχήμα 4.39: Ισοχλώριες καμπύλες υδρολογικού έτους 1988-89, χαμηλές στάθμες
 [160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).



Σχήμα 4.40: Ισοχλώρας καμπύλες υδρολογικού έτους 1990-91, χαμηλές στάθμες  ^[160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).

Εμφανέστερη τάση γεωγραφικής επέκτασης της ρύπανσης, παρατηρείται στο υδρολογικό έτος 1992-93 (**Σχήμα 4.41**, χαμηλές στάθμες), λόγω της εκμετάλλευσης του πεδίου Κέρης. Επίσης, εξακολουθεί να υπάρχει έντονη ποιοτική υποβάθμιση στην περιοχή Αλμυρού και τάση υφαλμύρινσης ΝΑ του πεδίου Τυλίσου.

Τα παραπάνω φαινόμενα αποδίδονται σε δύο διαφορετικούς μηχανισμούς:

- 1) Με δεδομένη την υπεδαφική γεωλογία της περιοχής από προγενέστερες γεωφυσικές και γεωτρητικές έρευνες (FAO, Υπουργείο Γεωργίας), η περιοχή ανάβλυσης της πηγής Αλμυρού συμπίπτει με τη ζώνη συμβολής: α) της "διεπιφάνειας" γλυκού – αλμυρού νερού, β) της ελεύθερης στάθμης του υδροφορέα, και γ) της επιφάνειας του εδάφους.

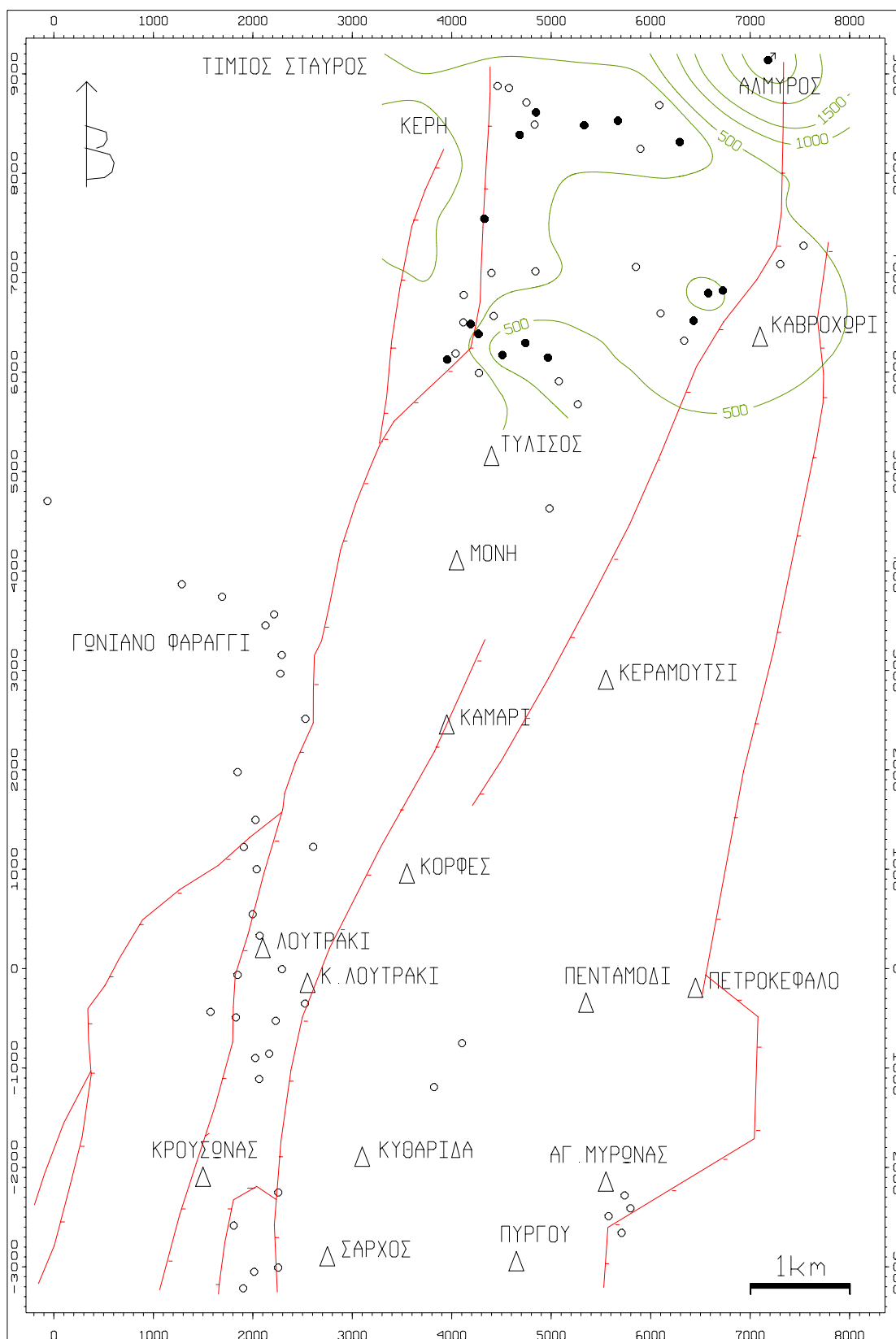
Συνεπώς, το νερό της πηγής αποτελεί μίγμα νερού που προέρχεται τόσο από τα υπο-επιφανειακά, όσο και από τα βαθύτερα στρώματα του υδροφορέα.

- 2) Αντίθετα, η καταγραφόμενη ποιότητα νερού ΝΑ του πεδίου Τυλίσου αντιπροσωπεύει μίγμα νερού που ρέει κοντά στην ελεύθερη στάθμη του υδροφορέα και σε σημαντική απόσταση από το θεωρητικό σημείο συνάντησής της με την "διεπιφάνεια" γλυκού – αλμυρού νερού.

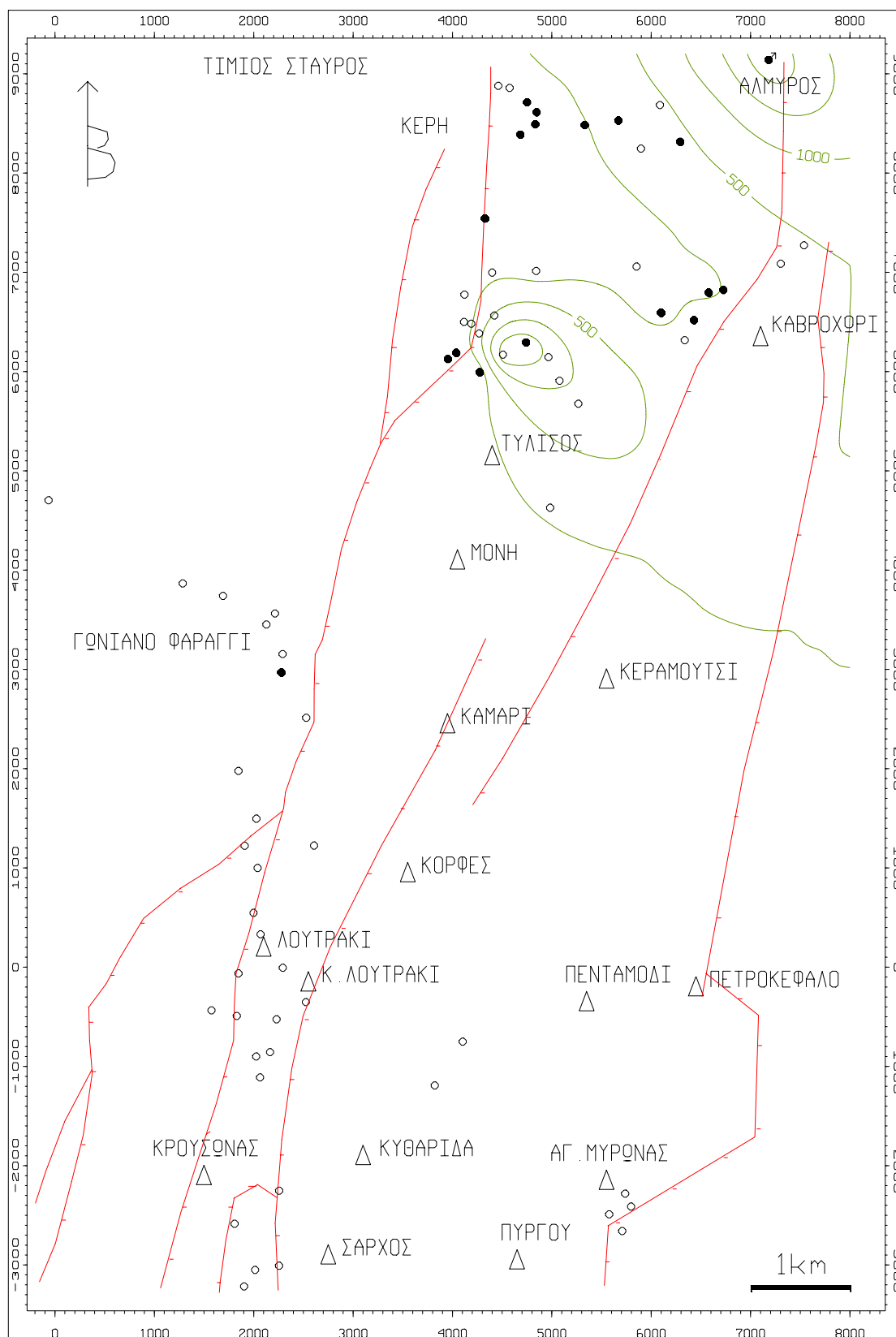
Συνεπώς, η ενδοχώρια αυτή περιοχή αναμένεται να έχει σημαντικά μικρότερη θαλάσσια ρύπανση, σε σχέση με την περιοχή της πηγής Αλμυρού. Η παρατηρούμενη τάση υφαλμύρινσης μπορεί να αποδοθεί σε δύο λόγους, οι οποίοι λειτουργούν εναλλακτικά ή / και αθροιστικά: α) η περιοχή ΝΑ του πεδίου Τυλίσου δεν ταυτίζεται με περιοχή μείζονος τροφοδοσίας, και β) η ίδια περιοχή γειτνιάζει με ζώνη προνομιακής διείσδυσης της θάλασσας.

Στα υδρολογικά έτη που ακολουθούν (1993-94 έως και 1995-96) η υφαλμύριση δείχνει να σταθεροποιείται (παροδικές αυξομειώσεις).

Στο υδρολογικό έτος 1996-97 (**Σχήμα 4.42**, χαμηλές στάθμες), διακρίνεται γενική ύφεση του ρυθμού υφαλμύρινσης, ενώ φαίνεται ότι η γεωγραφική επέκταση της θαλάσσιας ρύπανσης έχει σταθεροποιηθεί ή και μειωθεί, με εξαίρεση την περιοχή ΝΑ του πεδίου Τυλίσου.



Σχήμα 4.41: Ισοχλότητες καμπύλες υδρολογικού έτους 1992-93, χαμηλές στάθμες  ^[160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).



Σχήμα 4.42: Ισοχλότητες καμπύλες υδρολογικού έτους 1996-97, χαμηλές στάθμες  ^[160]. (Υπόμνημα στην σελ.120).

Υπόμνημα (Σχήματα 4.35 έως και 4.42).

	Γεώτρηση
	Γεώτρηση παρατήρησης (με διατιθέμενες μετρήσεις στο επιλεγμένο χρονικό "παράθυρο")
	Πηγή
	Οικισμός
	Μετάπτωση
	Ισοπιεζομετρικές καμπύλες ανά 5 m
	Ισοχλώριες καμπύλες ανά 500 ppm

4.8.5. Παρατηρήσεις – διαπιστώσεις από την ερμηνεία των χαρτών

Στην ερμηνεία των χαρτών που προηγήθηκε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι εξής παρατηρήσεις ^[160]:

- Το δίμηνο Απριλίου – Μαΐου 1997 έγιναν θερμομετρήσεις σε όλα τα πεδία, σε μη αντλούμενες γεωτρήσεις. Στις μετρήσεις αυτές δεν διαπιστώθηκαν θερμοκρασιακές ανωμαλίες, επιβεβαιώνοντας την γενική άποψη (για ανάλογα καρστικά συστήματα) ότι οι ανάντη περιοχές τροφοδοσίας είναι ψυχρότερες από τις κατόντη (αποδέκτες). Έτσι, επικρατούν θερμοκρασίες 15 – 16°C στον Άγιο Μύρωνα, 16 – 17,5°C στον Κρουσώνα και 19 – 20°C στην Κέρη και στην Τύλισο. Οι ενδεικτικές αυτές τιμές συμφωνούν έμμεσα με την γενική τάση της υπόγειας απορροής, η οποία γίνεται με διευθύνσεις $N \rightarrow B$ και $\Delta \rightarrow A$. Κατά την ίδια περίοδο, η θερμοκρασία στην πηγή Αλμυρού κυμάνθηκε μεταξύ 15 και 16°C. Επειδή δεν υπάρχει άλλη φυσική ανάβλυση (π.χ. πηγή) ανάντη και στο ομόλογο επίπεδο υδροφορίας, δεν είναι δυνατόν να γίνουν ανάλογες συγκρίσεις.
- Κατά τη συνολική στατιστική ανάλυση των υφισταμένων γεωτρήσεων (όχι ανά γεώτρηση), με δεδομένα το βάθος ανάπτυξης και την παροχή άντλησης (παραγωγή), δεν διαπιστώθηκαν σαφείς σχέσεις μεταξύ των μεγεθών ποιότητας, βάθους και παροχής άντλησης. Οι χαμηλοί συντελεστές συσχετισμού δεν επιτρέπουν συναγωγή

αξιόπιστων συμπερασμάτων. Αντίθετα, φαίνεται έμμεσα να επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι η ποιότητα του νερού σε κάθε γεώτρηση είναι συνάρτηση του ρυθμού άντλησής της και λιγότερο του συνολικά απολήψιμου όγκου νερού από την ίδια γεώτρηση [146]. Δηλαδή, με δεδομένο τον απολήψιμο όγκο, οι δυσμενείς επιπτώσεις στην ποιότητα του αντλούμενου νερού θα είναι μικρότερες εάν μειωθεί ο ρυθμός και παραταθεί, εφόσον είναι πρακτικά δυνατό, ο χρόνος άντλησης.

Με βάση και τις παραπάνω παρατηρήσεις, οι σημαντικότερες διαπιστώσεις που συνάγονται από την μελέτη των ισοκαμπυλών είναι οι εξής [160]:

- Οι υδροδυναμικές συνθήκες που επιβάλλει το καθεστώς εκμετάλλευσης στα πεδία Κέρης, Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού, δεν επηρεάζουν φανερά την διακίνηση των υπόγειων νερών που τροφοδοτούν την πηγή Αλμυρού (παροχές – ποιότητα νερού της πηγής).
- Κύριοι ρυθμιστές της διακίνησης των υπόγειων νερών στην ευρύτερη περιοχή των πεδίων εκμετάλλευσης και στην πηγή Αλμυρού εξακολουθούν να είναι η γεωλογική δομή της περιοχής και η γεωγραφική κατανομή των πετρωμάτων και των υδρολιθολογικών ενοτήτων.
- Τα πετρώματα μέσα από τα οποία λαμβάνει χώρα η κύρια υπόγεια ροή είναι τα ανθρακικά της γεωτεκτονικής ζώνης της "Τρίπολης" και οι "Πλακώδεις ασβεστόλιθοι". Πρόκειται δηλαδή για υδροφορία η οποία διαμορφώνεται περί το φυσιογραφικό επίπεδο βάσης και εκφορτίζεται περιφερειακά μέσω πηγών και υπόγειας ή / και υποθαλάσσιας απορροής.
- Με τη σταδιακή εντατικοποίηση της εκμετάλλευσης του υδροφορέα παρατηρήθηκε προοδευτική, πλην όμως ταχεία, ταπείνωση της στάθμης των γεωτρήσεων, η οποία συνοδεύθηκε από ανάλογη υποβάθμιση της ποιότητας. Ειδικότερα:
 - Με την έναρξη της εκμετάλλευσης του πεδίου Τυλίσου (1987-88) και με πρόσθετη επιβάρυνση λόγω ξηρασίας των ετών 1989 και 1990, εμφανίστηκε σαφής τοπική κάμψη της πιεζομετρίας. Η μορφή του "βυθίσματος" της πιεζομετρίας υπαγορεύεται από την τοπική τεκτονική και την κατανομή των υδρολιθολογικών ενοτήτων. Εμφανίζεται επίσης σαφής ένδειξη τροφοδοσίας από νοτιοδυτική, δυτική και βορειοδυτική κατεύθυνση. Αναφορικά με την κατανομή των χλωριόντων της ίδιας περιόδου παρατηρείται ανάλογη κάμψη της ποιότητας (προοδευτική πλην όμως σαφής αύξηση της συγκέντρωσης χλωριόντων), ενώ εντοπίζεται και δεύτερη

περιοχή με σχετικά υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, ΝΑ του πεδίου Τυλίσου, πέραν εκείνης της πηγής Αλμυρού.

- Η επέκταση της υδρομάστευσης στα πεδία Κέρης και Γωνιανού Φαραγγιού και η μερική αναρρύθμιση των ρυθμών άντλησης στο πεδίο Τυλίσου επέφεραν ουσιαστική ύφεση των αρχικά παρατηρηθέντων συμπτωμάτων υπερεκμετάλλευσης στην Τύλισο και στη γύρω περιοχή. Σήμερα, με τη βοήθεια και των σχετικά βροχερών ετών που ακολούθησαν (περίοδος 1991-97), ο υδροφορέας έχει ανακτήσει πιεζομετρικά και ποιοτικά και οι επιπτώσεις της εκμετάλλευσης έχουν σταθεροποιηθεί. Η ένταξη στην παραγωγή και των πεδίων Κρουσώνα – Λουτρακίου και Αγίου Μύρωνα (πλήρες) αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τις απολήψιμες ποσότητες και να σταθεροποιήσει ακόμη ευνοϊκότερα τα πεδία εκμετάλλευσης Κέρης, Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού.
- Η αλμύρινη που εντοπίζεται ανέκαθεν στην πηγή Αλμυρού και η κάμψη της ποιότητας ΝΑ του πεδίου Τυλίσου δεν εξηγούνται με τον αυτό τρόπο, αποδιδόμενες σε διαφορετικούς μηχανισμούς.

Θα πρέπει βέβαια να ληφθεί υπόψη ότι οι θερμομετρήσεις του 1997 (Απρίλιος – Μάιος), επειδή δεν έχουν επεκταθεί συστηματικά, θα πρέπει να ερμηνευθούν με επιφύλαξη. Όμως, από τα πρώτα αυτά στοιχεία δεν φαίνεται να υπάρχουν ανωμαλίες που να υποδεικνύουν σύνθετες ή μικτές υπόγειες ροές.

Για την ασφαλή εκμετάλλευση του υδροφορέα με δίκτυα γεωτρήσεων και προκειμένου να αυξηθούν σημαντικά οι απολήψιμες ποσότητες νερού, θα πρέπει να αναζητηθεί: α) ο βέλτιστος ρυθμός σε συνδυασμό με την πρακτικά εφικτή επιμήκυνση του χρόνου άντλησης ανά γεώτρηση, και β) η μέγιστη δυνατή γεωγραφική επέκταση των δικτύων (πεδία) άντλησης.

Τα εκτεταμένα δίκτυα γεωτρήσεων όμως εξαιτίας του ότι απαιτούν συνεχή συντήρηση αποτελούν μια πολυδάπανη αντιμετώπιση του προβλήματος η οποία στην περίπτωση του συγκεκριμένου υδροφορέα δεν αποτελεί μόνιμη λύση. Στην επόμενη παράγραφο επιχειρείται μία πρώτη προσέγγιση μιας πιο μόνιμης διεξόδου που είναι η κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς.

4.9. Υδρομαστευτική στοά – Εκτίμηση υδρογεωλογικών παραμέτρων

Όπως προαναφέρθηκε (κεφ. 2, παρ. 2.4.6), η πρόταση εκμετάλλευσης του υδροφορέα μέσω υδρομαστευτικής στοάς διατυπώθηκε πολύ νωρίς, ήδη από το 1969. Όμως, για πολλά έτη παρέμενε ημιτελής, υπό την έννοια ότι δεν είχαν εκτιμηθεί τα τεχνικά – οικονομικά χαρακτηριστικά του έργου (διαστάσεις, απόδοση, κόστος κ.λπ.).

Το 1996, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου "Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού Ποταμού", πραγματοποιήθηκε, υπό μορφή τεχνικής έκθεσης [157], εμπειρική προσέγγιση των υδρογεωλογικών παραμέτρων του προτεινόμενου έργου. Σκοπός της έκθεσης ήταν να εξετάσει την περίπτωση αξιοποίησης του υδροφόρου ορίζοντα που τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού με υδρομαστευτική στοά στην ευρύτερη περιοχή της Κέρης. Έτσι, έγινε εκτίμηση των υδρογεωλογικών παραμέτρων που θα επηρεάσουν τη λειτουργία της στοάς και υπολογισμός του όγκου νερού που θα εισέρχεται στη στοά, υπό συνθήκες άντλησης.

Ως θέση της υδρομαστευτικής στοάς υποδείχθηκε η περιοχή δυτικά από το Βουλισμένο Αλώνι (λόφος Κέρης). Η στοά θα συναντήσει την υδροφορία περίπου στο επίπεδο της θάλασσας και η προσπέλασή της θα γίνει με κεκλιμένες στοές, είτε από τη λαγκάδα του Αγίου Γεωργίου, είτε από το φαράγγι της Κέρης.

Οι τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων έδειξαν ότι στην συγκεκριμένη περιοχή η ποιότητα του νερού παραμένει εντός των επιτρεπτών ορίων, καθ' όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους.

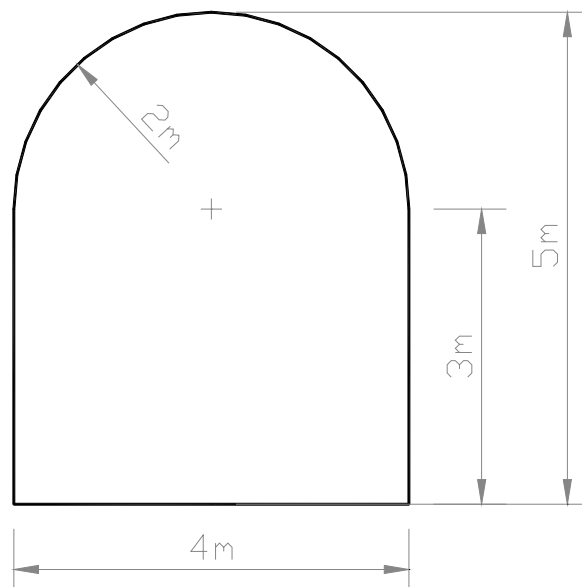
Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου, θεωρήθηκε ότι η στοά θα αποτελείται από έναν κύριο κλάδο, ο οποίος θα αναπτύσσεται "παράλληλα" στις πιεζομετρικές καμπύλες του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής και από άλλους μικρότερους, εγκάρσιους στην κύρια στοά. Οι δευτερεύοντες κλάδοι θα μεταφέρουν νερό στην κύρια στοά από περιοχές υψηλότερου υδραυλικού φορτίου.

Οι παροχές που βρέθηκαν, συγκρινόμενες και με ανάλογα έργα ανά τον κόσμο (βλέπε κεφ. 3), κρίθηκαν υπεραισιόδοξες και κατέστησαν αναγκαία την αναλυτικότερη προσέγγιση του θέματος. Στα επόμενα δίνεται νέος υπολογισμός της παροχής της υδρομαστευτικής στοάς, με βάση ανάλογη μελέτη [41], μετά και την συμπλήρωση των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην προαναφερόμενη έκθεση.

Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά και τις δύο τελικά προτεινόμενες θέσεις της υδρομαστευτικής στοάς, στην περιοχή της Κέρης (μήκος 1,8 km) και στην περιοχή της

Τυλίσου (μήκος 1,2 km), έτσι όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο κεφ. 2, Σχήμα 2.7. Οι δύο αυτές εναλλακτικές λύσεις εφ' εξής θα αναφέρονται ως "υδρομαστευτική στοά Κέρης" (σενάριο Α) και "υδρομαστευτική στοά Τυλίσου" (σενάριο Β).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της στοάς (βάθος, τελική θέση, μορφή ανάπτυξης) αποτελούν θέμα συμπληρωματικής έρευνας και δεν αφορούν την παρούσα διατριβή. Έτσι, για διευκόλυνση των υπολογισμών έγινε απλούστευση της μορφής της. Η τελική μορφή (εγκάρσια τομή), όπως και οι διαστάσεις του έργου φαίνονται αναλυτικά στο **Σχήμα 4.43**.



Σχήμα 4.43: Εγκάρσια τομή της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.

Επίσης, θεωρήθηκε ότι η υδρομαστευτική στοά (κύριος κλάδος) θα είναι οριζόντια και "εν πλήρη καταδύσει", δηλαδή σε "κατάσταση ηρεμίας" (χωρίς αντλήσεις ή / και πλημμύρες) η επιφάνεια του νερού θα βρίσκεται ακριβώς στην οροφή της. Με βάση λοιπόν αυτή τη θεώρηση, η παροχή της εκτιμήθηκε για δύο περιπτώσεις:

Η πρώτη περίπτωση θεωρεί πτώση στάθμης (στην "κατάσταση ισορροπίας") ίση με 3 m. Έτσι, το επίπεδο άντλησης θα βρίσκεται 2 m πάνω από τον πυθμένα της στοάς. Η δεύτερη περίπτωση προβλέπει πτώση στάθμης ίση με 5 m και άντληση στον πυθμένα

της στοάς. Σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται μέγιστη απόληψη, καθώς ολόκληρη η στοά βρίσκεται "εν ξηρώ".

Έτσι, θα εξετασθούν τέσσερις περιπτώσεις – σενάρια:

- Σενάριο A1: Υδρομαστευτική στοά Κέρης. Πτώση στάθμης 3 m.
- Σενάριο A2: Υδρομαστευτική στοά Κέρης. Πτώση στάθμης 5 m.
- Σενάριο B1: Υδρομαστευτική στοά Τυλίσου. Πτώση στάθμης 3 m.
- Σενάριο B2: Υδρομαστευτική στοά Τυλίσου. Πτώση στάθμης 5 m.

Η υδροπερατότητα των σχηματισμών εκτιμήθηκε από τα δεδομένα των δοκιμαστικών αντλήσεων (Πίνακας 4.3), με την επιλογή των αντιπροσωπευτικότερων γεωτρήσεων, όσον αφορά την οριζόντια απόστασή τους από την θέση της στοάς. Έγινε, δηλαδή, υπολογισμός της "τοπικής" υδροπερατότητας, εφόσον ο υδροφορέας αποτελεί ανομοιογενή καρστικό σχηματισμό (ασβεστόλιθοι "Τριπόλεως").

Έτσι, για την υδρομαστευτική στοά Κέρης επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικές οι γεωτρήσεις K2, K4, K9 και K10 (βλέπε Σχήμα 4.2). Οι K3, K5, K6, K6A, K7 και K8 απορρίφθηκαν ως "μακρινές".

Επίσης, δεν λήφθηκε υπόψη η γεώτρηση K1, καθώς η υπολογισμένη περατότητα σε αυτήν κρίθηκε υπερβολική για τον συγκεκριμένο σχηματισμό (τάξη μεγέθους 10^{-3} m/sec, ενώ η περατότητα στους ασβεστόλιθους κυμαίνεται από 10^{-4} έως 10^{-8} m/sec). Πιθανόν η αυξημένη αυτή περατότητα να οφείλεται σε τυχαία διάτρηση μεγάλου καρστικού αγωγού.

Για την υδρομαστευτική στοά Τυλίσου, πάλι με την βοήθεια του Σχήματος 4.2, επιλέχθηκαν οι γεωτρήσεις T11, T12, T15, T16, T17, T21 και T23, για τις οποίες διατίθενται στοιχεία δοκιμαστικών αντλήσεων. Οι γεωτρήσεις T13 και KT4 απορρίφθηκαν λόγω απόστασης από την προτεινόμενη θέση κατασκευής του έργου.

Στον **Πίνακα 4.5** παρουσιάζονται τα δεδομένα των δοκιμαστικών αντλήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μέσης περατότητας (k_{avg}) για κάθε μία από τις δύο προτεινόμενες θέσεις του έργου. Ο υπολογισμός έγινε με βάση τη σχέση:

$$k_{avg} = \frac{\sum T}{\sum H} \quad (4.4)$$

όπου, T μεταβιβαστικότητα (m^2/sec), και

H φαινόμενο πάχος υδροφορέα (m).

Πίνακας 4.5: Εκτίμηση περατότητας στις δύο προτεινόμενες θέσεις της υδρομαστευτικής στοάς.

Γεωτρήσεις	H (m)	T (m ² /sec)	k (m/sec)
Θέση υδρομαστευτικής στοάς Κέρης			
K2	55,00	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$2,51 \cdot 10^{-4}$
K4	62,60	$7,15 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$
K9	97,52	$5,86 \cdot 10^{-3}$	$6,01 \cdot 10^{-5}$
K10	82,95	$3,66 \cdot 10^{-4}$	$4,41 \cdot 10^{-6}$
ΣΥΝΟΛΟ	ΣΗ = 298,07	ΣΤ = $2,08 \cdot 10^{-2}$	k_{avg} = $6,96 \cdot 10^{-5}$
Θέση υδρομαστευτικής στοάς Τυλίσου			
T11	82,50	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$
T12	57,20	$6,30 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
T15	66,12	$5,36 \cdot 10^{-4}$	$8,10 \cdot 10^{-6}$
T16	109,48	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$
T17	116,90	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$
T21	69,75	$1,60 \cdot 10^{-2}$	$2,29 \cdot 10^{-4}$
T23	161,30	$7,74 \cdot 10^{-4}$	$4,80 \cdot 10^{-6}$
ΣΥΝΟΛΟ	ΣΗ = 663,25	ΣΤ = $1,07 \cdot 10^{-1}$	k_{avg} = $1,61 \cdot 10^{-4}$

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 4.5 χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές μεταβιβατικότητας του Πίνακα 4.3 που αφορούν τις μεθόδους "επαναφοράς στάθμης" και "ισορροπίας", οι οποίες θεωρήθηκαν ως οι πλέον αξιόπιστες (βλέπε παρ. 4.6.1).

Επίσης, ως "φαινόμενο πάχος" του υδροφορέα λογίστηκε η διαφορά του απόλυτου υψομέτρου στον πυθμένα κάθε γεώτρησης (σωληνωμένο τμήμα) από την απόλυτη στάθμη ηρεμίας που παρουσιάζεται στην γεώτρηση αυτή. Το μέγεθος αυτό (φαινόμενο πάχος) χρησιμοποιήθηκε αντί του πραγματικού πάχους του υδροφορέα, καθώς το τελευταίο είναι ουσιαστικά αδιευκρίνιστο από την γεωτρητική έρευνα (ατελείς γεωτρήσεις).

Σημαντική παράμετρος, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του έργου είναι και η ακτίνα επίδρασης (**R**) της "επιφάνειας πτώσης στάθμης" ή "δυναμικής

επιφάνειας" ⁽¹⁾. Το μέγεθος αυτό δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί με ακρίβεια για δύο κύρια λόγους:

- α) Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία από γεωτρήσεις παρατήρησης, ώστε να βρεθούν οι (ανάλογοι) κώνοι πτώσης στάθμης των γεωτρήσεων άντλησης στην περιοχή. Τα λιγοστά "πηγάδια παρατήρησης" που κατασκευάστηκαν από την ΔΕΥΑΗ βρίσκονται μάλλον εκτός κώνων πτώσης αφού δεν επηρεάζονται από τις αντλήσεις των γεωτρήσεων στις οποίες αναφέρονται. Εξαίρεση φαίνεται να αποτελεί η T22 (η T19 αποτελεί πηγάδι παρατήρησής της), η οποία όμως έχει την υδροφορία της εγκατεστημένη σε "Πλακώδεις ασβεστόλιθους" (Γωνιανό Φαράγγι).
- β) Το καρστ καθιστά αμφίβολη οποιαδήποτε εκτίμηση της ακτίνας επίδρασης, καθώς αποτελεί φυσική ασυνέχεια που εμποδίζει την διάδοση της επιφάνειας πτώσης στάθμης.

Προκειμένου πάντως να βρεθεί, έστω και προσεγγιστικά, η ακτίνα επίδρασης των κώνων πτώσης των γεωτρήσεων άντλησης, εφαρμόσθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

Σύμφωνα με τους Cooper – Jacob ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφορέα (coefficient of storage ή storativity, **S**) είναι δυνατόν να υπολογισθεί από τα δεδομένα πεδίου, αν διατίθενται μετρήσεις στάθμης σε πηγάδια παρατήρησης, παρακείμενα της γεώτρησης άντλησης. Η παράμετρος αυτή δίνεται από την σχέση (Driscoll, 1986):

$$S = \frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2} \quad (4.5)$$

όπου, **T** μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου σχηματισμού (m²/day),

t χρόνος από έναρξη της άντλησης, στον οποίο παρατηρείται πτώση στάθμης

Δh στην γεώτρηση παρατήρησης (days), και

r απόσταση γεώτρησης παρατήρησης από γεώτρηση άντλησης (m).

Στην παραπάνω σχέση, αν θεωρηθεί γεώτρηση παρατήρησης σε απόσταση ίση με την ακτίνα επίδρασης του κώνου πτώσης της γεώτρησης άντλησης (**r = R**), τότε **t = t₀**, όπου **t₀** ο χρόνος από την έναρξη της άντλησης κατά τον οποίο "σταθεροποιείται" ο κώνος πτώσης (**Δh = σταθ.**). Έτσι, η σχέση 4.5 μπορεί να τροποποιηθεί στην:

⁽¹⁾ Η επιφάνεια αυτή θεωρείται ανάλογη με τον κώνο πτώσης στάθμης που δημιουργείται σε

$$R = \sqrt{\frac{2,25 \cdot T \cdot t_0}{S}} \quad (4.6)$$

Η αποθηκευτικότητα (S) είναι δυνατό να εκτιμηθεί βιβλιογραφικά. Σε ελεύθερους ασβεστολιθικούς υδροφορείς, όπως στην περιοχή ενδιαφέροντος, η παράμετρος S συνηθίζεται να λαμβάνεται ίση με 2 – 4% [37],[46],[169]. Έτσι, θεωρήθηκε συντελεστής αποθηκευτικότητας ίσος με 3% (= 0,03), δεδομένου ότι το ενεργό πορώδες κυμαίνεται γύρω στο 4 – 6%.

Με βάση τα παραπάνω και με την βοήθεια των "Τεχνικών Τευχών" προόδου εργασιών των γεωτρήσεων (βλέπε κεφ. 1, παρ. 1.2), εκτιμήθηκαν οι ακτίνες επίδρασης όλων των γεωτρήσεων του Πίνακα 4.5, για τις οποίες τα διατιθέμενα στοιχεία ήταν επαρκή (οι δοκιμαστικές αντλήσεις τους ολοκληρώθηκαν μετά την "ισορροπία" του κώνου πτώσης στάθμης).

Στην συνέχεια θεωρήθηκε "αντιπροσωπευτική γεώτρηση" για την κάθε μία από τις δύο προτεινόμενες θέσεις της υδρομαστευτικής στοάς. Η επιλογή της γεώτρησης έγινε με βάση την μεταβιβαστικότητα της (T), σε σχέση με την μέση τιμή (T_{avg}) του Πίνακα 4.5. Έτσι, ως "αντιπροσωπευτικές γεωτρήσεις" θεωρήθηκαν οι K9 και T21 για τις στοές Κέρης και Τυλίσου, αντίστοιχα.

Επίσης, για κάθε μία από τις δύο εξεταζόμενες περιοχές ελήφθησαν οι μέσες τιμές R που αντιστοιχούν σε μέσες τιμές Δh και μεταβιβαστικότητα ίδια με αυτή της "αντιπροσωπευτικής γεώτρησης", όλων των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκαν ζεύγη τιμών R , τα οποία θεωρήθηκε ότι αντιστοιχούν στις "αντιπροσωπευτικές γεωτρήσεις" K9 και T21 για διαφορετικές πτώσεις στάθμης, Δh .

Τα παραπάνω ζεύγη τιμών R και Δh παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Εκτίμηση ακτίνας επίδρασης δυναμικής επιφάνειας στις δύο προτεινόμενες θέσεις της υδρομαστευτικής στοάς.

Τρόπος εκτίμησης	Δh (m)	R (m)
Θέση υδρομαστευτικής στοάς Κέρης		
"Αντιπροσωπευτική γεώτρηση" K9	0	0
	4,22	30,85

αντλούμενες γεωτρήσεις, αλλά εκτεινόμενη κατά το μήκος της στοάς.

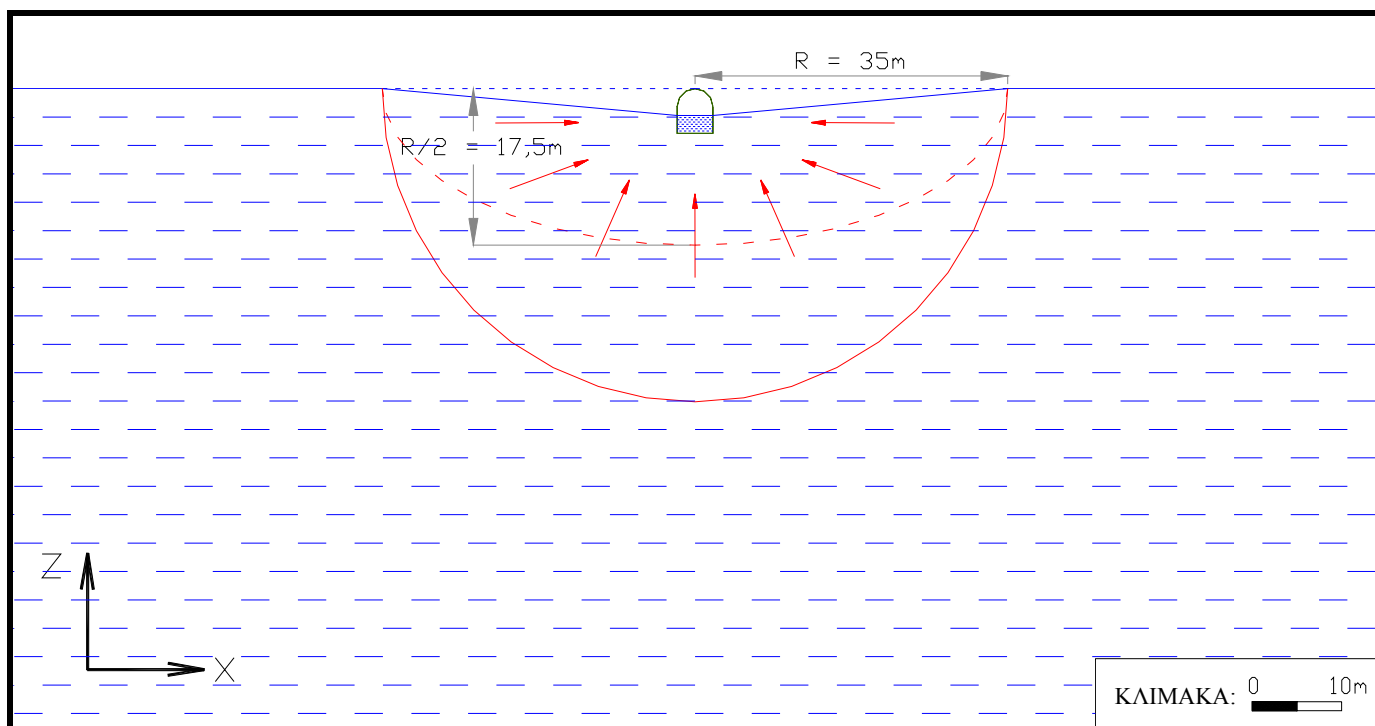
Μέσες τιμές από K2, K4, K9 και K10	9,52	150,19
Θέση υδρομαστευτικής στοάς Τυλίσου		
"Αντιπροσωπευτική γεώτρηση" T21	0	0
	6,72	50,91
Μέσες τιμές από T11, T12, T17 και T21	9,50	154,85

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 4.6 υπολογίσθηκαν (μέσω πολυωνυμικής σχέσης) οι ακτίνες επίδρασης της επιφάνειας πτώσης στάθμης της υδρομαστευτικής στοάς για κάθε ένα από τα τέσσερα θεωρούμενα σενάρια λειτουργίας της, ως εξής: Σενάριο A1: $R \approx 35$ m, σενάριο A2: $R \approx 67$ m, σενάριο B1: $R \approx 33$ m, και σενάριο B2: $R \approx 63$ m.

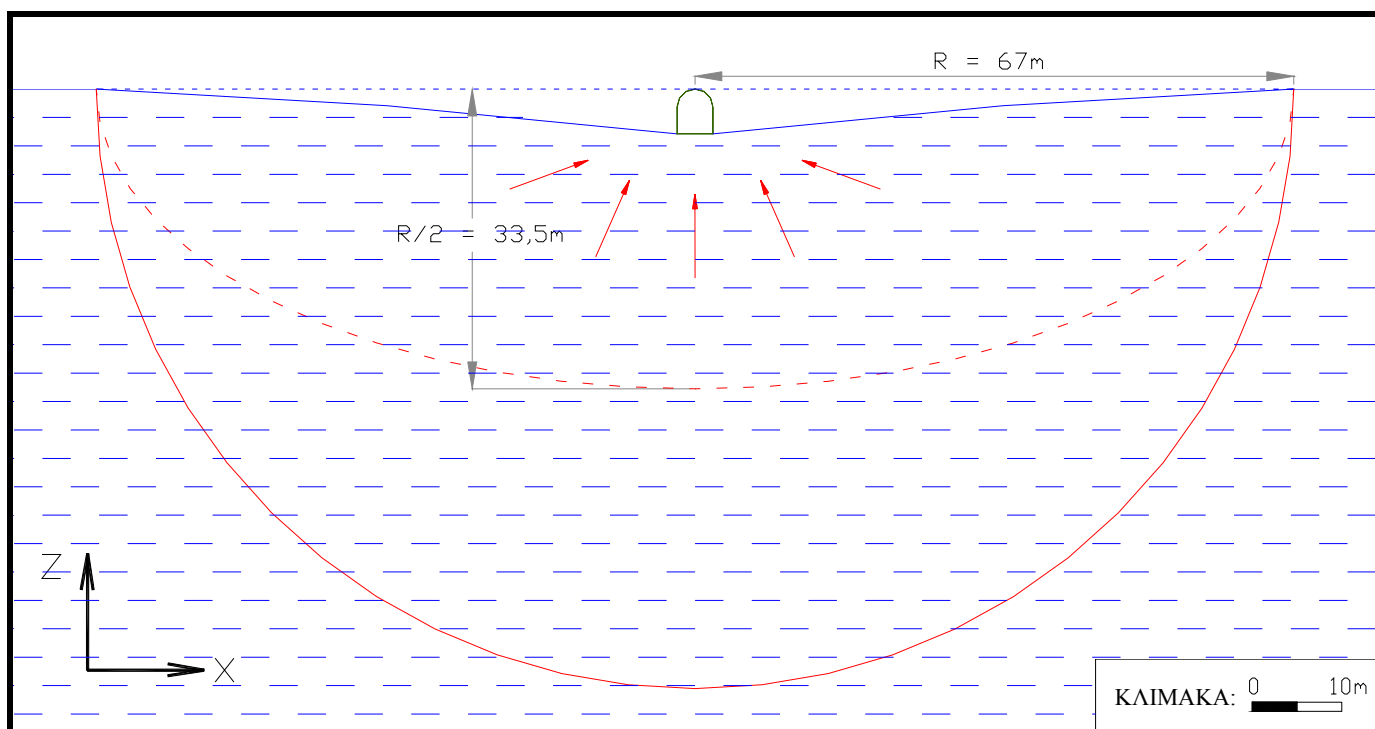
Η περιοχή αποστράγγισης της υδρομαστευτικής στοάς εκτιμήθηκε ότι εκτείνεται μεταξύ της δυναμικής επιφάνειας και κυκλικού τομέα με ακτίνα ίση με R , από την οροφή της στοάς και κατά μήκος αυτής (μέγιστη δυνατή αποστραγγιστική περιοχή).

Εναλλακτικά του κυκλικού τομέα θεωρήθηκε ελλειψοειδής περιοχή με μέγιστη ακτίνα ίση με R και ελάχιστη ακτίνα ίση με $R/2$, από την οροφή της στοάς και κατά μήκος αυτής (ελάχιστη δυνατή αποστραγγιστική περιοχή).

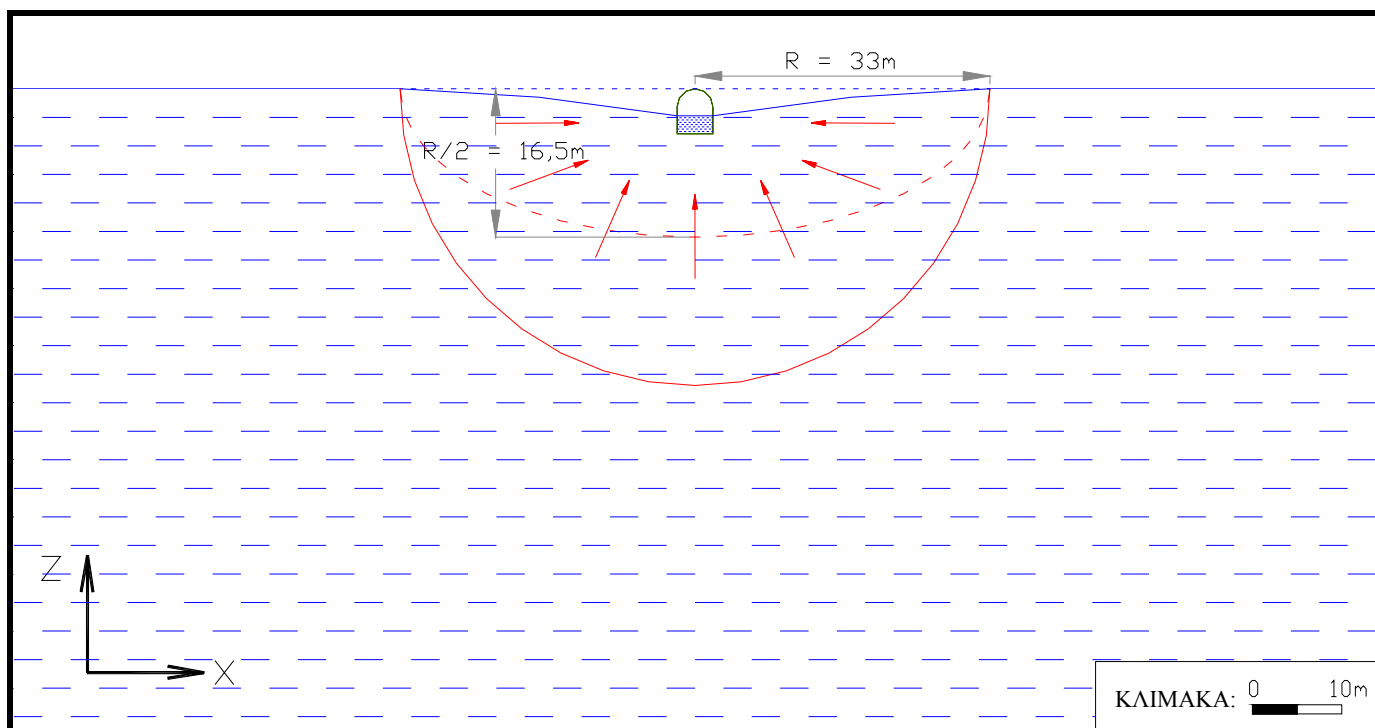
Στα **Σχήματα 4.44** έως και **4.47** δίνεται γραφική απεικόνιση των θεωρούμενων ισοδυναμικών καμπυλών αποστράγγισης (κόκκινο χρώμα) σε εγκάρσια τομή, για κάθε ένα από τα τέσσερα θεωρούμενα σενάρια εκμετάλλευσης της υδρομαστευτικής στοάς. Η μέγιστη ισοδυναμική καμπύλη (κυκλική) δίνεται με πλήρη γραμμή, ενώ η ελάχιστη (ελλειψοειδής) με διακεκομμένη. Στα ίδια σχήματα σχεδιάστηκαν και οι πιθανές γραμμές ροής (κόκκινα βέλη).



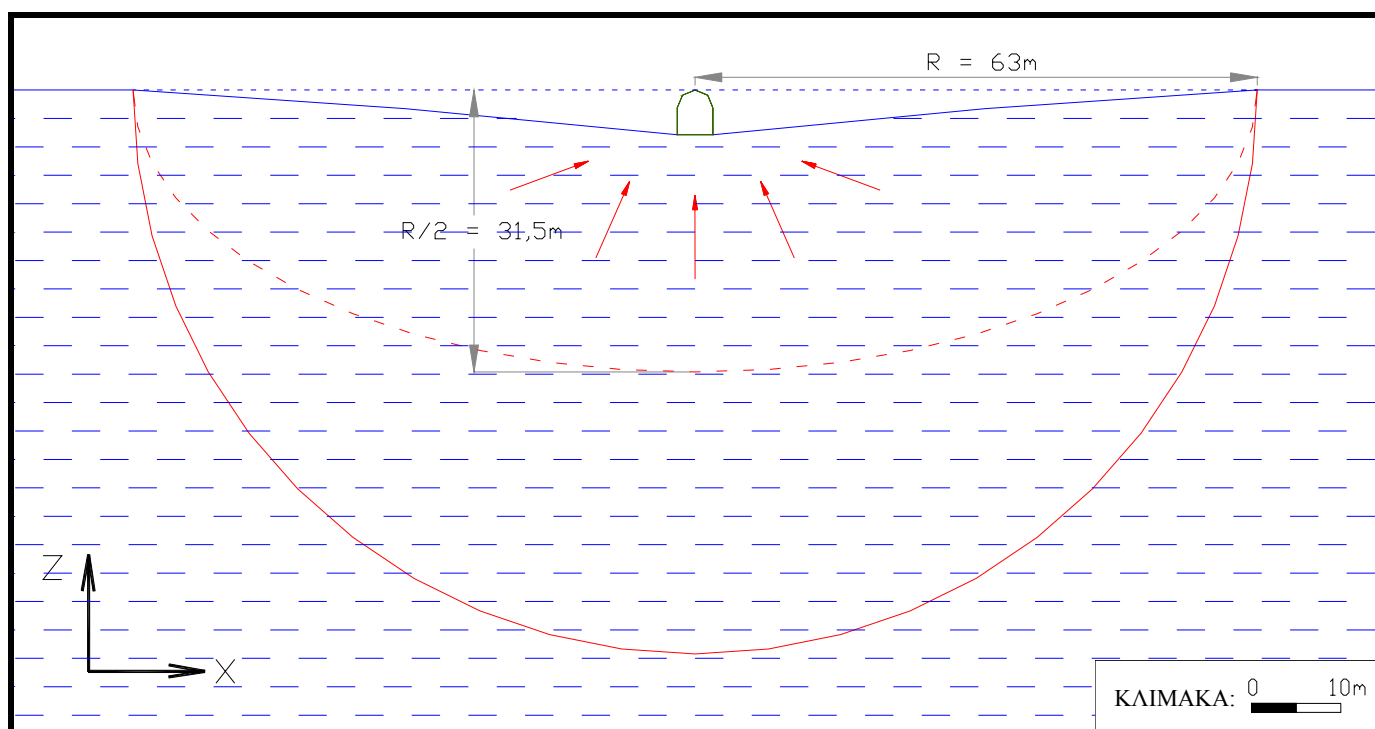
Σχήμα 4.44: Σενάριο A1 – Εγκάρσια τομή περιοχής αποστράγγισης.



Σχήμα 4.45: Σενάριο A2 – Εγκάρσια τομή περιοχής αποστράγγισης.



Σχήμα 4.46: Σενάριο B1 – Εγκάρσια τομή περιοχής αποστράγγισης.



Σχήμα 4.47: Σενάριο B2 – Εγκάρσια τομή περιοχής αποστράγγισης.

Στη συνέχεια, προκειμένου να εκτιμηθεί η παροχή της υδρομαστευτικής στοάς χρησιμοποιήθηκε ο Νόμος του Darcy. Ως σύστημα αναφοράς θεωρήθηκε ορθογώνιο σύστημα αξόνων (x, y, z), με το επίπεδο (x, z) να αντιστοιχεί στην εγκάρσια τομή της στοάς (βλέπε Σχήματα 4.46 έως και 4.49), η οποία εκτείνεται σε μήκος παράλληλα στον άξονα y.

Σύμφωνα λοιπόν με τον Darcy, η παροχή της υδρομαστευτικής στοάς δίνεται από την σχέση:

$$Q = k_{avg} \cdot L \cdot z \cdot \frac{dz}{dx} \quad (4.7)$$

όπου, Q παροχή (m^3/day) σε επιφάνεια της αποστραγγιστικής περιοχής με εμβαδόν $L \cdot z$ και υδραυλική κλίση dz/dx .

k_{avg} μέση περατότητα του υδροφόρου ορίζοντα (m/day), και

L μήκος στοάς κατά τον άξονα y (m).

Η σχέση 4.7, ολοκληρώνοντας στα όρια της θεωρούμενης δυναμικής επιφάνειας της στοάς, μπορεί να μετατραπεί ως εξής [41]:

$$Q \cdot \int_0^R dx = k_{avg} \cdot L \cdot \int_{h_1}^{h_0} z \cdot dz \quad (4.8)$$

$$Q = k_{avg} \cdot L \cdot \frac{h_0^2 - h_1^2}{2 \cdot R} \quad (4.9)$$

όπου, R ακτίνα επίδρασης της (δυναμικής) επιφάνειας πτώσης στάθμης της υδρομαστευτικής στοάς (m),

h_0 ύψος (m) στάθμης ηρεμίας (πριν την κατασκευή της στοάς), από το χαμηλότερο σημείο της αποστραγγιστικής περιοχής, και

h_1 ύψος (m) στάθμης λειτουργίας (σε κατάσταση "ισορροπίας"), από το χαμηλότερο σημείο της αποστραγγιστικής περιοχής.

Από την επίλυση της σχέσης 4.9 κατασκευάστηκε ο **Πίνακας 4.7**, στον οποίο παρουσιάζονται οι παροχές της υδρομαστευτικής στοάς, όπως αυτές υπολογίσθηκαν για κάθε ένα από τα τέσσερα θεωρούμενα σενάρια λειτουργίας της.

Σημειώνεται ότι οι τρεις διαφορετικές τιμές της παροχής που παρουσιάζονται στον πίνακα, αφορούν την ελάχιστη (ελλειψοειδής ισοδυναμική καμπύλη) θεωρούμενη

περιοχή αποστράγγισης ($Q_{\min}$), την μέγιστη (κυκλική ισοδυναμική καμπύλη) περιοχή αποστράγγισης ($Q_{\max}$) και τον μέσο αριθμητικό όρο αυτών των τιμών (Q_{avg}).

Πίνακας 4.7: Εκτιμούμενες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Σενάριο λειτουργίας	k (m/sec)	L (m)	R (m)	Δh (m)	$Q_{\min}$ (m ³ /day)	$Q_{\max}$ (m ³ /day)	Q_{avg} (m ³ /day)
A1	$6,96 \cdot 10^{-5}$	1.800	35	3	14.848	31.089	22.968
A2	$6,96 \cdot 10^{-5}$	1.800	67	5	25.047	52.114	38.581
B1	$1,61 \cdot 10^{-4}$	1.200	33	3	22.703	47.676	35.190
B2	$1,61 \cdot 10^{-4}$	1.200	63	5	38.319	79.941	59.130

Για την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοση της υδρομαστευτικής στοάς θα πρέπει να επισημανθούν και τα παρακάτω:

- Η ανάλυση που έγινε αφορά την περίπτωση κατά την οποία η υδρομαστευτική στοά είναι παράλληλη στις ισοπιεζομετρικές καμπύλες και άρα κάθετη στην διεύθυνση ροής. Έτσι, αξιοποιείται ολόκληρο το μήκος της. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ο συγκεκριμένος προσανατολισμός, η απόδοση του έργου αναμένεται μειωμένη.
- Δεν λήφθηκαν υπόψη δευτερεύουσες στοές, οι οποίες θα μπορούσαν να αυξήσουν την συνολική παροχή αποστράγγισης.
- Θεωρήθηκαν συνθήκες σταθερής ροής (steady flow), δηλαδή, δεν λήφθηκαν υπόψη οι εποχιακές μεταβολές της στάθμης στην υδρομαστευτική στοά. Η πραγματική παροχή είναι αυξημένη τους "χειμερινούς" μήνες (Νοέμβριος – Μάρτιος) και μειωμένη τους "θερινούς" (Απρίλιος – Οκτώβριος).
- Στην παρούσα εργασία δεν ενδιαφέρει το τεχνικό – σχεδιαστικό μέρος της στοάς. Ο σχεδιασμός του έργου (βλέπε Σχήμα 4.45) έγινε έτσι ώστε να απλοποιεί τους υπολογισμούς κατά την εκτίμηση της απόδοσής του και όχι για να εξηγήσει προβλήματα τεχνικής φύσεως (π.χ. πρόσβαση στο μέτωπο διάτρησης, μέρος της στοάς πρέπει να βρίσκεται "εν ξηρώ" ώστε να είναι δυνατή η διάνοιξή της κ.λπ.).
- Ο Νόμος του Darcy ισχύει, σε καρστικούς υδροφόρους σχηματισμούς όπως ο εξεταζόμενος, μόνο υπό προϋποθέσεις. Είναι δυνατό κατά την διάνοιξη της

υδρομαστευτικής στοάς να διατηρηθεί καρστικός αγωγός μεγάλης παροχής, ο οποίος να ανατρέψει οποιαδήποτε εκτίμηση για την απόδοση του έργου.

- Τελικά, η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε δίνει προσεγγιστικές τιμές της παροχής αποστράγγισης και χρησιμοποιείται για συγκριτικούς και μόνο σκοπούς με την μοντελοποίηση που ακολουθεί (κεφ. 6).

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΟ MODFLOW

5.1. Ο ρόλος της προσομοίωσης

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο μέθοδοι προσομοίωσης (simulation) και μοντελοποίησης (modelling), προκειμένου να επιτευχθούν προσεγγιστικές λύσεις σε πολλά επιστημονικά προβλήματα. Ως προσομοίωση καλείται η διαδικασία εκείνη κατά την οποία η εφαρμογή ενός προτύπου (μοντέλου) οδηγεί στην αναπαραγωγή της πραγματικότητας.

Με τις μεθόδους προσομοίωσης γίνεται προσπάθεια να περιγραφεί ένα φυσικό φαινόμενο με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά. Στην περίπτωση προσομοίωσης της ροής νερού στο υπέδαφος έχουν αναπτυχθεί προγράμματα σε H/Y που χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για την επίτευξη προσεγγιστικών λύσεων της μερικής διαφορικής εξίσωσης της ροής.

Ως "πρότυπο" ή "μοντέλο" (model) καλείται η μορφοποιημένη έκφραση μιας θεωρίας ή συνήθους κατάστασης που μεταβάλλεται και επαναλαμβάνεται. Γενικά, μοντέλο είναι κάθε τέχνασμα με το οποίο είναι δυνατή η προσεγγιστική απεικόνιση των φυσικών συνθηκών. Υπάρχουν δύο ειδών μοντέλα ^[1]:

- τα φυσικά μοντέλα, τα οποία αναπτύσσονται σε εργαστήρια και απεικονίζουν απευθείας τις φυσικές συνθήκες, και
- τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία προσομοιάζουν τις φυσικές συνθήκες έμμεσα, μέσω μαθηματικών εξισώσεων και συνοριακών συνθηκών.

Τα μαθηματικά πρότυπα επιλύονται, είτε αναλυτικά, είτε αριθμητικά. Ποιος από τους δύο τύπους μοντέλων θα χρησιμοποιηθεί έχει να κάνει με το είδος του προβλήματος που καλείται να αντιμετωπισθεί. Το σύνολο των εντολών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου ονομάζεται πρόγραμμα H/Y ή κώδικας.

Υπάρχουν υπερασπιστές και πολέμιοι της μοντελοποίησης. Οι πρώτοι υποστηρίζουν ότι ένα μοντέλο μπορεί να οδηγήσει στην ανίχνευση προβλημάτων σε περιοχές που υπάρχει έλλειψη στοιχείων πεδίου ή να προβλέψουν την εξέλιξη ενός συστήματος ροής μέσα στο χρόνο, εντός ελεγχόμενων περιθωρίων σφάλματος.

Οι δεύτεροι ισχυρίζονται ότι ένα μοντέλο μπορεί να δώσει αποτελέσματα ανεξέλεγκτου λάθους, καθώς για να λειτουργήσει πρέπει να εστιάσει σε μια μικρή περιοχή, απομονώνει τα συστήματα υπόγειας ροής και ποσοτικοποιεί παραμέτρους που από τη φύση τους είναι ποιοτικές.

Όπως και να έχει πάντως, τα μοντέλα έχουν αρχίσει τα τελευταία χρόνια να καταλαμβάνουν εξέχουσα θέση στο χώρο της υδρογεωλογίας. Αυτό οφείλεται αφενός στη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για ποσοτικοποιημένες μελλοντικές προβλέψεις, εξαιτίας της συνεχούς μείωσης των όγκων νερού στον πλανήτη, αφετέρου στην αλματώδη αύξηση της χρήσης των Η/Υ που εμπλέκεται ολοένα και περισσότερο σε όλα τα πεδία της επιστήμης.

Η πραγματοποίηση της μοντελοποίησης απαιτεί προηγούμενη μακροχρόνια, επίπονη και συχνά υψηλού κόστους εργασία υπαίθρου. Κανένα μοντέλο δεν λειτουργεί χωρίς την εισαγωγή πραγματικών στοιχείων πεδίου, των οποίων η πληθώρα καθορίζει σε σημαντικό βαθμό και την ακρίβεια του μοντέλου [1].

Ξεκινώντας την διαδικασία της μοντελοποίησης θα πρέπει [1]:

- να καθοριστούν εκ των προτέρων τα ερωτήματα στα οποία αναμένεται να απαντήσει το μοντέλο,
- να επιλεγεί ο τύπος του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί,
- να καθοριστεί ένα θεωρητικό μοντέλο της περιοχής ενδιαφέροντος, το οποίο θα χρησιμεύσει ως οδηγός,
- να καθοριστεί ο κώδικας που θα χρησιμοποιηθεί, και
- να ελεγχθεί εάν τα αποτελέσματα που εξάγονται από το μοντέλο επιβεβαιώνονται και από παρατηρήσεις.

5.2. Μαθηματική περιγραφή ομοιωμάτων επίλυσης

5.2.1. Γενίκευση του Νόμου του Darcy – Εξίσωση της υπόγειας ροής

Έστω ένας σωλήνας μέρος του οποίου είναι πλήρες άμμου. Σ' αυτόν εισέρχεται ρευστό σταθερής πυκνότητας και ιξώδους (στην προκειμένη περίπτωση το ρευστό είναι νερό) υπό πίεση, έτσι ώστε ο σωλήνας να παραμένει πλήρης και η άμμος κορεσμένη. Αν Q ο ρυθμός της ροής, h_1 και h_2 το υδραυλικό φορτίο που μετράται στα άκρα του σωλήνα (από δεδομένο επίπεδο αναφοράς), A το εμβαδόν της διατομής του σωλήνα,

κάθετα στην κατεύθυνση της ροής και L το μήκος του τμήματος άμμου του σωλήνα, τότε ο ρυθμός ροής του ρευστού μέσα από το τμήμα άμμου του σωλήνα δίνεται από τη σχέση:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (5.1)$$

όπου, K υδραυλική αγωγιμότητα της άμμου.

Η σχέση 5.1 είναι γνωστή ως "Νόμος του Darcy" και περιγράφει τη ροή σε πορώδη μέσα. Ο Νόμος του Darcy μπορεί να γραφτεί και με τη μορφή:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl} \quad (5.2)$$

Το φορτίο h συμβολίζει τη δυναμική ενέργεια μιας μονάδας βάρους νερού στο σημείο της μέτρησης. Σύμφωνα με τη σχέση Bernoulli ισχύει:

$$h = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = \Phi \quad (5.3)$$

όπου, z υψόμετρο πάνω από τη στάθμη αναφοράς,

P υδροστατική πίεση,

γ πυκνότητα του νερού,

v ταχύτητα ροής του νερού,

g επιτάχυνση της βαρύτητας, και

Φ υδραυλικό φορτίο.

Ο όρος P/γ αντιπροσωπεύει το ύψος στο οποίο θα ανέβει το νερό σε ένα ελεύθερο πιεζόμετρο τοποθετημένο στο σημείο αυτό.

Μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι ο κινητικός όρος $v^2/(2 \cdot g)$ είναι δυνατό να απουσιάζει από την σχέση 5.3, εφόσον οι ταχύτητες μέσα σε πορώδη μέσα είναι αρκετά μικρές. Προκειμένου για τον υπολογισμό της ταχύτητας ροής θα πρέπει να μελετηθεί ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να κινηθεί από τη μία πλευρά της άμμου στην άλλη.

Η σχέση 5.2 μπορεί να απλοποιηθεί (για το νερό) στην παρακάτω:

$$\left| \frac{Q}{A} \right| = \left| k \cdot \frac{dh}{dl} \right| \quad (5.4)$$

όπου, k εσωτερική διαπερατότητα (intrinsic permeability) της άμμου.

Το πηλίκο Q/A αντιπροσωπεύει την ταχύτητα (v) με την οποία κινείται το νερό μέσα στο σωλήνα διατομής A . Η ταχύτητα v καλείται "ταχύτητα Darcy", όμως δεν είναι η πραγματική ταχύτητα ροής του νερού.

Η σχέση Darcy θεωρεί ενεργή όλη την διατομή A , κάτι που δεν ισχύει στην πραγματικότητα, καθώς είναι προφανές ότι παρεμβάλλεται η στερεή φάση και η ροή εκμεταλλεύεται μόνο τον χώρο που της παρέχεται από το ενεργό πορώδες. Θεωρώντας λοιπόν ενεργό πορώδες θ προκύπτει διαφορετική διατομή $A' = \theta \cdot A$. Ανάλογα λοιπόν θα ισχύει:

$$v_{\theta} = \frac{v}{\theta} \quad (5.5)$$

Η ταχύτητα v_{θ} καλείται "φαινόμενη πραγματική" ταχύτητα ροής ή "μέση συνιστώσα" της ταχύτητας ροής. Και πάλι δεν πρόκειται για την πραγματική ταχύτητα ροής του ρευστού, καθώς θεωρείται ότι το νερό ρέει πάνω σε ευθείες τροχιές, υπόθεση που δεν ισχύει στην πραγματικότητα, αφού τα μόρια του νερού ακολουθούν τεθλασμένες, αλλά και διαφορετικές, τροχιές. Η πραγματική ταχύτητα του νερού είναι μεγαλύτερη της "φαινόμενης πραγματικής" ταχύτητας.

Είναι προφανές ότι η ταχύτητα ροής είναι ένα εξαιρετικά πολυσύνθετο μέγεθος και γι' αυτό πρακτικά αδύνατο να υπολογιστεί. Είναι πάντως κοινά αποδεκτό, όταν αναφέρεται "ταχύτητα ροής" να εννοείται η ταχύτητα κατά Darcy ^[169].

Η παραπάνω μελέτη είναι ανάλογη με τη ροή υπό σταθερή κατάσταση (steady state flow) ενός "σωλήνα" (π.χ. ποταμού που καθορίζεται από τις όχθες του), γνωρίζοντας τη σχέση μεταξύ του χρόνου ροής, του όγκου του ρευστού και του ρυθμού ροής. Ο χρόνος της διαδρομής του ρευστού υπολογίζεται από το λόγο του όγκου αυτού που κινείται σε μία τομή του "σωλήνα" προς το ρυθμό ροής του.

Στα προβλήματα πεδίου η ταχύτητα Darcy και η μέση ταχύτητα ροής δεν έχουν σταθερή διεύθυνση, συνεπώς θεωρείται αναγκαία η τρισδιάστατη διανυσματική τους απεικόνιση. Η ταχύτητα Darcy δίνεται διανυσματικά από την εξίσωση:

$$\mathbf{q} = q_x \cdot \mathbf{i} + q_y \cdot \mathbf{j} + q_z \cdot \mathbf{k} \quad (5.6)$$

Οι q_x , q_y , q_z αποτελούν τις συνιστώσες της ταχύτητας Darcy, στις τρεις κύριες διευθύνσεις και στην περίπτωση σταθερού ιξώδους και πυκνότητας. Οι συνιστώσες αυτές γίνονται:

$$q_x = -K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}, \text{ και } q_z = -K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5.7)$$

Στην αντίθετη περίπτωση, μεταβλητού ιξώδους ή / και πυκνότητας, οι q_x , q_y , q_z διατυπώνονται σε σχέση με την εσωτερική διαπερατότητα k :

$$q_x = -\frac{k_x}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}, \quad q_y = -\frac{k_y}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial y}, \text{ και } q_z = -\frac{k_z}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g \right) \quad (5.8)$$

όπου, P πίεση,
 μ δυναμικό ιξώδες,
 ρ πυκνότητα του ρευστού,
 k_x, k_y, k_z εσωτερικές διαπερατότητες στις αντίστοιχες διευθύνσεις,
 g μέτρο της επιτάχυνσης της βαρύτητας, και
 z κατακόρυφη συντεταγμένη με θετική την προς τα πάνω κατεύθυνση.

Η εσωτερική διαπερατότητα k (ή περατότητα ή υδροπερατότητα όταν αφορά νερό) είναι συνάρτηση μόνο του πορώδους μέσου, σε αντίθεση με την υδραυλική αγωγιμότητα K που επιπλέον συνδέει ιδιότητες του ρευστού:

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (5.9)$$

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η υδραυλική αγωγιμότητα και η εσωτερική διαπερατότητα είναι στην πραγματικότητα τανυστές δευτέρας τάξης. Αν οι κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας ή της εσωτερικής διαπερατότητας δεν είναι παράλληλες με τους καρτεσιανούς άξονες, οι συνιστώσες της ταχύτητας σε κάθε κατεύθυνση είναι συνάρτηση του φορτίου (ή του διαφορικού της πίεσης) στις τρεις κατευθύνσεις και όχι μόνο στην κατεύθυνση της συνιστώσας της ταχύτητας. Συνεπώς δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \\ q_y &= -K_{yx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \\ q_z &= -K_{zx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (5.10)$$

όπου, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} κύριες συνιστώσες του τανυστή υδραυλικής αγωγιμότητας, και

$K_{xy}, K_{xz}, K_{yx}, K_{yz}, K_{zx}, K_{zy}$ διατμητικοί όροι (cross terms) του τανυστή.

Οι σχέσεις 5.10 σπάνια χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές, εφόσον συνήθως θεωρείται ότι οι κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορούν να συμπίσουν με τις κύριες κατευθύνσεις των αξόνων και επομένως οι διατμητικοί όροι της να μηδενιστούν.

Προκειμένου να υπολογιστεί το διάνυσμα της μέσης ταχύτητας ροής, αρκεί να διαιρεθεί η ταχύτητα Darcy με το (μονόμετρο) ενεργό πορώδες:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{q}}{\theta} = \frac{q_x}{\theta} \cdot \mathbf{i} + \frac{q_y}{\theta} \cdot \mathbf{j} + \frac{q_z}{\theta} \cdot \mathbf{k} \quad \left\{ \begin{array}{l} u_x = \frac{q_x}{\theta} \\ u_y = \frac{q_y}{\theta} \\ u_z = \frac{q_z}{\theta} \end{array} \right. \quad (5.11)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής στην σχέση 5.11 υπολογίζονται επιλύοντας πρώτα τη διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής για την ανεύρεση του φορτίου ή της πίεσης σαν συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων και του χρόνου. Στη συνέχεια, από τις σχέσεις 5.7 ή 5.8 υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy, μέσα στο χώρο και το χρόνο που ενδιαφέρει το πρόβλημα. Τέλος, μετατρέπονται οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy σε αυτές της μέσης ταχύτητας ροής, χρησιμοποιώντας το ενεργό πορώδες.

Στην περίπτωση σταθερής πυκνότητας και ιξώδους του ρευστού (όπως στην εξεταζόμενη περίπτωση) η διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής είναι πιο βολικό να γραφτεί σε συνάρτηση με το φορτίο $\mathbf{h}$ ^{[36],[50]}. Δηλαδή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{K}_x \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{K}_y \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{K}_z \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial z} \right) = S_s \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \mathbf{R}^* \quad (5.12)$$

όπου, $\mathbf{K}_x, \mathbf{K}_y, \mathbf{K}_z$ συνιστώσες υδραυλικής αγωγιμότητας,

$\mathbf{h}$ υδραυλικό φορτίο,

S_s ειδική αποθηκευτικότητα (specific storage), δηλαδή ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται από μια μονάδα όγκου του υδροφόρου ορίζοντα ανά μονάδα πτώσης του φορτίου, και

$\mathbf{R}^*$ ογκομετρικός ρυθμός με τον οποίο νερό προστίθεται ή αφαιρείται από το σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου ορίζοντα.

Ειδικότερη μορφή της παραπάνω εξίσωσης είναι η σχέση:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{T}_x \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{T}_y \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{y}}) = \mathbf{S} \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \mathbf{R} + \mathbf{L} \quad (5.13)$$

όπου, $\mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_z$ συνιστώσες μεταβιβαστικότητας,
 $\mathbf{S}$ συντελεστής αποθηκευτικότητας,
 $\mathbf{R}$ επανατροφοδότηση (πάντα θετικό), και
 $\mathbf{L}$ διαρροή μέσω κορεσμένου στρώματος (για την περίπτωση ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα $\mathbf{L} = 0$).

Από την σχέση 5.13 λείπει η μεταβιβαστικότητα κατά τη διεύθυνση z γιατί θεωρείται ακαθόριστη, αφού η εξίσωση περιγράφει μόνο οριζόντια ροή. Επίσης, θεωρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας χαρακτηρίζεται από τρεις ορθογώνιες κύριες διευθύνσεις υδραυλικής αγωγιμότητας, οι οποίες συμπίπτουν με το σύστημα συντεταγμένων ^[127].

5.2.2. Θεμελιώδης εξίσωση της ροής

Οι διαφορικές εξισώσεις που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα ονομάζονται θεμελιώδεις εξισώσεις (governing equations) της ροής ρευστού σε υδροφόρο ορίζοντα. Υπάρχει άπειρος αριθμός πιθανών λύσεων για κάθε τέτοια μερική διαφορική εξίσωση.

Για να χρησιμοποιηθεί μία θεμελιώδης εξίσωση για τη λύση ενός προβλήματος χρειάζονται πρόσθετες πληροφορίες με τη μορφή:

- 1) "αρχικές συνθήκες", οι οποίες καθορίζουν την αρχική κατάσταση μέσα στο σύστημα, και
- 2) "συννοριακές συνθήκες", οι οποίες ελέγχουν τον τρόπο με τον οποίο η υπό μελέτη δομή επικοινωνεί με περιοχές εκτός αυτής.

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις σε συνδυασμό με τις αρχικές και τις συννοριακές συνθήκες διαμορφώνουν το μαθηματικό ομοίωμα του συστήματος. Η θεμελιώδης εξίσωση για την τρισδιάστατη υπόγεια ροή είναι η παρακάτω:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{K}_{ij} \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial x_j} \right) + \mathbf{R} = \mathbf{S}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} \quad (5.14)$$

όπου, $\mathbf{K}_{ij}$ танυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας,
 $\mathbf{h}$ υδραυλικό φορτίο, και

S_s ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου.

Στη γενική περίπτωση, ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας αποτελείται από εννέα στοιχεία. Παρόλα αυτά, οι άξονες συντεταγμένων μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπίπτουν με τις κύριες συνιστώσες του τανυστή υδραυλικής αγωγιμότητας (K_x , K_y , K_z), οι οποίες είναι γενικά κάθετες ή παράλληλες με τη στρωματογραφία.

Σ' αυτή την απλοποιημένη περίπτωση οι δευτερεύουσες συνιστώσες μηδενίζονται. Αυτή η θεώρηση συναντάται στα πιο συνηθισμένα ομοιώματα ροής και κυρίως σε ομοιώματα πεπερασμένων διαφορών, όπως το USGS ModFlow (Modular 3D Finite Difference Groundwater Flow Model) [74].

5.3. Επίλυση μαθηματικού προτύπου

Η διαδικασία μορφοποίησης και επίλυσης ενός μαθηματικού προτύπου (μοντέλου), μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες, την αναλυτική και την αριθμητική, παρόλο που δεν είναι ασυνήθιστος ο συνδυασμός αυτών των δύο. Οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν συμβατικές μαθηματικές λύσεις των θεμελιωδών διαφορικών εξισώσεων, ενώ οι αριθμητικές μέθοδοι προσεγγίζουν τις διαφορικές εξισώσεις με σειρά αλγεβρικών εξισώσεων.

5.3.1. Αναλυτικές επιλύσεις

Οι αναλυτικές επιλύσεις είναι μαθηματικές εκφράσεις που ικανοποιούν επακριβώς τη θεμελιώδη εξίσωση και τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Παρόλο που μπορούν να επιτευχθούν μόνο υπό περιοριστικές υποθέσεις, η απλότητά τους τις κάνει χρήσιμες σαν εργαλεία παρατήρησης (screening tools). Επίσης, είναι το κύριο μέσο για τη δοκιμή και τον έλεγχο σε αριθμητικούς κώδικες.

Γενικά όμως, οι αναλυτικές λύσεις επιτυγχάνονται μόνο κάτω από πολλές απλοποιητικές υποθέσεις, όπως ομοιόμορφο πεδίο ταχυτήτων και σταθερές παραμέτρους, απλό γεωμετρικό πεδίο ροής και μια απλουστευμένη μορφή κατανομής των εισροών και εκροών. Για τους λόγους αυτούς, οι αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες έχουν την ικανότητα προσέγγισης περισσότερο γενικών συνθηκών, χρησιμοποιούνται ευρύτερα σε εφαρμογές πεδίου.

5.3.2. Αριθμητικές επιλύσεις

Όπως προαναφέρθηκε, οι αναλυτικές μέθοδοι δεν έχουν ευρεία πρακτική εφαρμογή σε προβλήματα ροής. Αντίθετα, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι πολύ πιο πολύπλευρες και εξαιτίας της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών συστημάτων η επίλυση τους είναι πια σχετικά εύκολη και γρήγορη.

Στην μοντελοποίηση ροής υπόγειου νερού χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες πέντε αριθμητικές μέθοδοι ^[1]:

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FD, Finite Differences Method).
- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FE, Finite Elements Method).
- Μέθοδος ολοκλήρωσης πεπερασμένων διαφορών (IFD, Integrated Finite Differences Method).
- Μέθοδος εξίσωσης συνοριακής ολοκλήρωσης (BIE, Boundary Integral Equation Method).
- Μέθοδος αναλυτικών στοιχείων (AE, Analytic Elements Method).

Οι δύο πρώτες μέθοδοι είναι οι ευρύτερα διαδεδομένες στο χώρο της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής. Οι δύο τελευταίες είναι σχετικά καινούργιες και γι' αυτό το λόγο δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες. Επίσης, η μέθοδος ολοκλήρωσης πεπερασμένων διαφορών (IFD) μοιάζει πολύ με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Σε όλες τις μεθόδους ένας κώδικας αναλαμβάνει να επιλύσει μια ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί από προσέγγιση των επιμέρους διαφορικών εξισώσεων (η βασική εξίσωση, οι συνοριακές και οι αρχικές συνθήκες) και οι οποίες σχηματίζουν ένα μαθηματικό μοντέλο.

Προσεγγιστικές τεχνικές, όπως αυτές των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων, λειτουργούν πάνω στο μοντέλο και το μετασχηματίζουν σε μία φόρμα, η οποία μπορεί να επιλυθεί γρήγορα από H/Y. Η ομάδα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγονται με αυτό τον τρόπο μπορούν να εκφραστούν ως μία θεμελιώδης εξίσωση (matrix equation).

Η επιλογή μεταξύ της προσεγγιστικής μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από το πρόβλημα που πρόκειται να επιλυθεί, καθώς επίσης και από την προτίμηση του ίδιου του χρήστη. Η μέθοδος των

πεπερασμένων διαφορών είναι ευκολότερα κατανοητή. Γενικά, χρειάζεται να εισαχθούν λιγότερα στοιχεία, προκειμένου να κατασκευαστεί ο κানাβος των πεπερασμένων διαφορών.

Τα πεπερασμένα στοιχεία προσεγγίζουν καλύτερα ακανόνιστα συνοριακά σχήματα (boundaries) από τις καθορισμένες πεπερασμένες διαφορές. Παρόλα αυτά, οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές μπορούν να χειριστούν ακανόνιστα συνοριακά σχήματα εξίσου καλά. Είναι ευκολότερο να ρυθμιστεί το μέγεθος μεμονωμένων στοιχείων, όπως επίσης και οι θέσεις των συνοριακών σχημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, κάνοντας ευκολότερο τον έλεγχο της επίδρασης των κομβικών αποστάσεων του πλέγματος (grid) στην επίλυση.

Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα από τις πεπερασμένες διαφορές στο να χειριστούν εσωτερικά συνοριακά σχήματα, όπως ζώνες ρηγμάτωσης και να προσομοιάσουν σημειακές πηγές και δεξαμενές, μέτωπα αποστράγγισης και μεταβαλλόμενες πιεζομετρικές επιφάνειες.

Γενικά όμως, η επιλογή της μεθόδου βασίζεται αποκλειστικά στην προτίμηση του χρήστη. Ο Gray (1984) αναφέρει ότι "οι διαφωνίες μεταξύ των χρηστών για το ποια μέθοδος είναι καλύτερη συνίσταται απλώς στο ότι ο κάθε χρήστης έχει χρησιμοποιήσει περισσότερο κάποια από τις δύο μεθόδους". Μπορεί να ειπωθεί ότι "η κάθε μέθοδος έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που την κάνουν πιο ελκυστική για συγκεκριμένες εφαρμογές".

Σύμφωνα με τους Pinder και Gray (1976), καθώς και τους Wang και Anderson (1977), η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

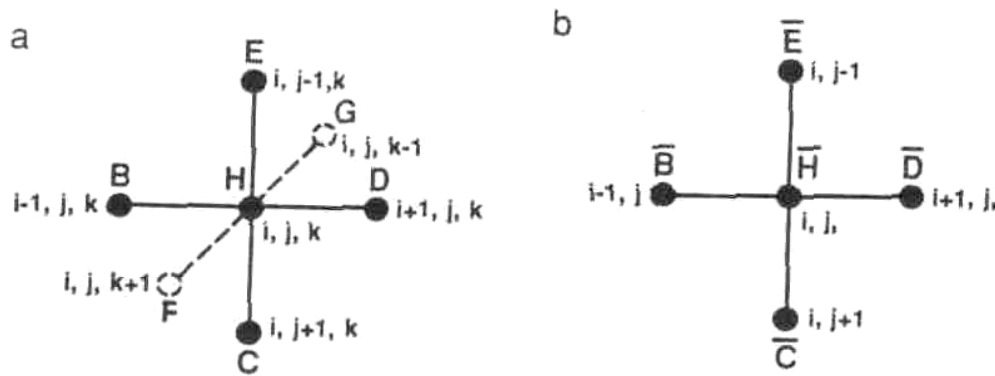
Πάντως υπάρχει θεμελιώδης διαφορά στη φιλοσοφία μεταξύ των δύο μεθόδων: Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει μία τιμή για τον κόμβο, η οποία είναι επίσης και η μέση τιμή για τα κελιά που περιβάλλουν τον κόμβο. Καμία υπόθεση δεν γίνεται σχετικά με τη μεταβολή της τιμής από κόμβο σε κόμβο. Τα πεπερασμένα στοιχεία από την άλλη, υπολογίζουν με ακρίβεια την μεταβολή της κομβικής τιμής εντός του γειτονικού κελιού μέσω υπολογισμού της τιμής της συναρτήσεως δια παρεμβολής (interpolation function).

Τελικά, κανένας κώδικας πεπερασμένων στοιχείων δεν χαίρει αποδοχής αντίστοιχης με αυτής των κωδικών των πεπερασμένων διαφορών. Γι' αυτό το λόγο στα

επόμενα παρουσιάζεται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, κώδικας της οποίας είναι και το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα ModFlow.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα επίλυσης της μεθόδου αυτής δίνεται στο **Σχήμα 5.1**, όπου για το μικρό υπολογισμένο τμήμα της περιοχής του, η γενική έκφραση της εξίσωσης των πεπερασμένων διαφορών είναι η παρακάτω:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{h}_{i,j,k} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{h}_{i,j+1,k} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{h}_{i+1,j,k} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{h}_{i,j-1,k} + \mathbf{F} \cdot \mathbf{h}_{i,j,k+1} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{h}_{i,j,k-1} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{h}_{i,j,k} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{S}_{i,j,k} \quad (5.15)$$



Σχήμα 5.1: Υπολογισμός κελιών πεπερασμένων διαφορών. *a) Τρισδιάστατο κελί.*
b) Δισδιάστατο κελί  ^[1] (Fig. 2.4).

Η εξίσωση της τιμής του κόμβου $\mathbf{i,j,k}$ ($\mathbf{h}_{i,j,k}$) εμπλέκει την τιμή του ίδιου του κόμβου, καθώς επίσης και τις τιμές των έξι γειτονικών του. Κάθε τιμή πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά (**B**, **C**, **D**, **E**, **F**, **G** και **H**) που είναι συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των κόμβων.

Η σταθερά **H** είναι επίσης συνάρτηση του όρου της αποθηκευτικότητας, ενώ ο όρος $\mathbf{R} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{S}_{i,j,k}$ περικλείει τις έννοιες τόσο της αποθηκευτικότητας, όσο και της επανατροφοδότησης.

Σημειώνεται ότι παρόμοια εξίσωση με αυτήν της σχέσης 5.17 χρησιμοποιείται και από το ModFlow.

5.3.3. Το λογισμικό φύλλο του μοντέλου πεπερασμένων διαφορών

Το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν όταν επιχειρείται προσέγγιση ενός μοντέλου υπόγειας ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών επιλύεται με συνδυασμό της μητρικής εξίσωσης και επαναληπτικών τεχνικών επίλυσης. Μια απλή επαναληπτική επίλυση αυτών των εξισώσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια του λογισμικού φύλλου.

Στο λογισμικό φύλλο του μοντέλου κάθε εισαγωγή αποτελεί ένα κελί στον κάναβο των πεπερασμένων διαφορών. Η τεχνική αυτή μπορεί να παρουσιαστεί απλοποιημένη, με την θεμελιώδη εξίσωση Laplace για σταθερή ροή δύο διαστάσεων, για ομογενείς και ισότροπους υδροφόρους ορίζοντες [1]:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial \mathbf{z}^2} = 0 \quad (5.16)$$

Η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών για κανονικό πλέγμα, όπου $\Delta \mathbf{x}$ και $\Delta \mathbf{z}$ (διαστάσεις κάθε κελιού) είναι σταθερά και ίσα, έχει ως εξής:

$$\frac{\mathbf{h}_{i+1,j} + \mathbf{h}_{i-1,j} + \mathbf{h}_{i,j+1} + \mathbf{h}_{i,j-1}}{4} = \mathbf{h}_{i,j} \quad (5.17)$$

Δηλαδή, η τιμή σε κάθε κελί των πεπερασμένων διαφορών είναι η μέση τιμή των τιμών στα τέσσερα γειτονικά κελιά.

Μια εξίσωση αυτού του τύπου εισάγεται στο λογισμικό φύλλο για κάθε κελί ξεχωριστά. Το λογισμικό φύλλο, προκειμένου να επιλύσει τις εξισώσεις επαναληπτικά, χρησιμοποιεί έναν συντελεστή επανάληψης. Καθορισμένες τιμές συνοριακών συνθηκών επιτυγχάνονται εισάγοντας τις συνοριακές τιμές στα κατάλληλα κελιά. Το μοντέλο θεωρεί συνοριακές συνθήκες "κέντρου του κόμβου" (mesh-centered) για τα συνοριακά σχήματα, τόσο της υψομετρικής διαφοράς ρευστού, όσο και της ροής.

5.4. Εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών

5.4.1. Γενικά

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης στην προσομοίωση υπόγειας ροής, κυρίως λόγω της απλότητας και της ευκολίας με την οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε τρισδιάστατα προβλήματα.

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα κώδικα προσομοίωσης με την μέθοδο αυτή είναι το USGS ModFlow, το οποίο πρωτοπαρουσιάστηκε τη δεκαετία του '80 ^[74].

Σε κάθε προσομοίωση ροής πεπερασμένων διαφορών, το φορτίο υπολογίζεται σε καθορισμένα σημεία στο χώρο. Αυτά τα σημεία ονομάζονται κόμβοι του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών. Τα ομοιώματα πεπερασμένων διαφορών συνήθως περιγράφονται, είτε ως προς το "κέντρο του κύβου" (block-centered), είτε ως προς το "κέντρο του κόμβου" (mesh-centered), ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο οι υδραυλικές παράμετροι καθορίζονται, σε σχέση με τους κόμβους του πλέγματος.

Στη διάταξη του "κέντρου του κόμβου", οι κόμβοι βρίσκονται στις τομές των γραμμών πλέγματος. Σε αυτή τη διάταξη οι περιοχές στις οποίες καθορίζονται μεταβιβαστικές ιδιότητες, διαφέρουν από αυτές για τις οποίες καθορίζονται ιδιότητες αποθηκευτικότητας, εισροής και αποχώρησης.

Οι μεταβιβαστικές ιδιότητες, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα ή η μεταβιβαστικότητα σε μια δεδομένη κατεύθυνση, καθορίζονται πάνω σ' ένα διάστημα ως προς την ίδια κατεύθυνση και παίρνουν αυτή την τιμή σ' όλη την απόσταση ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους. Αντίθετα, ιδιότητες όπως ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ή ο ρυθμός επανατροφοδότησης, καθορίζονται σε περιοχές ή όγκους με κέντρα τους κόμβους, ακριβώς όπως συμβαίνει στην προσέγγιση του "κέντρου του κύβου".

Το ModFlow είναι ένας κώδικας πεπερασμένων διαφορών του "κέντρου του κύβου" (block-centered) και μπορεί να προσομοιάσει όλους τους τύπους υδροφορέων. Ο κώδικας αυτός παρουσιάζει ένα τρισδιάστατο σύστημα ως ακολουθία στρωμάτων πορώδους μέσου ^[1].

Στη διάταξη κατά την οποία οι κόμβοι βρίσκονται στο κέντρο των κύβων (στοιχείων), το πεδίο προσομοίωσης μπορεί να θεωρηθεί σαν πλέγμα στοιχείων ή κελιών, που περιβάλλουν κάθε κόμβο. Αυτά τα στοιχεία χωρίζονται μεταξύ τους με πλεγματικές γραμμές ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους. Οι υδραυλικές ιδιότητες καθορίζονται για κάθε στοιχείο και θεωρούνται ομοιογενείς μέσα σ' αυτό.

Το οριζόντιο πλέγμα (grid) δημιουργείται με το συνηθισμένο τρόπο καθορίζοντας τις διαστάσεις του πλέγματος κατά τις διευθύνσεις x και y . Όπως σε όλα τα πλέγματα των πεπερασμένων διαφορών, το οριζόντιο πλέγμα πρέπει να είναι το ίδιο για κάθε στρώμα.

Το μοντέλο δεν απαιτεί εισαγωγή κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (z). Το Δz καθορίζεται έμμεσα. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις μεταβιβαστικότητες (transmissivities) του στρώματος, οι οποίες είναι ίσες με την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) του στρώματος επί το πάχος του στρώματος (Δz). Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε στρώμα και τιμές που δίνουν το υψόμετρο της οροφής και του δαπέδου κάθε στρώματος. Το ModFlow στη συνέχεια υπολογίζει την μεταβιβαστικότητα του στρώματος, αφού πρώτα υπολογίσει το πάχος του στρώματος από τα υψόμετρα της οροφής και της βάσης του.

Η μεταβιβαστικότητα σε κάθε θέση i,j μέσα το στρώμα πιθανόν να ποικίλει, κάτι που οφείλεται στις χωρικές μεταβολές που πάχους του υδροφορέα ή / και της υδραυλικής αγωγιμότητας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το Δz ποικίλει χωρικά εντός του στρώματος.

Η παραπάνω διαδικασία επιτρέπει μεγαλύτερη ευκαμψία στην εφαρμογή των υδροστρωματογραφικών ενοτήτων στο πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών. Παρόλα αυτά, με τον τρόπο αυτόν διαστρέφονται τα στρώματα, εισάγοντας λάθος στην προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών. Σύμφωνα με τους McDonald και Harbaugh (1988) το συγκεκριμένο λάθος είναι γενικά μικρό ^[1].

5.4.2. Χαρακτηριστικά ομοιώματος ModFlow

Τα γενικά χαρακτηριστικά του μοντελοποιητή ModFlow, για προσομοίωση υπόγειας ροής του νερού, είναι τα εξής:

(1) Δημιουργία ομοιώματος

- Καθορισμός των μονάδων μέτρησης (μήκος, αγωγιμότητα, χρόνος, ρυθμός άντλησης, επανατροφοδότηση κ.λπ.).
- Επιλογή χάρτη βάσης (μορφής .DXF).
- Καθορισμός του αρχικού τρισδιάστατου πλέγματος (μήκος, πλάτος και βήμα των βρόγχων, αριθμός, βάθος και πάχος των στρωμάτων).

(2) Εισαγωγή δεδομένων ροής

Αποτελούν τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό του ομοιώματος. Για τα στοιχεία αυτά το πρόγραμμα δημιουργεί βάση δεδομένων, με

την οποία είναι δυνατός ο καθορισμός των ιδιοτήτων του ομοιώματος σε οποιονδήποτε βρόγχο του πλέγματος.

- Μεταβολή του τρισδιάστατου πλέγματος (πύκνωση, αραίωση).
- Εισαγωγή, μεταβολή και διαγραφή πηγαδιών (γεωτρήσεων) και των ιδιοτήτων τους.
- Υδραυλική αγωγιμότητα (υδροπερατότητα) και αποθηκευτικότητα.
- Εισαγωγή και μεταβολή συνοριακών συνθηκών ροής:
 - Σταθερό φορτίο.
 - Ποτάμια.
 - Απορροές.
 - Εξατμισοδιαπνοή.
 - Τοίχοι (οριζόντια εμπόδια ροής).
 - Επανατροφοδότηση.

(3) Εκτέλεση προσομοίωσης

Αρχικά επιλέγεται αν ο τύπος της προσομοίωσης της ροής είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη (steady state ή transient). Στην περίπτωση μεταβαλλόμενης ροής, καθορίζονται οι παράμετροι του χρονικού βήματος (περίοδος τάσης και χρονικό βήμα). Στη συνέχεια καθορίζονται οι εξής παράμετροι:

- Αρχικά φορτία (είτε σταθερό κατά στρώμα, είτε σαν αρχείο Surfer, ASCII, ή προηγούμενη εκτέλεση του ModFlow).
- Επανατροφοδότηση στο ανώτερο στρώμα.
- Τύποι των επί μέρους στρωμάτων (τέσσερις τύποι είναι διαθέσιμοι ανάλογα με τη σταθερότητα ή μη της τιμής της αποθηκευτικότητας και της μεταβιβαστικότητας).
- Χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες αποθηκεύονται τα αποτελέσματα και μορφή αυτών.

(4) Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναπαρίστανται γραφικά, ανάλογα με τη μορφή που ζητά ο χρήστης και κάθε εικόνα μπορεί να αποθηκευτεί με τη μορφή .DXF αρχείου. Οι δυνατές επιλογές του χρήστη είναι οι εξής:

- Ισοκαμπύλες:
 - Φορτίου.

- Μεταβολής του φορτίου στα επιλεγμένα στρώματα.
- Διαφορών του αρχικού από το υπολογισμένο φορτίο.
- Απωλειών ύδατος ανάμεσα σε γειτονικά στρώματα.
- Ανάγλυφου.
- Στάθμης του υδροφορέα.
- Καθαρής επανατροφοδότησης (= επανατροφοδότηση – εξατμισοδιαπνοή).
- Διανύσματα ταχυτήτων

Για όλες τις παραπάνω ισοκαμπύλες είναι δυνατός ο καθορισμός χρωμάτων και διαστημάτων τους, η παρακολούθηση των ακριβών τιμών τους σε κάθε κελί και σε κάθε χρονικό βήμα και η δημιουργία ASCII αρχείων με τις τιμές των παραμέτρων για κάθε κελί. Τέλος, δημιουργούνται τα εξής διαγράμματα, στα οποία επίσης αναγράφονται τα αντίστοιχα σφάλματα:

- Φορτίου – χρόνου σε πηγάδια παρατήρησης (μεταβαλλόμενη ροή).
- Παρατηρούμενες – υπολογισμένες τιμές του φορτίου σε πηγάδια παρατήρησης.
- Πτώσης στάθμης – χρόνου σε πηγάδια παρατήρησης.

5.5. Παράμετροι στρωμάτων

Τα στρώματα (layers) μπορούν να σχεδιάζονται υπό πίεση (confined), ελεύθερα (unconfined) ή μετατρέψιμα (convertible), δηλαδή, είτε υπό πίεση, είτε ελεύθερα.

Εάν το στρώμα είναι υπό πίεση, ο χρήστης εισάγει τις σταθερές μεταβιβαστικότητας (**T**) και αποθηκευτικότητας (**S**) του στρώματος. Το κορυφαίο στρώμα του συστήματος τυπικά σχεδιάζεται να είναι ελεύθερο και ο χρήστης εισάγει την υδραυλική αγωγιμότητα (**K**), την ειδική παροχή (**Sy**) και τη βάση του στρώματος. Το ModFlow υπολογίζει τη μεταβιβαστικότητα του στρώματος πολλαπλασιάζοντας την υδραυλική αγωγιμότητα με το κορεσμένο πάχος του στρώματος.

Τα υδραυλικά φορτία στο στρώμα υπολογίζονται με τα αξιώματα του Dupuit. Μετά από κάθε επανάληψη (iteration) το κορεσμένο πάχος του στρώματος ανανεώνεται και νέες μεταβιβαστικότητες υπολογίζονται. Το πρόγραμμα επιτρέπει το ύψος της πιεζομετρικής επιφάνειας του νερού να απειρίζεται προς την οροφή στο ελεύθερο στρώμα. Έτσι, συμπεραίνεται ότι το πάχος του ελεύθερου στρώματος μπορεί να είναι άπειρο ^[1].

Εάν τα στρώματα σχεδιάστηκαν να είναι μετατρέψιμα, εισάγονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες και τα υψόμετρα της οροφής και της βάσης του υδροφορέα και το ModFlow υπολογίζει τις μεταβιβαστικότητες του στρώματος. Μετά από κάθε επανάληψη ελέγχει για να καθορίσει εάν το φορτίο στο στρώμα είναι υψηλότερα ή χαμηλότερα από την οροφή του.

Εάν το φορτίο είναι υψηλότερα από την οροφή του στρώματος, συμπεραίνεται ότι το στρώμα είναι "υπό πίεση". Αντίθετα, εάν το φορτίο βρίσκεται χαμηλότερα από την οροφή του στρώματος, το στρώμα θεωρείται "ελεύθερο".

5.6. Συνοριακές συνθήκες

5.6.1. Τύποι συνοριακών συνθηκών

Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούνται από μία κύρια (θεμελιώδης) εξίσωση, συνοριακές και αρχικές συνθήκες. Συνοριακή συνθήκη (boundary) είναι η μαθηματική σχέση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (φορτίο) ή την παράγωγό της (ροή) στα όρια της περιοχής του προβλήματος.

Η σωστή επιλογή των συνοριακών συνθηκών είναι ένα κρίσιμο βήμα στο σχεδιασμό του μοντέλου. Στις προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης ροής (steady state flow) οι συνοριακές συνθήκες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το σχέδιο ροής.

Οι φυσικές συνοριακές συνθήκες (physical boundaries) των συστημάτων ροής του υπόγειου νερού καθορίζονται από την φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου τμήματος βράχου ή ενός μεγάλου σώματος επιφανειακού νερού. Άλλες συνοριακές συνθήκες σχηματίζονται ως αποτέλεσμα των υδρολογικών συνθηκών.

Αυτές οι "μη ορατές" συνθήκες είναι υδραυλικές συνοριακές συνθήκες (hydraulic boundaries), οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τον διαχωρισμό του υπόγειου νερού και στρωτές ροές. Για παράδειγμα, ο καθορισμός της περιοχής του υπόγειου νερού και η γραμμή ροής είναι υδραυλικές συνοριακές συνθήκες, ενώ ο ποταμός λογίζεται ως φυσική συνοριακή συνθήκη.

Τα υδρογεωλογικά συνοριακά σχήματα παρουσιάζονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους συνοριακών συνθηκών ^[1]:

- 1) **Συνοριακές συνθήκες καθορισμένου φορτίου** (Dirichlet Conditions), για τις οποίες δίνεται το φορτίο.

- 2) **Συνοριακές συνθήκες καθορισμένης ροής** (Neumann Conditions), για τις οποίες δίνεται η παράγωγος του φορτίου (διακύμανση), κατά μήκος του συνοριακού σχήματος. Μια "συνοριακή συνθήκη μη ροής" (no flow condition) εισάγεται καθορίζοντας τη μεταβολή στο μηδέν.
- 3) **Εξαρτημένες από το φορτίο συνοριακές συνθήκες ροής** (Cauchy Conditions ή μικτές συνοριακές συνθήκες), για τις οποίες η διακύμανση κατά μήκος του συνοριακού σχήματος υπολογίζεται δίνοντας οριακή τιμή φορτίου. Αυτός ο τύπος συνοριακής συνθήκης μερικές φορές καλείται μικτή, γιατί συσχετίζει τα συνοριακά φορτία με τις συνοριακές ροές. Υπάρχουν αρκετοί τύποι συνοριακών συνθηκών εξαρτημένων από το φορτίο.

5.6.2. Καθορισμός συνοριακών συνθηκών

Κατά την επιλογή των συνοριακών συνθηκών ο χρήστης πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός, ως προς το αν το μοντέλο που σχεδιάζεται έχει νόημα. Πρέπει να επιλέγονται, όπου είναι δυνατόν, τα φυσικά συνοριακά σχήματα, καθώς αποτελούν σταθερά χαρακτηριστικά του συστήματος ροής [1].

Το αδιαπέρατο στρώμα, τυπικά σχηματίζει το κατώτερο συνοριακό σχήμα του συστήματος που μοντελοποιείται. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών του μεγέθους της αγωγιμότητας μπορεί να είναι αρκετή για να καθορίσει τη θέση του αδιαπέρατου συνοριακού στρώματος.

Η διαφορά αυτή, στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, προκαλεί "διάθλαση" στις γραμμές ροής, έτσι ώστε η ροή στο στρώμα μεγάλης αγωγιμότητας να είναι ουσιαστικά οριζόντια, ενώ στο στρώμα μικρής αγωγιμότητας κάθετη [49].

Το αδιαπέρατο στρώμα σχηματίζει ένα συνοριακό σχήμα μη ροής. Επίσης, συνοριακά σχήματα μη ροής είναι δυνατόν να εκφράζουν ζώνες ρηγμάτων και τη διεπιφάνεια μεταξύ "γλυκού" και "αλμυρού" νερού, σε παράκτιους υδροφορείς.

5.7. Το προφίλ του μοντέλου

Η εγκάρσια τομή στο μοντέλο είναι σημαντική, όταν η κατακόρυφη ροή είναι μεγάλη. Επίσης, το "προφίλ" του μοντέλου βοηθάει στην αξιολόγηση του θεωρητικού μοντέλου του συστήματος που σχεδιάζεται πριν το τρισδιάστατο μοντέλο ροής [1].

Το σημαντικότερο βήμα για τον προσανατολισμό του μοντέλου είναι αυτό να ευθυγραμμισθεί κατά μήκος της γραμμής ροής. Εάν το προφίλ δεν είναι προσανατολισμένο με αυτό τον τρόπο θα υπάρχουν σφάλματα στα αποτελέσματα, επειδή το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει συνιστώσες ροής που βρίσκονται σε γωνία με την εγκάρσια τομή.

Η κύρια εξίσωση για την προσομοίωση του προφίλ του μοντέλου είναι η εξής:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{K}_x \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}}) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} (\mathbf{K}_z \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{z}}) = \mathbf{S}_s \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \mathbf{R}^* \quad (5.18)$$

Η παραπάνω εξίσωση, όπως διαπιστώνεται, είναι ίδια με την εξίσωση 5.12 εάν θεωρηθεί ότι $\mathbf{y} = \mathbf{z}$, $\mathbf{S}_s = \mathbf{S}$, $\mathbf{K} = \mathbf{T}$ και $\mathbf{R}^* = \mathbf{R}$, αφού $\mathbf{L} = \mathbf{0}$.

5.8. Ιδιαιτερότητες προσομοίωσης μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής

Οι προσομοιώσεις μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής (transient state flow) είναι αναγκαίες, προκειμένου να αναλυθούν προβλήματα που εξαρτώνται από το χρόνο. Οι προσομοιώσεις αυτές παράγουν ομάδα φορτίων για κάθε χρονικό βήμα, ενώ οι προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης ροής (steady state flow) δημιουργούν μόνο μία ομάδα φορτίων.

Τα προβλήματα μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής είναι πολυπλοκότερα, για διάφορους λόγους, πέρα από την διαχείριση των δεδομένων. Συγκεκριμένα, απαιτούνται εξής ^[1]:

- Καθορισμό των χαρακτηριστικών της αποθηκευτικότητας του υδροφορέα. Επίσης, πρέπει να καθοριστούν οι αποθηκευτικότητες των υπό πίεση στρωμάτων, όταν η απελευθέρωση νερού από το απόθεμα είναι αξιόλογη.
- Επιπρόσθετο καθορισμό των συνοριακών συνθηκών, δηλαδή, τις αρχικές συνθήκες που δίνουν την διασπορά του φορτίου στον υδροφορέα στην αρχή της προσομοίωσης.
- Διακριτοποίηση της χρονικής και της χωρικής διάστασης.

Μεγάλο πρόβλημα στην επίλυση των μοντέλων μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής είναι και το γεγονός ότι οι υδρολογικές πιέσεις (π.χ. άντληση) μπορεί να επεκταθούν στα σχεδιασμένα υδραυλικά συνοριακά σχήματα του μοντέλου και να προκαλέσουν ασυμβιβάστότητα των συνοριακών συνθηκών.

5.8.1. Αρχικές συνθήκες

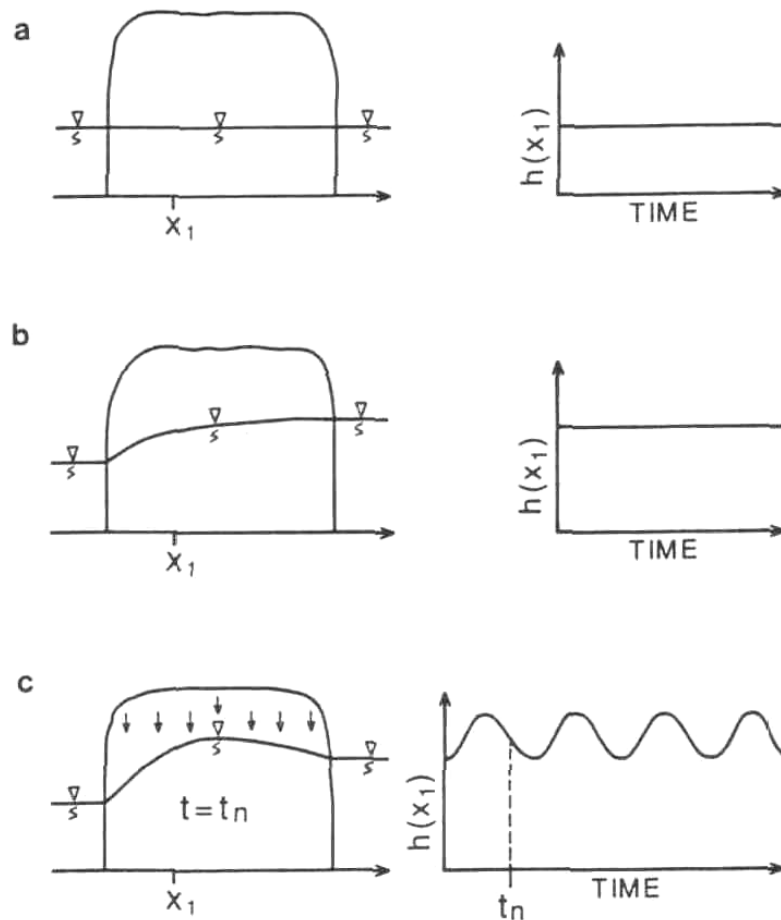
Οι αρχικές συνθήκες αναφέρονται στην διασπορά φορτίου παντού στο σύστημα στην αρχή της προσομοίωσης και γι' αυτό το λόγο είναι συνοριακές συνθήκες στον χρόνο. Είναι συνήθης τακτική να επιλέγεται ως αρχική συνθήκη μια λύση σταθερού φορτίου (σταθερή κατάσταση ροής) που προκύπτει από ένα βαθμονομημένο μοντέλο.

Δύο τύποι λύσεων σταθερής κατάστασης ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές συνθήκες ^[1]:

- στατική σταθερή κατάσταση, και
- σταθερή κατάσταση δυναμικού μέσου όρου.

Στο **Σχήμα 5.2** φαίνονται οι αρχικές συνθήκες για μονοδιάστατη ροή. Στα αριστερά διαγράμματα (σκίτσα) παριστάνεται η χωρική διακύμανση του φορτίου, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, και στα δεξιά η χρονική διακύμανση του φορτίου σε συγκεκριμένο σημείο.

Κάτω από συνθήκες "στατικής σταθερής κατάστασης ροής" (Σχήμα 5.2a), το φορτίο είναι σταθερό σε όλη την υπό μελέτη περιοχή και δεν υπάρχει καθόλου ροή νερού στο σύστημα. Δηλαδή, το φορτίο $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ είναι σταθερό χρονικά και χωρικά.



Σχήμα 5.2: Αρχικές συνθήκες για μονοδιάστατη ροή. α) Στατική σταθερή κατάσταση ροής. β) Σταθερή κατάσταση δυναμικού μέσου όρου. γ) Δυναμικές κυκλικές συνθήκες  ^[1] (Fig. 7.3).

Η "σταθερή κατάσταση δυναμικού μέσου όρου" (Σχήμα 5.2b) είναι η αρχική συνθήκη που χρησιμοποιείται συχνότερα. Κάτω από συνθήκες δυναμικού μέσου όρου το υδραυλικό φορτίο ποικίλει χωρικά και η ροή προς το σύστημα (input) ισούται με τη ροή από το σύστημα (output). Δηλαδή, το $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ είναι σταθερό μόνο χρονικά.

Επιπρόσθετα, στους δύο τύπους αρχικής συνθήκης σταθερής κατάστασης που αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της μεταβατικής επίλυσης για να δημιουργηθούν οι "δυναμικές κυκλικές αρχικές συνθήκες" (dynamic cyclic initial conditions, Σχήμα 5.2c). Οι συνθήκες αυτές αποτελούνται από μία ομάδα υδραυλικών φορτίων που παριστάνουν κυκλικές αυξομειώσεις του επιπέδου του νερού.

Για παράδειγμα, ο κύκλος μπορεί να αντιπροσωπεύει μηνιαίες αυξομειώσεις φορτίου για σειρά ετών. Επειδή όλα τα έτη είναι ίδια, ο κάθε κύκλος αποτελείται από

μια πανομοιότυπη ομάδα τιμών φορτίου, μεταβαλλόμενου χρονικά και χωρικά. Έτσι τα φορτία του Ιανουαρίου είναι τα ίδια για κάθε κύκλο, όπως και τα φορτία του Φεβρουαρίου και το ίδιο συνεχίζεται μέχρι τον Δεκέμβριο.

Η αρχική συνθήκη είναι "δυναμική" επειδή τα φορτία αλλάζουν μηνιαίως και "σταθερής κατάστασης", επειδή ο κύκλος ως σύνολο είναι σε σταθερή κατάσταση. Το μέσο μηνιαίο φορτίο για ένα συγκεκριμένο μήνα δεν αλλάζει με το χρόνο, παρόλο που τα φορτία αλλάζουν από μήνα σε μήνα εντός ενός μέσου έτους.

Μία άλλη εναλλακτική λύση, κατά την επιλογή της αρχικής διασποράς φορτίου για την μεταβαλλόμενη προσομοίωση, είναι να χρησιμοποιηθεί μια αυθαίρετα καθορισμένη διασπορά και στη συνέχεια να επιλύεται το μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής, μέχρι τα αποτελέσματα του να συμφωνήσουν, κατά το δυνατό, με πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Τα βαθμονομημένα αυτά φορτία χρησιμεύουν ως αρχικές συνθήκες στις προσομοιώσεις πρόβλεψης [114].

Το σκεπτικό πίσω από την παραπάνω επιλογή αρχικών συνθηκών είναι ότι η επίδραση των αρχικών συνθηκών μειώνεται καθώς προχωράει η προσομοίωση, οπότε σφάλματα που σχετίζονται με πιθανή εσφαλμένη επιλογή αρχικών συνθηκών θα είναι μικρά, εάν έχει παρέλθει επαρκής χρόνος προσομοίωσης [1].

5.8.2. Συνοριακές συνθήκες

Στις μεταβαλλόμενες προσομοιώσεις είναι σημαντικό να ρυθμιστεί ο τρόπος με τον οποίο θα εκφράζονται τα αποτελέσματα στα συνοριακά σχήματα. Οι συνοριακές συνθήκες συχνά επιλέγονται για να επιτύχουν βαθμονόμηση σταθερής κατάστασης δυναμικού μέσου όρου, η οποία χρησιμοποιείται μετά ως αρχική συνθήκη για τη μεταβαλλόμενη προσομοίωση. Είναι αναγκαίο λοιπόν να ελεγχθεί αν οι δυνάμεις που εφαρμόζονται στο σύστημα κατά τη μεταβαλλόμενη προσομοίωση, θα μεταδοθούν στα συνοριακά σχήματα της μοντελοποιούμενης περιοχής [1].

Σε πολλές εφαρμογές μοντελοποίησης, είναι αδύνατο να σχεδιαστούν οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου σε φυσικά συνοριακά σχήματα του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση, οι υδραυλικές συνθήκες τοποθετούνται ως συνοριακά σχήματα της προβληματικής περιοχής.

Οι συνοριακές συνθήκες μη ροής πρέπει να σχεδιάζονται μακριά από το κέντρο του πλέγματος, για να προσομοιάσουν τις μεταβατικές επιδράσεις της άντλησης. Σε

αυτή την περίπτωση, τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι μεταβολές στο φορτίο (πτώση στάθμης) σαν αποτέλεσμα της άντλησης και όχι απόλυτες τιμές φορτίου.

Οι αρχικές συνθήκες σταθερής κατάστασης επιλέγονται, όπου τα φορτία καθορίζονται ίσα, σε κάποια αυθαίρετη αναφορά φορτίου, π.χ. το μηδέν. Εναλλακτικά, άλλοι τύποι συνοριακών συνθηκών επιλέγονται για να παράγουν αρχικές συνθήκες σταθερής κατάστασης δυναμικού μέσου όρου. Και σε αυτή την περίπτωση, τα συνοριακά σχήματα τοποθετούνται μακριά από το κέντρο του πλέγματος, στο οποίο υπάρχει άντληση. Αυτές οι προσομοιώσεις της πτώσης στάθμης είναι πολύτιμες μόνο όταν δεν επηρεάζουν την άντληση [1].

5.8.3. Διακριτοποίηση του χρόνου

Στη σταθερή κατάσταση ροής, το φορτίο είναι ανεξάρτητο του χρόνου, έτσι ώστε η ταχύτητα ροής να είναι συνάρτηση μόνο του χώρου. Αντίθετα, στο ομοίωμα μεταβαλλόμενης ροής ο ολικός χρόνος προσομοίωσης διαιρείται σε περιόδους τάσης και χρονικά βήματα.

Η επιλογή του χρονικού βήματος (Δt) και η δομή του πλέγματος είναι κρίσιμες παράμετροι στο σχεδιασμό του μοντέλου, επειδή οι τιμές των διαστημάτων και του χρονικού βήματος επηρεάζουν σημαντικά τα αριθμητικά αποτελέσματα. Είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται μικρά διαστήματα ανάμεσα στους κόμβους και μικρά χρονικά βήματα, έτσι ώστε η αριθμητική προσομοίωση να προσεγγίζει καλύτερα την επιμέρους διαφορική εξίσωση [1].

Τα χρονικά βήματα μπορεί επίσης να επηρεάζονται από τις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου κώδικα. Για παράδειγμα, η εξίσωση μη κορεσμένης ροής υπόκειται σε αριθμητικές αστάθειες που μπορεί να οδηγήσουν το μοντέλο να μετρήσει τιμές μη ρεαλιστικών περιοδικών μεταβολών του υδραυλικού φορτίου.

Οι αριθμητικές περιοδικές μεταβολές μπορούν συνήθως να εμποδιστούν μειώνοντας το χρονικό βήμα. Οι κώδικες της υπόγειας ροής είναι λιγότερο επιρρεπείς στην αριθμητική αστάθεια. Ωστόσο, είναι καλή πρακτική μοντελοποίησης να γίνουν μερικές προσπάθειες να "τρέξει" το μοντέλο χρησιμοποιώντας διαφορετικά Δt [1].

Όπως είναι επιθυμητό να χρησιμοποιείται μικρό διάστημα μεταξύ των κόμβων, είναι εξίσου επιθυμητό να χρησιμοποιείται και μικρό χρονικό βήμα. Παρόλα αυτά

συνήθως δεν είναι πρακτικό να χρησιμοποιούνται εξαιρετικά μικρά χρονικά βήματα, καθώς τότε απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι επίλυσης του μοντέλου.

Σωστός καθορισμός του αρχικού χρονικού βήματος επιτρέπει την αποσαφήνιση της μορφής της κύριας εξίσωσης. Αυτό το χρονικό βήμα μερικές φορές καλείται **κρίσιμο βήμα** (Δt_c). Για τη δισδιάστατη μορφή της κύριας εξίσωσης, χρησιμοποιώντας ένα κανονικό πλέγμα ($\Delta x = \Delta y = \alpha$) και θεωρώντας έναν ομογενή και ισότροπο υδροφόρο σχηματισμό, ισχύει:

$$\Delta t_c = \frac{S \cdot \alpha^2}{4 \cdot T} \quad (5.19)$$

Έτσι, το Δt_c είναι δυνατό να προσεγγιστεί από την σχέση 5.19 επιλέγοντας αντιπροσωπευτικό κελί με διάσταση στοιχείου α , και ιδιότητες στοιχείου S (αποθηκευτικότητα) και T (μεταβιβαστικότητα).

Τα χρονικά βήματα αυξάνονται τυπικά ως γεωμετρική πρόοδος, με αναλογία 1,2 έως και 1,5. Σύμφωνα με τον De Marsily (1986), η τετραγωνική ρίζα του 2 είναι συχνά μία καλή αρχική επιλογή.

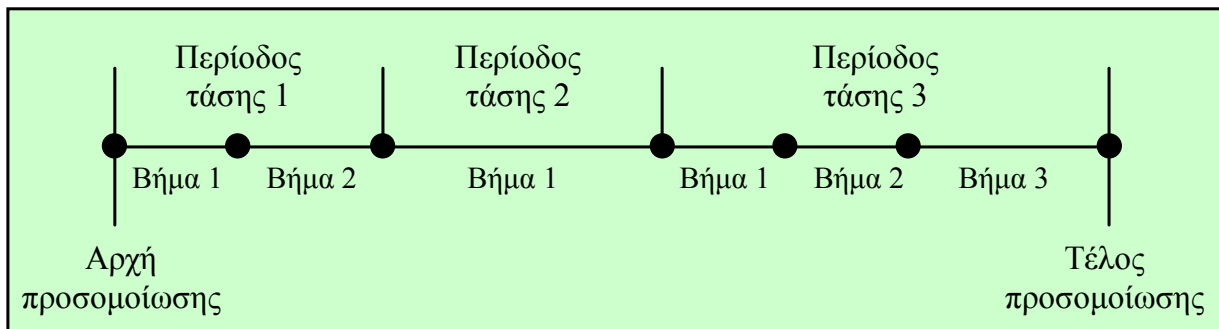
Το ModFlow, για να αυξάνεται το Δt ως γεωμετρική πρόοδος, χρησιμοποιεί έναν πολλαπλασιαστή (**TSMULT**). Ο κώδικας υπολογίζει το αρχικό χρονικό βήμα, **DELT(1)**, εφαρμόζοντας την ακόλουθη σχέση:

$$\text{DELT}(1) = \frac{\text{PERLEN} \cdot (1 - \text{TSMULT})}{1 - \text{TSMULT} \cdot \text{NSTP}} \quad (5.20)$$

όπου, **PERLEN** χρονικό εύρος της περιόδου τάσης, και
NSTP αριθμός χρονικών βημάτων αυτής.

Οι περισσότεροι κώδικες ροής επιτρέπουν στον χρήστη την επιλογή της διακριτοποίησης της περιόδου προσομοίωσης σε "μπλοκ χρόνου", διαφόρων μηκών. Αυτά τα μικρότερα χρονικά μπλοκ είναι γνωστά στο ModFlow ως "περίοδοι τάσης" (stress periods). Περίοδος τάσης μπορεί γενικά να λεχθεί ότι είναι το χρονικό εκείνο διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου όλες οι εξωτερικές τάσεις (π.χ. ρυθμοί άντλησης) παραμένουν σταθερές.

Κάθε περίοδος τάσης διαιρείται με τη σειρά της σε ένα ή περισσότερα χρονικά βήματα (time steps), όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Η διακριτοποίηση αυτή του χρόνου παριστάνεται γραφικά στο **Σχήμα 5.3**.



Σχήμα 5.3: Διακριτοποίηση του χρόνου ^[127].

Η χρήση των περιόδων τάσης προσφέρει στον χρήστη την δυνατότητα της αλλαγής μερικών παραμέτρων ή τάσεων, ενώ η προσομοίωση βρίσκεται σε εξέλιξη ^[1]. Έτσι, στο ModFlow υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με τις συνοριακές συνθήκες εξαρτημένου φορτίου στα υπολογιστικά "πακέτα" του ποταμού, της αποστράγγισης, της εξατμισοδιαπνοής και του γενικού συνοριακού φορτίου (GBH). Επίσης, είναι δυνατές αλλαγές και στους ρυθμούς επανατροφοδότησης (πακέτο επανατροφοδότησης) και στους ρυθμούς άντλησης (πακέτο γεωτρήσεων).

Ο πολλαπλασιαστής του χρονικού βήματος (TSMULT) μπορεί να ανανεώνεται στην αρχή κάθε περιόδου τάσης και ένα νέο αρχικό Δt υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σχέση 5.19.

5.9. Εκτέλεση μοντέλου και διαδικασία βαθμονόμησής του

5.9.1. Επιλογή κώδικα

Κατά την επιλογή ενός κώδικα (προγράμματος) θα πρέπει να απαντηθούν τα ακόλουθα ερωτήματα ^[1]:

- 1) Η ακρίβειά του έχει επαληθευτεί για μία ή περισσότερες αναλυτικές λύσεις;
- 2) Περιλαμβάνει υπολογισμούς για το ισοζύγιο νερού;
- 3) Έχει χρησιμοποιηθεί σε άλλες μελέτες πεδίου;

Οι κώδικες για την υπόγεια ροή επαληθεύονται συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα με μία ή περισσότερες αναλυτικές επιλύσεις. Ο σκοπός της επαλήθευσης είναι να διαπιστωθεί αν η αριθμητική λύση είναι σχετικά απαλλαγμένη από σφάλματα ολοκλήρωσης, τα οποία οδηγούν σε ασταθείς λύσεις. Η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με την αναλυτική επίλυση εξαρτάται από την επιλογή του κριτηρίου σφάλματος, της διακριτοποίησης του πλέγματος και του χρονικού βήματος.

Ο υπολογισμός του ισοζυγίου νερού πρέπει να είναι τμήμα κάθε άσκησης μοντέλου. Το ισοζύγιο νερού περιλαμβάνει υπολογισμό ροής, κατά μήκος των συνοριακών συνθηκών, από και προς τις πηγές και τις δεξαμενές, και από τον υδροφορέα. Επίσης, δίνει πληροφορίες για τους ρυθμούς αποφόρτισης σε επιφανειακά σημεία, καθώς και για τους ρυθμούς επαναφόρτισης κατά μήκος της πιεζομετρικής επιφάνειας (water table).

5.9.2. Εισαγωγή στην διαδικασία εκτέλεσης

Η πρώτη εκτέλεση του μοντέλου απαιτεί εισαγωγή των δεδομένων, επίλυση του μοντέλου και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Υπάρχει περίπτωση κάποια από τα δεδομένα που θα εισαχθούν να εμπεριέχουν λάθη. Γι' αυτό το λόγο, οι πρώτες επιλύσεις του μοντέλου έχουν σκοπό να εντοπίσουν και να απομονώσουν αυτά τα λάθη.

Επίσης, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος, δηλαδή, να επιλυθεί το μοντέλο, πρέπει ο υπολογιστής που θα χρησιμοποιηθεί να είναι ανάλογων δυνατοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να έχει επαρκή μόνιμη και προσωρινή μνήμη, καθώς επίσης και ικανοποιητική ταχύτητα, έτσι ώστε το πρόγραμμα να μπορεί να "τρέξει" και να αποθηκεύσει μέσα σε εύγλωττο χρόνο τα δεδομένα και τα αποτελέσματα.

5.9.3. Κριτήρια σφάλματος

Τα προσομοιαζόμενα φορτία εμπεριέχουν σφάλματα που οφείλονται σε λάθη διακριτοποίησης ή ολοκλήρωσης. Τα λάθη που οφείλονται στην διακριτοποίηση, είτε του πλέγματος, είτε του χρόνου, αποτιμώνται ανεξάρτητα, κατά τα πρώτα στάδια της βαθμονόμησης.

Η επίδραση του μεγέθους του πλέγματος είναι δυνατό να καθοριστεί μεταβάλλοντας το μέγεθος του πλέγματος και επιλύοντας ("τρέχοντας") ξανά το

πρόγραμμα. Εξαιτίας της δυσκολίας αλλαγής του πλέγματος στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, η διαδικασία αυτή γίνεται σπάνια.

Η επίδραση της διακριτοποίησης του χρόνου στα μεταβαλλόμενα μοντέλα εντοπίζεται με την χρησιμοποίηση μικρότερων χρονικών βημάτων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένες τεχνικές επίλυσης έχουν όριο στο μέγεθος του χρονικού βήματος, με σκοπό να διασφαλίσουν μια σταθερή λύση. Εάν αυτό το όριο ξεπεραστεί, δημιουργούνται αθροιστικά λάθη, τα οποία οδηγούν σε αριθμητική αστάθεια [1].

Η ομάδα των αλγεβρικών εξισώσεων που αντιπροσωπεύει την εξίσωση ροής μπορεί να επιλυθεί απευθείας (άμεσα), χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις μεθόδους, πλαγίως (έμμεσα), χρησιμοποιώντας επανάληψη, ή ακόμα, με συνδυασμό άμεσων και έμμεσων μεθόδων.

Όταν στην επίλυση εμπλέκεται η επανάληψη, τότε δημιουργείται μία επιπρόσθετη πηγή λάθους, γνωστή ως "υπολειπόμενο λάθος επανάληψης" (iteration residual error). Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης διαμορφώνει το κριτήριο σφάλματος (error criterion), ή την ανοχή σφάλματος (error tolerance), ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση. Το υπολειπόμενο λάθος επανάληψης μειώνεται κατά την επανάληψη, έτσι ώστε η αλλαγή ανάμεσα στις επαναλήψεις επίσης να μειώνεται προοδευτικά.

Η επιλογή του κριτηρίου σφάλματος ελέγχει το μέγεθος του υπολειπόμενου λάθους επανάληψης (υπολειπόμενο σφάλμα) και επηρεάζει τον αριθμό των επαναλήψεων που σχηματίζονται για να προσεγγίσουν μια επίλυση εντός καθορισμένων ορίων. Η επανάληψη σταματάει όταν η αλλαγή στα φορτία μεταξύ των επαναλήψεων είναι μικρότερη από το κριτήριο σφάλματος που επιλέχθηκε από τον χρήστη.

Το υπολειπόμενο λάθος επανάληψης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για τα κριτήρια σφάλματος, τόσο για την επίλυση που αφορά τα φορτία, όσο και για την επίλυση του υδατικού ισοζυγίου [1].

α) Κριτήριο σφάλματος για τα φορτία

Η τιμή που επιλέγεται για το κριτήριο σφάλματος εξαρτάται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί η αλλαγή στην επίλυση μεταξύ των επαναλήψεων.

Η αλλαγή στα φορτία, ανάμεσα σε επιτυχημένες επαναλήψεις, υπολογίζεται πάντα για κάθε κόμβο.

Μερικοί κώδικες επιλέγουν την μεγαλύτερη απόλυτη διαφορά στα φορτία, ως μέτρο του υπολειπόμενου λάθους και την συγκρίνουν με το επιλεγμένο από τον χρήστη κριτήριο λάθους. Αυτός ο τρόπος ελέγχου του σφάλματος χρησιμοποιείται και από το ModFlow. Ο εμπειρικός κανόνας που εφαρμόζεται είναι ο εξής: Το κριτήριο σφάλματος θα πρέπει να είναι μία ή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερο από το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας στα αποτελέσματα των φορτίων. Στην ιδανική κατάσταση, το κριτήριο σφάλματος πρέπει να είναι μικρό για να διασφαλίζει ακριβή επίλυση.

Παρόλα αυτά, εάν το κριτήριο σφάλματος καθοριστεί πολύ μικρό, η ακρίβεια της αριθμητικής επίλυσης είναι δυνατόν να ξεπεραστεί. Τότε το μοντέλο θα προσεγγίσει μία τιμή του κριτηρίου, αλλά στην πραγματικότητα δεν θα την φτάσει ποτέ. Εάν το κριτήριο σφάλματος έχει καθορισθεί χαμηλότερο από την ακρίβεια της αριθμητικής επίλυσης, το υπολειπόμενο σφάλμα θα ταλαντεύεται γύρω από κάποια τιμή που είναι υψηλότερη από το κριτήριο σφάλματος. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται αυξάνοντας το κριτήριο σφάλματος σε αυτή την τιμή.

β) Κριτήριο σφάλματος για το υδατικό ισοζύγιο

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου της τιμής του υπολειπόμενου σφάλματος, κατά την επίλυση, είναι η σύγκριση των ολικών προσομοιαζόμενων εισροών και εκροών, όπως αυτές υπολογίζονται από το υδατικό ισοζύγιο. Στην προσομοίωση μεταβαλλόμενου φορτίου (μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής), η αποθήκευση και η απελευθέρωση νερού, προς και από τον υδροφόρο σχηματισμό, αντίστοιχα, συμπεριλαμβάνεται στο υδατικό ισοζύγιο.

Σε μερικούς κώδικες, όπως και στο ModFlow, περιοχές ή όγκοι κελιών που σχετίζονται με καθορισμένα κομβικά φορτία είναι δυνατόν να μην θεωρούνται τμήματα της περιοχής του προβλήματος, όσον αφορά τους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου. Έτσι, το ModFlow δεν επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει χωριστό κριτήριο σφάλματος για το υδατικό ισοζύγιο.

Πάντως, σε ιδανικές συνθήκες, το σφάλμα στο υδατικό ισοζύγιο πρέπει να είναι μικρότερο από 0,1%. Ένα σφάλμα γύρω στο 1% θεωρείται γενικά αποδεκτό [70].

Επιπροσθέτως, για τον έλεγχο της ακρίβειας της επίλυσης, η χρησιμοποίηση του υδατικού ισοζυγίου είναι ένας τρόπος καθορισμού των σφαλμάτων κατά το σχεδιασμό του μοντέλου. Για παράδειγμα, σφάλματα κατά την εισαγωγή των δεδομένων μεταβιβαστικότητας, πιθανόν να αντανakλώνται σε ασυνήθιστα υψηλές ή χαμηλές διακυμάνσεις ροής στο μοντέλο. Επίσης, σφάλματα κατά την εισαγωγή των παραμέτρων αποθηκευτικότητας θα αντανakλώνται στο υδατικό ισοζύγιο ως ασυνήθιστα μεγάλοι ή μικροί όγκοι νερού που αποθηκεύονται ή απελευθερώνονται από τον υδροφόρο σχηματισμό.

Η αποτυχία του μοντέλου να ολοκληρώσει την επίλυση ή το ενδεχόμενο να παρουσιάσει μια επίλυση με μεγάλο σφάλμα υδατικού ισοζυγίου, παραπέμπει σε ανακρίβειες κατά την εισαγωγή των δεδομένων ή υποδηλώνει ότι το θεωρητικό μοντέλο του συστήματος είναι λάθος. Ένα μεγάλο σφάλμα στο υδατικό ισοζύγιο μπορεί επίσης να σημαίνει, είτε ότι η αριθμητική επίλυση είναι ανακριβής, εξαιτίας του ότι η τιμή του κριτηρίου σφάλματος είναι πολύ μεγάλη, είτε ότι η επίλυση αποτυγχάνει να συγκλίνει (converge) εντός του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων που καθορίστηκαν από τον χρήστη.

5.9.4. Διαδικασία βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση του μοντέλου ροής δηλώνει την ικανότητά του να παράγει τιμές που αντιπροσωπεύουν πραγματικές μετρήσεις (υπαίθρου) φορτίου και ροών. Η διαδικασία ολοκληρώνεται αφού βρεθεί μια ομάδα παραμέτρων, συννοριακών συνθηκών και τάσεων που προσομοιάζουν φορτία και ροές, τα οποία ταιριάζουν με τιμές μετρημένες στην ύπαιθρο, εντός ενός προκαθορισμένου εύρους σφάλματος.

Καθορίζοντας αυτή την ομάδα τιμών ξεκινάει η επίλυση του "αντίστροφου προβλήματος" (inverse problem). Στο αντίστροφο πρόβλημα το ζητούμενο είναι ο καθορισμός τιμών των παραμέτρων και των υδρολογικών τάσεων από πληροφορίες σχετικές με τα φορτία. Αντίθετα, στο "απευθείας πρόβλημα" (forward problem) πρώτα καθορίζονται οι τιμές των παραμέτρων (υδραυλική αγωγιμότητα, ειδική αποθηκευτικότητα) και των υδρολογικών τάσεων (ρυθμός επανατροφοδότησης) και στη συνέχεια το μοντέλο υπολογίζει φορτία ^[1].

Τα περισσότερα θεωρητικά προβλήματα αντιμετωπίζονται απευθείας, ενώ τα πραγματικά προβλήματα (υπαίθρου) απαιτούν την επίλυση του αντίστροφου

προβλήματος. Η επιπλοκή που παρουσιάζεται στα προβλήματα ροής του υπόγειου νερού έχει να κάνει με το ότι οι πληροφορίες σχετικά με τη διασπορά των φορτίων είναι πάντοτε ημιτελείς.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιείται, τόσο σε σταθερή, όσο και σε μεταβαλλόμενη κατάσταση ροής. Σε μερικές υδρογεωλογικές καταστάσεις πιθανόν να είναι ακατάλληλο να θεωρούνται σταθερές συνθήκες, όταν υπάρχουν μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις στις υδατικές στάθμες ή όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα σταθερών συνθηκών. Σε αυτή την περίπτωση, το μοντέλο πρέπει να βαθμονομείται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ^[1].

Σε μεταβαλλόμενες συνθήκες οι τιμές βαθμονόμησης πρέπει να λαμβάνονται, είτε από τα υδρογραφήματα των γεωτρήσεων, είτε από τις στάθμες νερού κατά την διάρκεια παραγωγής του υδροφορέα (στάθμες άντλησης). Ο συνηθέστερος τύπος βαθμονόμησης μοντέλου μεταβαλλόμενης ροής ξεκινάει την προσομοίωση από μία ήδη βαθμονομημένη επίλυση σταθερών συνθηκών ^[1].

Για παράδειγμα, οι αρχικές συνθήκες (initial conditions) για την εν λόγω βαθμονόμηση (μεταβαλλόμενης ροής) είναι δυνατόν να αντιπροσωπεύουν τις σταθερές συνθήκες πριν την εκμετάλλευση του υδροφορέα. Το μοντέλο στη συνέχεια βαθμονομείται με βάση μία χρονική σειρά αλλαγών στις στάθμες νερού που προκαλούνται από την άντληση.

Εναλλακτικά, το μοντέλο είναι δυνατό να βαθμονομηθεί για ένα καθορισμένο χρονικό σημείο που αντιπροσωπεύει μετρήσεις (υπαίθρου) πιεζομετρικής επιφάνειας ή ομάδα υδρογραφημάτων. Οι αρχικές συνθήκες καθορίζονται αυθαίρετα και το μοντέλο επιλύεται μέχρι να επιτευχθούν οι στόχοι βαθμονόμησης. Θεωρείται ότι, οι τιμές των αρχικών συνθηκών δεν επηρεάζουν την επίλυση.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής και ο έλεγχος επαλήθευσης είναι αναγκαίες ενέργειες για την βαθμονόμηση των τιμών της αποθηκευτικότητας που απαιτούνται για πρόβλεψη. Υπάρχουν δύο τρόποι για να βρεθούν οι παράμετροι βαθμονόμησης του μοντέλου, για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος ^[1]:

- 1) Ο μη αυτόματος καθορισμός των παραμέτρων, με την μέθοδο "trial and error".
- 2) Ο αυτόματος καθορισμός των παραμέτρων.

Η βαθμονόμηση με την μέθοδο "trial and error" ήταν η πρώτη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε και ακόμη προτιμάται από τους περισσότερους χρήστες.

Στα τέλη της δεκαετίας του '70 άρχισε να εφαρμόζεται ερευνητικά η χρήση των αυτόματων μεθόδων βαθμονόμησης. Οι προσπάθειες για να βρεθεί η καλύτερη μέθοδος για αυτόματη βαθμονόμηση δημιούργησαν σημαντικό όγκο συγγραμμάτων. Όμως, μόνο στις αρχές της δεκαετίας του '90 βρέθηκαν κώδικες που εισήγαγαν την αυτόματη βαθμονόμηση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα πλαίσιο, εντός του οποίου αναπτύσσεται το μοντέλο και αξιολογούνται τα αποτελέσματα βαθμονόμησης.

Πάντως, πριν την έναρξη της βαθμονόμησης του μοντέλου, είτε με τον ένα, είτε με τον άλλο τρόπο, είναι αναγκαία η συλλογή τιμών φορτίων και διακυμάνσεων στάθμης νερού ή άλλων δεδομένων βαθμονόμησης που καλούνται "πληροφορίες υπαίθρου". Επίσης, είναι αναγκαία η συλλογή και άλλων παραμέτρων που καλούνται "αρχικές πληροφορίες" ^[1].

Πληροφορίες υπαίθρου

Τις πληροφορίες υπαίθρου (ή τιμές βαθμονόμησης) τις αποτελούν μετρήσεις (πεδίου) φορτίων και διακυμάνσεων ροής. Αυτές οι τιμές πάντα συμπεριλαμβάνουν ένα σφάλμα, το οποίο πρέπει να ποσοτικοποιηθεί.

Η τιμή βαθμονόμησης, μαζί με το σχετιζόμενο με αυτή σφάλμα, συνιστούν τον "στόχο βαθμονόμησης" (calibration target). Οι στόχοι βαθμονόμησης πρέπει να καθοριστούν πριν την βαθμονόμηση του μοντέλου.

1) Μετρήσεις φορτίων:

Οι τιμές φορτίων αποτελούν πάντα τμήμα των πληροφοριών υπαίθρου. Σε κάθε τιμή βαθμονόμησης πρέπει να εκτιμηθούν οι πηγές σφάλματος, ενώ είναι αναγκαίο να ποσοτικοποιηθεί το μέγεθος του ολικού σφάλματος.

Οι μετρήσεις φορτίων μπορεί να αντανακλούν την παρουσία μεταβαλλόμενων επιδράσεων, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύονται στο μοντέλο. Επίσης, οι τιμές φορτίων εμπεριέχουν σφάλματα, τα οποία σχετίζονται με την ακρίβεια της συσκευής μέτρησης της στάθμης του νερού, τον ίδιο τον μετρητή και την ακρίβεια μέτρησης του υψομέτρου του σημείου έρευνας. Σε ιδανικές συνθήκες, το λάθος μέτρησης θα πρέπει να είναι της τάξης των λίγων εκατοντάδων ft. Παρόλα αυτά, η μελέτη μιας περιοχής μπορεί να περιέχει μεγαλύτερα λάθη, εξαρτώμενα από την ακρίβεια διεξαγωγής της έρευνας.

Άλλη πηγή σφαλμάτων προκαλείται από επιδράσεις κλίμακας. Για παράδειγμα, τα φορτία μπορεί να μετριοούνται σε γεωτρήσεις με μεγάλο μήκος φίλτρων, αλλά το μοντέλο να απαιτεί σημειακές τιμές. Οι τιμές φορτίων που υπολογίζονται ως ο μέσος όρος μεγάλου μήκους φίλτρων μπορεί να είναι κατάλληλες για τη βαθμονόμηση ενός δισδιάστατου μοντέλου, αλλά συνήθως δεν είναι αντιπροσωπευτικές για ένα τρισδιάστατο μοντέλο.

Υπάρχουν όμως σφάλματα στα φορτία που προκαλούνται κι από ένα άλλο είδος επιδράσεων κλίμακας: Τα κελιά του πλέγματος αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές των ιδιοτήτων του υδροφόρου ορίζοντα. Όμως, οι μετρήσεις φορτίων στην ύπαιθρο είναι δυνατόν να επηρεάζονται από μικρής κλίμακας ετερογένειες, οι οποίες δεν γίνονται αντιληπτές από το μοντέλο. Μία μη μοντελοποιημένη ετερογένεια προκαλεί σφάλμα στα φορτία που προκύπτουν κατά την προσομοίωση. Το μέγεθος αυτού του σφάλματος μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, εάν είναι γνωστά το εύρος του λογαρίθμου της υδραυλικής αγωγιμότητας και η συσχέτιση μεταξύ της οριζόντιας και της κάθετης διαπερατότητας της περιοχής ^[54].

Σε ιδανικές συνθήκες, οι τιμές βαθμονόμησης θα έπρεπε να συμπίπτουν με τους κόμβους, αλλά στην πράξη αυτό συμβαίνει σπάνια. Έτσι, εισάγονται σφάλματα παρεμβολής (interpolation errors), τα οποία προκαλούνται από τον υπολογισμό τιμών φορτίων στους κόμβους. Αυτός ο τύπος σφάλματος μπορεί να φτάσει τα 10 ft ή και περισσότερο ^[1].

Για την εξομάλυνση αυτών των σφαλμάτων θα πρέπει τα σημεία, των οποίων οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου, να παρουσιάζονται σε χάρτη σε σχέση με τους κόμβους. Τα φορτία και οι διακυμάνσεις ροής θα πρέπει επίσης να μετριοούνται σε μεγάλο αριθμό θέσεων και να είναι κανονικά κατανεμημένα σε όλη την περιοχή.

2) Διακυμάνσεις ροής:

Οι μετρήσεις υπαίθρου ροής, όπως η βασική ροή, η ροή πηγών, η κατείσδυση από ένα υδατόρεμα με απώλειες και η εξατμισοδιαπνοή από την πιεζομετρική επιφάνεια, μπορούν να επιλεγούν σαν τιμές βαθμονόμησης.

Οι υπολογισμοί της ροής σχετίζονται με σφάλματα, τα οποία συνήθως είναι μεγαλύτερα από αυτά που προέρχονται από τις μετρήσεις φορτίου. Παρόλα αυτά, είναι επιθυμητό να καθορίζονται τιμές βαθμονόμησης της ροής επιπρόσθετα στις τιμές των

φορτίων, ώστε να αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας μίας και μόνο βαθμονόμησης ^[1].

Για παράδειγμα, όταν βαθμονομείται ένα μοντέλο, μία αύξηση στην υδραυλική αγωγιμότητα προκαλεί το ίδιο αποτέλεσμα στα φορτία με την μείωση της επανατροφοδότησης. Αυτό καθιστά δυνατή την βαθμονόμηση ενός μοντέλου ως προς τα φορτία, μεταβάλλοντας την υδραυλική αγωγιμότητα ή την επανατροφοδότηση. Έτσι, η βαθμονόμηση των ροών προσφέρει ανεξάρτητο έλεγχο στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μερικοί ερευνητές χρησιμοποιούν και τις ταχύτητες ροής ^[38] ή τις παρατηρήσεις διασποράς ρύπων ^{[66],[67],[71],[76]} ως επιπρόσθετες πληροφορίες βαθμονόμησης του μοντέλου ροής.

Αρχικές (προκαταρκτικές) πληροφορίες

Επειδή οι τιμές των παραμέτρων του υδροφορέα και των υδρολογικών τάσεων είναι ουσιαστικά γνωστές σε λίγους μόνο κόμβους, η βαθμονόμηση του μοντέλου είναι γενικά δύσκολη εργασία. Επιπροσθέτως, ακόμη και αυτές οι τιμές περιέχουν ποσοστά σφάλματος. Εάν οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο δεν συμβαδίζουν με τις τιμές που μετριοούνται στην ύπαιθρο, το αποτέλεσμα θα είναι εσφαλμένη περιγραφή του συστήματος.

Οι συνοριακές συνθήκες είναι επίσης αβέβαιες, ειδικά στην περίπτωση που οι συνθήκες αυτές δεν ανταποκρίνονται στις φυσικές συνοριακές συνθήκες του υδροφορέα. Γενικά, η χρήση καθορισμένων συνοριακών συνθηκών φορτίων βοηθάει στη βαθμονόμηση του μοντέλου, αφού αυτός ο τύπος συνοριακών συνθηκών εφοδιάζει το μοντέλο με αριθμητικά βαθμονομημένα σημεία ^[1].

Οι αρχικές πληροφορίες για την υδραυλική αγωγιμότητα ή / και την μεταβιβαστικότητα και την αποθηκευτικότητα, λαμβάνονται συνήθως από τις δοκιμαστικές αντλήσεις. Οι αντίστοιχες πληροφορίες για την αποφόρτιση του υδροφορέα, λαμβάνονται από μετρήσεις υπαίθρου ροών των πηγών ή της βασικής ροής. Απευθείας μετρήσεις επανατροφοδότησης δεν είναι συνήθως δυνατές, αλλά είναι δυνατόν να καθοριστεί ένα εύλογο εύρος τιμών.

Πρέπει επίσης να αποτιμάται, δηλαδή να ποσοτικοποιείται, η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων του υδροφορέα, καθώς και

των συνοριακών συνθηκών. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα που σχετίζεται με κάθε κομμάτι των προκαταρκτικών πληροφοριών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η "σταθερά απόκλισης" ($\text{coefficient variation} = \text{standard deviation} / \text{expected value}$) [1].

Τεχνικές βαθμονόμησης

Ο καθορισμός των παραμέτρων είναι ουσιαστικά συνώνυμο της βαθμονόμησης του μοντέλου, η οποία αντιστοιχεί στην επίλυση του "αντίστροφου προβλήματος". Το **kriging** είναι μέθοδος καθορισμού της χωρικής κατανομής των παραμέτρων (ή των φορτίων), αλλά είναι γενικά αποδεκτό ότι η διαδικασία αυτή θα πρέπει να συνδυάζεται με την αντίστροφη επίλυση. Κι αυτό γιατί η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τον καθορισμό της μεταβιβαστικότητας μπορεί να μειωθεί σημαντικά, όταν οι πληροφορίες σχετικά με την κατανομή των φορτίων χρησιμοποιηθούν στον καθορισμό των μεταβιβαστικότητων.

Με άλλα λόγια, είναι δυνατό να επιτευχθεί καλύτερος καθορισμός των παραμέτρων του υδροφορέα όταν οι πληροφορίες, τόσο του πεδίου, όσο και οι προκαταρκτικές, χρησιμοποιούνται στην ανάλυση.

Επιλύοντας το αντίστροφο πρόβλημα με την μέθοδο "trial and error", κατά την τελική επιλογή παραμέτρων δεν διατίθεται καμία πληροφορία για τον βαθμό αβεβαιότητας, ούτε καμία εγγύηση ότι επιλέχθηκε η στατιστικά καλύτερη επίλυση. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας την αυτόματη μέθοδο επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος επιτυγχάνεται, τόσο ποσοτικοποίηση της παραμέτρου αβεβαιότητας, όσο και η στατιστικά καλύτερη επίλυση, με βάση τα δεδομένα εισαγωγής.

1) Βαθμονόμηση "trial and error":

Στην βαθμονόμηση αυτή (σε ελεύθερη απόδοση μπορεί να μεταφραστεί ως "συνεχείς επιλύσεις για τον εντοπισμό σφαλμάτων") καθορίζονται για κάθε κόμβο του πλέγματος οι αρχικές τιμές των παραμέτρων.

Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης, οι τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται από τις συνεχόμενες επιλύσεις του μοντέλου, με σκοπό τη σύγκλιση των υπολογιζόμενων τιμών φορτίων και ροών με τις τιμές των στόχων βαθμονόμησης [1].

Πριν την βαθμονόμηση, το εύρος της αβεβαιότητας για κάθε τιμή παραμέτρου πρέπει να ποσοτικοποιηθεί. Μερικές παράμετροι είναι δυνατό να έχουν μεγάλο βαθμό

βεβαιότητας και γι' αυτό να μεταβάλλονται ελάχιστα ή και καθόλου κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης. Τα αποτελέσματα από κάθε επίλυση του μοντέλου συγκρίνονται με τους στόχους βαθμονόμησης, μεταβάλλονται όλες ή κάποιες επιλεγμένες παράμετροι ή / και συννοριακές συνθήκες και τελικά μια καινούργια βαθμονόμηση ξεκινάει.

Για να βαθμονομηθεί το μοντέλο χρειάζονται γενικά από δεκάδες έως εκατοντάδες "τρεξίματα" (επιλύσεις). Οι Maclay και Land (1988) κατέγραψαν 300 προσομοιώσεις μέχρι να επιτύχουν βαθμονόμηση.

Η "trial and error" βαθμονόμηση μπορεί να δώσει περισσότερες από μία αποδεκτές επιλύσεις, καθώς διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων οδηγούν ουσιαστικά σε ίδιες κατανομές φορτίων. Για παράδειγμα, ο Freyberg (1988) ανέφερε εννέα (9) διαφορετικές αποδεκτές βαθμονομήσεις, για μία ομάδα τιμών βαθμονόμησης.

Ένας μεγάλος αριθμός κανονικά κατανεμημένων στόχων βαθμονόμησης, από τους οποίους ο καθένας συμπεριλαμβάνει το ανάλογο σφάλμα, αυξάνουν την πιθανότητα να προκύψει μία μοναδική βαθμονόμηση. Αυτή η πιθανότητα αυξάνεται και όταν χρησιμοποιούνται μετρήσεις ροών ως στόχοι βαθμονόμησης [1].

Επειδή, η εν λόγω μέθοδος δεν ποσοτικοποιεί στατιστικά την αβεβαιότητα ή την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, η διαδικασία βαθμονόμησης θα πρέπει να ακολουθείται από λεπτομερή "ανάλυση ευαισθησίας" (sensitivity analysis).

2) Αυτόματη βαθμονόμηση:

Η αυτόματη επίλυση του αντίστροφου προβλήματος απαιτεί τη χρήση εξαιρετικά ανεπτυγμένων κωδικών που χρησιμοποιούν, είτε άμεσες, είτε έμμεσες, προσεγγίσεις.

Στην άμεση επίλυση οι άγνωστες παράμετροι έχουν τη θέση των εξαρτημένων μεταβλητών στην βασική εξίσωση και τα φορτία αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γίνει εισαγωγή τιμών φορτίων για όλους τους κόμβους. Τα φορτία όμως είναι γνωστά μόνο σε σημεία που υπάρχουν γεωτρήσεις παρατήρησης. Έτσι, είναι αναγκαίος ο καθορισμός φορτίου σε όλη την έκταση του πλέγματος, διαδικασία που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας συνήθως τη μέθοδο kriging.

Η εν λόγω επίλυση ελαχιστοποιεί το κομβικό σφάλμα του ισοζυγίου μάζας που προκαλείται από τα παραπάνω φορτία και από τις τιμές των παραμέτρων. Όμως, οι άμεσες επιλύσεις είναι ασταθείς, ενώ δεν αναγνωρίζουν μετρήσεις σφαλμάτων [1].

Η έμμεση προσέγγιση είναι παρόμοια με τις βαθμονομήσεις "trial and error", με το πρόβλημα να λύνεται επαναλαμβανόμενο. Παρόλα αυτά, ένας αντίστροφος κώδικας ελέγχει αυτόματα την επίλυση φορτίων και μεταβάλλει τις παραμέτρους με ένα συστηματικό τρόπο, με σκοπό να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση.

Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων, μέσω ελέγχου των διαφορών μεταξύ των προσομοιαζόμενων και των παρατηρούμενων πιεζομετρικών φορτίων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιήσουν τις αντικειμενικές συναρτήσεις συχνά βασίζονται στην κατανομή των Gauss – Newton ή στην "βαθμιαία έρευνα μεθόδων" (gradient search methods).

Αν και περισσότερο σταθερές από τις άμεσες επιλύσεις, οι έμμεσες είναι δυνατόν να παρουσιάσουν αστάθεια και να δώσουν μη λογικά αποτελέσματα. Η αστάθεια μπορεί να ελεγχθεί με κατάλληλο χωρισμό ζωνών που αφορά τις παραμέτρους του υδροφορέα ^[1].

Επίσης, η αστάθεια μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας τις προκαταρκτικές πληροφορίες για να ορισθούν όρια στις τιμές των παραμέτρων. Όταν οι προκαταρκτικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων, η προσομοίωση καλείται συνεχής. Στις ασυνεχείς προσομοιώσεις η αβεβαιότητα στις τιμές των παραμέτρων στα σημεία μέτρησης, ή κοντά σε αυτά, είναι ίδια με την αβεβαιότητα σε περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη μετρήσεων ^[1].

Κώδικας που παρέχει αυτόματη τρισδιάστατη επίλυση του αντίστροφου προβλήματος είναι και το ModFlow.

Αξιολόγηση βαθμονόμησης

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης πρέπει να αξιολογούνται, τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά. Η απόφαση για το αν το μοντέλο ταιριάζει με την πραγματικότητα παραμένει σε μεγάλο βαθμό υποκειμενική. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και λιγότερο υποκειμενικοί τρόποι αξιολόγησης της βαθμονόμησης.

Η σύγκριση μεταξύ των ισοπιεζομετρικών καμπυλών που προκύπτουν από τις πραγματικές μετρήσεις και από την προσομοίωση οδηγεί σε ένα οπτικό – ποιοτικό μέτρο του βαθμού ομοιότητάς τους και δίνει μια πρώτη ιδέα για τη χωρική κατανομή του σφάλματος. Η κατασκευή πίνακα με τα μετρούμενα φορτία, τα προσομοιαζόμενα

φορτία και τις αντίστοιχες διαφορές τους, είναι ένας συνήθης τρόπος καταγραφής των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης.

Ο μέσος όρος των παραπάνω διαφορών χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιηθεί το "μέσο σφάλμα" στην βαθμονόμηση. Η παράμετρος ελαχιστοποίησης αυτού του σφάλματος καλείται "κριτήριο βαθμονόμησης" (calibration criterion).

Υπάρχουν τρεις τρόποι για να εκφραστεί η μέση διαφορά μεταξύ των προσομοιαζόμενων και των μετρούμενων φορτίων [1]:

- 1) Το μέσο σφάλμα (Mean Error, **ME**) είναι η μέση διαφορά μεταξύ των μετρούμενων φορτίων ($\mathbf{h}_m$) και των προσομοιαζόμενων φορτίων ($\mathbf{h}_s$). Το μέσο σφάλμα εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{h}_m - \mathbf{h}_s)_i \quad (5.21)$$

όπου, n πλήθος τιμών βαθμονόμησης.

- 2) Το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, **MAE**) είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των διαφορών των μετρούμενων και προσομοιαζόμενων φορτίων. Δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(\mathbf{h}_m - \mathbf{h}_s)_i| \quad (5.22)$$

- 3) Η τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (Root Mean Squared Error, **RMS**) ή σταθερή απόκλιση (Standard Deviation) είναι ο μέσος όρος των τετραγώνων των διαφορών των μετρούμενων και προσομοιαζόμενων φορτίων. Το κριτήριο αυτό είναι όμοιο με την παράμετρο του σταθερού σφάλματος (Standard Error, **SE**) και εκφράζεται από την σχέση:

$$\mathbf{RMS} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{h}_m - \mathbf{h}_s)_i^2 \right]^{0.5} \quad (5.23)$$

Η επιλογή του κριτηρίου βαθμονόμησης είναι δυνατό να επηρεάσει τις τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για το βαθμονομημένο μοντέλο. Το **ME** συμπεριλαμβάνει τόσο τις αρνητικές, όσο και τις θετικές διαφορές μεταξύ μετρούμενων

και προσομοιαζόμενων φορτίων, οι οποίες είναι δυνατόν να αλληλοεξουδετερώνονται. Έτσι, ένα μικρό μέσο σφάλμα δεν υποδηλώνει απαραίτητα μία καλή βαθμονόμηση.

Το **RMS** συνήθως θεωρείται η καλύτερη μέτρηση του σφάλματος, εάν τα σφάλματα είναι κανονικά κατανεμημένα. Έτσι, θα πρέπει να ελέγχεται αν τα σφάλματα ακολουθούν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.

Είναι σημαντικό να υπογραμμισθεί ότι οι παραπάνω μετρήσεις σφάλματος μπορούν να αξιολογήσουν μόνο το μέσο σφάλμα του υπό βαθμονόμηση μοντέλου. Το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα συχνά καθορίζεται κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης, αν και κανονικά θα έπρεπε να καθορίζεται πριν από αυτή ^[1].

Η μέγιστη αποδεκτή τιμή του κριτηρίου βαθμονόμησης εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβολής των φορτίων σε όλη την υπό εξέταση περιοχή. Εάν η ποσοστιαία (%) αναλογία του **RMS** ως προς την ολική απώλεια φορτίου του συστήματος είναι μικρή, τότε τα σφάλματα αποτελούν ένα μικρό τμήμα της ολικής ανταπόκρισης του μοντέλου.

Επίπεδα βαθμονόμησης και κατανομή του σφάλματος

Προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης πρέπει να είναι γνωστό πόσο καλά ταιριάζει το βαθμονομημένο μοντέλο με τον κάθε στόχο βαθμονόμησης. Το επίπεδο βαθμονόμησης είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας σαν οδηγό τον **Πίνακα 5.1**.

Πίνακας 5.1: Επίπεδα βαθμονόμησης.

Επίπεδο 1	Οι υπολογιζόμενες τιμές βρίσκονται εντός των στόχων βαθμονόμησης (υψηλότερο επίπεδο βαθμονόμησης)
Επίπεδο 2	Οι υπολογιζόμενες τιμές βρίσκονται εντός του διπλάσιου συσχετιζόμενου σφάλματος των στόχων βαθμονόμησης
Επίπεδο 3	Οι υπολογιζόμενες τιμές βρίσκονται εντός του τριπλάσιου συσχετιζόμενου σφάλματος των στόχων βαθμονόμησης
Επίπεδο n	Οι υπολογιζόμενες τιμές βρίσκονται εντός του n-πλάσιου συσχετιζόμενου σφάλματος των στόχων βαθμονόμησης (χαμηλότερο επίπεδο βαθμονόμησης)

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι, σε ιδανικές συνθήκες, ολόκληρο το μοντέλο θα έπρεπε να βαθμονομείται στο επίπεδο 1. Στην πραγματικότητα όμως, τα επίπεδα βαθμονόμησης ποικίλουν χωρικά. Τα επίπεδα 2, 3 και n καθορίζονται χρησιμοποιώντας αντίστοιχους πολλαπλασιαστές για το συσχετιζόμενο σφάλμα των στόχων βαθμονόμησης και χρησιμοποιούνται για να απεικονιστούν εκείνα τα τμήματα του πλέγματος, στα οποία δεν ισχύει το επίπεδο 1 της βαθμονόμησης.

Δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι το μοντέλο που βαθμονομείται στο επίπεδο 1 θα έχει σαν αποτέλεσμα ένα αξιόπιστο ερμηνευτικό ή προβλεπτικό μοντέλο. Οι διαδικασίες βαθμονόμησης "trial and error" δεν δίνουν μοναδικές λύσεις και γι' αυτό το λόγο υπάρχει αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του μοντέλου. Η αυτόματη βαθμονόμηση, επίσης παράγει ομάδα δυνατών λύσεων.

Ενώ το αντικείμενο της βαθμονόμησης είναι να υποδηλώσει ότι το βαθμονομημένο μοντέλο μπορεί να αναπαράγει μετρήσεις φορτίων και ροών, το θεμελιώδες αντικείμενο της μοντελοποίησης είναι να παράγει ένα μοντέλο, το οποίο να μπορεί να προσομοιάσει με ακρίβεια τις μελλοντικές συνθήκες, χωρίς να υπάρχουν δεδομένα γι' αυτές. Δεδομένου ότι η βαθμονόμηση μπορεί να μην είναι μοναδική, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι το μοντέλο πρόβλεψης που κατασκευάστηκε θα παράγει ασφαλή αποτελέσματα, όταν αυτό έχει να αντιμετωπίσει συνθήκες διαφορετικές από αυτές της βαθμονόμησης. Λόγω αυτής της αβεβαιότητας, το βαθμονομημένο μοντέλο πρέπει να υπόκειται σε ανάλυση ευαισθησίας και, αν είναι δυνατόν, σε έλεγχο επαλήθευσης ^[1].

Ανάλυση ευαισθησίας και έλεγχος επαλήθευσης

Ο σκοπός της "ανάλυσης ευαισθησίας" (sensitivity analysis) είναι να ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα στο βαθμονομημένο μοντέλο, η οποία υπεισέρχεται από τα σφάλματα κατά τον καθορισμό των παραμέτρων του υδροφορέα, των μεταβολών και των συνοριακών συνθηκών.

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα στις εφαρμογές μοντελοποίησης, καθώς δεν υπάρχει αβεβαιότητα μόνο για τιμές των παραμέτρων που χρειάζονται στους υπολογισμούς, αλλά και στην γεωμετρία του ίδιου του συστήματος. "Οι αβεβαιότητες στη λιθολογία, στη στρωματογραφία και στην γεωλογική δομή

εισάγουν ένα επίπεδο δυσκολίας στη γεωτεχνική και υδρογεωλογική ανάλυση, το οποίο είναι τελείως άγνωστο σε άλλο σύστημα κανόνων μηχανικής" ^[51].

Κατά την διάρκεια της ανάλυσης ευαισθησίας, οι βαθμονομημένες τιμές για την υδραυλική αγωγιμότητα, την αποθηκευτικότητα, την επανατροφοδότηση και τις συνοριακές συνθήκες αλλάζουν συστηματικά, εντός ενός εύλογα καθορισμένου εύρους. Το μέγεθος των αλλαγών στα φορτία από την βαθμονομημένη λύση είναι ένα μέτρο της ευαισθησίας της λύσης στη συγκεκριμένη παράμετρο.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας αναφέρονται ως οι επιδράσεις της αλλαγής παραμέτρου στη μέση μέτρηση σφάλματος που επιλέγεται ως κριτήριο βαθμονόμησης. Σε ιδανικές συνθήκες, εξετάζεται επίσης η επίδραση της χωρικής διασποράς του υπολειπόμενου φορτίου ^[1].

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται αλλάζοντας μία τιμή παραμέτρου με το χρόνο. Οι επιδράσεις της αλλαγής δύο ή τριών παραμέτρων θα πρέπει να συνεξετάζονται, προκειμένου να καθορισθεί το μέγιστο εύρος δυνατών επιλύσεων.

Για παράδειγμα, η υδραυλική αγωγιμότητα και ο ρυθμός επανατροφοδότησης είναι δυνατόν να αλλάζουν μαζί, έτσι ώστε χαμηλές υδραυλικές αγωγιμότητες να χρησιμοποιούνται με υψηλούς ρυθμούς επανατροφοδότησης και αντίστροφα. Η ανάλυση ευαισθησίας δύναται επίσης να ελέγξει τις μεταβολές στις τιμές και άλλων παραμέτρων εκτός των φορτίων, όπως την ανισοτροπία.

Η επαλήθευση του μοντέλου βοηθάει στην απόκτηση μεγαλύτερης εμπιστοσύνης στη βαθμονόμηση. Σύμφωνα με τον Konikow (1978), ένα μοντέλο επαληθεύεται "εάν η ακρίβεια και η δυνατότητα πρόβλεψής του αποδεικνύεται, από ελέγχους ανεξάρτητους των δεδομένων βαθμονόμησης, ότι βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων σφάλματος". Ένας τρόπος για να επαληθευτεί το μοντέλο είναι να χρησιμοποιηθούν οι παράμετροι που καθορίστηκαν κατά την βαθμονόμηση για να γίνει μεταβαλλόμενη προσομοίωση (transient state), της οποίας τα αποτελέσματα να είναι δυνατόν να διασταυρωθούν με μετρήσεις πεδίου (υπαίθρου) ^[1].

Εάν το μοντέλο βαθμονομείται σε σταθερές συνθήκες (steady state), τότε η επαλήθευση γίνεται εισάγοντάς του ομάδα δεδομένων, ανεξάρτητων της βαθμονόμησης. Επιλύοντας το μοντέλο ξανά, διαφαίνεται η σύγκλιση μεταξύ μετρήσεων πεδίου και αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Αν ο βαθμός σύγκλισης είναι εκτός των αποδεκτών ορίων σφάλματος, τότε θα πρέπει το μοντέλο να επαναβαθμονομηθεί και να ακολουθήσει νέος έλεγχος επαλήθευσης με τον ίδιο τρόπο.

Η διαδικασία της επαλήθευσης θεωρείται ότι ολοκληρώνεται, όταν υπάρξει σύγκλιση μεταξύ των δεδομένων επαλήθευσης (μετρήσεις πεδίου) και των δεδομένων βαθμονόμησης (αποτελέσματα προσομοίωσης).

Δυστυχώς, είναι συχνά αδύνατο να επαληθευτεί ένα μοντέλο, επειδή στη διάθεση του χρήστη υπάρχει μόνο μία ομάδα δεδομένων, η οποία είναι απαραίτητη για τη βαθμονόμηση του. Ένα βαθμονομημένο αλλά όχι επαληθευμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιείται για προβλέψεις, εάν τα μοντέλα βαθμονόμησης και πρόβλεψης υπόκεινται σε ανάλυση ευαισθησίας και αξιολογούνται με προσοχή [1].

5.10. Πρόβλεψη

Σε μία προσομοίωση πρόβλεψης οι παράμετροι που καθορίζονται κατά την βαθμονόμηση και την επαλήθευση, χρησιμοποιούνται για να προβλεφθεί η αντίδραση του συστήματος σε μελλοντικά γεγονότα. Κάποια περιβαλλοντικά προβλήματα απαιτούν πρόβλεψη αυτής της αντίδρασης μέχρι και 10.000 έτη.

Ένα σημαντικό μέρος της μοντελοποίησης, με σκοπό την πρόβλεψη, είναι να καθοριστεί το χρονικό διάστημα για το οποίο το μοντέλο δίνει αξιόπιστες προβλέψεις. Ο βαθμός εμπιστοσύνης στις προσομοιώσεις πρόβλεψης εξαρτάται σημαντικά από τα αποτελέσματα βαθμονόμησης, ανάλυσης ευαισθησίας και ελέγχων επαλήθευσης. Ο χρήστης πρέπει να υπολογίζει τον χρονικό ορίζοντα για τον οποίο το μοντέλο έχει αξιολογηθεί, δηλαδή, υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα βαθμονόμησης [1].

Ο Faust προτείνει η προσομοίωση πρόβλεψης να μην εκτείνεται στο μέλλον περισσότερο από το διπλάσιο της περιόδου, για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα βαθμονόμησης [43]. Όμως, αυτό μπορεί να μην είναι δυνατό, εάν οι περιστάσεις απαιτούν εκτενέστερες χρονικά προσομοιώσεις.

Δύο είναι τα μεγαλύτερα προβλήματα, τα οποία πρέπει να αντιμετωπίζονται όταν γίνονται προβλέψεις [1]:

- η αβεβαιότητα στο μοντέλο βαθμονόμησης, και
- η αβεβαιότητα σχετικά με μελλοντικές υδρολογικές μεταβολές (stresses).

Το καθένα από τα παραπάνω προβλήματα απαιτεί για την αντιμετώπισή του διαφορετικό τύπο ανάλυσης ευαισθησίας.

Ακόμα και όταν το μοντέλο επαληθεύεται (από τον έλεγχο επαλήθευσης), η προσομοίωση μπορεί να μην αντανάκλα με ασφάλεια την συμπεριφορά του

συστήματος, όταν το μοντέλο υφίσταται νέες μεταβολές. Γι' αυτό θα πρέπει η ανάλυση ευαισθησίας να εφαρμόζεται τουλάχιστο μία φορά, με σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης της αβεβαιότητας στις παραμέτρους βαθμονόμησης.

Επιπροσθέτως, πολλές προσομοιώσεις πρόβλεψης απαιτούν αυθαίρετο καθορισμό (guesses) της πιθανότητας και του μεγέθους φυσικών ή τεχνητών υδρολογικών συμβάντων, όπως η μελλοντική επανατροφοδότηση ή οι μελλοντικοί ρυθμοί άντλησης. Επειδή τέτοιες πληροφορίες είναι γνωστές μόνο με αβεβαιότητα, στην προσομοίωση υπεισέρχονται καινούργια σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά εξηγούν, εν μέρει, γιατί οι επικριτές των εφαρμογών μοντελοποίησης ισχυρίζονται ότι τα μοντέλα δίνουν αναξιόπιστες προβλέψεις.

Σε μία ανάλυση ευαισθησίας για πρόβλεψη προσομοιάζονται αρκετές μεταβλητές για ένα συγκεκριμένο σενάριο. Για παράδειγμα, ελέγχεται η αντίδραση του συστήματος σε διαφορετικούς ρυθμούς άντλησης ή σε διαφορετικούς ρυθμούς επανατροφοδότησης. Τα αποτελέσματα φορτίων και πτώσης στάθμης για κάθε σενάριο πρέπει να καταγράφονται.

5.11. Μοντελοποίηση σε κατακερματισμένους υδροφόρους

σχηματισμούς

Τα μοντέλα που προαναφέρθηκαν είχαν ως σκοπό να προσομοιάσουν τη ροή σε πορώδη μέσα, τα οποία έχουν συνεχή και συνδεδεμένα κενά πόρων (ιδανική κατάσταση). Παρόλα αυτά, η ροή των υπόγειων νερών σε κατακερματισμένα πετρώματα (fractured media), ήταν πάντοτε και θα συνεχίσει να είναι αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος των Υδρογεωλόγων.

Κατακερματισμένα ανθρακικά πετρώματα, τέτοια όπως οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες, συνηθέστατα φιλοξενούν αξιόλογους υδροφόρους ορίζοντες, οι οποίοι είναι αναγκαίο να μελετηθούν προκειμένου να καθοριστεί η παρούσα αλλά και η μελλοντική συμπεριφορά τους (πρόβλεψη). Ο καθορισμός του θεωρητικού μοντέλου ενός κατακερματισμένου συστήματος απαιτεί, είτε χονδροειδή απλοποίηση, είτε λεπτομερή περιγραφή, των ιδιοτήτων του υδροφορέα που ελέγχουν τη ροή.

Ένας κατακερματισμένος σχηματισμός αποτελείται από στερεό βράχο με πρωτογενές πορώδες, ο οποίος κατακερματίζεται από μικρά και μεγάλα σπασίματα από ζώνες ρωγμάτωσης και διάτμησης, καθώς και από διάλυση των ανθρακικών

συστατικών του εξαιτίας της κυκλοφορίας νερού (καρστικοποίηση). Οι διαδικασίες αυτές οδηγούν στη δημιουργία δευτερογενούς πορώδους, το οποίο αντανακλά σε επιπλέον δίκτυο ροής (ασυνέχειες, καρστικοί αγωγοί) που συνήθως αποτελεί και το κύριο δίκτυο ροής του νερού [1].

Τα πυριγενή και τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα και οι αποθέσεις αργίλου τυπικά έχουν αρχικές περατότητες που ποικίλουν από 10^{-12} έως 10^{-16} cm^2 , ή υδραυλικές αγωγιμότητες από 10^{-8} έως 10^{-11} cm/sec [50]. Η δευτερογενής περατότητα μπορεί να αυξήσει την ενεργή υδραυλική αγωγιμότητα ενός συστήματος κατακερματισμένου βράχου μέχρι και πέντε (5) τάξεις μεγέθους, κάτι που εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και το πλήθος, το εύρος και την εσωτερική σύνδεση των ρωγματώσεων [53].

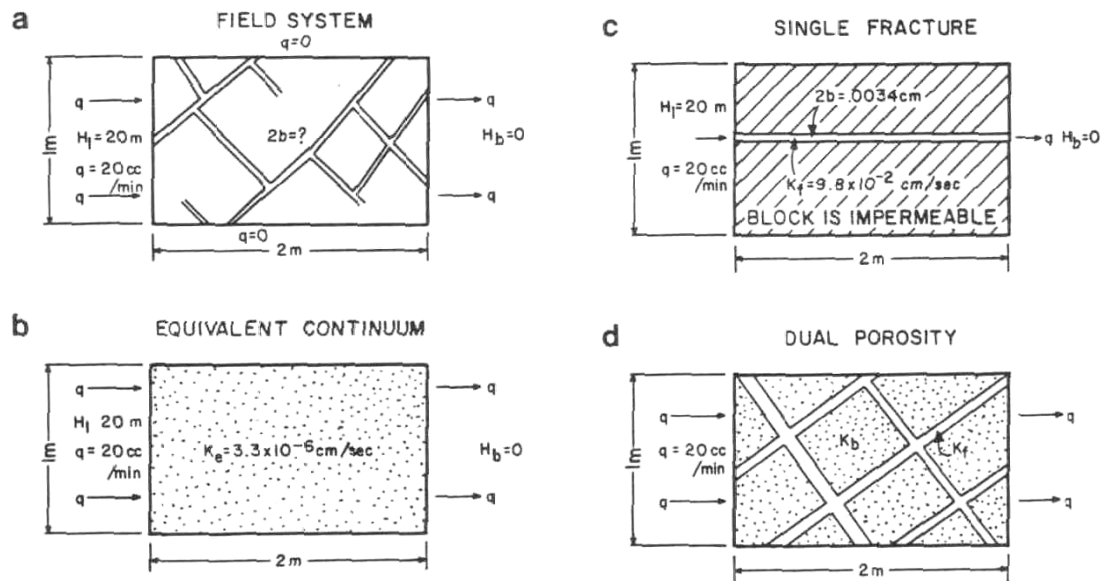
Εξαιρετικά μεγάλη μεταβολή στις υδραυλικές ιδιότητες του βράχου μπορεί να σημειωθεί όταν το δίκτυο ρωγματώσεων μεγαλώνει εξαιτίας της διάλυσης (καρστικοποίηση ανθρακικών σχηματισμών). Στην περίπτωση της ανάπτυξης του καρστ είναι δυνατόν να δημιουργηθούν κανάλια ροής.

Τέτοιοι σχηματισμοί εξετάζονται και στην παρούσα εργασία. Πρόκειται για ανθρακικά πετρώματα της γεωτεκτονικής υποζώνης "Τριπόλεως", ισχυρά καρστικοποιημένα, κατακερματισμένα και ρωγματωμένα και "Πλακώδεις ασβεστόλιθοι" με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Με εξαίρεση την περίπτωση του καρστ, στα κατακερματισμένα μοντέλα ροής θεωρείται ότι ο Νόμος του Darcy εφαρμόζεται γιατί τόσο η διάνοιξη των ρωγματώσεων, όσο και οι ταχύτητες ροής είναι μικρές. Τα κατακερματισμένα συστήματα μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα θεωρητικά μοντέλα [1]:

- ισοδύναμο πορώδες μέσο (Equivalent Porous Medium, EPM),
- διακριτοποιημένες ρωγματώσεις (Discrete Fractures, DF), και
- διπλό πορώδες (Dual Porosity, DP).

Τα θεωρητικά αυτά μοντέλα παρουσιάζονται γραφικά (σκίτσα) στο **Σχήμα 5.4**. Στο σχήμα αυτό παριστάνονται τα τρία ανωτέρω θεωρητικά μοντέλα (b: EPM, c: DF και d: DP) με βάση ένα απλοποιημένο δίκτυο ρωγματώσεων, ανοίγματος **2·b**, με ροή από αριστερά προς τα δεξιά (a: πραγματικός υδροφορέας).



Σχήμα 5.4: Θεωρητικά μοντέλα κατακερματισμένων πετρωμάτων [53].

5.11.1. Ισοδύναμο πορώδες μέσο

Το κατακερματισμένο πέτρωμα αντιπροσωπεύεται από ένα ισοδύναμο πορώδες μέσο (EPM), δηλαδή, από συνεχές πορώδες μέσο με ανάλογες υδραυλικές ιδιότητες (πορώδες και υδραυλική αγωγιμότητα). Οι παράμετροι επιλέγονται έτσι ώστε το μοντέλο ροής στο EPM να είναι όμοιο με το μοντέλο ροής στο αρχικό πέτρωμα.

Η EPM προσέγγιση θεωρεί ότι το κατακερματισμένο υλικό είναι συνεχές. Γι' αυτό το λόγο, μπορεί να καθοριστεί ο αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος του υλικού (Representative Elementary Volume, REV), ο οποίος χαρακτηρίζεται από ισοδύναμες υδραυλικές παραμέτρους.

Η προσομοίωση της ροής σε κατακερματισμένα συστήματα που χρησιμοποιούν αυτό το θεωρητικό μοντέλο απαιτεί υπολογισμό των ισοδύναμων τιμών για υδραυλική αγωγιμότητα, ειδική αποθηκευτικότητα και πορώδες. Οι τιμές για τις ισοδύναμες αυτές παραμέτρους καθορίζονται, είτε από δοκιμές στον υδροφορέα που βασίζονται στις μεταβολές του επιπέδου νερού, είτε από τα αντίστροφα μοντέλα, ή / και από μετρήσεις υπαίθρου του εύρους των ρωγμών, του μήκους και της εσωτερικής σύνδεσής τους και από μετρήσεις όγκων και περατοτήτων σε μη κατακερματισμένο πέτρωμα.

Όταν οι ισοδύναμες παράμετροι οριστούν, το EPM αναπαριστά το κατακερματισμένο σύστημα και είναι δυνατό να εφαρμοστούν σε αυτό κώδικες πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιούνται για συνεχή πορώδη μέσα. Η δυσκολία

στην εφαρμογή της προσέγγισης EPM εστιάζεται στον καθορισμό του κατάλληλου μεγέθους του REV, το οποίο είναι αναγκαίο για το ορισμό των ισοδύναμων υδραυλικών ιδιοτήτων [22].

Όταν οι ρωγματώσεις είναι λίγες και απομακρυσμένες μεταξύ τους και η υδραυλική αγωγιμότητα του μη κατακερματισμένου όγκου μικρή, η μέθοδος EPM πιθανόν να μην είναι η κατάλληλη, ακόμη και αν υπάρχει ένα μεγάλο REV [53]. Ο Berkowitz ισχυρίζεται ότι, εάν ο καθορισμός των ισοδύναμων υδραυλικών ιδιοτήτων γίνεται από μετρήσεις υπαίθρου, συμπεριλαμβανομένων ιχνηθετήσεων, μπορεί να κατασκευαστεί ένα λογικό μοντέλο ροής που στηρίζεται σε αυτό το EPM θεωρητικό μοντέλο [10].

Άλλοι ερευνητές θεωρούν ότι η EPM μέθοδος γενικά δεν είναι αξιόπιστη. Οι ίδιοι ερευνητές πιστεύουν ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να αντιπροσωπεύει επαρκώς τη συμπεριφορά ενός συστήματος ροής για μια μεγάλη περιοχή, αλλά αναπαράγει ανεπαρκώς τις τοπικές συνθήκες [22],[73].

5.11.2. Διακριτοποιημένες ρωγματώσεις

Το μοντέλο διακριτοποιημένης ρωγμάτωσης (DF) θεωρεί ότι το νερό κινείται μόνο μέσω του συστήματος ρωγματώσεων. Η προσέγγιση DF εφαρμόζεται σε κατακερματισμένους σχηματισμούς με μικρή σχετικά πρωτογενή περατότητα, όπως τα κρυσταλλικά πετρώματα.

Η ροή μέσω μιας μεμονωμένης ρωγμής μπορεί θεωρητικά να απεικονισθεί ως ροή νερού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών που έχουν σταθερή απόσταση καθ' όλο το μήκος της ρωγμής. Η απόσταση αυτή είναι ίση με αυτό που καλείται "άνοιγμα ρωγμής" (fracture aperture = $2 \cdot b$). Έτσι, ο ρυθμός ροής (Q_f) υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q_f = 2 \cdot b \cdot w \cdot K_f \cdot \frac{dh}{dl} \quad (5.24)$$

όπου, w πλάτος ρωγμής,

K_f υδραυλική αγωγιμότητα της ρωγμής,

h υδραυλικό φορτίο, και

l μήκος στο οποίο μετρίεται η υδραυλική βαθμίδα.

Επίσης, η υδραυλική αγωγιμότητα μιας ρωγμής μπορεί να μετρηθεί από την παρακάτω σχέση:

$$K_f = \rho \cdot g \cdot \frac{(2 \cdot b)^2}{12 \cdot u} \quad (5.25)$$

όπου, ρ πυκνότητα του νερού,
 u ιξώδες του νερού, και
 g σταθερά επιτάχυνσης.

Συσχετίζοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι, το Q_f είναι ανάλογο με τον κύβο του ανοίγματος ρωγμής. Η χρήση λοιπόν του μοντέλου απαιτεί περιγραφή του δικτύου ρωγμών, συμπεριλαμβανομένων του ανοίγματος ρωγμών και της γεωμετρίας. Τα δεδομένα αυτά είναι εξαιρετικά δύσκολο να συλλεχθούν και να αξιολογηθούν. Συγκεκριμένα, είναι δυνατό να βρεθούν από χαρτογραφήσεις που γίνονται για τις ανάγκες υπόγειων εκσκαφών, από δοκιμές διάτρησης κατά την εξόρυξη γεωτρήσεων και από ιχνηθετήσεις.

Επιπλέον προβλήματα, κατά τη χρήση της DF προσέγγισης, μπορεί να σημειωθούν όταν τα πλάτη των ρωγμών (w) είναι μικρότερα από 10 μm και όταν μέρη των κατακερματισμένων επιπέδων έχουν ή τείνουν να έχουν ανώμαλη (αδρή) επιφάνεια. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο κυβικός νόμος της ροής μέσω ρωγμής που προαναφέρθηκε, πιθανόν να μην είναι αξιόπιστος [80],[119].

Επίσης, επειδή η πίεση αυξάνεται με το βάθος, ενώ παράλληλα ελαττώνεται η πίεση των πόρων, λόγω της αποστράγγισης, προκαλείται μείωση του ανοίγματος των ρωγμών. Έτσι, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο σχετικός προσανατολισμός των ρωγματώσεων, σε σχέση με τη ροή του νερού.

5.11.3. Διπλό πορώδες

Εάν ο βράχος, μέσα στον οποίο αναπτύσσεται το δίκτυο των ρωγματώσεων, έχει σημαντική πρωτογενή περατότητα, τότε πιθανόν να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο διπλού πορώδους (DP). Σε αυτό το θεωρητικό μοντέλο η ροή, μέσω των ρωγματώσεων, συνοδεύεται από ανταλλαγή νερού και διαλυμένου υλικού από και προς το περιβάλλον πορώδες πέτρωμα.

Προφανώς το δίκτυο ρωγματώσεων, όπως και οι ιδιότητες του πορώδους μέσου, θα πρέπει να περιγράφονται πριν την μοντελοποίηση. Οι δοκιμές υπαίθρου στον υδροφόρο ορίζοντα (π.χ. δοκιμαστικές αντλήσεις) υποδηλώνουν εάν αυτός συμπεριφέρεται σαν σύστημα διπλού πορώδους.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών είναι απαραίτητο να ερμηνευτούν, ώστε να καθοριστούν οι υδραυλικές αγωγιμότητες [101]. Η ανταλλαγή μεταξύ του δικτύου ρωγματώσεων και του πορώδους μέσου αντιπροσωπεύεται από έναν όρο, ο οποίος περιγράφεται ως "ρυθμός μεταφοράς μάζας" [40],[63].

5.11.4. Καρστικά συστήματα

Οι υδροφόροι σχηματισμοί που αποτελούνται από ασβεστόλιθους, δολομίτες, μάρμαρα, εβαπορίτες και άλλα διαλυτά πετρώματα, είτε συμπεριφέρονται σαν τυπικά κατακερματισμένα συστήματα ροής, όπως προαναφέρθηκε, είτε επηρεάζονται από τα κανάλια προνομιακής ροής (καρστικοί αγωγοί). Στα διαλυτά πετρώματα τα ανοίγματα των ρωγμών και το πρωτογενές πορώδες μεγαλώνουν με το χρόνο, δημιουργώντας ένα σύστημα καναλιών υψηλότερης υδραυλικής αγωγιμότητας [48].

Γενικά, τα διαλυτά πετρώματα με υψηλό πρωτογενές πορώδες αναπτύσσουν ένα σύστημα ροής που βασίζεται στη διάχυση, με λίγα χαρακτηριστικά καρστ. Από την άλλη, πετρώματα με χαμηλό πρωτογενές πορώδες αναπτύσσουν κανάλια προνομιακής ροής του νερού [48].

Η μοντελοποίηση στα καρστικά πετρώματα είναι πολύ περίπλοκη, εξαιτίας της δυσκολίας του χαρακτηρισμού των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων του καρστ, καθώς και της γεωμετρίας των καναλιών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις προσεγγίσεις μοντελοποίησης, προκειμένου να προσομοιασθεί η υπόγεια ροή σε καρστ:

- 1) Η υπόγεια ροή σε πορώδη και κατακερματισμένα πετρώματα θεωρείται ότι ελέγχεται από τον Νόμο του Darcy, έτσι ώστε ένα από τα τρία θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω (EPM, DF, DP) να μπορεί να εφαρμοσθεί. Οι Thrailkill (1974 και 1989) και Yusun και Ji (1988) περιέγραψαν την εφαρμογή της DF προσέγγισης για την προσομοίωση ροής σε καρστικούς σχηματισμούς που έχουν κανάλια διαφόρων μεγεθών (pipes και conduits).
- 2) Για το ώριμο καρστ χρησιμοποιείται η προσέγγιση "black box", όπου δημιουργούνται συναρτήσεις με σκοπό να αναπαράγουν τις εισαγωγές και εξαγωγές

στο μοντέλο, οι οποίες ονομάζονται επανατροφοδότηση (recharge) και ροή πηγής (spring flow). Τυπικά, η ροή της πηγής χρησιμοποιείται για να αναπαρασταθεί ολοκληρωμένα η αντίδραση του συστήματος του υπόγειου νερού στην επανατροφοδότηση. Αναλύσεις των υδρογραφημάτων εκφόρτισης, της επανατροφοδότησης, αλλά και της γεωχημείας, χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν εξισώσεις που θα περιγράφουν την αποφόρτιση του συστήματος. Αυτές οι εξισώσεις είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν σταθερές παραμέτρους του υδροφόρου ορίζοντα.

- 3) Μια τρίτη προσέγγιση χρησιμοποιεί τα στοιχεία του υδροφορέα προκειμένου να αναπτύξει τις παραμέτρους ενός ισοδύναμου πορώδους μέσου EPM ^[92].

Είναι φανερό ότι μπορεί να γίνει μοντελοποίηση ροής σε κατακερματισμένα πετρώματα, συμπεριλαμβανομένων και των καρστικών. Φυσικά χρειάζονται όσο το δυνατόν λεπτομερέστερες πληροφορίες, σχετικά με τη φύση του δικτύου ρωγμών και καναλιών.

Οι τεχνικές υπαίθρου που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή αυτών των δεδομένων δεν έχουν ακόμη τελειοποιηθεί. Επομένως, οι προβλέψεις που γίνονται από τέτοιου είδους μοντέλα θα συνεχίσουν να εμπεριέχουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας και θα πρέπει να αξιολογούνται βάση των μετρήσεων υπαίθρου.

5.12. Μηχανές επίλυσης ModFlow

5.12.1. Πακέτο προαπαιτούμενης συζυγούς βαθμίδας

Το πακέτο αυτό (Preconditioned Conjugate Gradient package, PCG2) χρησιμοποιεί τη μέθοδο της συζυγούς βαθμίδας για να επιλύσει τις ταυτόχρονες εξισώσεις που δημιουργούνται από το μοντέλο. Μπορούν να προσομοιαστούν γραμμικές και μη γραμμικές συνθήκες ροής. Το PCG2 περιλαμβάνει δύο προαπαιτούμενες επιλογές ^[1]:

- α) την τροποποιημένη μη ολοκληρωμένη προϋπόθεση Cholesky, η οποία είναι αποδοτική σε βαθμωτούς (scalar) υπολογιστές, και
- β) την πολυωνυμική προϋπόθεση, η οποία απαιτεί από τον H/Y λιγότερη μνήμη και με συγκεκριμένες τροποποιήσεις είναι πιο αποδοτική στους ανυσματικούς (vector) υπολογιστές.

Η σύγκλιση της επίλυσης καθορίζεται χρησιμοποιώντας, τόσο τις μεταβολές των υδραυλικών φορτίων, όσο και τα κριτήρια υπολοίπου (residual criteria). Μη γραμμικά προβλήματα επιλύονται χρησιμοποιώντας τις επαναλήψεις Picard.

Η μηχανή επίλυσης PCG2 λειτουργεί προσεγγίζοντας την επίλυση σε δύο επίπεδα, σε ένα χρονικό βήμα. Οι εξωτερικές επαναλήψεις χρησιμοποιούνται για να διαφοροποιηθεί η μητρική προαπαιτούμενη παράμετρος, κατά την προσέγγιση της επίλυσης. Μία εξωτερική επανάληψη συμβαίνει όταν οι υδρογεωλογικές παράμετροι του συστήματος ροής (π.χ. μεταβιβαστικότητα, πάχος κορεσμένου υδροφορέα) ενημερώνονται στην προαπαιτούμενη ομάδα θεμελιωδών εξισώσεων.

5.12.2. Πακέτο διαδικασίας σταθερής συνεπαγωγής

Η μέθοδος αυτή (Strongly Implicit Procedure package, SIP) χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλου συστήματος ταυτόσημων γραμμικών εξισώσεων με επανάληψη. Το προσόν της μηχανής επίλυσης SIP είναι ότι είναι πολύ σταθερή και γενικά καταλήγει σε σύγκλιση, συχνά όμως με πολύ αργό ρυθμό ^[1].

Δεν είναι τόσο γρήγορη όσο η μέθοδος PCG, αλλά απαιτεί λιγότερη μνήμη για να υπολογίσει την τελική επίλυση. Επειδή κάθε επίλυση περιλαμβάνει μέχρι επτά άγνωστες τιμές φορτίου και η ομάδα των αγνώστων τιμών αλλάζει από την μία εξίσωση στην επόμενη, διαμέσου του πλέγματος (grid), οι εξισώσεις για όλο το πλέγμα πρέπει να επιλύονται ταυτόχρονα, για κάθε χρονικό βήμα.

5.12.3. Πακέτο επιτυχούς εκτόνωσης

Η εν λόγω μηχανή επίλυσης (Slice-successive Over-Relaxation package, SOR) χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλων συστημάτων γραμμικών εξισώσεων με τους μέσους όρους των επαναλήψεων. Κατά την εφαρμογή της, το πλέγμα διαιρείται σε κάθετες "φέτες", ομαδοποιώντας τις εξισώσεις των κόμβων σε διακριτές ομάδες, στις οποίες κάθε ομάδα αντιστοιχεί σε μία "φέτα" ^[1].

Σε κάθε επανάληψη, αυτές οι ομάδες εξισώσεων λειτουργούν διαδοχικά, δίνοντας αποτελέσματα σε νέα ομάδα καθορισμένων τιμών φορτίων για κάθε "φέτα". Καθώς γίνεται η επεξεργασία των εξισώσεων για κάθε "φέτα", αυτές εκφράζονται πρώτα σε όρους της μεταβολής των υπολογιζόμενων φορτίων, μεταξύ των επιτυχημένων επαναλήψεων. Η ομάδα των εξισώσεων που αντιστοιχεί στην "φέτα"

επιλύεται μέσω της Gaussian απαλοιφής, χρησιμοποιώντας τους όρους για μεταβαλλόμενες "φέτες" ως γνωστές ποσότητες.

Στη συνέχεια, η κάθε μία από τις τιμές της μεταβολής του φορτίου που υπολογίζονται για τη "φέτα", πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή επιτάχυνσης, T , με τιμή γενικά μεταξύ 1 και 2. Τα αποτελέσματα θεωρούνται τελικές τιμές της μεταβολής του φορτίου στην επανάληψη για την "φέτα".

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι "φέτες" και προς τις τρεις διευθύνσεις (x , y , z), να επεξεργαστούν και να ολοκληρωθούν οι επαναλήψεις στην περιοχή ενδιαφέροντος. Τελικά, η συνολική ακολουθία επαναλαμβάνεται μέχρι οι διαφορές μεταξύ των μεταβολών φορτίου, οι οποίες υπολογίστηκαν στις επιτυχείς επαναλήψεις, να είναι μικρότερες από το επιλεγμένο κριτήριο σε όλους του κόμβους του πλέγματος.

5.12.4. Μηχανή επίλυσης WHS

Είναι η βασική μηχανή επίλυσης του ModFlow. Χρησιμοποιεί την ρουτίνα επιτάχυνσης της σταθερής συζυγούς βαθμίδας (Bi-Conjugate Gradient STABilized, Bi-CGSTAB), η οποία εφαρμόστηκε με την ατελή διάσπαση του Stone, για τις προαπαιτούμενες επιμέρους διαφορικές εξισώσεις της ροής του υπόγειου νερού.

Αυτή η μηχανή επίλυσης, όπως και όλες όσες χρησιμοποιούν την μέθοδο των επαναλήψεων, προσεγγίζει την επίλυση μιας μεγάλης ομάδας μερικών διαφορικών εξισώσεων επαναληπτικά, μέσω μιας προσεγγιστικής επίλυσης. Επειδή η μητρική εξίσωση για τη ροή του υπόγειου νερού είναι αρχικά "ανεπαρκούς συνθήκης", είναι αναγκαία για αποτελεσματική επίλυση μια ενεργή προϋπόθεση για αυτές τις εξισώσεις.

Στην μηχανή επίλυσης WHS είναι διαθέσιμα δύο "επίπεδα" παραγοντισμού. Ενώ η σύγκλιση της επίλυσης απαιτεί λιγότερες επαναλήψεις με επίπεδο παραγοντισμού 1, η απαιτούμενη μνήμη για να "τρέχει" (run) η επίλυση αυξάνει με το επίπεδο παραγοντισμού. Επίσης, η εργασία ανά επανάληψη αυξάνει με το επίπεδο παραγοντισμού 1, τόσο ώστε ο συνολικός χρόνος επίλυσης να μην είναι λιγότερος από αυτόν που απαιτείται για το επίπεδο παραγοντισμού 0.

Η μηχανή επίλυσης WHS του κώδικα ModFlow είναι αυτή ακριβώς που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τις ανάγκες της μοντελοποίησης (βλέπε κεφ. 6). Για το λόγο αυτό αναλύεται διεξοδικά παρακάτω.

Επεξήγηση των παραμέτρων της επίλυσης

Η μηχανή επίλυσης WHS λειτουργεί με προσέγγιση δύο βαθμίδων σε ένα χρονικό βήμα. Οι εξωτερικές επαναλήψεις χρησιμοποιούνται για να τροποποιήσουν την παραγοντιζόμενη μητρική παράμετρο, με τρόπο ώστε να προσεγγιστεί η επίλυση.

Μία εξωτερική επανάληψη λαμβάνει χώρα όταν οι υδρογεωλογικές παράμετροι του συστήματος ροής ενημερώνονται (π.χ. μεταβιβαστικότητα, κορεσμένο πάχος, αποθηκευτικότητα) στο παραγοντιζόμενο σύνολο των μητρικών εξισώσεων. Διαφορετικά επίπεδα παραγοντισμού επιτρέπουν στις θεμελιώδεις εξισώσεις να τοποθετήσουν διαφορετικές τιμές, έτσι ώστε να μεγαλώσει η αποδοτικότητα της επίλυσης και η σταθερότητα του μοντέλου.

Οι εσωτερικές επαναλήψεις χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν επαναληπτικά τις θεμελιώδεις εξισώσεις που δημιουργήθηκαν από την εξωτερική επανάληψη.

Μέγιστος αριθμός εξωτερικών επαναλήψεων (προτεινόμενο = 50)

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το άνω όριο του αριθμού των εξωτερικών (μη γραμμικών) επαναλήψεων που θα διαμορφωθούν. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων θα χρησιμοποιηθεί μόνο όταν δεν επιτευχθεί σύγκλιση της επίλυσης νωρίτερα.

Οι 50 επαναλήψεις είναι επαρκείς για τα περισσότερα προβλήματα. Παρόλα αυτά, εάν χρησιμοποιείται ο μέγιστος αυτός αριθμός και δεν λαμβάνεται το κατάλληλο σφάλμα στο ισοζύγιο μάζας, η τιμή θα πρέπει να αυξηθεί.

Μέγιστος αριθμός εσωτερικών επαναλήψεων (προτεινόμενο = 25)

Καθορίζει το άνω όριο του αριθμού των εσωτερικών επαναλήψεων που θα διαμορφωθούν. Αυτός ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων θα χρησιμοποιηθεί μόνο εάν δεν επιτευχθεί σύγκλιση της επίλυσης με τις εξωτερικές επαναλήψεις.

Ο αριθμός 25 είναι επαρκής για τα περισσότερα προβλήματα. Εάν όμως δεν προκύψει το κατάλληλο σφάλμα στο ισοζύγιο μάζας, η τιμή αυτή πρέπει να αυξηθεί.

Κριτήριο αλλαγής φορτίου για την σύγκλιση (προτεινόμενο = 0,01)

Αφού έχουν ολοκληρωθεί όλες οι εξωτερικές επαναλήψεις, η μηχανή επίλυσης ελέγχει την μέγιστη μεταβολή της επίλυσης σε κάθε κελί. Εάν αυτή είναι μικρότερη από την τιμή ανοχής της σύγκλισης (σε m ή ft), η σύγκλιση έχει ολοκληρωθεί και η επίλυση σταματάει. Σε διαφορετική περίπτωση, ξεκινάει μια νέα εξωτερική επανάληψη.

Ακρίβεια της εξίσωσης στην τιμή 0,01 (ft ή m) είναι επαρκής για τα περισσότερα προβλήματα, εκτός κι αν η μέγιστη διαφορά φορτίου στην περιοχή μοντελοποίησης είναι μικρότερη από 1 (ft ή m). Εάν δεν προσεγγίζεται το κατάλληλο ισοζύγιο μάζας και ο αριθμός των εσωτερικών και εξωτερικών επαναλήψεων είναι εντός των ορίων που προαναφέρθηκαν, η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί κατά μία τάξη μεγέθους.

Κριτήριο υπολοίπου για την σύγκλιση (προτεινόμενο = 0,001)

Το κριτήριο υπολοίπου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σύγκλισης των εσωτερικών επαναλήψεων της μηχανής επίλυσης. Εάν η μεταβολή, σε επιτυχείς εσωτερικές επαναλήψεις, είναι μικρότερη από την ανοχή που καθορίζεται (μονάδες L^3/T), η μηχανή επίλυσης προχωράει στην επόμενη εξωτερική επανάληψη.

Μία τιμή για το κριτήριο υπολοίπου ίση με 0,001 είναι συνήθως επαρκής. Αν όμως, με αυτήν την τιμή, διεκπεραιώνεται πολύ μικρός αριθμός εσωτερικών επαναλήψεων, για κάθε εξωτερική επανάληψη, υπάρχει το ενδεχόμενο να μην προσεγγίζεται το κατάλληλο ισοζύγιο μάζας. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η τιμή του κριτηρίου να μειωθεί κατά μία ή περισσότερες τάξεις μεγέθους.

Παράγοντας απόσβεσης για εξωτερικές επαναλήψεις (προτεινόμενο = 1)

Αυτός ο παράγοντας επιτρέπει στον χρήστη να ελαττώσει (= αποσβέσει) την υπολογιζόμενη μεταβολή φορτίου, κατά τη διάρκεια κάθε επιτυχούς εξωτερικής επανάληψης. Για τα περισσότερα "τεχνητά", αλλά και ρεαλιστικά, προβλήματα της ροής του υπόγειου νερού, ο συντελεστής απόσβεσης προτείνεται να είναι ίσος με τη μονάδα.

Η εν λόγω παράμετρος είναι όμοια με τις παραμέτρους επιτάχυνσης που χρησιμοποιούν άλλες μηχανές επίλυσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει μια μη συγκλίνουσα διαδικασία (ταλαντούμενη ή αποκλίνουσα) σε πιο

σταθερή, έτσι ώστε να επιτευχθεί επίλυση (σύγκλιση). Αυτό γίνεται μειώνοντας τον παράγοντα απόσβεσης σε μία τιμή μεταξύ του 0 και του 1 (συνήθως μεγαλύτερη από 0,6).

Κριτήριο σχετικού υπολοίπου (προτεινόμενο = 0)

Η παράμετρος αυτή προάγει μια διαφορετική μέθοδο, για τον έλεγχο της σύγκλισης στην εσωτερική επανάληψη. Συγκρίνει το υπόλοιπο από την πιο πρόσφατη εσωτερική επανάληψη με το υπόλοιπο από την αρχική εσωτερική επανάληψη.

Έτσι, εάν το υπόλοιπο της πρόσφατης εσωτερικής επανάληψης είναι μικρότερο από το υπόλοιπο της αρχικής εσωτερικής επανάληψης, πολλαπλασιαζόμενο με το κριτήριο σχετικού υπολοίπου, η τρέχουσα εξωτερική επανάληψη ολοκληρώνεται και μία νέα (εξωτερική) επανάληψη αρχίζει.

Επίπεδο παραγοντισμού (προτεινόμενο = 1)

Υπάρχουν δύο επίπεδα παραγοντισμού, το 0 και το 1. Το επίπεδο 0 απαιτεί περισσότερες εξωτερικές επαναλήψεις, αλλά λιγότερη μνήμη. Το επίπεδο 1 απαιτεί λιγότερες εξωτερικές επαναλήψεις, αλλά περισσότερη μνήμη.

6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΡΟΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα που εισάχθηκαν στα μοντέλα ροής, προκειμένου αυτά να επιλυθούν, μέσω του επιλεγμένου προγράμματος ModFlow. Στα αρχικά στοιχεία (μετρήσεις πεδίου) έγινε επεξεργασία, στην οποία λήφθηκαν υπόψη οι απαιτήσεις του προγράμματος προσομοίωσης. Οι παραγόμενες τιμές των διαφόρων παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν στον σχεδιασμό των κατάλληλων μοντέλων ροής (σταθερής κατάστασης ροής, μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής και πρόβλεψης).

Στα επόμενα δίνονται τα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από τις επιλύσεις των μοντέλων ροής που σχεδιάστηκαν. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται σε δύο μορφές: γραφικά (χάρτες, διαγράμματα, τομές) ⁽¹⁾ και ποσοτικά (πίνακες).

6.1. Σχεδιασμός μοντέλων

Ο σχεδιασμός των μοντέλων επιλέχθηκε να γίνει στην ευρύτερη περιοχή των πεδίων εκμετάλλευσης Κέρης, Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού (βλέπε Σχήμα 4.2, κεφ. 4), για τα οποία υπήρχαν στοιχεία από προηγούμενες εργασίες υδρογεωλογικού περιεχομένου (Πολυτεχνείο Κρήτης, ΔΕΥΑΗ, ιδιώτες μελετητές κ.ά.).

Απαιτήθηκαν δεδομένα για τα δύο είδη προσομοίωσης, δηλαδή σταθερής και μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής και επιπλέον για την πρόβλεψη της ροής στις δύο προτεινόμενες θέσεις της υδρομαστευτικής στοάς (2 βασικά σενάρια). Επίσης, τα μοντέλα πρόβλεψης της ροής επιλύθηκαν για δύο (2) περιπτώσεις το κάθε ένα, ανάλογα με την θεωρούμενη πτώση στάθμης (Δh) της δυναμικής επιφάνειας της υδρομαστευτικής στοάς (βλέπε κεφ. 4, παρ. 4.9).

6.1.1. Γενικές παραδοχές

Για τον σχεδιασμό και την επίλυση των έξι (6) παραπάνω μοντέλων (1 μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής + 1 μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής + 4 μοντέλα πρόβλεψης), έγιναν οι παρακάτω γενικές παραδοχές, αναγκαίες για το πρόγραμμα ModFlow:

- (1) Οι υδροφόροι σχηματισμοί που τροφοδοτούν την πηγή Αλμυρού και που ενδιαφέρουν την παρούσα μελέτη, αποτελούν ενιαίο υδροφόρο ορίζοντα. Δηλαδή, λειτουργούν ως ένας υδροφορέας και όχι ως διαφορετικοί υδροφόροι ορίζοντες που άλλοτε επικοινωνούν μεταξύ τους και άλλοτε όχι. Η πραγματικότητα είναι ουσιαστικά άγνωστη, αφού μέχρι σήμερα δεν έχει ανακαλυφθεί η ακριβής υδρογεωλογική συμπεριφορά της περιοχής ενδιαφέροντος.
- (2) Τα διάφορα υδρολιθολογικά στρώματα είναι ομοιογενή. Η παραδοχή αυτή είναι αναγκαία προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή του Νόμου του Darcy, σχέση στην οποία στηρίζεται και το ModFlow. Στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν ισχύει, καθώς οι καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί λειτουργούν ως τελείως διαφορετική υδρολιθολογική ενότητα από την υποτιθέμενη. Όμως, σε μακροκλίμακα, είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι ο Νόμος Darcy δίνει αξιόλογα αποτελέσματα, ακόμη και για τέτοιους σχηματισμούς.
- (3) Όπως αναφέρθηκε στο κεφ. 5 (παρ. 5.11.1), σε κατακερματισμένους υδροφορείς, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση, η τεχνική του "ισοδύναμου πορώδους μέσου" (EPM) είναι μάλλον η βέλτιστη δυνατή. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε τελικά και στον σχεδιασμό των μοντέλων.
- (4) Παρόλα αυτά, σε καρστικοποιημένους σχηματισμούς δεν είναι πάντα εφικτή η προσομοίωση με την τεχνική EPM, υπό την έννοια ότι τέτοιοι σχηματισμοί περιέχουν αρκετούς απρόβλεπτους παράγοντες, όπως καρστικούς αγωγούς μεγάλης υδροπερατότητας. Υπάρχουν βέβαια και άλλες τεχνικές προσομοίωσης (βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.11.4), οι οποίες όμως κρίθηκαν εξειδικευμένες, εξαρτώμενες από τον συγκεκριμένο τύπο καρστικού πετρώματος. Με βάση αυτό το σκεπτικό, ασυνέχειες μεγάλης σημασίας, όπως το ρήγμα και οι καρστικοί αγωγοί που τροφοδοτούν την πηγή Αλμυρού, προσομοιάσθηκαν (όπου ήταν δυνατό) με "τοπικές ρυθμίσεις".
- (5) Τα υδρολιθολογικά στρώματα θεωρήθηκαν ισότροπα. Αυτό σημαίνει ότι ο "συντελεστής ανισοτροπίας" (T_x/T_y) είναι ίσος με 1, οπότε κάθε ιδιότητα των υδρολιθολογικών σχηματισμών είναι ίση προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις (x, y). Η παραδοχή αυτή έγινε λόγω ανεπάρκειας στοιχείων και όχι για "τεχνικούς"

⁽¹⁾ Οι χάρτες, τα διαγράμματα και οι τομές που παράχθηκαν από το ModFlow παρουσιάζονται χωρίς υπόμνημα, λόγω τεχνικής αδυναμίας του προγράμματος. Έτσι, όπου κρίνεται σκόπιμο, τα στοιχεία των σχημάτων αυτών περιγράφονται εντός του κειμένου.

λόγους, καθώς το ModFlow παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να αλλάξει τον συντελεστή ανισοτροπίας.

- (6) Εξαιτίας του ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα (ModFlow) δεν αντιμετωπίζει το ενδεχόμενο διείσδυσης θαλασσινού νερού (sea intrusion) οι σχηματισμοί κάτω από την θάλασσα ορίζονται ως περιοχές στις οποίες δεν λαμβάνει χώρα ροή υπόγειου νερού (no flow).
- (7) Η υδρομαστευτική στοά, ανεξάρτητα από την θέση που σχεδιάστηκε, θεωρήθηκε ότι θα είναι "εν καταδύσει" και η πιεζομετρική στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε "κατάσταση ηρεμίας" (πριν την λειτουργία της στοάς) θα βρίσκεται στην οροφή του υδρομαστευτικού έργου. Έτσι, θεωρώντας ύψος στοάς ίσο με 5 m (βλέπε Σχήμα 4.45 στο κεφ. 4) και για να παραχθεί το σύνολο του νερού που αποστραγγίζει η στοά θα πρέπει να δημιουργηθεί πτώση στάθμης ίση με 5 m. Σε αυτή την κατάσταση η υδρομαστευτική στοά είναι "εν ξηρώ".

6.1.2. Σχεδιασμός ανάγλυφου και υπόγειων στρωμάτων

Στην περιοχή που επιλέχθηκε (βλέπε κεφ. 4, Σχήμα 4.2) προσδιορίστηκε, τόσο η ακριβής επιφανειακή μορφολογία της (από τους τοπογραφικούς χάρτες, κλίμακας 1:50.000, φύλλα "Ηράκλειο" και "Ανώγεια", της ΓΥΣ), όσο και το ανάγλυφο των υπόγειων στρωμάτων αυτής (από τις γεωλογικές τομές που κατασκευάστηκαν στο κεφ. 4, Σχήματα 4.4 έως και 4.20).

Η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος είναι $10.800 \text{ m} \times 8.700 \text{ m} \approx \mathbf{93,96 \text{ km}^2}$. Αρχικά, η περιοχή χωρίστηκε σε οριζόντια πλέγματα των 100 στηλών και 100 γραμμών (μέγεθος κελιών $108 \text{ m} \times 87 \text{ m}$) και στη συνέχεια σε 200 στήλες και 200 γραμμές (μέγεθος κελιών $54 \text{ m} \times 43,5 \text{ m}$).

Τελικά, μετά από αλληπάλληλες επιλύσεις, αποφασίστηκε η προσομοίωση να πραγματοποιηθεί σε ένα πλέγμα **216** στηλών (columns) και **174** γραμμών (rows), προκειμένου τα κελιά να είναι τετράγωνα (μέγεθος κελιών $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$). Τα κελιά συνηθίζεται να ορίζονται τετράγωνα, προκειμένου να μην δημιουργούνται αριθμητικά προβλήματα κατά την επίλυση του μοντέλου ^[1].

Επίσης, όσον αφορά την πυκνότητα του πλέγματος που επιλέχθηκε, θεωρήθηκε ως η καταλληλότερη από μια ακολουθία συνεχών επιλύσεων με διαφορετικά κάθε φορά πλέγματα. Η πυκνότητα αυτή επιτρέπει την επίλυση του μοντέλου μέσα σε κάποια

"λογικά" χρονικά πλαίσια, ενώ παράλληλα αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το επιφανειακό ανάγλυφο που δόθηκε στην περιοχή.

Στα **Σχήματα 6.1** και **6.2** φαίνονται τα διάφορα ανάγλυφα σε κατακόρυφες τομές με διεύθυνση $\Delta \rightarrow A$ στις γραμμές "58" και "116". Επίσης, στα **Σχήματα 6.3** και **6.4** δίνονται τομές με διεύθυνση $B \rightarrow N$ στις στήλες "72" και "148".

Τέλος, στο **Σχήμα 6.5** παρουσιάζεται τρισδιάστατη απεικόνιση (μέσω του βοηθητικού προγράμματος 3D-Explorer), τόσο του ανάγλυφου της επιφάνειας, όσο και των δαπέδων των 4 υπόγειων στρωμάτων, όπως αυτά σχεδιάστηκαν στο μοντέλο.

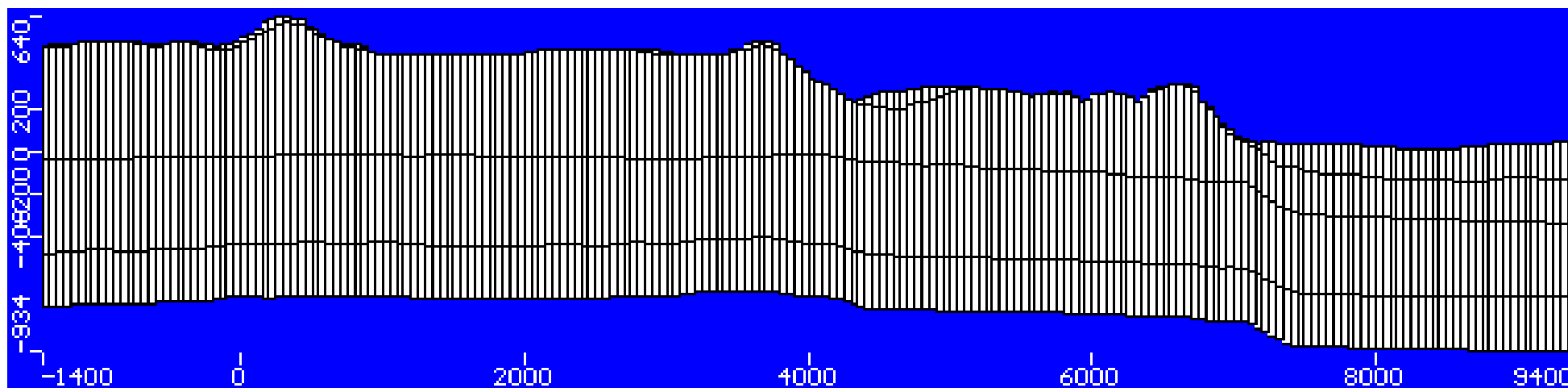
Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να κατασκευαστούν τα παραπάνω ανάγλυφα (επιφανειακό και υπόγεια), έχει ως εξής:

Για την όσο το δυνατόν πιστότερη αναπαράσταση του επιφανειακού ανάγλυφου της περιοχής, σχεδιάστηκαν, με την βοήθεια ψηφιοποιητή (digitizer) και του προγράμματος AutoCAD 2000, οι ισοϋψείς καμπύλες των 20 m (όπου κρίθηκε σκόπιμο και των 10 m) των δύο τοπογραφικών χαρτών της ΓΥΣ (βλέπε χάρτη στο Σχήμα Γ.1, Παράρτημα – Μέρος Γ). Στη συνέχεια, ο παραγόμενος χάρτης μετατράπηκε, μέσω ειδικού προγράμματος (SDPS), σε μορφή πίνακα συντεταγμένων x, y, z (αρχείο ASCII, τύπου .TXT) και εισάχθηκε στο μοντέλο.

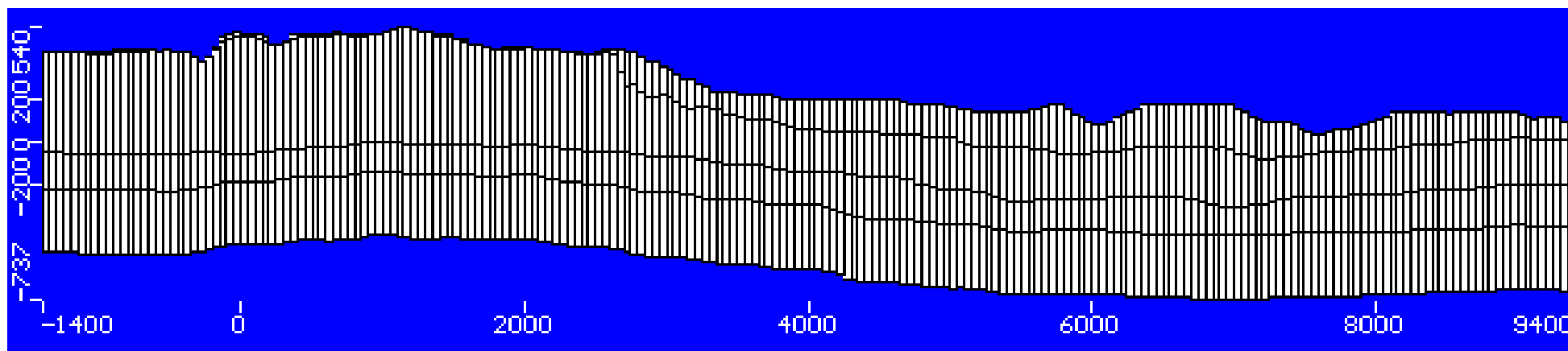
Το ανάγλυφο των υπόγειων στρωμάτων (layers) κατασκευάστηκε από την ψηφιοποίηση των 17 παράλληλων γεωλογικών τομών (γεωλογικές τομές AA' έως και ΙΖΙΖ'), διεύθυνσης $\Delta \rightarrow A$, όπως αυτές αναφέρθηκαν στο κεφ. 4 (Σχήματα 4.4 έως και 4.20). Δηλαδή, κατασκευάστηκαν ASCII αρχεία (τύπου .TXT), για κάθε ένα από τα τέσσερα κύρια στρώματα υδρογεωλογικού ενδιαφέροντος, τα οποία περιλάμβαναν τις συντεταγμένες (x, y, z) του ανάγλυφου των δαπέδων τους:

- Layer 1: Νεογενή,
- Layer 2: Ασβεστόλιθοι "Τριπόλεως",
- Layer 3: "Φυλλίτες – Χαλαζίτες", και
- Layer 4: "Πλακώδεις ασβεστόλιθοι".

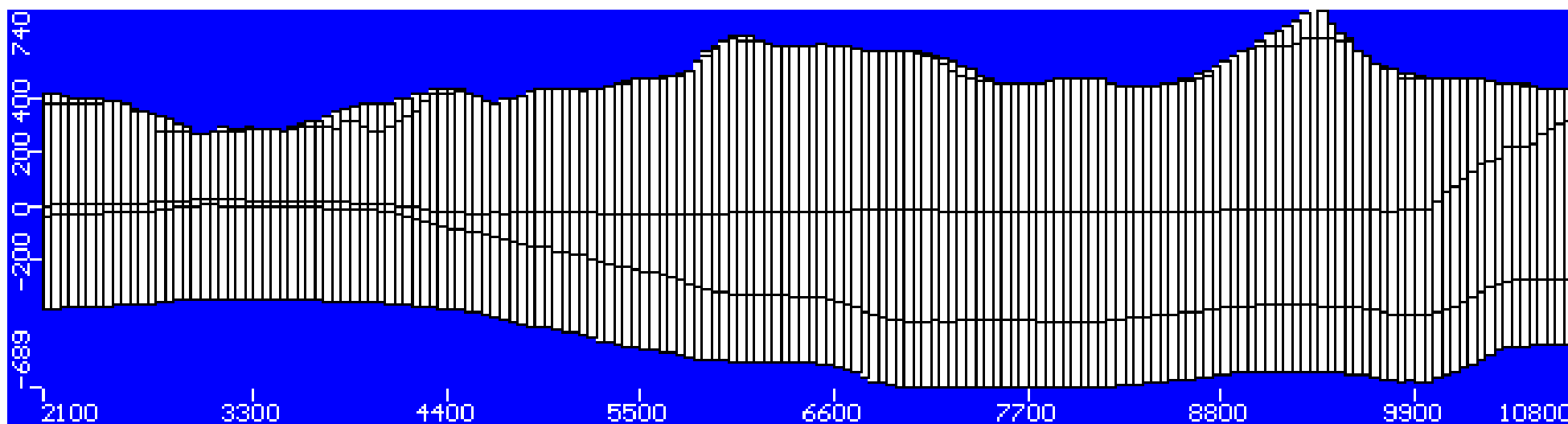
Οι συντεταγμένες αυτές εισάχθηκαν στο μοντέλο, όμοια με το επιφανειακό ανάγλυφο. Σημειώνεται ότι το μέγιστο βάθος του κατώτερου στρώματος ("Πλακώδεις ασβεστόλιθοι") φτάνει τα 1.107 m.



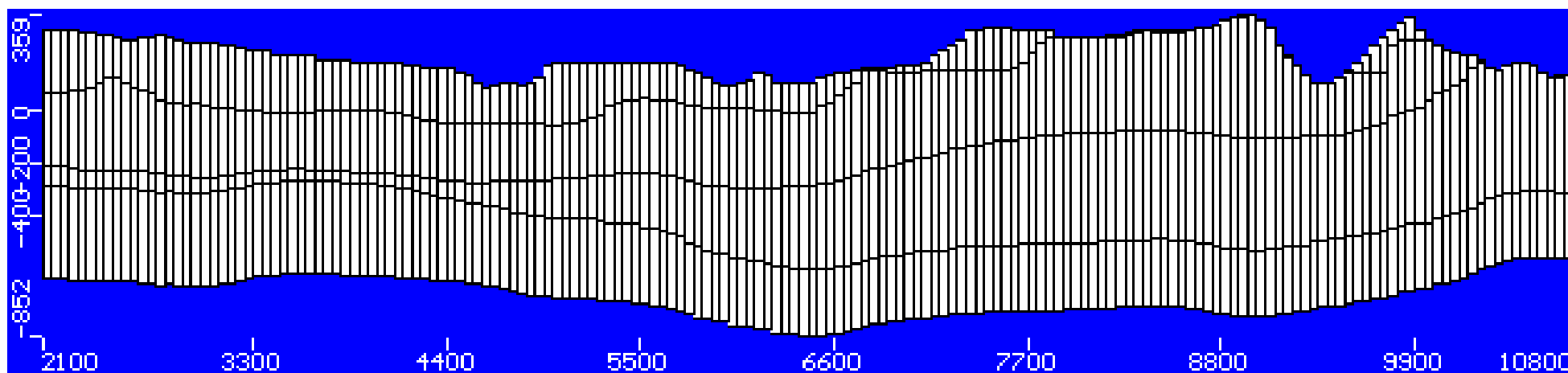
Σχήμα 6.1: Απεικόνιση ανάγλυφου σε κατακόρυφη τομή διεύθυνσης $\Delta \rightarrow A$ στην γραμμή 58.



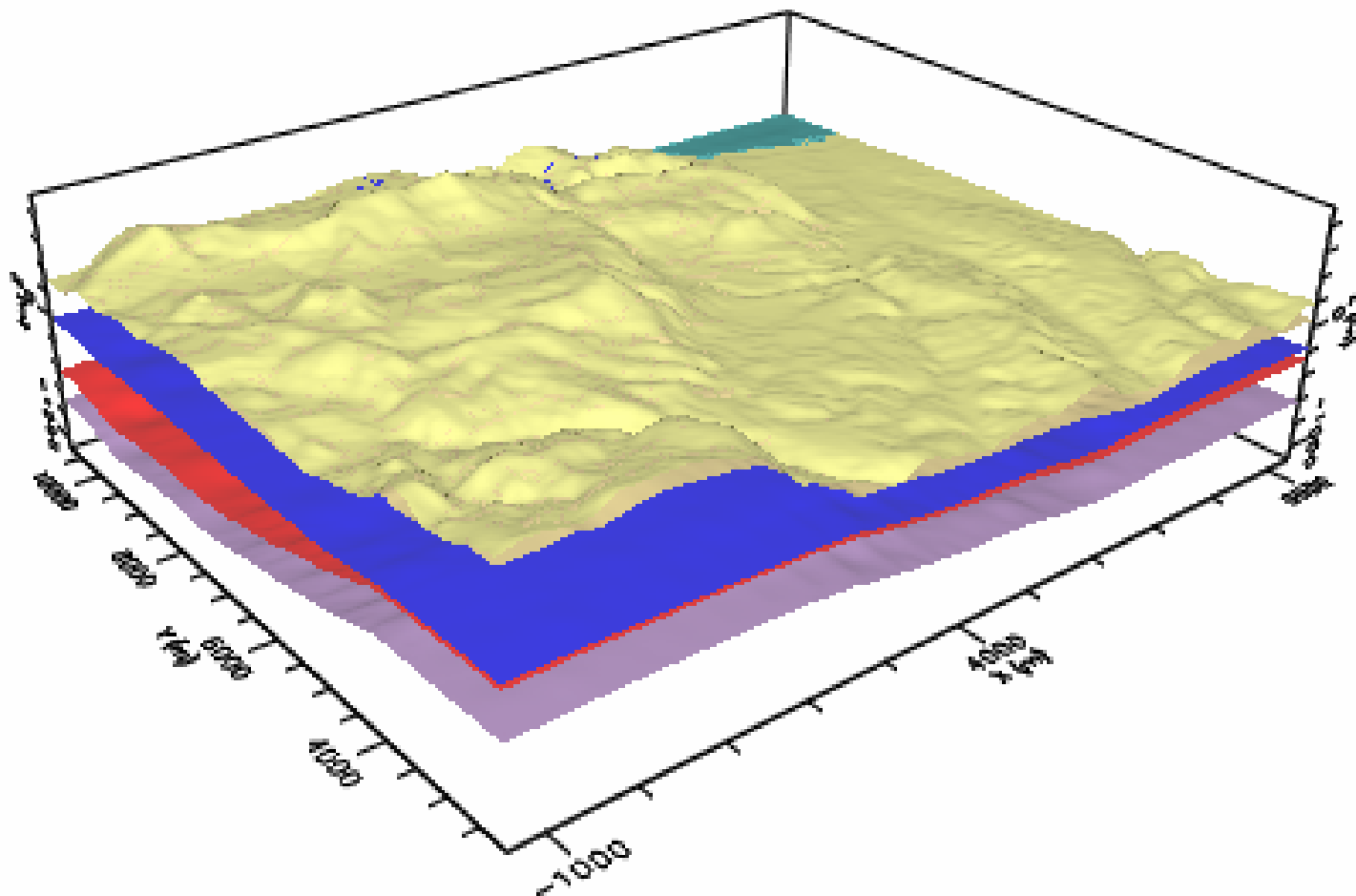
Σχήμα 6.2: : Απεικόνιση ανάγλυφου σε κατακόρυφη τομή διεύθυνσης $\Delta \rightarrow A$ στην γραμμή 116.



Σχήμα 6.3: : Απεικόνιση ανάγλυφου σε κατακόρυφη τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 72.



Σχήμα 6.4: : Απεικόνιση ανάγλυφου σε κατακόρυφη τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 144.



Σχήμα 6.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση του ανάγλυφου της επιφάνειας και των δαπέδων των 4 υπόγειων στρωμάτων (προοπτική από NNΔ).

Όσον αφορά την εισαγωγή των υδρολιθολογικών (υπόγειων) στρωμάτων, θα πρέπει να επισημανθούν τα εξής:

- Το υδρογεωλογικό ενδιαφέρον εστιάστηκε στα τέσσερα προαναφερόμενα στρώματα. Το ModFlow "δυσκολεύεται" να αναπαραστήσει λεπτομέρειες, καθώς δεν προβλέπει την ύπαρξη ασυνεχειών (π.χ. ρηγμάτων) και την τοπική εμφάνιση ενός υδροφόρου σχηματισμού.
- Έτσι, οι υπόλοιποι σχηματισμοί (μικρότερης σημασίας και έκτασης) εντάχθηκαν στα τέσσερα στρώματα, ανάλογα με την υδρογεωλογική συμπεριφορά τους. Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις και οι οφιολιθικοί σχηματισμοί εντάχθηκαν στο 1^ο στρώμα, ο φλύσχης και οι σχιστόλιθοι "Τριπόλεως" στο 2^ο, ενώ οι ασβεστοφυλλίτες περιλήφθηκαν στο 3^ο.
- Το βάθος των "Πλακωδών ασβεστόλιθων" στις γεωλογικές τομές που κατασκευάστηκαν είναι ενδεικτικό. Όπως τονίστηκε και στο κεφ. 4, θεωρήθηκε ότι το πάχος του στρώματος είναι σταθερό και ίσο με 250 m στην μικρότερη ανάπτυξή του (προς Βορρά) και 350 m στην μεγαλύτερη ανάπτυξή του (προς Νότο), καθώς είναι αδύνατη η έστω και πρόχειρη εκτίμησή του (ανυπαρξία γεωτρήσεων μέχρι το δάπεδο του σχηματισμού).
- Το ModFlow δεν αναγνωρίζει ρήγματα. Τα ρήγματα μεταφράζονται στο πρόγραμμα ως απότομα "σκαλοπάτια" των δαπέδων, ενώ δεν νοείται διακοπή του στρώματος κατά την οριζόντια διεύθυνση (π.χ. λόγω απότομης βύθισης στην μια πλευρά του ρήγματος και ανύψωσης στην άλλη). Αυτό έχει ως συνέπεια, προκειμένου να είναι δυνατή η επίλυση της προσομοίωσης, την κατ' ανάγκη διαφοροποίηση των δαπέδων των γεωλογικών στρωμάτων που εισάχθηκαν στο πρόγραμμα (ομαλοποίηση κοντά σε ρήγματα), από αυτά που σχεδιάστηκαν στις γεωλογικές τομές. Στο Παράρτημα – Μέρος Δ, στα **Σχήματα Α.1** έως και **Α.17**, σχεδιάστηκαν πάνω στις γεωλογικές τομές που χρησιμοποιήθηκαν και τα δάπεδα, όπως αυτά εισάχθηκαν στο ModFlow. Όπως φαίνεται, η διαφοροποίηση από τα πραγματικά δεδομένα δεν ξεπερνάει σε καμία τομή τα 50 m, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, παρά μόνο σε θέσεις ρηγμάτων, όπου η διαφορά φτάνει τα 100 ή και τα 150 m, περίπου.
- Η παραπάνω αδυναμία του προγράμματος (απαίτηση συνέχειας των στρωμάτων) δεν επέτρεψε μεγαλύτερη διακριτοποίηση του πλέγματος σε περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όπως στην πηγή Αλμυρού και στις προτεινόμενες θέσεις της

υδρομαστευτικής στοάς. Περαιτέρω διακριτοποίηση οδηγούσε σε διακοπές στρωμάτων, κυρίως στο λεπτό 1^ο στρώμα (Νεογενή) και αδυναμία επίλυσης του μοντέλου.

Σημαντικό βήμα στον σχεδιασμό του ανάγλυφου, είναι και η απενεργοποίηση κελιών (inactive cells), στα οποία είναι λογικό να μην υπάρχει ροή νερού (no flow cells). Η κατάσταση "μη ροής" αφορά τα κελιά που αντιπροσωπεύουν το θαλάσσιο μέρος της περιοχής ενδιαφέροντος, όπως και όλα τα κελιά των υπόγειων στρωμάτων που αντιστοιχούν σε γεωλογικούς σχηματισμούς κάτω από τη θάλασσα. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν επιτρέπεται από το πρόγραμμα ροή "γλυκού" νερού προς σχηματισμούς που περιέχουν θαλασσινό νερό, καθώς η πυκνότητα της θάλασσας είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του "γλυκού" νερού (περίπου 40 φορές).

Τα κελιά που τελικά απενεργοποιήθηκαν είναι συνολικά 785 σε σύνολο 37.584 (= 216 στήλες × 174 γραμμές), δηλαδή, ποσοστό περίπου 2%. Τα κελιά αυτά δεν μετέχουν στην περαιτέρω επεξεργασία.

6.1.3. Επιλογή χρονικού "παραθύρου"

Η χρονική περίοδος αναφοράς (= χρονικό "παράθυρο") επιλέχθηκε με βάση τις διατιθέμενες από την ΔΕΥΑΗ μετρήσεις παροχής και στάθμης. Έτσι, ως "ημέρα 0" θεωρήθηκε η 1η Νοεμβρίου του 1987, έτος κατά το οποίο κατασκευάστηκαν οι πρώτες γεωτρήσεις στο πεδίο Τυλίσου (άρχισαν να αντλούνται από το 1988).

Οι τελευταίες διατιθέμενες μετρήσεις παροχής και στάθμης στα τρία πεδία εκμετάλλευσης (Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού και Κέρης) σημειώνονται τον Ιούνιο του 2000. Προκειμένου λοιπόν να ληφθούν ολόκληρα έτη στο εξεταζόμενο "χρονικό παράθυρο", αυτό επεκτάθηκε έως και την 1^η Νοεμβρίου του 2000 ("ημέρα 4.749"). Πρόκειται δηλαδή για χρονική περίοδο **4.749 ημερών** ή 13 ετών (1987 – 2000).

Σημειώνεται ότι, η επέκταση του χρονικού "παραθύρου" μέχρι και το τρέχον έτος (2003), αφενός θα δημιουργούσε προβλήματα (από την έλλειψη μετρήσεων) και αφετέρου δεν κρίνεται αναγκαία, εφόσον η κατάσταση στα πεδία παραγωγής δεν έχει αλλάξει σημαντικά (δεν έχουν προστεθεί νέα πεδία εκμετάλλευσης).

6.1.4. Εισαγωγή υδρογεωλογικών παραμέτρων

Η διαπερατότητα ή υδροπερατότητα ή απλά περατότητα (conductivity, **k**) των διαφόρων γεωλογικών στρωμάτων υπολογίσθηκε με βάση τις δοκιμαστικές αντλήσεις που έγιναν στις γεωτρήσεις των πεδίων εκμετάλλευσης της περιοχής ενδιαφέροντος (βλέπε κεφ. 4, Πίνακας 4.3). Επιπλέον αυτών των τιμών, για τα πετρώματα για τα οποία δεν υπήρχαν μετρήσεις πεδίου (π.χ. σειρά "φυλλιτών – χαλαζιτών"), δόθηκαν εμπειρικές τιμές από τη βιβλιογραφία.

Στον Πίνακα 6.1 αναγράφονται οι τιμές υδροπερατότητας που τελικά εισάχθηκαν στο μοντέλο. Με τη στήλη "ιδιότητα" χαρακτηρίζεται κάθε ομάδα τιμών **k** (αντίστοιχη της υδρολιθολογικής ενότητας), έτσι όπως αυτή εισάχθηκε στο μοντέλο, στα διάφορα στρώματα (layers).

Πίνακας 6.1: Τιμές υδροπερατότητας που εισάχθηκαν στα μοντέλα.

Ενότητα	Ιδιότητα	k_x, k_y (m/sec)	k_z (m/sec)
Νεογενές – Τεταρτογενές	A	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$
Ασβεστόλιθοι Τριπόλεως	B	$2,5 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-5}$
Φυλλίτες – Χαλαζίτες	Γ	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-7}$
Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι	Δ	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$
Στην πηγή	E	20	20
Σε άμεση επαφή με την πηγή	Z	10	10
Σε έμμεση επαφή με την πηγή	H	5	5

Σημειώνεται ότι οι τιμές πεδίου αφορούν τις οριζόντιες περατότητες (**k_x, k_y**), όπως συνηθίζεται. Επίσης, λόγω της θεωρούμενης ισοτροπίας, οι οριζόντιες περατότητες λήφθηκαν ίσες, δηλαδή, **k_x = k_y**.

Η κάθετη περατότητα (**k_z**) των υδροφόρων σχηματισμών θεωρήθηκε ίση ή μία τάξη μεγέθους μικρότερη από τις οριζόντιες τιμές (πεδίου). Αυτό έγινε για δύο λόγους:

- 1) Η στρωματογραφία των σχηματισμών αυτών απαιτεί μεγαλύτερες οριζόντιες περατότητες. Εξαίρεση αποτελούν οι Νεογενείς – Τεταρτογενείς σχηματισμοί στους οποίους δεν υφίσταται στρωματογραφία (γι' αυτό και **k_x = k_y = k_z**).

2) Με τον τρόπο αυτό "δηλώνεται" στο μοντέλο η δυνατότητα υδροφορίας των σχηματισμών (βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.6.2).

Αντίθετα, στο στεγανό υπόβαθρο των "φυλλιτών – χαλαζιτών", προκειμένου αυτό να "δηλώνεται" στο μοντέλο ως αδιαπέρατο, οι οριζόντιες περατότητες ορίσθηκαν δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες από την κάθετη (βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.6.2).

Στον Πίνακα 6.1 οι ιδιότητες "Α", "Β", "Γ" και "Δ" αφορούν υδρολιθολογικές ενότητες. Η κάθετη υδροπερατότητα στους Νεογενείς – Τεταρτογενείς σχηματισμούς προέκυψε ως μέση τιμή των υπολογιζόμενων στις γεωτρήσεις ΚΡ4 και ΚΡ5 (Πίνακας 4.3). Κατ' ανάλογο τρόπο, στους ασβεστόλιθους Τριπόλεως και στους Πλακώδεις ασβεστόλιθους προέκυψε από τον μέσο όρο τιμών του Πίνακα 4.3 για τα πεδία Κέρης – Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού, αντίστοιχα. Τέλος, η τιμή της οριζόντιας περατότητας για τους φυλλίτες – χαλαζίτες είναι βιβλιογραφική ^[169].

Αντίθετα με τις προηγούμενες, οι ιδιότητες "Ε", "Ζ" και "Η" δεν αφορούν υδρολιθολογικές ενότητες, αλλά αποτελούν αναγκαία "τοπική ρύθμιση" (βλέπε παρ. 6.1.1), προκειμένου να παρασταθούν ασυνέχειες μεγάλης σημασίας. Έτσι, θεωρήθηκε ότι η περιοχή γύρω από τη πηγή Αλμυρού (ειδικά στην πλευρά τροφοδοσίας της) παρουσιάζει πολύ μεγάλες τιμές υδροπερατότητας, λόγω του ρήγματος και των καρστικών αγωγών που την τροφοδοτούν.

Η σημασία των δύο παραπάνω ασυνεχειών είναι τεράστια, καθώς ουσιαστικά είναι υπεύθυνες για τις μεγάλες παροχές που παρουσιάζει η πηγή. Όμως, δεν δύνανται να παρασταθούν στο μοντέλο ως έχουν, εφόσον το πρόγραμμα δεν αναγνωρίζει ρήγματα και καρστικούς αγωγούς.

Προκειμένου λοιπόν να προσομοιασθούν αυτές οι ασυνέχειες έγιναν διάφορες θεωρήσεις με ποικίλα αποτελέσματα (βλέπε και παρ. 6.1.8). Τελικά, η τοπική αλλαγή της υδροπερατότητας, εκτιμήθηκε ως η βέλτιστη ρύθμιση, καθώς δεν επιφέρει σοβαρές ανωμαλίες στο μοντέλο (επηρεάζει μόνο τοπικά), ενώ παράλληλα προκαλεί τις επιθυμητές παροχές από την πηγή (συμβατότητα με τις μετρήσεις πεδίου).

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (coefficient of storage ή storativity, **S**) είναι δυνατόν να υπολογισθεί από τα δεδομένα πεδίου, αν διατίθενται μετρήσεις στάθμης σε πηγάδια παρατήρησης παρακείμενα της γεώτρησης άντλησης. Την προϋπόθεση αυτή καλύπτουν μόνο οι γεωτρήσεις άντλησης Κ3 και Κ5 στο πεδίο Κέρης, Τ15 στο πεδίο Τυλίσου και Τ22 στο πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού.

Με βάση λοιπόν τη σχέση Dupuit προκύπτει η σχέση [37]:

$$S = \frac{2,25 \cdot T \cdot t_0}{r^2} \quad (6.1)$$

όπου, T μεταβιβαστικότητα (m^2/day),

t_0 χρόνος από έναρξη της άντλησης μέχρι την επίτευξη ισορροπίας (μηδενική πτώση στάθμης στην γεώτρηση παρατήρησης) (days), και

r απόσταση γεώτρησης παρατήρησης από γεώτρηση άντλησης (m).

Από την σχέση 6.1 προέκυψαν τιμές συντελεστή αποθηκευτικότητας για τις τέσσερις προαναφερόμενες γεωτρήσεις άντλησης. Με βάση λοιπόν την υδροφορία των γεωτρήσεων αυτών, προκύπτει ότι η μέση τιμή του S για τους ασβεστόλιθους "Τρίπολης" (πεδία Κέρης και Τυλίσου) είναι ίση με $7,33 \times 10^{-4}$, ενώ για τους "Πλακώδεις ασβεστόλιθους" (πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού) είναι ίση με $1,31 \times 10^{-2}$.

Οι παραπάνω τιμές, διαιρούμενες με το μέσο πάχος των υδρολιθολογικών ενοτήτων, είναι δυνατόν να δώσουν την ειδική αποθηκευτικότητα (specific storage, S_s), η οποία και απαιτείται από το πρόγραμμα. Δηλαδή, ισχύει:

$$S_s \approx \frac{S}{h} \quad (6.2)$$

όπου, h μέσο πάχος υδρολιθολογικής ενότητας (m).

Η σχέση 6.2 δίνει πρόχειρη εκτίμηση της S_s (τάξη μεγέθους), η οποία όμως είναι συνήθως αρκετή για τις ανάγκες της προσομοίωσης [1].

Από τη σχέση αυτή, αν θεωρηθεί ότι το μέσο πάχος των ασβεστόλιθων "Τρίπολης" φτάνει τα 300 m και των "Πλακωδών ασβεστόλιθων" τα 250 m, προκύπτει ότι η ειδική αποθηκευτικότητα του πρώτου σχηματισμού είναι ίση με $2,4 \times 10^{-6} m^{-1}$, ενώ του δεύτερου περίπου ίση με $5,2 \times 10^{-5} m^{-1}$.

Λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή ανακρίβεια της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της αποθηκευτικότητας μέσω μετρήσεων πεδίου, λόγω του μικρού πλήθους των δεδομένων (ελλείπει γεωτρήσεων παρατήρησης), κρίθηκε αναγκαία η σύγκριση των τιμών με αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές. Πράγματι, από την βιβλιογραφία, οι τιμές που δίδονται για την ειδική αποθηκευτικότητα και των δύο παραπάνω σχηματισμών είναι αρκετά μεγαλύτερες, της τάξεως των 10^{-3} έως και $10^{-4} m^{-1}$ [1],[37].

Επίσης, διαπιστώνεται ότι σε ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες, όπως στην περιοχή ενδιαφέροντος, η ειδική παροχή (specific yield) συνηθίζεται να λαμβάνεται περίπου ίση με το ενεργό πορώδες (efficient porosity) του σχηματισμού και τον συντελεστή αποθηκευτικότητας (S) [1],[37],[46],[169]. Αν θεωρηθεί ότι στα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι "Τριπόλεως" και "Πλακώδεις") το ενεργό πορώδες φτάνει το 4 – 6%, τιμή "λογική" αν ληφθεί υπόψη και η καρστικοποίηση, τότε και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας θα είναι ίσος με 3% ($= 3 \times 10^{-2}$) και για τους δύο σχηματισμούς (βλέπε και κεφ. 4, παρ. 4.9).

Η παραπάνω τιμή συμφωνεί ικανοποιητικά με αυτήν που βρέθηκε για τους "Πλακώδεις ασβεστόλιθους" από μετρήσεις πεδίου (Γωνιανό Φαράγγι). Αντίθετα, διαφέρει πολύ από την αντίστοιχη τιμή για τους ασβεστόλιθους "Τρίπολης" (πεδία Κέρης και Τυλίσου). Αυτό πιθανόν να οφείλεται, πέρα από την έλλειψη ικανοποιητικού πλήθους δεδομένων, στις μεγάλες αποστάσεις (r) μεταξύ των γεωτρήσεων άντλησης και παρατήρησης.

Οι μεγάλες αυτές αποστάσεις δημιουργούν αμφιβολίες για το αν τα "πηγάδια παρατήρησης" αντιπροσωπεύουν τις συγκεκριμένες γεωτρήσεις άντλησης ή οι μετρήσεις τους εκφράζουν πολυπλοκότερες μορφές κώνων πτώσης στάθμης (π.χ. συνδυασμό δύο ή περισσότερων κώνων). Το ίδιο δεν συμβαίνει στο πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού, όπου η απόσταση μεταξύ γεώτρησης άντλησης (T22) και παρατήρησης (T19) είναι πολύ μικρή.

Για τους παραπάνω λόγους και λαμβάνοντας υπόψη ότι το πρόγραμμα ModFlow απαιτεί προσεγγιστικές τιμές των υδρογεωλογικών παραμέτρων (αρκεί η τάξη μεγέθους), θεωρήθηκε ότι η τιμή $S = 3 \times 10^{-2}$, για τους δύο εξεταζόμενους υδροφόρους σχηματισμούς, είναι αρκετά ικανοποιητική.

Στον **Πίνακα 6.2** δίνονται οι τιμές του πορώδους (porosity, p), του ενεργού πορώδους (efficient porosity, ep), της ειδικής παροχής (specific yield, Sy) και της ειδικής αποθηκευτικότητας (specific storage, Ss) ⁽¹⁾, οι οποίες τελικά εισάχθηκαν στο μοντέλο, συναγόμενες τόσο από βιβλιογραφικές αναφορές [1],[37],[169], όσο και από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου.

⁽¹⁾ Η ειδική αποθηκευτικότητα (Ss) κατά την επίλυση του μοντέλου σταθερής κατάστασης ροής θεωρείται από το ModFlow ίση με 0. Η συγκεκριμένη παράμετρος ουσιαστικά μετέχει στους υπολογισμούς στα μοντέλα μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής, όπως και στα ανάλογα μοντέλα πρόβλεψης.

Πίνακας 6.2: Τιμές παραμέτρων αποθηκευτικότητας που εισάχθηκαν στα μοντέλα.

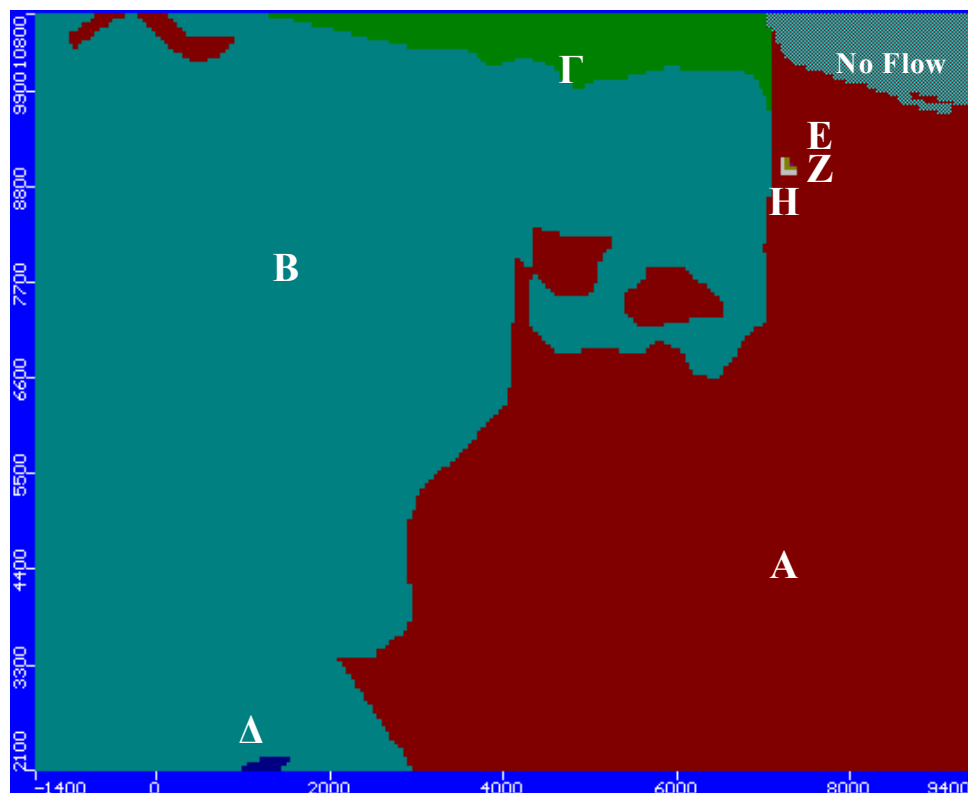
Ενότητα	Ιδιότητα	p (%)	ep (%)	Sy (%)	Ss (m ⁻¹)
Νεογενές – Τεταρτογενές	A	15,0	8,0	10,0	$1,0 \times 10^{-3}$
Ασβεστόλιθοι Τριπόλεως	B	10,0	5,0	5,0	$1,7 \times 10^{-4}$
Φυλλίτες – Χαλαζίτες	Γ	1,0	0,1	0,1	$3,3 \times 10^{-7}$
Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι	Δ	9,0	4,0	5,0	$2,0 \times 10^{-4}$

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2, δεν έγινε "τοπική ρύθμιση" των παραμέτρων της αποθηκευτικότητας, ανάλογη με αυτήν της υδροπερατότητας, για τα κελιά γύρω από την πηγή Αλμυρού. Οι παράμετροι αποθηκευτικότητας στα κελιά αυτά (ιδιότητες "E", "Z" και "H" του Πίνακα 6.1) παρέμειναν σύμφωνες με την υδρολιθολογική τους ενότητα (Νεογενή, ιδιότητα "A" ή ασβεστόλιθοι Τριπόλεως, ιδιότητα "B").

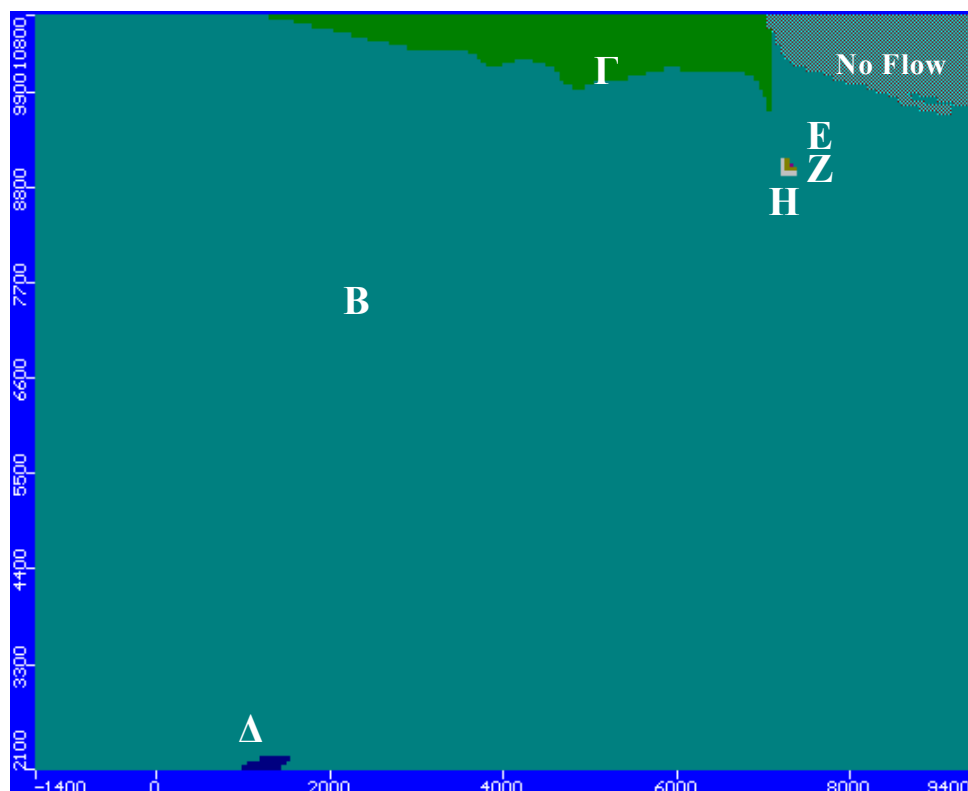
Στα **Σχήματα 6.6** έως και **6.9** παριστάνονται οι ζώνες κοινών υδρογεωλογικών παραμέτρων, όπως αυτές σχεδιάστηκαν στο μοντέλο (με την βοήθεια του χάρτη στο Σχήμα 4.3) στα τέσσερα στρώματα.

Σ' αυτές τις ζώνες ("ιδιότητες" A, B, Γ, Δ, E, Z και H) περιλαμβάνονται η υδροπερατότητα και οι παράμετροι αποθηκευτικότητας (πορώδες, ενεργό πορώδες, ειδική παροχή και ειδική αποθηκευτικότητα), όπως αυτές αναλύθηκαν στα προηγούμενα.

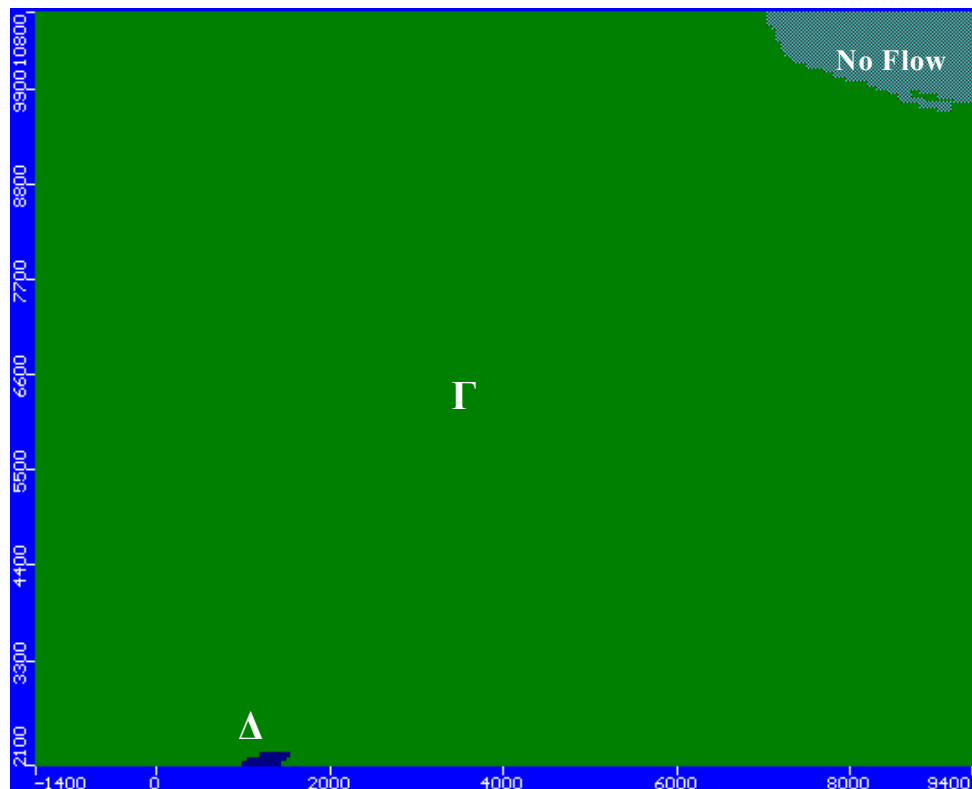
Σημειώνεται ότι στα σχήματα αυτά, όπως και σε όλα τα επόμενα, δεν φαίνεται το πλέγμα (grid), για λόγους ευκρίνειας.



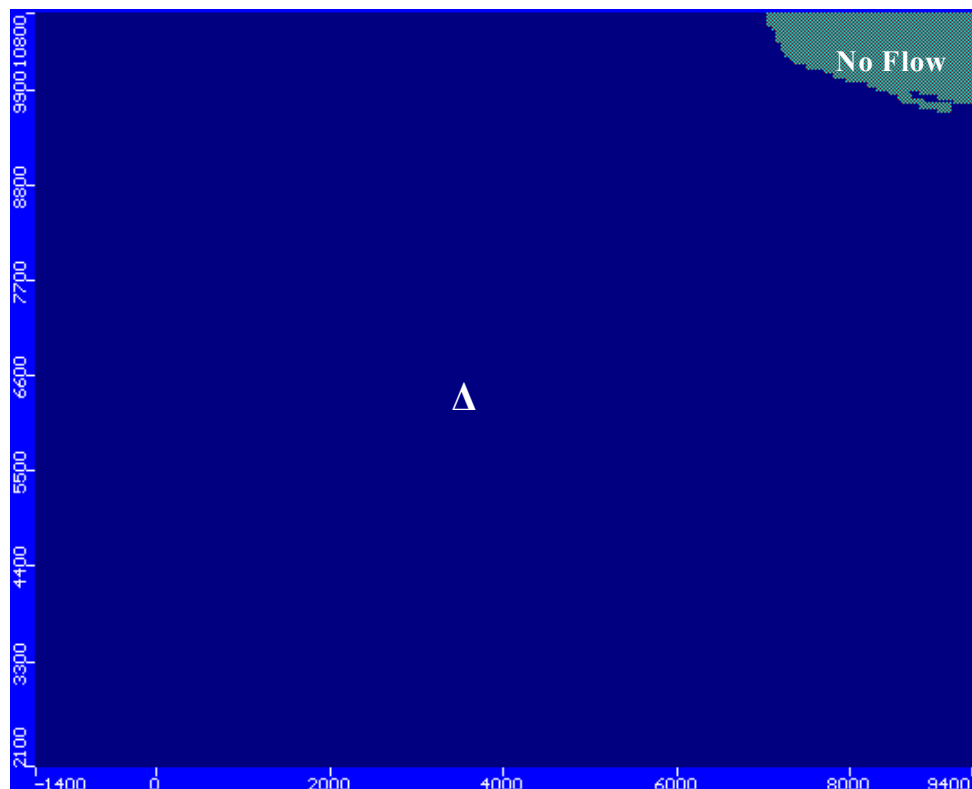
Σχήμα 6.6: Ζώνες κοινών υδρογεωλογικών παραμέτρων στο 1^ο στρώμα (layer 1).



Σχήμα 6.7: Ζώνες κοινών υδρογεωλογικών παραμέτρων στο 2^ο στρώμα (layer 2).



Σχήμα 6.8: Ζώνες κοινών υδρογεωλογικών παραμέτρων στο 3^ο στρώμα (layer 3).



Σχήμα 6.9: Ζώνες κοινών υδρογεωλογικών παραμέτρων στο 4^ο στρώμα (layer 4).

6.1.5. Σχεδιασμός ζωνών επανατροφοδότησης

Ο σχεδιασμός των ζωνών επανατροφοδότησης (recharge zones) έγινε με τη βοήθεια του χάρτη επανατροφοδότησης στο Σχήμα 4.26 (κεφ. 4). Πρόκειται για δέκα (10) ζώνες με τιμές που κυμαίνονται από 50 έως και 600 mm/year.

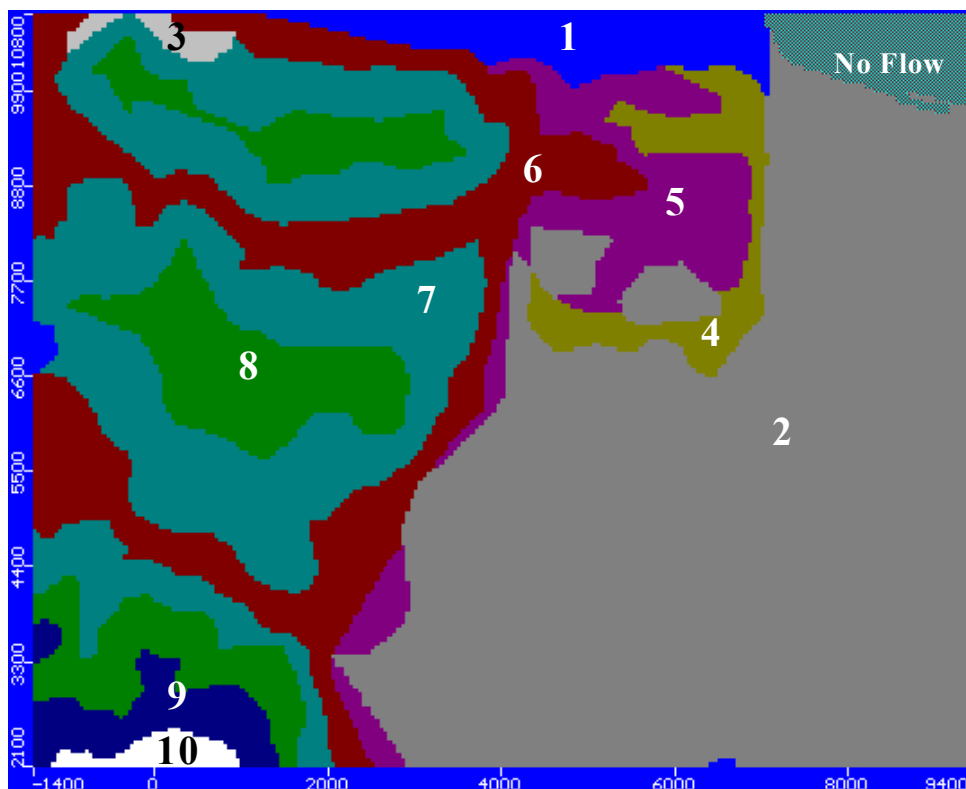
Στον **Πίνακα 6.3** παρουσιάζονται οι τιμές επανατροφοδότησης που τελικά εισάχθηκαν στο μοντέλο. Επίσης, δίδεται το πλήθος των κελιών του μοντέλου που περιλαμβάνονται σε κάθε ζώνη και ο χαρακτηρισμός των ζωνών (αντίστοιχος με τον χαρακτηρισμό των "ιδιοτήτων" στους Πίνακες 6.1 και 6.2).

Πίνακας 6.3: Τιμές επανατροφοδότησης ανά σχεδιαζόμενη ζώνη.

Ζώνη	Πλήθος κελιών	Τιμές (mm/year)
1	1.192	50
2	15.222	100
3	171	150
4	1.047	300
5	2.120	350
6	4.823	400
7	7.267	450
8	4.006	500
9	724	550
10	227	600
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ⁽¹⁾		283

⁽¹⁾ Από το άθροισμα των γινομένων των τιμών με τα αντίστοιχα πλήθη των κελιών των ζωνών, προς το σύνολο των κελιών του πλέγματος που επανατροφοδοτούνται (= 36.799).

Στο **Σχήμα 6.10** απεικονίζονται οι συγκεκριμένες ζώνες επανατροφοδότησης, όπως αυτές σχεδιάστηκαν στο μοντέλο. Ο σχεδιασμός έγινε μόνο στο επιφανειακό στρώμα (layer 1), καθώς το πρόγραμμα "κατανέμει" αυτόματα την επανατροφοδότηση στα επόμενα τρία στρώματα, ανάλογα με τις υδρογεωλογικές παραμέτρους των σχηματισμών (Σχήματα 6.6 έως και 6.9).



Σχήμα 6.10: Ζώνες επανατροφοδότησης.

6.1.6. Εισαγωγή δεδομένων άντλησης

Τα δεδομένα άντλησης αφορούν μετρήσεις παροχών (σε m^3/day) από τις παραγωγικές γεωτρήσεις (pumping wells) των πεδίων Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού και Κέρης. Πρόκειται για δεκαπέντε (15) γεωτρήσεις, οι οποίες τροφοδοτούν το δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Ηρακλείου ασυνεχώς (με διακοπές λειτουργίας) κατά την διάρκεια του επιλεγμένου χρονικού "παραθύρου" των 4.749 ημερών. Οι γεωτρήσεις αυτές είναι οι T11, T12, T15, T17, T21 και Σ1 από το πεδίο Τυλίσου, T19 και T22 από το πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού και K1, K2, K3, K5, K7, K9 και K10 από το πεδίο Κέρης (για τις ακριβείς θέσεις τους βλέπε Σχήμα 4.2 στο κεφ. 4).

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφ. 4, στον Πίνακα Β.1 (α – γ) του Παραρτήματος – Μέρος Β, δίνονται οι συντεταγμένες (x, y, z) των παραπάνω γεωτρήσεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στον σχεδιασμό τους, όπως και λειτουργικά στοιχεία αυτών.

Το πρόβλημα με τα δεδομένα άντλησης ήταν η ανομοιογένεια των μετρήσεων, καθώς άλλες φορές δίνονταν ως ωριαίες (ή και ημερήσιες) απόλυτες τιμές παροχής και άλλες ως μηνιαίοι όγκοι νερού που πέρασαν από τα δίκτυα ύδρευσης του Δήμου

Ηρακλείου. Η ανομοιογένεια αυτή των μετρήσεων διακρίνεται και στα Σχήματα Β.1 έως και Β.15 του Παραρτήματος – Μέρος Β.

Στα σχήματα αυτά παρίστανται τριπλά διαγράμματα με τα διατιθέμενα δεδομένα ωριαίας παροχής (ενδεικτικής), απολήψιμων όγκων νερού και συγκέντρωσης χλωριόντων, για κάθε γεώτρηση παραγωγής ξεχωριστά. Παρατηρείται ασυμφωνία μεταξύ παροχών και απολήψιμων όγκων νερού, η οποία οφείλεται στην διαφορετική ημερήσια λειτουργία των αντλητικών συγκροτημάτων.

Προκειμένου λοιπόν να υπάρξει ομοιογένεια στις μετρήσεις, ώστε αυτές να εισαχθούν στο μοντέλο, έγινε καταρχήν αξιολόγησή τους. Στη συνέχεια, και αφού απομονώθηκαν οι "προβληματικές" (αναξιόπιστες) μετρήσεις, οι υπόλοιπες ανάχθηκαν σε μηνιαίους όγκους νερού και τελικά σε ημερήσιες παροχές.

Προβληματικές μετρήσεις εννοούνται όσες κατεγράφησαν από το "ημερολόγιο λειτουργίας" των γεωτρήσεων ως ανακριβείς για οποιαδήποτε αιτία. Αναξιόπιστες όμως θεωρήθηκαν και οι μετρήσεις, οι οποίες διέφεραν σημαντικά από τις χρονικά πλησιέστερές τους. Οι τελευταίες αυτές μετρήσεις ήταν μικρής χρονικής διάρκειας και συνήθως αφορούσαν έκτακτες διορθωτικές παρεμβάσεις στον ημερήσιο ρυθμό άντλησης της εκάστοτε γεώτρησης.

Εκτός από την παραπάνω επεξεργασία έγινε και συμπλήρωση των χρονικών περιόδων, στις οποίες δεν διατίθονταν δεδομένα λειτουργίας των γεωτρήσεων παρατήρησης. Η συμπλήρωση έγινε σε τρία βήματα, ως εξής:

- 1) Όταν το "ημερολόγιο λειτουργίας" των γεωτρήσεων έδειχνε άντληση, οι ελλείψεις συμπληρώθηκαν με βάση τις τελευταίες καταγραφόμενες παροχές (θεωρήθηκαν σταθερές).
- 2) Όταν το "ημερολόγιο λειτουργίας" των γεωτρήσεων έδειχνε διακοπή άντλησης, οι ελλείψεις συμπληρώθηκαν με μηδενικές τιμές.
- 3) Στις περιπτώσεις που στο "ημερολόγιο λειτουργίας" των γεωτρήσεων δεν υπήρχε σαφής ένδειξη της κατάστασης λειτουργίας, οι ελλείψεις συμπληρώθηκαν με βάση τις τελευταίες καταγραφόμενες παροχές, όπως στο 1^ο βήμα της συμπλήρωσης. Δηλαδή, θεωρήθηκε ότι η άντληση συνεχιζόταν με σταθερό ρυθμό.

Στον **Πίνακα Δ.1 (α – ε)** του Παραρτήματος – Μέρος Δ δίνονται οι ημερήσιες παροχές (μετά και την επεξεργασία των μετρήσεων) των γεωτρήσεων άντλησης που τελικά εισάχθηκαν στο μοντέλο με τη μορφή ASCII αρχείων (.TXT).

Όπως φαίνεται στον πίνακα, ως πρώτη ημέρα άντλησεων λογίζεται η "ημέρα 1.157", οπότε και αρχίζουν να παράγουν οι γεωτρήσεις T11, T15, T17 και T21. Πριν λοιπόν από την συγκεκριμένη ημέρα δεν υπήρχαν άντλήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος (μηδενικές παροχές).

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων παραγωγής εισάχθηκαν στο μοντέλο ως αρνητικές, γιατί διαφορετικά το ModFlow τις αναγνωρίζει ως παροχές "εμπλουτισμού" του υδροφορέα. Δηλαδή, θεωρεί ότι οι αρνητικές παροχές σημαίνουν μάστευση νερού από τον υδροφορέα, ενώ οι θετικές, εισπίεση νερού προς αυτόν.

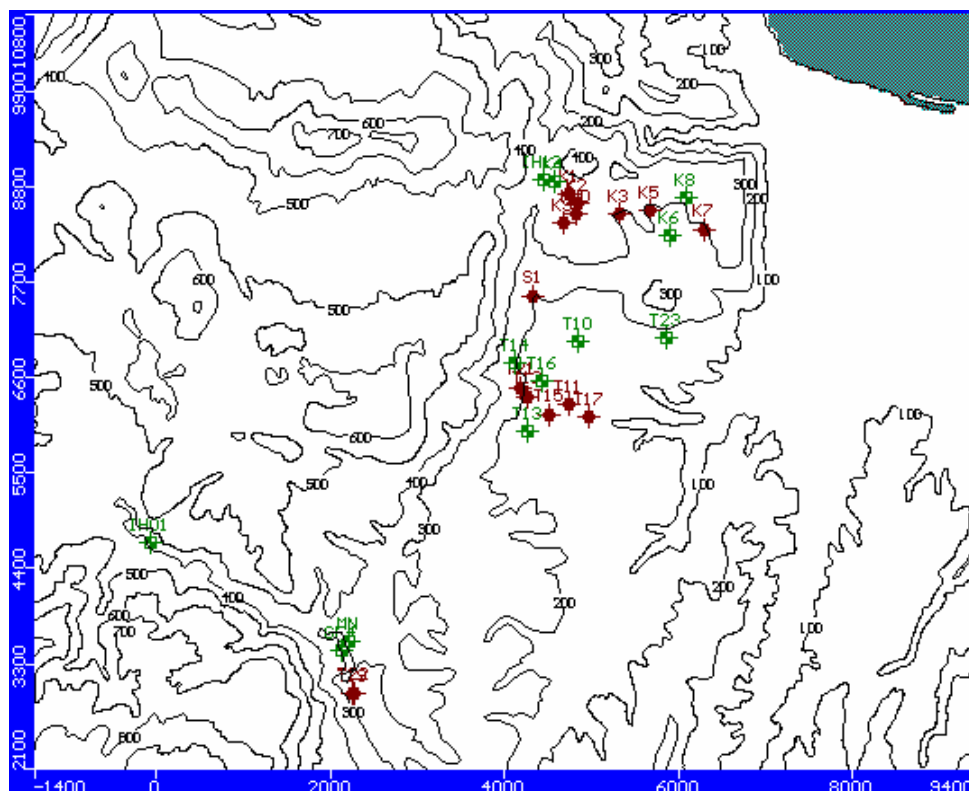
Στο **Σχήμα 6.11** δίδονται οι θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης, μαζί με το τοπογραφικό ανάγλυφο, έτσι όπως αυτές εισάχθηκαν στο μοντέλο. Οι γεωτρήσεις αυτές παριστάνονται με βαθύ κόκκινο χρώμα. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται και οι γεωτρήσεις παρατήρησης (με πράσινο χρώμα), των οποίων η εισαγωγή στο μοντέλο αναλύεται στην επόμενη παράγραφο (παρ. 6.1.7).

Επίσης, στα **Σχήματα 6.12** έως και **6.26** παρουσιάζονται οι τομές των γεωτρήσεων άντλησης, όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα ModFlow. Στις τομές αυτές φαίνονται το βάθος των γεωτρήσεων (με χακί χρώμα), τα φίλτρα τους (με μπλε χρώμα) και το βάθος στο οποίο συναντούν κάθε υδρολιθολογική ενότητα (layer).

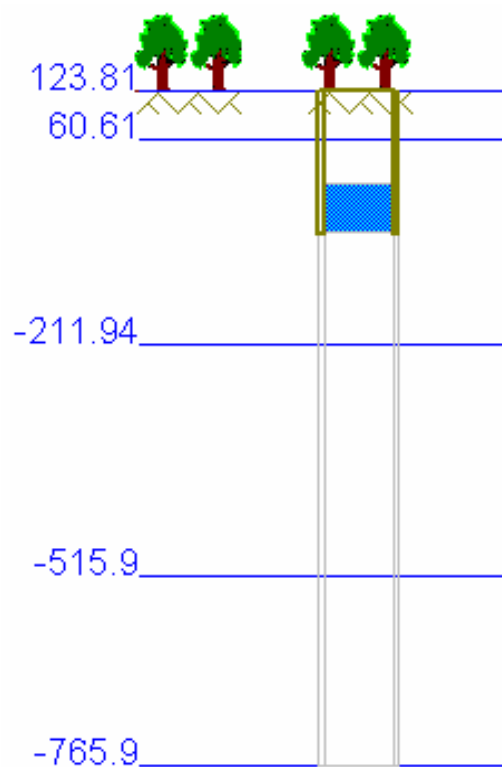
Όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα, όλες οι γεωτρήσεις έχουν εγκατεστημένη την υδροφορία τους στο 2^ο στρώμα (ασβεστόλιθοι "Τριπόλεως"), εκτός από τις T19 και T22 του Γωνιανού Φαραγγιού, οι οποίες τροφοδοτούνται με νερό από το 4^ο στρώμα ("Πλακώδεις ασβεστόλιθοι").

Σημειώνεται ότι για λόγους ευκρίνειας τα φίλτρα παρουσιάζονται ενιαία (από το ανώτερο έως το κατώτερο) και όχι ασυνεχή, όπως είναι στην πραγματικότητα. Η πραγματική κατανομή των φίλτρων, η οποία και εισάχθηκε στο μοντέλο, δίνεται στο Παράρτημα – Μέρος Β, στην τελευταία στήλη του Πίνακα Β.1 (α – γ).

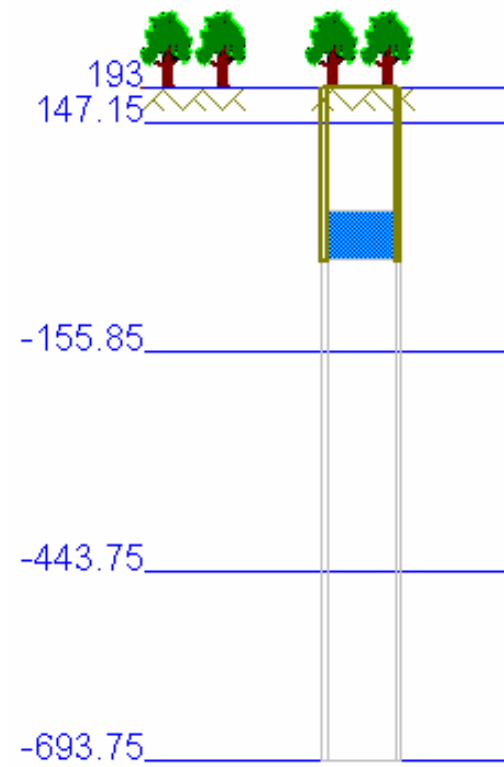
Επίσης, σε ορισμένες τομές διακρίνονται 3 στρώματα (π.χ. Σχήμα 6.18, γεώτρηση T19), επειδή το 1^ο στρώμα (Νεογενή) έχει σχεδόν μηδενικό πάχος.



Σχήμα 6.11: Γεωτρήσεις άντλησης και παρατήρησης.



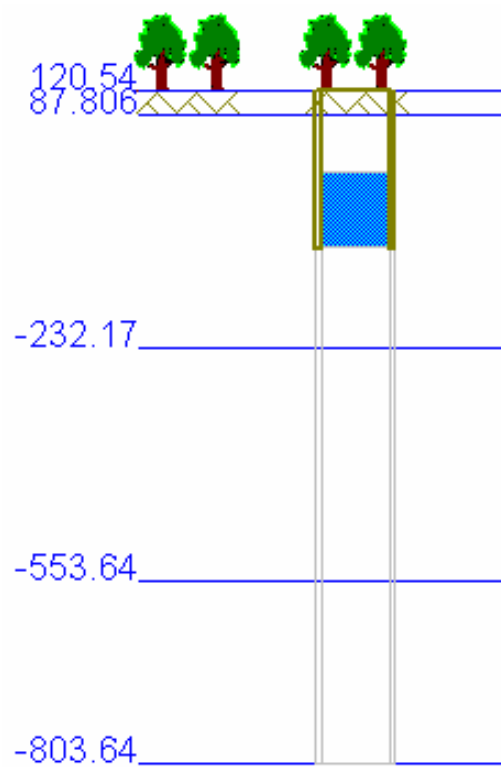
Σχήμα 6.12: Τομή γεώτρησης T11.



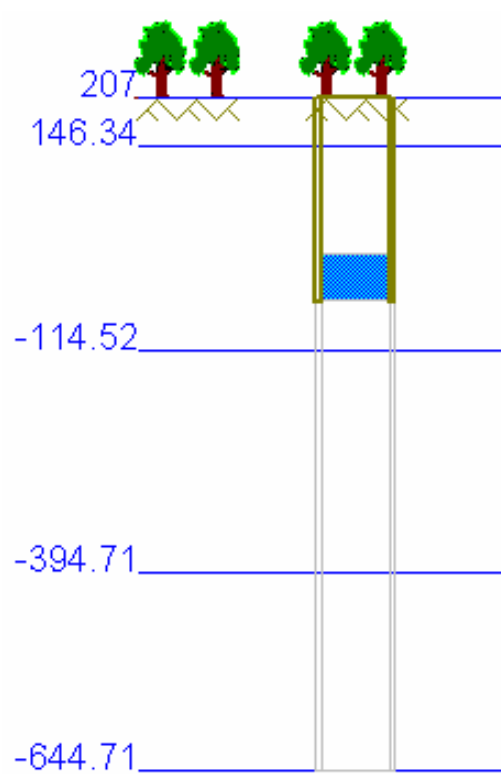
Σχήμα 6.13: Τομή γεώτρησης T12.



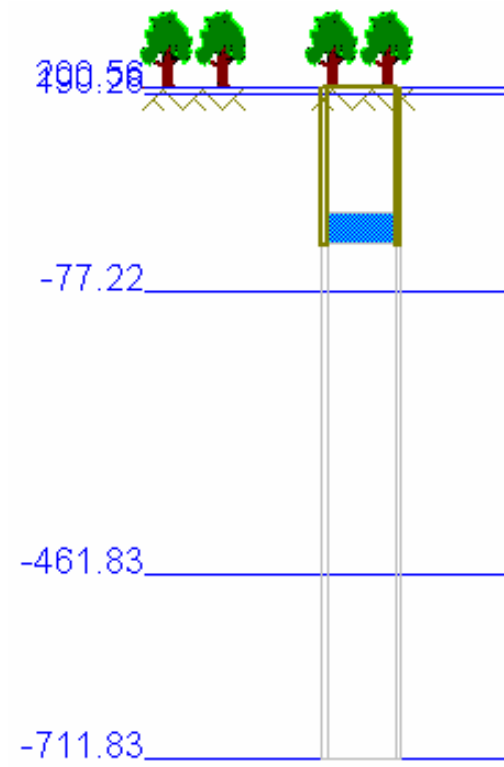
Σχήμα 6.14: Τομή γεώτρησης T15.



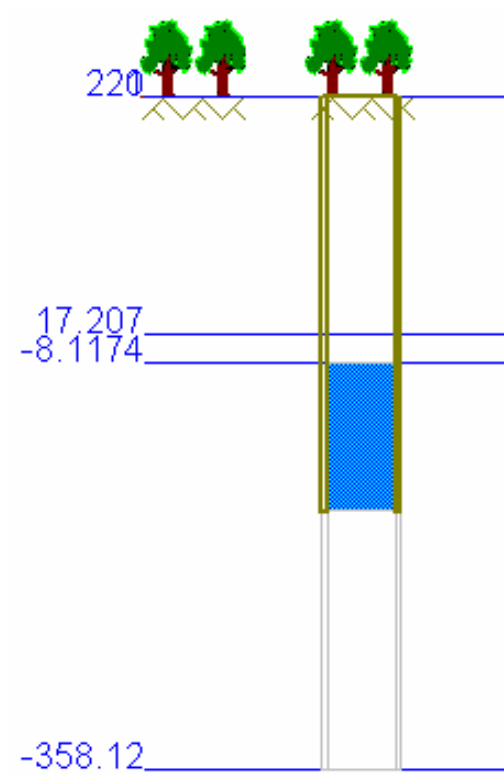
Σχήμα 6.15: Τομή γεώτρησης T17.



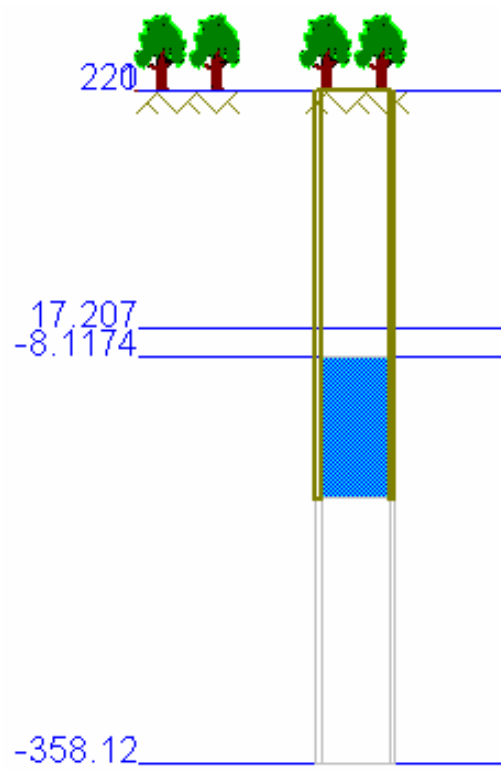
Σχήμα 6.16: Τομή γεώτρησης T21.



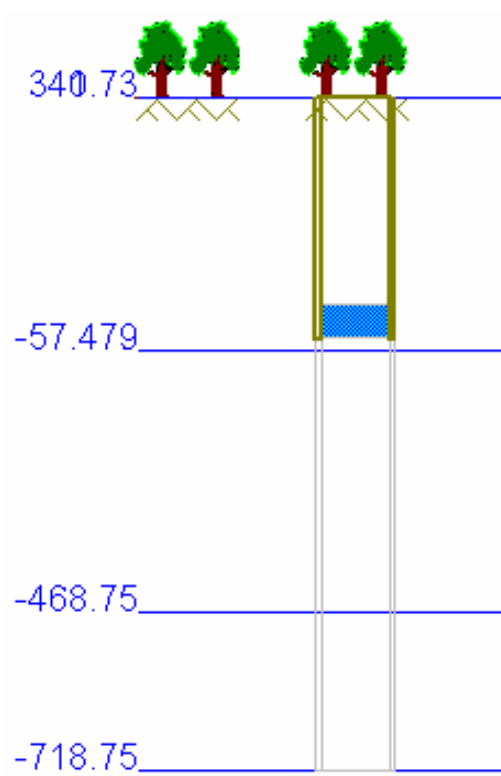
Σχήμα 6.17: Τομή γεώτρησης Σ1.



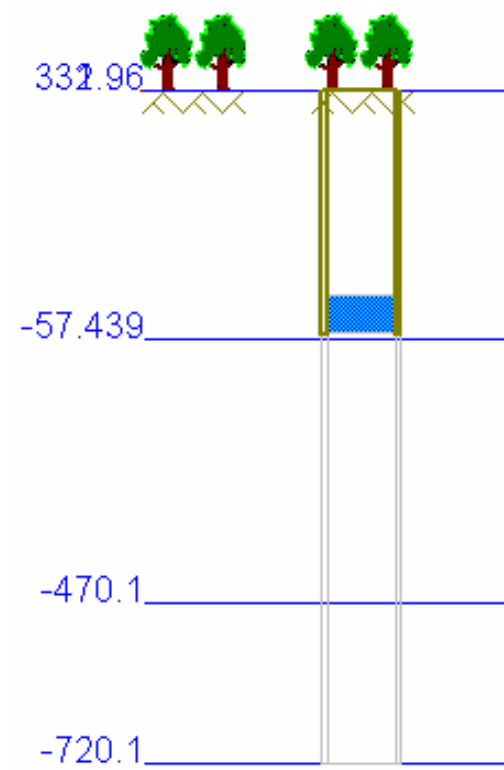
Σχήμα 6.18: Τομή γεώτρησης T19.



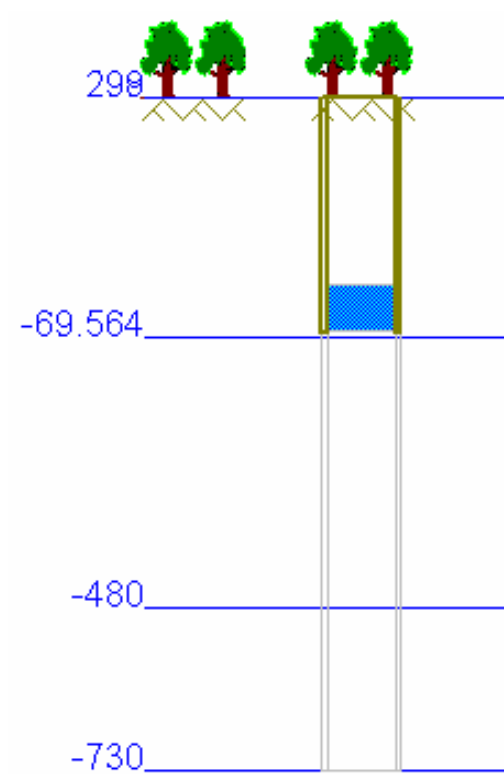
Σχήμα 6.19: Τομή γεώτρησης T22.



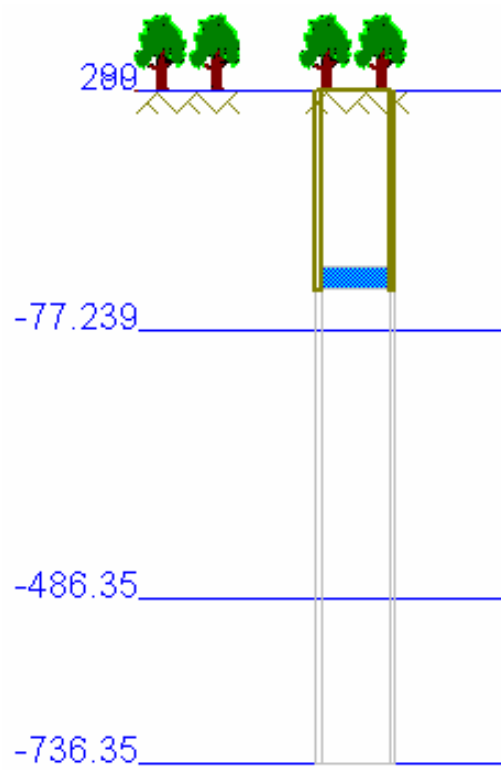
Σχήμα 6.20: Τομή γεώτρησης K1.



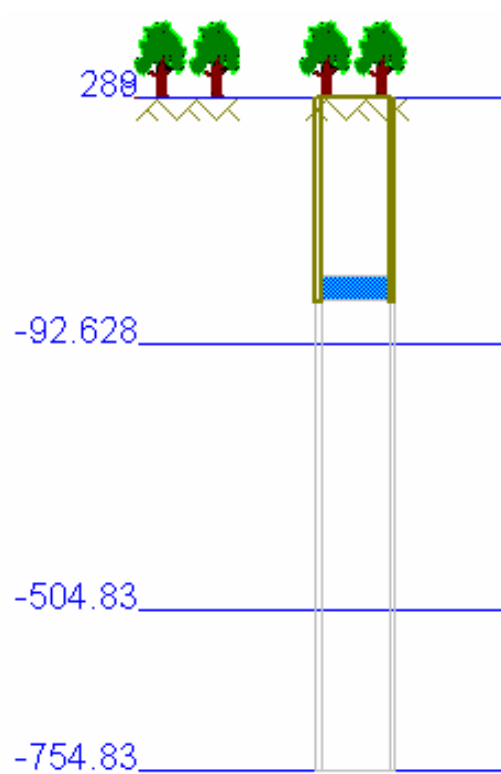
Σχήμα 6.21: Τομή γεώτρησης K2.



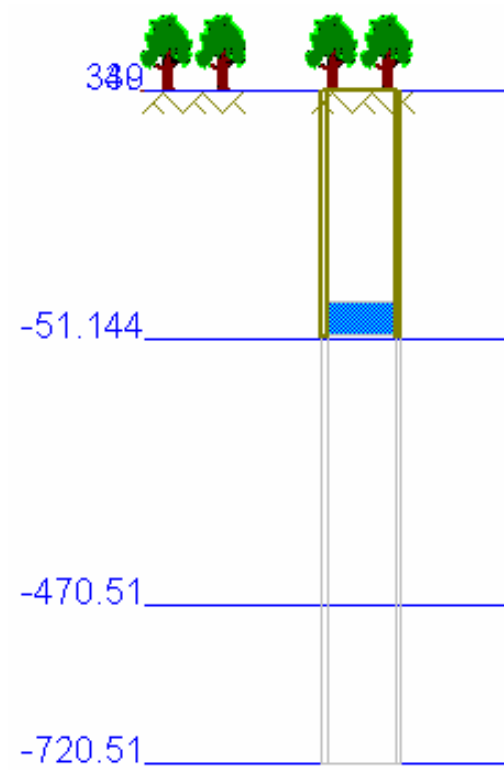
Σχήμα 6.22: Τομή γεώτρησης K3.



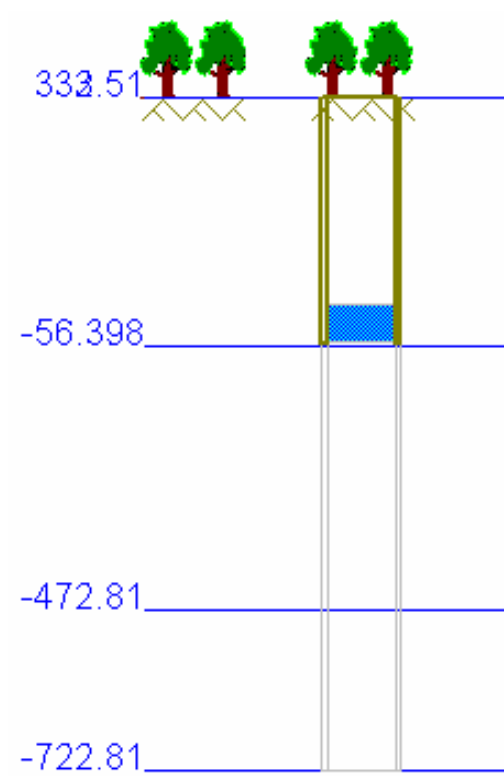
Σχήμα 6.23: Τομή γεώτρησης K5.



Σχήμα 6.24: Τομή γεώτρησης K7.



Σχήμα 6.25: Τομή γεώτρησης K9.



Σχήμα 6.26: Τομή γεώτρησης K10.

6.1.7. Εισαγωγή δεδομένων παρατήρησης

Τα δεδομένα παρατήρησης αφορούν γεωτρήσεις για τις οποίες διατίθενται σχεδόν αποκλειστικά μετρήσεις στάθμης ηρεμίας του νερού. Οι γεωτρήσεις αυτές αντλήθηκαν μόνο κατά την διάρκεια των δοκιμαστικών τους αντλήσεων και αφού κρίθηκαν "άγονες" ή "προβληματικές", από τεχνικής απόψεως, χρησιμοποιήθηκαν από την υπεύθυνη επιχείρηση (ΔΕΥΑΗ) ως γεωτρήσεις παρατήρησης (observation wells) της μεταβολής της στάθμης νερού του υδροφορέα.

Πρόκειται συνολικά για δεκαεπτά (17) γεωτρήσεις. Συγκεκριμένα, οι T10, T13, T14, T16, T23, KT1, KT2, KT3 και KT4 στην Τύλισο, ΓΦ4, MN και IH01 στο Γωνιανό Φαράγγι και K4, K6, K6A, K8 και IH12 στην Κέρη (οι θέσεις τους δίνονται στο Σχήμα 4.2, κεφ. 4). Στον Πίνακα Β.1 (α – γ) του Παραρτήματος – Μέρος Β, δίνονται οι συντεταγμένες (x, y, z) και λειτουργικά στοιχεία των γεωτρήσεων αυτών.

Στις προαναφερόμενες γεωτρήσεις παρατήρησης έγινε επεξεργασία των τιμών τους, όμοια με αυτήν που έγινε στις γεωτρήσεις άντλησης αλλά αυτή τη φορά για τις στάθμες ηρεμίας, προκειμένου οι μετρήσεις αυτές να ομοιογενοποιηθούν και να εισαχθούν στο μοντέλο.

Από το σύνολο των 17 γεωτρήσεων οι K6A, KT1, KT2 και KT4 απορρίφθηκαν αμέσως, καθώς δεν διέθεταν ικανοποιητικό πλήθος μετρήσεων στάθμης ηρεμίας. Επίσης, οι μετρήσεις της γεώτρησης KT3 κρίθηκαν ως αναξιόπιστες, εφόσον διέφεραν σε μεγάλο βαθμό από τις αντίστοιχες μετρήσεις της γειτονικής γεώτρησης T23 (με πολύ μεγαλύτερο πλήθος μετρήσεων, συνεπώς περισσότερο αξιόπιστων) και γενικά δημιουργούσαν ανωμαλία στο μοντέλο. Έτσι, απορρίφθηκε και η KT3.

Τελικά, μετά και την επεξεργασία των μετρήσεων επελέγησαν δώδεκα (12) γεωτρήσεις παρατήρησης, οι T10, T13, T14, T16, T23, ΓΦ4, MN, IH01, K4, K6, K8 και IH12, οι οποίες και σχεδιάστηκαν στο μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11 (πράσινο χρώμα).

Στον **Πίνακα Δ.2 (α – στ)** του Παραρτήματος – Μέρος Δ, παρατίθενται οι στάθμες ηρεμίας των παραπάνω 12 γεωτρήσεων, οι οποίες εισάχθηκαν στο μοντέλο (σε μορφή .TXT). Οι στάθμες αυτές είναι απόλυτες, δηλαδή, μετρημένες από το επίπεδο της θάλασσας.

Σημειώνεται ότι, αντίθετα με τα δεδομένα άντλησης, τα οποία θα πρέπει να είναι συνεχή, το ModFlow επιτρέπει στον χρήστη τα δεδομένα παρατήρησης να είναι

ασυνεχή, δηλαδή, με διακοπές μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, στον Πίνακα Δ.2 (α – στ) εντοπίζονται και κενά κελιά, κάτι που δεν συνέβαινε στον Πίνακα Δ.1 (α – ε).

6.1.8. Σχεδιασμός συνοριακών συνθηκών ροής

Ο σχεδιασμός των συνοριακών συνθηκών ροής αποτελεί την σημαντικότερη εργασία πριν την τελική επίλυση της προσομοίωσης (βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.8). Προκειμένου να καθοριστούν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες θα πρέπει να γίνουν πολλές δοκιμαστικές επιλύσεις του μοντέλου μέχρι η ροή στην περιοχή ενδιαφέροντος να αποκτήσει την αναμενόμενη της μορφή (σύμφωνη με τις μετρήσεις πεδίου).

Οι συνοριακές συνθήκες σταθερής στάθμης (constant heads) απαιτούν πολύπλοκες εργασίες προκειμένου να σχεδιαστούν. Υπολογίσθηκαν καταρχήν ως μηνιαίες τιμές στάθμης ηρεμίας (μέθοδος "σταθερής κατάστασης δυναμικού μέσου όρου", βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.8.2), με βάση τις μετρήσεις στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης και σχεδιάστηκαν (ακολουθώντας το ανάγλυφο της επιφάνειας) στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος, ώστε να μην επηρεάζουν την ροή του νερού κοντά στις γεωτρήσεις άντλησης.

Για τον αρχικό (οπτικό) σχεδιασμό τους, σημαντικό ρόλο διατέλεσαν οι χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών (Σχήματα 4.37 έως και 4.40) που παρουσιάστηκαν στο κεφ. 4. Στη συνέχεια, με συνεχείς επιλύσεις του μοντέλου και εξέταση των αποτελεσμάτων ροής (ισοπιεζομετρικές καμπύλες και γραμμές ροής), επιλέχθηκαν οι καταλληλότερες τιμές, για τις οποίες η ροή προσομοιάζει τις μετρήσεις πεδίου.

Ο έλεγχος προκειμένου να βρεθεί ο καταλληλότερος συνδυασμός τιμών στις συνοριακές συνθήκες σταθερής στάθμης γίνεται και από το ίδιο το ModFlow, το οποίο μέσω διαγραμμάτων και στατιστικών αποτελεσμάτων συγκρίνει το παραγόμενο αποτέλεσμα (ισοπιεζομετρικές καμπύλες) με τις μετρήσεις πεδίου ("έμμεση αυτόματη βαθμονόμηση", βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.9.4). Τα αποτελέσματα της τελικής βαθμονόμησης των μοντέλων παρατίθενται στη συνέχεια, στην παρ. 6.2.

Τελικά, με την παραπάνω μεθοδολογία σχεδιάστηκαν, ακολουθώντας το επιφανειακό ανάγλυφο της περιοχής ενδιαφέροντος (ισοϋψείς καμπύλες), δέκα (10) περιοχές συνοριακών συνθηκών σταθερής κατάστασης.

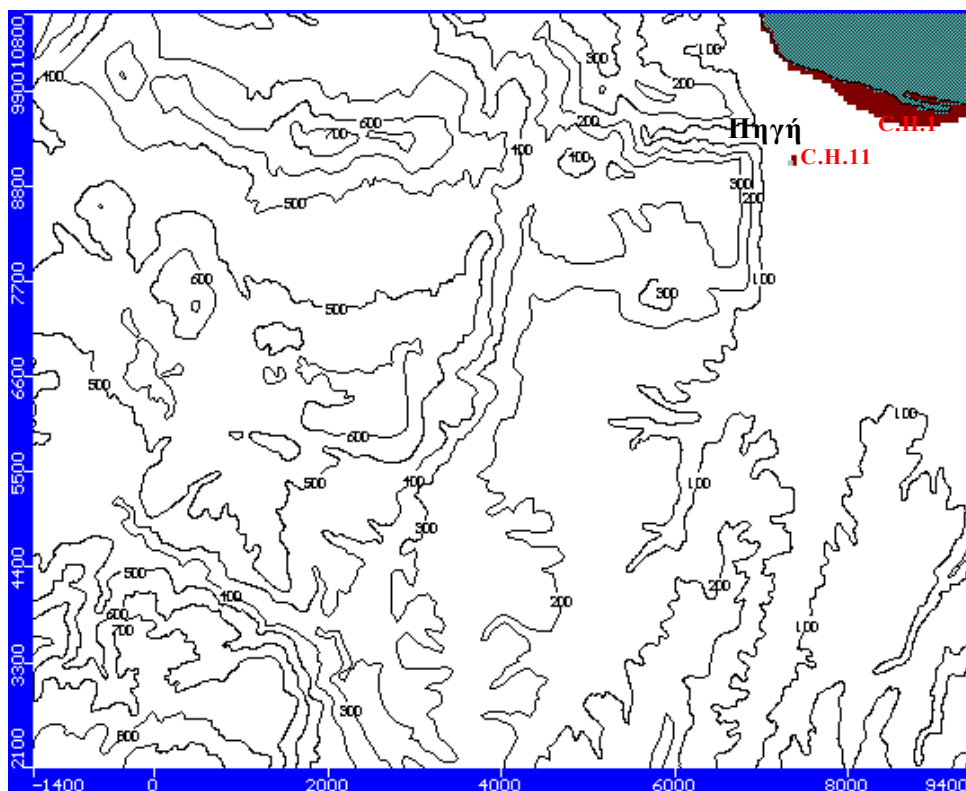
Οι μηνιαίες τιμές στάθμης που δόθηκαν στις παραπάνω περιοχές συνοριακών συνθηκών φαίνονται στον **Πίνακα 6.4**. Οι τιμές αυτές εισάχθηκαν στο πρόγραμμα με

την μορφή ASCII αρχείων (μορφής .TXT), για όλο το χρονικό φάσμα ενδιαφέροντος (4.749 ημέρες).

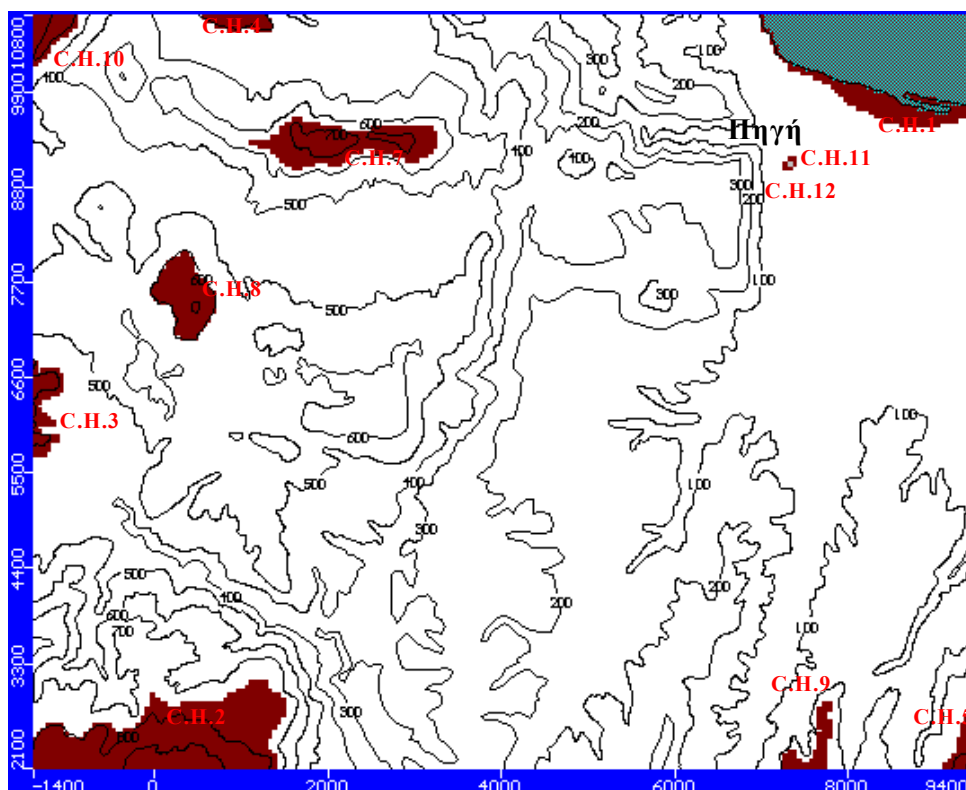
Πίνακας 6.4: Τιμές μηνιαίας στάθμης ανά περιοχή συνοριακών συνθηκών.

Μήνας	Απόλυτη στάθμη (m)									
	C.H.1	C.H.2	C.H.3	C.H.4	C.H.5	C.H.6	C.H.7	C.H.8	C.H.9	C.H.10
NOE	0	66	6	5	8	1	6	16	10	6
ΔΕΚ	0	67	7	6	9	2	7	17	11	7
ΙΑΝ	0	68	8	7	10	3	8	18	12	8
ΦΕΒ	0	69	9	8	11	4	9	19	13	9
ΜΑΡ	0	70	10	9	12	5	10	20	14	10
ΑΠΡ	0	68	9	8	11	4	9	19	13	9
ΜΑΙ	0	66	8	7	10	3	8	18	12	8
ΙΟΥΝ	0	64	6	5	8	1	6	16	10	6
ΙΟΥΛ	0	62	5	4	8	1	5	15	9	5
ΑΥΓ	0	60	5	4	8	1	5	15	9	5
ΣΕΠ	0	62	5	4	8	1	5	15	9	5
ΟΚΤ	0	64	6	5	8	1	6	16	10	6

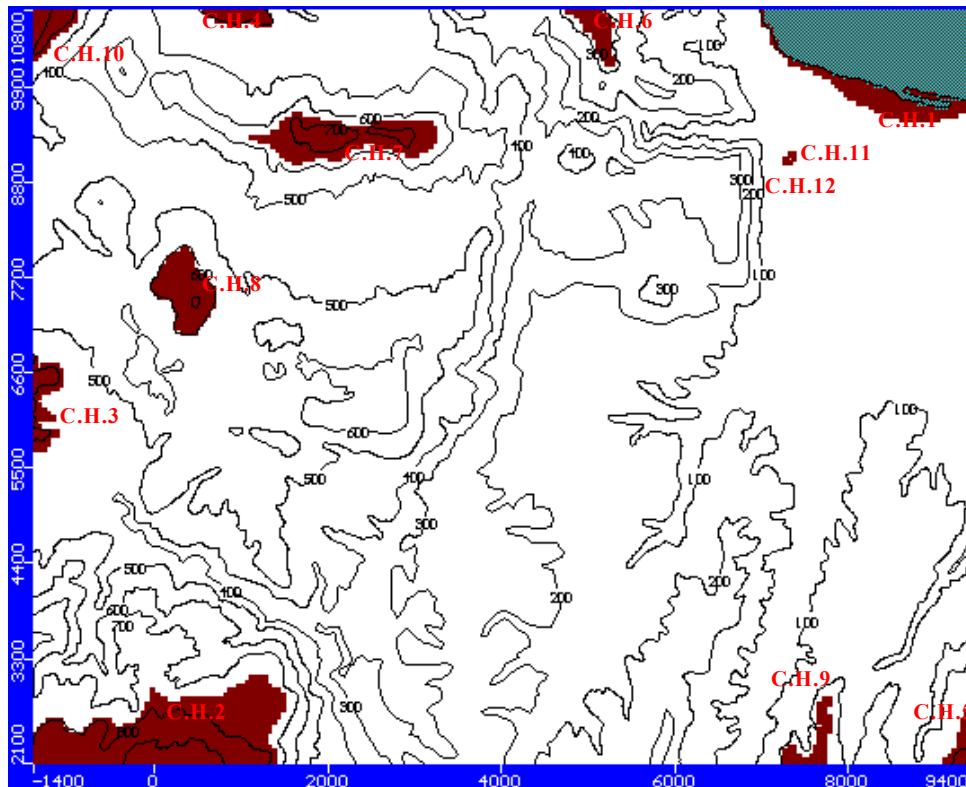
Στον Πίνακα 6.4, κάθε περιοχή συνοριακών συνθηκών συμβολίζεται με C.H. (= constant head) και κάποιον αριθμό. Οι περιοχές αυτές φαίνονται στα **Σχήματα 6.27** έως και **6.29**, για κάθε στρώμα ξεχωριστά. Για τα δύο τελευταία στρώματα (3^ο και 4^ο) οι περιοχές είναι κοινές και παρουσιάζονται σε έναν χάρτη (Σχήμα 6.29).



Σχήμα 6.27: Περιοχές συνοριακών συνθηκών στο 1^ο στρώμα.



Σχήμα 6.28: Περιοχές συνοριακών συνθηκών στο 2^ο στρώμα.



Σχήμα 6.29: Περιοχές συνοριακών συνθηκών στο 3^ο και στο 4^ο στρώμα.

Σημειώνεται ότι στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται και οι περιοχές συνοριακών συνθηκών σταθερής κατάστασης C.H.11 και C.H.12, οι οποίες αφορούν την περιοχή της πηγής Αλμυρού και αναλύονται στα επόμενα (πρόκειται για "τοπικές ρυθμίσεις", βλέπε παρ. 6.1.1).

Τελευταία συνοριακή συνθήκη ροής (φυσική) αποτελεί η ίδια η πηγή Αλμυρού (η ακριβής θέση της φαίνεται στον χάρτη του Σχήματος 4.2, κεφ. 4), η οποία, λόγω της φύσης της, επιλέχθηκε να εισαχθεί στο μοντέλο ως περιοχή αποστράγγισης (drain). Η πηγή σχεδιάστηκε σε ένα κελί στο πρώτο και στο δεύτερο στρώμα του μοντέλου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.27 και 6.28.

Στις διατιθέμενες μετρήσεις παροχής και στάθμης λίμνης της πηγής έγινε επεξεργασία, ανάλογη με τις αντίστοιχες μετρήσεις στις γεωτρήσεις που παρουσιάστηκε προηγουμένως, με σκοπό αυτές να ομοιογενοποιηθούν και να αναχθούν σε μηνιαίες τιμές. Στον **Πίνακα Δ.3 (α – ε)** του Παραρτήματος – Μέρος Δ, παρουσιάζονται οι επεξεργασμένες μετρήσεις πεδίου (υπαίθρου) της πηγής, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στην περαιτέρω επεξεργασία.

Προκειμένου όμως να εισαχθεί στο μοντέλο ένα φυσικό όριο (στην συγκεκριμένη περίπτωση πηγή) ως περιοχή αποστράγγισης (drain), απαιτείται από το πρόγραμμα ο υπολογισμός δύο επιπλέον παραμέτρων, της "στάθμης αποστράγγισης" και της "σταθεράς αποστράγγισης".

Στάθμη αποστράγγισης (drain elevation) ⁽¹⁾ είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μέσα στην αποστραγγιστική περιοχή. Η αποστράγγιση θεωρείται ότι λειτουργεί σε συνθήκες μερικής πληρότητας, έτσι ώστε η στάθμη αποστράγγισης να είναι περίπου ίση με τη μέση στάθμη της αποστραγγιστικής περιοχής.

Η σταθερά αποστράγγισης (conductance) είναι ένας συνολικός συντελεστής που περιγράφει την απώλεια φορτίου μεταξύ της αποστράγγισης και του υπόγειου υδροφορέα. Αυτή η απώλεια προκαλείται από το γεγονός ότι η ροή κοντά στην αποστράγγιση γίνεται συγκλίνουσα, από την παρουσία ξενόφερτου υλικού γύρω από την αποστράγγιση, από το κατά πόσο είναι διασπασμένο το πέτρωμα που φιλοξενεί την αποστράγγιση, από τα τοιχώματα της αποστράγγισης και από το κατά πόσο τυχόν ανοίγματα στα τοιχώματα της αποστράγγισης είναι φραγμένα, είτε από υλικά, είτε από φυτά κ.λπ. ^[1].

Η στάθμη αποστράγγισης (**H_b**) της πηγής Αλμυρού θεωρήθηκε σταθερή (ανεξαρτήτως εποχής) και ίση με την μέση στάθμη ανάβλυσης, δηλαδή 2 m, πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Στην πραγματικότητα, η στάθμη αυτή κυμαίνεται από 1,5 έως και 3,1 m, πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Όμως, δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις – παρατηρήσεις για την εποχιακή εξέλιξή της. Έτσι, προκειμένου να διευκολυνθεί και η περαιτέρω επεξεργασία, επιλέχθηκε η στάθμη των 2 m ως η καταλληλότερη (αναφέρεται συνηθέστερα από τους διαφόρους μελετητές της πηγής).

Η σταθερά αποστράγγισης συνήθίζεται να δίνεται από την σχέση ^{[1],[113]}:

$$C = k \cdot \frac{A}{B} \quad (6.3)$$

όπου, **C** σταθερά αποστράγγισης (m²/day),

⁽¹⁾ Το "Drain Package" του ModFlow σχεδιάστηκε για να προσομοιάσει τις επιδράσεις στον υδροφόρο ορίζοντα αποστραγγιστικών έργων. Ο ρυθμός (παροχή) αποστράγγισης είναι ανάλογος της διαφοράς του υδραυλικού φορτίου στον υδροφόρο ορίζοντα και στο αποστραγγιστικό έργο. Θεωρείται ότι, η αποστράγγιση δεν έχει κανενός είδους επίδραση

- k** υδροπερατότητα υδροφορέα που αποστραγγίζεται (m/day),
- A** εμβαδόν επιφανείας της περιοχής αποστράγγισης (m^2), και
- B** πάχος της περιοχής αποστράγγισης (m).

Από τη σχέση 6.3, για **k** (**= kz**) = 0,0025 m/sec = 216 m/day (βλέπε Πίνακα 6.1, ασβεστόλιθοι Τρίπολης), **A** = 50 m × 50 m = 2.500 m^2 (εμβαδόν κελιού)⁽¹⁾ και **B** = 1 m (ενδεικτική τιμή για το "πάχος" της πηγής)⁽²⁾, προκύπτει: **C** = **540.000 m^2/day** .

Μετά την εισαγωγή της παραπάνω τιμής σταθεράς αποστράγγισης (**C**), με στάθμη ανάβλυσσης της πηγής (**Hb**) τα 2 m και χωρίς την "τοπική ρύθμιση" της υδροπερατότητας που προαναφέρθηκε (παρ. 6.1.4), η επίλυση του μοντέλου έδωσε μικρές παροχές, πολύ μικρότερες από τις τιμές πεδίου. Σχεδόν το ίδιο συνέβη και για διάφορες άλλες τιμές **C** (1 έως και $10^{25} m^2/day$) που δοκιμάστηκαν.

Η παραπάνω σχέση, όπως τονίζεται και από τους συγγραφείς που την διατύπωσαν, είναι η πιο συνηθισμένη (ενδεικτική) σε μοντέλα ροής. Επίσης, από τους ίδιους συγγραφείς τονίζεται ότι είναι δυνατόν μεγάλες αυξομειώσεις στην σταθερά αποστράγγισης να μην επιφέρουν ουσιαστικές αλλαγές στην συμπεριφορά της περιοχής αποστράγγισης ^[1].

Η αλήθεια είναι ότι δεν υπάρχει κανένας γενικός τύπος για τον υπολογισμό της σταθεράς αποστράγγισης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν είναι διαθέσιμες όλες οι λεπτομερείς πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό της παραμέτρου αυτής. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν την ακριβή γνώση της διασποράς φορτίου γύρω από την αποστράγγιση, την υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου κοντά στην αποστράγγιση, την διασπορά και την ποιότητα του υλικού που βρίσκεται γύρω από την αποστράγγιση, καθώς και την υδροπερατότητά του.

στο μοντέλο, από τη στιγμή που η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη στάθμη αποστράγγισης.

⁽¹⁾ Θεωρήθηκε ότι, η επιφάνεια της πηγής αντιπροσωπεύεται ικανοποιητικά από ένα κελί, παρότι πρόκειται για σημειακή εκροή νερού. Έτσι κι αλλιώς, οι δυνατότητες του προγράμματος δεν επιτρέπουν σημειακή έκφραση της αποστράγγισης (drain), επιτρέπουν όμως χωρισμό των κελιών σε μικρότερα, προκειμένου να μειωθεί η επιφάνεια της πηγής και να προσομοιασθεί αυτή καλύτερα ως "σημειακή". Όμως, η τελευταία δυνατότητα δεν χρησιμοποιήθηκε για δύο λόγους: 1) Η τοπική πύκνωση των γραμμών προκειμένου να αναπαρασταθεί σημειακά η πηγή επιμήκυνε κατά πολύ τους χρόνους επίλυσης του μοντέλου και επιπλέον, όταν η πύκνωση ξεπερνούσε ένα όριο, δημιουργούσε αριθμητικά λάθη και δεν μπορούσε να επιτευχθεί σύγκλιση. 2) Η πύκνωση θεωρήθηκε μη αναγκαία εφόσον η πηγή αποτελεί φυσικό σημείο εκφόρτισης, χωρίς πραγματικές διαστάσεις.

Έτσι, έχει επικρατήσει ο υπολογισμός της σταθεράς αποστράγγισης να γίνεται έμμεσα, με τη χρήση παραμέτρων που μπορούν να μετρηθούν, όπως η πτώση στάθμης και ο ρυθμός (παροχή) αποστράγγισης. Το ModFlow, κατά την επίλυση του μοντέλου, προκειμένου να υπολογίσει την παροχή της αποστραγγιστικής περιοχής, χρησιμοποιεί τη σχέση $Q = C \cdot (H_b - H_m)$ ^[1]:

$$Q = C \cdot (H_b - H_m) \quad (6.4)$$

όπου, **Q** παροχή της αποστραγγιστικής περιοχής (m³/day) (αρνητικός αριθμός, καθώς πρόκειται για εκροή νερού),

H_b πιεζομετρική στάθμη της αποστραγγιστικής περιοχής (m) (στη συγκεκριμένη περίπτωση, στάθμη ανάβλυσης της πηγής = 2 m), και

H_m υπολογιζόμενη, από το ίδιο το πρόγραμμα, πιεζομετρική στάθμη στην αποστραγγιστική περιοχή (m).

Όμως, ο υπολογισμός της στάθμης **H_m** δεν είναι δυνατός από τον χρήστη, τουλάχιστο με άμεσο τρόπο, καθώς η διαφορά **H_m – H_b** ουσιαστικά εκφράζει την υδραυλική κλίση, την οποία θεωρεί το ModFlow στην αποστραγγιστική περιοχή, προκειμένου αυτή να παράγει νερό.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι, η σταθερά αποστράγγισης είναι πολύπλοκη παράμετρος, η οποία για να υπολογισθεί θα πρέπει να γίνουν συνεχείς επιλύσεις του μοντέλου με διαφορετικές τιμές **C**, μέχρι να προκύψει η ζητούμενη παροχή. Άλλωστε, είναι γενικά αποδεκτό η παράμετρος αυτή να καθορίζεται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης (calibration) του μοντέλου ^[1].

Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, το ModFlow δεν μπορεί να επεξεργαστεί ρήγματα. Όμως, η γένεση και η σημαντική (ποσοτικά) υδροφορία της πηγής Αλμυρού στηρίζονται τόσο στους καρστικούς αγωγούς του υδροφορέα (ασβεστόλιθοι Τρίπολης), όσο και σε ένα σχεδόν κατακόρυφο ρήγμα, το οποίο φέρνει σε επαφή (πηγή επαφής) τους ασβεστόλιθους "Τρίπολης" με τους υπερκείμενους Νεογενείς σχηματισμούς (βλέπε κεφ. 2, Σχήμα 2.4).

Η ως άνω τεκτονική – υδρογεωλογική λειτουργία της πηγής είναι αδύνατο να εκφραστεί από τις συμβατικές μορφές σχεδιασμού του προγράμματος. Αυτό έχει ως

⁽²⁾ Επιλέχθηκε η ενδεικτική τιμή **B** = 1 m (μικρότερος δυνατός ακέραιος αριθμός) προκειμένου να προσομοιασθεί καλύτερα η "σημειακή" έννοια της πηγής.

αποτέλεσμα, μετά την επίλυση του μοντέλου, η πηγή Αλμυρού να εμφανίζεται να έχει πολύ μικρότερες παροχές απ' ό τι στην πραγματικότητα.

Λύση στο παραπάνω πρόβλημα επέφερε η "τοπική ρύθμιση" της υδροπερατότητας που περιγράφηκε στην παρ. 6.1.4. Με την ρύθμιση αυτή, η επίλυση του μοντέλου έδωσε ικανοποιητικές παροχές με τιμές σχεδόν ίδιες με τις πραγματικές (μετρήσεις πεδίου). Όμως οι παροχές αυτές ήταν ανεξέλεγκτες, υπό την έννοια ότι οι αυξομειώσεις τους δεν ακολουθούσαν πιστά τις εποχιακές αυξομειώσεις των πραγματικών τιμών.

Προκειμένου λοιπόν να διορθωθεί η παραπάνω ασυμβατότητα ανάμεσα στις μετρήσεις πεδίου και στα αποτελέσματα του προσομοιωτή, επιχειρήθηκε αναπαράσταση των ασυνεχειών (ρήγμα και καρστικοί αγωγοί) με "θεωρητική" αλλαγή της υδραυλικής κλίσης (δηλαδή, της διαφοράς $H_m - H_b$) από τα ανάντη στα κατόντη της πηγής. Η νέα αυτή "τοπική ρύθμιση" έγινε με την χρησιμοποίηση δύο (2) ακόμη περιοχών συνοριακών συνθηκών σταθερής κατάστασης (constant heads), των C.H.11 και C.H.12, οι οποίες σχεδιάστηκαν σε κελιά γύρω από την πηγή (βλέπε Σχήματα 6.27, 6.28 και 6.29).

Για να βρεθεί η κατάλληλη υδραυλική κλίση που προκαλεί τις πραγματικές παροχές (μετρήσεις πεδίου) στην πηγή, επιλύθηκε το μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής για διάφορες τιμές "θεωρητικής στάθμης" (H_m') ανάντη της πηγής, δίνοντας για την αποστραγγιστική περιοχή (πηγή) τις τιμές $H_b = 2 \text{ m}$ και $C = 540.000 \text{ m}^2/\text{day}$, για όλο το χρονικό "παράθυρο" των 4.749 ημερών.

Η θεωρητική στάθμη H_m' αποτελεί την στάθμη της περιοχής C.H.12, για σταθερή στάθμη στην C.H.11 ίση με 1 m και ουσιαστικά ρυθμίζει την διαφορά $H_m - H_b$, δηλαδή την υδραυλική κλίση στην πηγή.

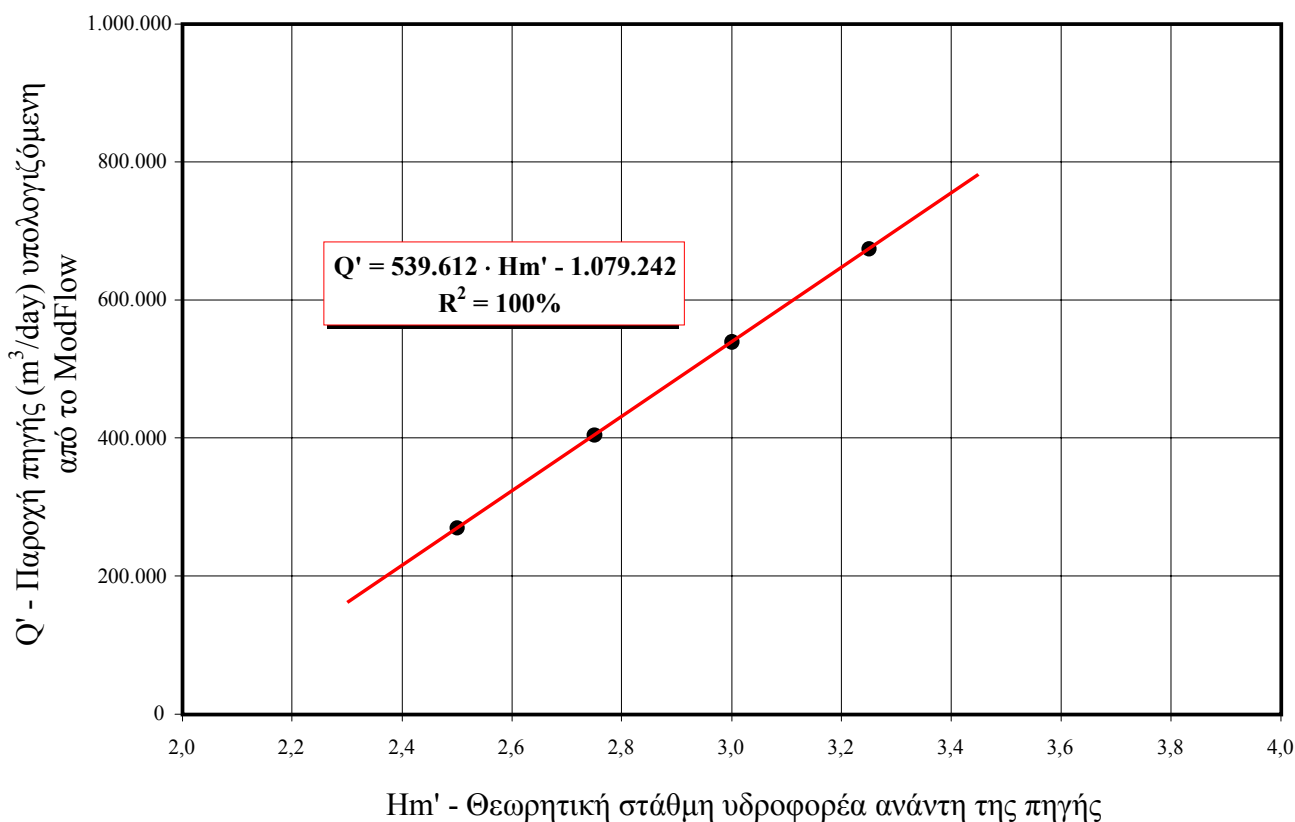
Τα ζεύγη τιμών H_m' και Q' (τιμές επιλύσεων του μοντέλου) που προέκυψαν από την παραπάνω εργασία παραστάθηκαν σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων. Στο **Σχήμα 6.30** παρουσιάζεται το διάγραμμα που τελικά κατασκευάστηκε.

Στο διάγραμμα αυτό η αντιπροσωπευτικότερη καμπύλη είναι ευθεία γραμμή (συντελεστής συσχετισμού $R^2 = 100\%$) με εξίσωση:

$$Q' = 539.612 \cdot H_m' - 1.079.242 \quad (6.5)$$

όπου, Q' παροχή της πηγής, υπολογιζόμενη από το ModFlow (m^3/day), και

H_m' θεωρητική στάθμη υδροφορέα ανάντη της πηγής (m).



Σχήμα 6.30: Σχέση μεταξύ "θεωρητικής στάθμης" ανάντη της πηγής Αλμυρού και υπολογιζόμενης από το ModFlow παροχής σε αυτήν.

Με βάση τη σχέση 6.5 και τον Πίνακα Δ.3 (α – ε) του Παραρτήματος – Μέρος Δ, αντιστοιχήθηκε σε κάθε τιμή (πεδίου) Q , η κατάλληλη τιμή Hm' , προκειμένου να ισχύει $Q = Q'$ ⁽¹⁾.

Στον **Πίνακα 6.5** δίνονται οι τιμές στάθμης Hm' που τελικά δόθηκαν στην περιοχή C.H.12. Οι τιμές αυτές εισάχθηκαν στο μοντέλο με την μορφή ASCII αρχείου (.TXT).

Πίνακας 6.5: Τιμές στάθμης στην περιοχή C.H.12.

⁽¹⁾ $Q = Q'$ στην σταθερή κατάσταση ροής. Στα μοντέλα μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής, οι γεωτρήσεις άντλησης επηρεάζουν την εκροή της πηγής με αποτέλεσμα $Q > Q'$. Πάντως, η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή και δεν αλλοιώνει την γενική εικόνα της προσομοίωσης.

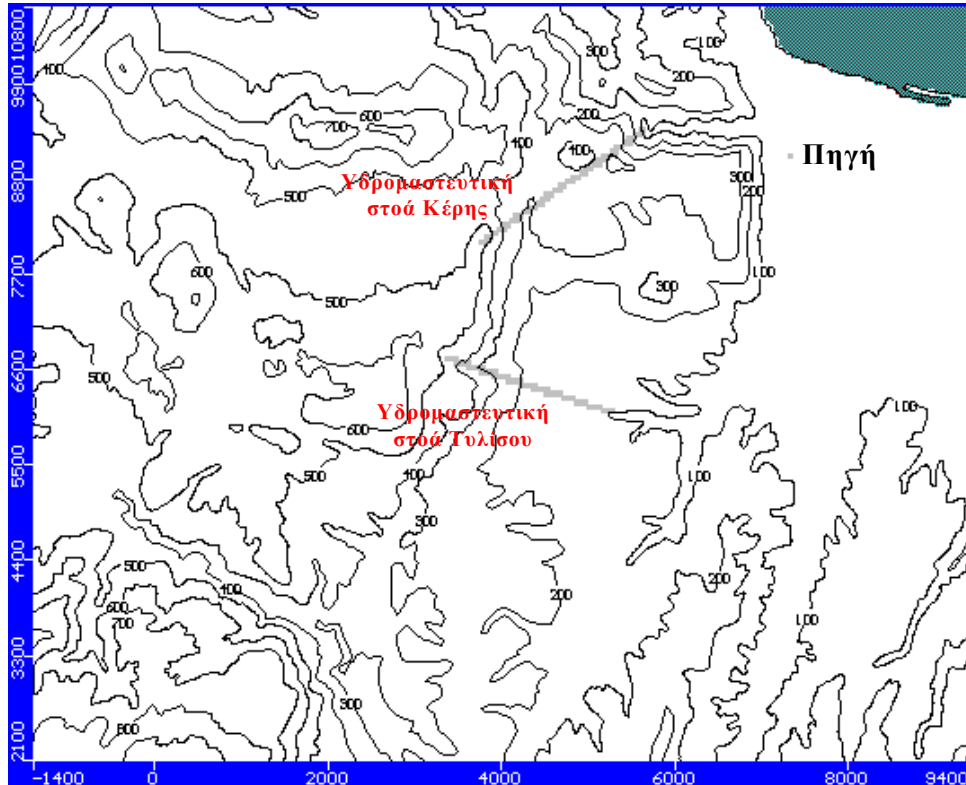
Μήνας	Απόλυτη στάθμη (m)						
	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
ΙΑΝ		3,1208	3,4052	3,0400	3,8005	3,8005	3,1489
ΦΕΒ		3,0177	3,7738	4,0350	4,0164	4,1614	3,6362
ΜΑΡ		3,8803	3,9027	2,9370	3,8803	4,7857	3,8803
ΑΠΡ		3,1946	3,2475	2,7760	3,2475	3,2475	3,2475
ΜΑΙ		2,9121	2,9169	2,7137	2,9985	2,9985	2,9985
ΙΟΥΝ		2,8953	2,9079	2,6703	2,8953	2,8953	2,8953
ΙΟΥΛ		2,8189	2,7742	2,8136	2,8136	3,0305	2,8136
ΑΥΓ		2,6367	2,7766	2,7195	2,5603	2,7556	2,7195
ΣΕΠ		2,7667	2,6438	2,6962	2,5630	2,6551	2,6962
ΟΚΤ		2,6936	2,6854	2,7482	2,6178	2,7482	2,5806
ΝΟΕ	2,7853	3,3891	2,6219	2,9773	2,9773	2,5670	2,5739
ΔΕΚ	3,1168	3,5132	3,0667	3,5132	3,4111	2,7527	4,2509
Μήνας	Απόλυτη στάθμη (m)						
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
ΙΑΝ	3,4925	3,8005	3,8005	3,8005	3,8005	3,8005	3,8005
ΦΕΒ	4,0164	4,0164	4,0164	4,0164	4,0164	4,0164	4,0164
ΜΑΡ	3,8803	3,8803	3,8803	3,8803	3,8803	3,8803	3,8803
ΑΠΡ	3,2475	3,2475	3,2475	3,2475	3,2475	3,2475	3,2475
ΜΑΙ	2,8442	2,9985	2,9985	2,9985	2,9985	2,9985	2,9985
ΙΟΥΝ	2,8953	2,8953	2,8953	2,8953	2,8953	2,8953	2,8953
ΙΟΥΛ	2,8136	2,8136	2,8136	2,8136	2,8136	2,8136	2,8136
ΑΥΓ	2,7195	2,7195	2,7195	2,7195	2,7195	2,7195	2,7195
ΣΕΠ	2,6962	2,6962	2,6962	2,6962	2,6962	2,6962	2,6962
ΟΚΤ	2,7482	2,7482	2,7482	2,7482	2,7482	2,7482	2,7482
ΝΟΕ	2,9773	2,9773	2,9773	2,9773	2,9773	2,9773	
ΔΕΚ	3,5132	3,5132	3,5132	3,5132	3,5132	3,5132	

Όπως προαναφέρθηκε, οι στάθμες στην περιοχή C.H.11 θεωρήθηκαν σταθερές για όλο το χρονικό φάσμα ενδιαφέροντος (4.749 ημέρες) και ίσες με 1 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (στατική σταθερή κατάσταση ροής, βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.8.2).

6.1.9. Σχεδιασμός υδρομαστευτικής στοάς

Η υδρομαστευτική στοά, τόσο στην περιοχή της Κέρης, όσο και στην Τύλισο, σχεδιάστηκε ως περιοχή αποστράγγισης (drain) στο δεύτερο στρώμα του μοντέλου

(ασβεστόλιθοι "Τριπόλεως"). Στο **Σχήμα 6.31** φαίνονται οι δύο προτεινόμενες θέσεις, όπως αυτές εισάχθηκαν στα μοντέλα.



Σχήμα 6.31: Προτεινόμενες θέσεις υδρομαστευτικής στοάς.

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του έργου στις δύο θέσεις του, θα μπορούσε το δεύτερο στρώμα να χωριστεί σε τρία (3) υποστρώματα, έτσι ώστε το μεσαίο από αυτά να οριστεί στις διαστάσεις της προτεινόμενης στοάς. Κάτι τέτοιο όμως, αν και αρχικά επιχειρήθηκε, τελικά δεν έγινε για τους εξής λόγους:

- 1) Ο ως άνω σχεδιασμός της υδρομαστευτικής στοάς είναι μεν εφικτός, αλλά μέχρι κάποιο βαθμό. Λεπτομερής σχεδιασμός προκαλεί αριθμητικά προβλήματα κατά την επίλυση του μοντέλου, τα οποία δεν είναι δυνατό να λυθούν. Για παράδειγμα, δεν προέκυψε πρακτικά εφικτή διακριτοποίηση του χρόνου, παρά τις συνεχείς προσπάθειες επίλυσης του μοντέλου με διάφορα χρονικά βήματα. Επίσης, όσο πιο λεπτομερής ήταν ο σχεδιασμός, τόσο ευκολότερα δημιουργούνταν ανεπίτρεπτες για το πρόγραμμα ασυνέχειες (διακοπές) στα στρώματα και το μοντέλο δεν επιλύονταν.

- 2) Ακόμα κι αν λύνονταν τα σχεδιαστικά προβλήματα, η προσομοίωση της λειτουργίας της υδρομαστευτικής στοάς θα ήταν ελλιπής, καθώς το μοντέλο θα αναγνώριζε αποστράγγιση μόνο από την συγκεκριμένη σχεδιαζόμενη περιοχή. Έτσι, πιθανόν η συμπεριφορά της στοάς να ήταν παρόμοια με εκείνη της πηγής (βλέπε παρ. 6.1.8), δηλαδή, η στοά θα έδινε πολύ μικρές παροχές, μη αναγνωρίζοντας τροφοδοσία από καρστικούς αγωγούς, οι οποίοι εκτείνονται σε όλο το πάχος των ασβεστόλιθων "Τριπόλεως".
- 3) Όπως αναφέρθηκε, ο σχεδιασμός είναι εφικτός ως ένα, αρκετά χονδροειδή, βαθμό λεπτομέρειας. Συγκεκριμένα, το μοντέλο επιλύθηκε με την στοά σχεδιασμένη έτσι ώστε το πάχος της αποστράγγισης να φτάνει τα 50 – 100 m, περίπου. Όμως η επίλυση αυτή, χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους αποστράγγισης (**C** και **Hb**), έδωσε όμοιες παροχές με αυτές του αρχικού σχεδιασμού (πάχος αποστράγγισης σε ολόκληρο τον σχηματισμό).

Τελικά, από τα παραπάνω συνάγεται η διαπίστωση ότι, όπως και στην περίπτωση της πηγής Αλμυρού, σε καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες οι περιοχές αποστράγγισης θα πρέπει να περιλαμβάνουν ολόκληρο το πάχος των σχηματισμών που τις τροφοδοτούν. Ο λόγος για τον οποίο είναι αναγκαία αυτή η ιδιαιτερότητα, έχει να κάνει με τον μηχανισμό μεταφοράς του νερού σε καρστικούς υδροφορείς, όπου η κύρια κίνηση γίνεται μέσω καναλιών (καρστικοί αγωγοί).

Συμπεραίνεται, δηλαδή, ότι στους καρστικούς υδροφόρους σχηματισμούς, όπως στην εξεταζόμενη περίπτωση, υπάρχει ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στις έννοιες "περιοχή αποστράγγισης" και "περιοχή εκφόρτισης". Η περιοχή αποστράγγισης ενός υδρομαστευτικού έργου (στοά) ή μιας φυσικής ανάβλυσης (πηγή) έχει τελείως διαφορετικές διαστάσεις από τις διαστάσεις των περιοχών εκφόρτισης (στοά ή πηγή).

Αυτό σημαίνει ότι οι αποστραγγιστικές παράμετροι (στάθμη και σταθερά αποστράγγισης) της υδρομαστευτικής στοάς (= αγωγός εκφόρτισης) θα πρέπει να εκτιμηθούν με βάση τις προτεινόμενες διαστάσεις της. Όμως, η σχεδιαζόμενη αποστραγγιστική περιοχή που θα τροφοδοτεί με νερό το έργο θα πρέπει να περιλαμβάνει ολόκληρο το πάχος των ασβεστόλιθων "Τριπόλεως".

Με βάση λοιπόν την παραπάνω διαπίστωση – παραδοχή η αποστραγγιστική περιοχή της στοάς στις δύο προτεινόμενες θέσεις της σχεδιάστηκε έτσι ώστε να

εκτείνεται σε πλάτος ενός ή δύο κελιών (Σχήμα 6.31) και σε πάχος ίσο με ολόκληρο το δεύτερο στρώμα (Layer 2: Ασβεστόλιθοι "Τρίπολης").

Όμοια με τον σχεδιασμό της πηγής Αλμυρού, ήταν αναγκαίο να εκτιμηθούν, τόσο η στάθμη αποστράγγισης του υδροφόρου ορίζοντα, όσο και η σταθερά αποστράγγισης της στοάς. Θεωρώντας ότι η υδρομαστευτική στοά θα έχει πλάτος 4 m, ύψος 5 m και μήκος σύμφωνα με το Σχήμα 2.7 στο κεφ. 2 (ανάλογα με την θέση της) και με βάση την σχέση 6.3, προκύπτουν οι παρακάτω τιμές **C**:

- Υδρομαστευτική στοά Κέρης (μήκος 1,8 km): $k (= kz) = 0,0025 \text{ m/sec} = 216 \text{ m/day}$ (Πίνακας 6.1, ασβεστόλιθοι "Τρίπολης"), $A = 4 \text{ m} \times 1.800 \text{ m} = 7.200 \text{ m}^2$, και $B = 5 \text{ m} \Rightarrow C = (216 \text{ m/day}) \cdot (7.200 \text{ m}^2) / (5 \text{ m}) \Rightarrow C = \mathbf{311.040 \text{ m}^2/\text{day}}$.
- Υδρομαστευτική στοά Τυλίσου (μήκος 1,2 km): $k (= kz) = 0,0025 \text{ m/sec} = 216 \text{ m/day}$ (Πίνακας 6.1, ασβεστόλιθοι "Τρίπολης"), $A = 4 \text{ m} \times 1.200 \text{ m} = 4.800 \text{ m}^2$, και $B = 5 \text{ m} \Rightarrow C = (216 \text{ m/day}) \cdot (4.800 \text{ m}^2) / (5 \text{ m}) \Rightarrow C = \mathbf{207.306 \text{ m}^2/\text{day}}$.

Αν θεωρηθεί ότι η διαμόρφωση της στάθμης του υδροφορέα κατά την λειτουργία της υδρομαστευτικής στοάς (εκμετάλλευση του νερού με βαρύτητα και με αντλίες στην στοά) γίνεται με σταθερό τρόπο καθ' όλο το μήκος της στοάς, τότε θα ισχύει:

$$\mathbf{Hb = h_0 - \Delta h} \quad (6.6)$$

όπου, **Hb** στάθμη αποστράγγισης (m) της υδρομαστευτικής στοάς,

h₀ αρχική στάθμη υδροφορέα στην περιοχή αποστράγγισης (m), πριν την λειτουργία του έργου, και

Δh πτώση στάθμης υδροφορέα στην περιοχή αποστράγγισης (m), λόγω της λειτουργίας του έργου.

Το πρόγραμμα απαιτεί τουλάχιστον δύο τιμές της στάθμης **Hb**, στα δύο άκρα της υδρομαστευτικής στοάς. Για να βρεθούν προσεγγίσεις των τιμών αυτών, το μοντέλο επιλύθηκε σε μεταβαλλόμενη κατάσταση ροής με απενεργοποιημένες, τόσο τις γεωτρήσεις άντλησης, όσο και την ίδια την στοά.

Με τον τρόπο αυτό βρέθηκαν δύο τιμές στάθμης **h₀** στα άκρα της στοάς (δυτικό και ανατολικό άκρο), για κάθε έναν από τους 156 μήνες του χρονικού "παραθύρου" των 4.749 ημερών.

Στον **Πίνακα 6.6** δίνονται οι υπολογιζόμενες, με την μέθοδο που περιγράφηκε, τιμές **h_0** και **Hb** , στα άκρα του έργου, για θεωρούμενη πτώση στάθμης (**Δh**) ίση με 3 m και 5 m ⁽¹⁾. Τα ζεύγη των τιμών στάθμης αποστράγγισης **Hb** και σταθεράς αποστράγγισης **C** , εισάχθηκαν στα μοντέλα πρόβλεψης ως ASCII αρχείο (.TXT), για ολόκληρο το χρονικό "παράθυρο" των 4.749 ημερών.

Πίνακας 6.6: Μηνιαίες τιμές στάθμης αποστράγγισης της υδρομαστευτικής στοάς.

Μήνας	Υδρομαστευτική στοά Κέρης						Υδρομαστευτική στοά Τυλίσου					
	h_0 (m)		Hb (m)				h_0 (m)		Hb (m)			
	Δ	A	$\Delta h = 3$ m		$\Delta h = 5$ m		Δ	A	$\Delta h = 3$ m		$\Delta h = 5$ m	
			Δ	A	Δ	A			Δ	A	Δ	A
ΙΑΝ	11,5	6,3	8,5	3,3	6,5	1,3	14,0	11,9	11,0	8,9	9,0	6,9
ΦΕΒ	11,8	6,6	8,8	3,6	6,8	1,6	14,3	12,1	11,3	9,1	9,3	7,1
ΜΑΡ	12,2	6,7	9,2	3,7	7,2	1,7	14,7	12,3	11,7	9,3	9,7	7,3
ΑΠΡ	12,3	6,7	9,3	3,7	7,3	1,7	14,9	12,5	11,9	9,5	9,9	7,5
ΜΑΙ	12,3	6,7	9,3	3,7	7,3	1,7	14,9	12,5	11,9	9,5	9,9	7,5
ΙΟΥΝ	12,0	6,6	9,0	3,6	7,0	1,6	14,8	12,5	11,8	9,5	9,8	7,5
ΙΟΥΛ	11,8	6,5	8,8	3,5	6,8	1,5	14,8	12,3	11,8	9,3	9,8	7,3
ΑΥΓ	11,6	6,4	8,6	3,4	6,6	1,4	14,4	12,2	11,4	9,2	9,4	7,2
ΣΕΠ	11,5	6,4	8,5	3,4	6,5	1,4	14,3	12,0	11,3	9,0	9,3	7,0
ΟΚΤ	11,4	6,4	8,4	3,4	6,4	1,4	14,2	11,9	11,2	8,9	9,2	6,9
ΝΟΕ	10,9	5,8	7,9	2,8	5,9	0,8	13,8	11,7	10,8	8,7	8,8	6,7
ΔΕΚ	11,1	6,2	8,1	3,2	6,1	1,2	13,9	11,7	10,9	8,7	8,9	6,7

(*) Δ = δυτικό άκρο της υδρομαστευτικής στοάς (υψηλότερο), A = ανατολικό άκρο της υδρομαστευτικής στοάς (χαμηλότερο).

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 6.6 δίδονται οι τιμές στάθμης αποστράγγισης της υδρομαστευτικής στοάς για τους 12 μήνες του έτους, καθώς πρόκειται ουσιαστικά για σταθερές μηνιαίες τιμές που επαναλαμβάνονται από έτος σε έτος, με ελάχιστες διαφορές (στο 2^ο ή 3^ο δεκαδικό).

⁽¹⁾ Η επιλογή των συγκεκριμένων θεωρούμενων πτώσεων στάθμης ακολουθεί την "εκτίμηση των υδρογεωλογικών παραμέτρων της στοάς" που παρουσιάστηκε στο κεφ. 4, παρ. 4.9.

6.2. Επίλυση μοντέλων – Έλεγχος βαθμονόμησης

Η εκτέλεση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε σε Η/Υ με τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✓ Επεξεργαστής: Intel Pentium III (1 GHz).
- ✓ Μνήμη: 512 MB DIMM / 7200 rpm.
- ✓ Σκληρός δίσκος: 20,4 GB.
- ✓ Μητρική: QDI Pentium III.
- ✓ Κάρτα Οθόνης: GE-Force 32 MB.
- ✓ Περιβάλλον εργασίας: Microsoft Windows 2000.
- ✓ Λογισμικό επίλυσης: Visual ModFlow v.2.8.2 Professional (περιέχει και το βοηθητικό πρόγραμμα τρισδιάστατης απεικόνισης 3D-Explorer).

Ο χρόνος εκτέλεσης (επίλυσης) της προσομοίωσης διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο. Για το μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής αρκούσαν γύρω στα 5 min, ενώ για τα υπόλοιπα μοντέλα (μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής) χρειάστηκαν περίπου 4 – 5 h, για το κάθε ένα, ανάλογα με την χρονική διακριτοποίηση που επιλέχθηκε.

6.2.1. Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής

Το πρώτο βήμα της προσομοίωσης, με τελικό σκοπό την πρόβλεψη, περιλαμβάνει την επίλυση του μοντέλου σε συνθήκες σταθερής κατάστασης ροής (steady state flow). Το βήμα αυτό είναι αναγκαίο προκειμένου να προκύψουν οι αρχικές συνθήκες ροής που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής που ακολουθεί.

Το ModFlow επιλύει τα εισαγόμενα δεδομένα θεωρώντας ότι υπάρχει μόνο μία περίοδος τάσης, δηλαδή όλες οι παράμετροι καθορισμού της κατάστασης ροής είναι σταθερές. Οι τιμές των παραμέτρων που επεξεργάζεται το πρόγραμμα, αφορούν τις αρχικές τιμές που εισάχθηκαν σε αυτό. Δηλαδή, από μια χρονική ακολουθία δεδομένων παροχής μιας γεώτρησης που εισάγονται στο πρόγραμμα, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του μόνο την πρώτη τιμή.

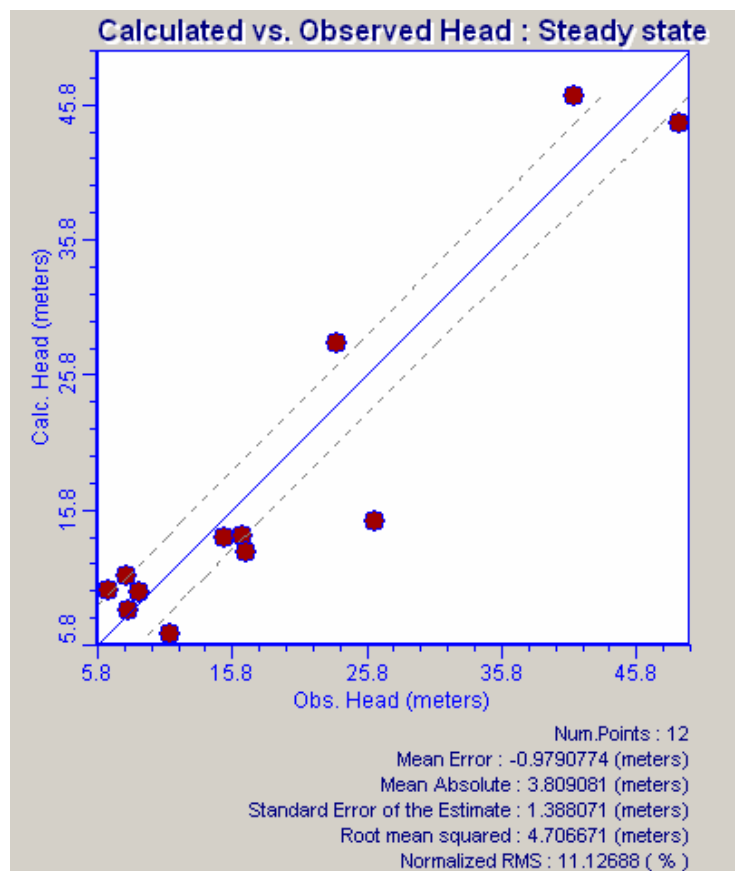
Το τελικό αποτέλεσμα εκφράζει μια "σταθερή αρχική κατάσταση" για ολόκληρο το "χρονικό παράθυρο" που επιλέγεται. "Σταθερή" γιατί εκφράζει μία και μόνη τιμή για ολόκληρη την περίοδο αναφοράς και "αρχική" γιατί στην

πραγματικότητα καθορίζει τις αρχικές συνθήκες (initial heads) του μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής (transient state flow) που ακολουθεί.

Έλεγχος βαθμονόμησης

Στο **Σχήμα 6.32** δίδονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης (έμμεση αυτόματη βαθμονόμηση) του ModFlow, μετά την επίλυση της προσομοίωσης με τα δεδομένα που αναλύθηκαν στα προηγούμενα.

Το διάγραμμα του σχήματος περιλαμβάνει ζεύγη τιμών στάθμης των γεωτρήσεων παρατήρησης, στα οποία η πρώτη τιμή (άξονας x) αφορά τις μετρήσεις πεδίου (observation heads) και η δεύτερη τιμή (άξονας y) αφορά τις υπολογιζόμενες από το πρόγραμμα στάθμες στις θέσεις των γεωτρήσεων παρατήρησης (calculated heads).



Σχήμα 6.32: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Έλεγχος βαθμονόμησης.

Οι υπολογιζόμενες από το πρόγραμμα στάθμες (calculated heads) προέκυψαν με βάση τις συνοριακές συνθήκες σταθερής στάθμης (constant heads). Επομένως, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο (κεφ. 5, παρ. 5.9), το ModFlow υπολογίζει αυτόματα το επίπεδο βαθμονόμησης του μοντέλου, δηλαδή το κατά πόσο "ταιριάζουν" οι μετρήσεις υπαίθρου με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Βέβαια, το Σχήμα 6.32 αναφέρεται στην τελική βαθμονόμηση του μοντέλου, η οποία επιτεύχθηκε με συνεχείς επιλύσεις του, για διάφορες τιμές στις συνοριακές συνθήκες σταθερής στάθμης. Η βαθμονόμηση αυτή πιθανόν να επιδέχεται βελτιώσεις, όμως η τελική απόφαση για την καταλληλότητά της είναι κατά το πλείστον υποκειμενική και εξαρτάται από το πρόβλημα που εξετάζεται.

Όπως φαίνεται από το σχήμα, οι περισσότερες γεωτρήσεις παρατήρησης ικανοποιούνται επαρκώς (μέσα στην ζώνη εμπιστοσύνης 95%) από την προκύπτουσα "κατάσταση ροής", δηλαδή από τις διαμορφωμένες ισοπιεζομετρικές καμπύλες. Η κανονικοποιημένη τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (**Normalized RMS**) φτάνει το 11,13%, ενώ το απόλυτο μέσο σφάλμα (**MAE**) περιορίζεται στα 3,81 m.

6.2.2. Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής

Στο μοντέλο αυτό (transient state flow model), το ModFlow επιλύει αναλύοντας το χρονικό "παράθυρο" που επιλέχθηκε (4.749 ημέρες) σε επιμέρους περιόδους τάσης (stress periods), για κάθε μία από τις οποίες θεωρεί σταθερές τις παραμέτρους που ρυθμίζουν την κατάσταση ροής (παροχή, στάθμη, συνοριακές συνθήκες κ.λπ.). Το τελικό αποτέλεσμα εκφράζει την μεταβολή της ροής για ολόκληρο το χρονικό φάσμα των 4.749 ημερών.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι παράμετροι της αποθηκευτικότητας, οι οποίες ήταν ανενεργές στο μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής, σε αυτό το μοντέλο ενεργοποιούνται, δηλαδή συμμετέχουν στην προσομοίωση.

Διακριτοποίηση "χρονικού παραθύρου"

Το ModFlow δεν παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα να καθορίσει με άμεσο τρόπο τις περιόδους τάσης (stress periods). Οι χρονικές αυτές περίοδοι καθορίζονται αυτόματα, με βάση την χρονική μεταβολή των συνοριακών συνθηκών ροής (constant heads, drain). Έτσι, μόνο έμμεση παρέμβαση μπορεί να γίνει.

Όπως προαναφέρθηκε, η μεταβολή των συνοριακών συνθηκών ορίστηκε να είναι μηνιαία (βλέπε παρ. 6.1.8), οπότε ανάλογος ήταν και ο καθορισμός από το πρόγραμμα των περιόδων τάσης. Δηλαδή, κάθε περίοδος τάσης είναι περίπου ίση με **30 ημέρες** ($\approx 30,4423$ ημέρες), ενώ το συνολικό πλήθος των "χρονικών περιόδων σταθερής κατάστασης" που επιλύει το ModFlow είναι ίσο με **156** ($\approx 4.749 / 30,4423$).

Τα χρονικά βήματα (time steps) είναι εξίσου σημαντικές παράμετροι, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από το πλέγμα, τις περιόδους τάσης κ.λπ. του μοντέλου προσομοίωσης της ροής, όπως αναλύθηκε εκτενέστερα στο κεφ. 5 (παρ. 5.8.3). Πρόκειται ουσιαστικά για διακριτοποίηση του χρόνου (δηλαδή των περιόδων τάσης), ανάλογη με την διακριτοποίηση του χώρου που έγινε με την μορφή πλέγματος (grid).

Το πρόγραμμα απαιτεί από τον χρήστη να καθορίσει το πλήθος των παραπάνω χρονικών βημάτων στα οποία χωρίζεται κάθε περίοδος τάσης. Λανθασμένη επιλογή είναι δυνατόν να προκαλέσει αριθμητικά σφάλματα και τελικά την μη επίλυση του μοντέλου.

Η χρησιμοποίηση της σχέσης 5.20 (κεφ. 5), προκειμένου να υπολογισθεί το κρίσιμο βήμα (Δt_c), έδωσε εξαιρετικά μικρούς χρόνους. Συγκεκριμένα, για τους ασβεστόλιθους "Τρίπολης", θεωρώντας μέσο πάχος $h = 300$ m, προκύπτει: $\Delta t_c = (0,051 \cdot 2.500 \text{ m}^2) / (4 \cdot 0,075 \text{ m}^2/\text{sec}) = 425 \text{ sec} \approx 7 \text{ min} \approx 0,005$ ημέρες.

Το κρίσιμο βήμα που υπολογίσθηκε, αν γίνει δεκτό, ορίζει πολύ μεγάλο πλήθος χρονικών βημάτων (περίπου 6.000, ανά περίοδο τάσης), το οποίο σημαίνει ότι θα απαιτούνται ανάλογα μεγάλοι χρόνοι επίλυσης του μοντέλου. Πρακτικά λοιπόν, η υπολογιζόμενη με αυτό τον τρόπο τιμή του κρίσιμου βήματος είναι απαγορευτική.

Έτσι, προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο πλήθος χρονικών βημάτων, δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές, αρχίζοντας από 1 χρονικό βήμα ανά περίοδο τάσης, με πολλαπλασιαστή (TSMULT) ίσο με 1,2. Η πρακτική αυτή είναι αρκετά συνηθισμένη και προτείνεται από διάφορους μελετητές [1], αλλά και από τους ίδιους τους κατασκευαστές του ModFlow [113].

Τελικά, στο συγκεκριμένο μοντέλο πραγματοποιήθηκε επίλυση με 3 χρονικά βήματα ανά περίοδο τάσης και πολλαπλασιαστή ίσο με 1,0. Εξαιρέσεις αποτέλεσαν οι 1^η, 10^η και 23^η περίοδοι τάσης, στις οποίες ορίστηκε πλήθος χρονικών βημάτων ίσο με 2, με πολλαπλασιαστή ίσο με 1,2 για τις δύο πρώτες και 0,8 για την τελευταία.

Καθορισμός αρχικών συνθηκών

Οι αρχικές συνθήκες (initial heads) δεν είναι τίποτε άλλο παρά συνοριακές συνθήκες σταθερής στάθμης του υδροφορέα κατά την αρχή της πρώτης περιόδου τάσης του μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης. Το πρόγραμμα ModFlow παρέχει την δυνατότητα, ώστε οι συνθήκες αυτές να επιλέγονται από τον ίδιο τον χρήστη.

Παρόλα αυτά, συνηθίζεται να καθορίζονται ως αρχικές συνθήκες ροής τα αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου σταθερής κατάστασης ροής (βλέπε και κεφ. 5, παρ. 5.8.1). Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε και για το εξεταζόμενο μοντέλο.

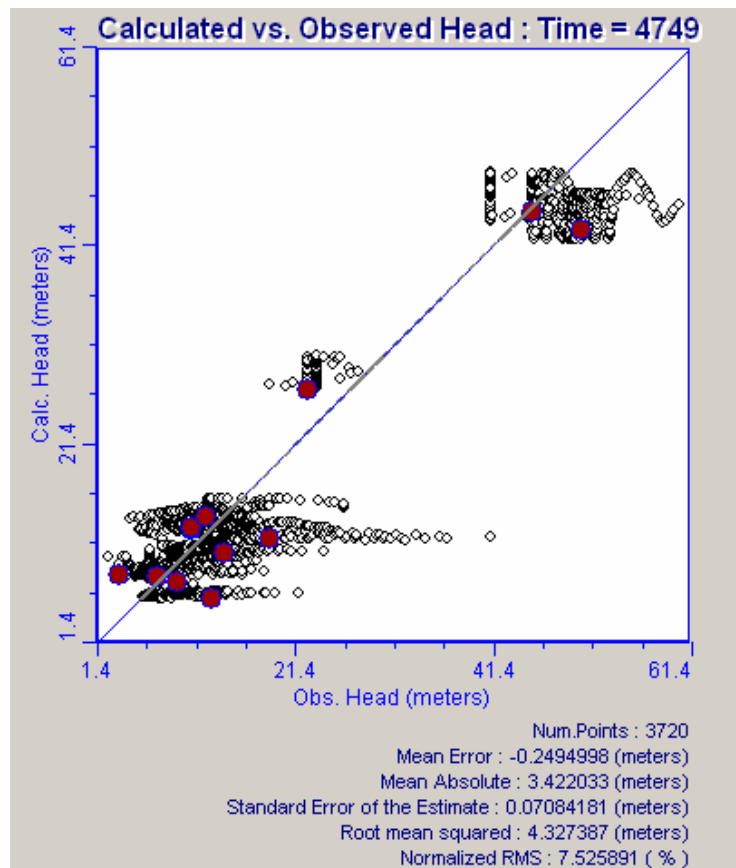
Έλεγχος βαθμονόμησης

Από την επίλυση του μοντέλου προέκυψε το **Σχήμα 6.33**, στο οποίο δίνονται τα αποτελέσματα της τελικής βαθμονόμησης για το σύνολο των 4.749 ημερών. Το **Normalized RMS** φτάνει το 7,53%, ενώ το **MAE** είναι ίσο με 3,42 m.

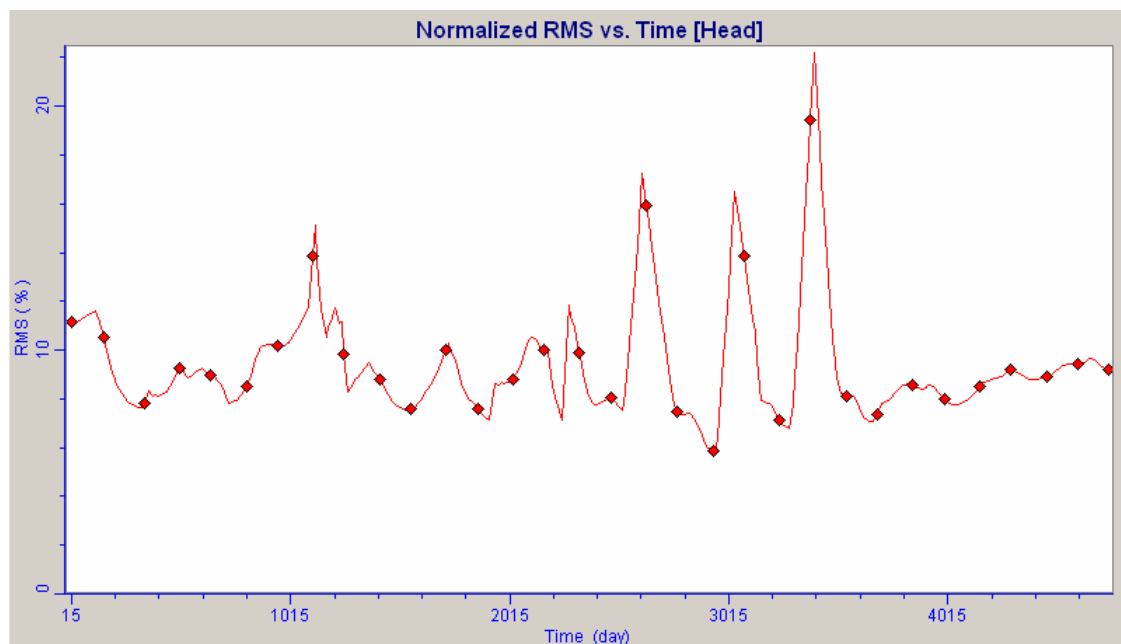
Στο εξεταζόμενο όμως μοντέλο, το ModFlow κατασκευάζει διαγράμματα πραγματικών (μετρήσεις πεδίου) και υπολογιζόμενων τιμών στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης, για κάθε περίοδο τάσης ξεχωριστά (156 διαγράμματα).

Έτσι, στο **Σχήμα 6.34** δίνεται η χρονική εξέλιξη του **Normalized RMS**. Ελάχιστο **RMS** (=5,86%, βέλτιστη βαθμονόμηση) εμφανίζεται την "ημέρα 2.942" (97^η περίοδος τάσης) και μέγιστο (= 22,20%) την "ημέρα 3.408" (112^η περίοδος τάσης).

Στην 112^η περίοδο τάσης η γεώτρηση παρατήρησης που "χαλάει" την βαθμονόμηση είναι η T10, για την οποία η υπολογιζόμενη στάθμη (calculated head) είναι ίση με 13,94 m, έναντι 41,00 m της μέτρησης πεδίου. Πιθανόν λοιπόν να πρόκειται για εσφαλμένη μέτρηση πεδίου, η οποία συμπεριλήφθηκε στην επεξεργασία, εφόσον δεν συντρέχουν λόγοι απόρριψής της από το ιστορικό λειτουργίας της γεώτρησης (βλέπε παρ. 6.1.7 για την μεθοδολογία εισαγωγής των δεδομένων των γεωτρήσεων παρατήρησης).



Σχήμα 6.33: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Έλεγχος βαθμονόμησης.



Σχήμα 6.34: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χρονική εξέλιξη Normalized RMS.

6.2.3. Μοντέλα πρόβλεψης

Τα μοντέλα πρόβλεψης (prediction models) είναι ουσιαστικά μοντέλα μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής (transient state flow models), στα οποία οι αρχικές συνθήκες καθορίζονται στο "παρόν", ώστε η επίλυσή τους να δώσει αποτελέσματα για το "μέλλον". Σε σχέση λοιπόν με το μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής που περιγράφηκε στα προηγούμενα, το οποίο είναι απαραίτητο να έχει προεπιλυθεί, αυτό που αλλάζει είναι ο καθορισμός των αρχικών συνθηκών (initial heads). Συγκεκριμένα, οι αρχικές συνθήκες στα μοντέλα πρόβλεψης ταυτίζονται με τις τελικές συνθήκες (stress period 156, time step 3) του μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής.

Οι περίοδοι τάσης, αν και αναφέρονται σε άλλο χρονικό "παράθυρο" παραμένουν οι ίδιες, τόσο σε μέγεθος (περίπου 30 ημέρες), όσο και σε πλήθος (156). Ως αρχή της πρώτης περιόδου τάσης ορίζεται η τελευταία κατάσταση ροής (stress period 156, time step 3) του προηγούμενου μοντέλου ("ημέρα 0" στις 21 Οκτωβρίου 2000), οπότε και η πρόβλεψη γίνεται μέχρι και τον Νοέμβριο του 2013 ("ημέρα 4.749" στις 22 Οκτωβρίου 2013).

Σημειώνεται ότι στο κεφ. 2 η πρόβλεψη του υδρευτικού ισοζυγίου του Δήμου Ηρακλείου έγινε μέχρι και το έτος 2010. Στα σχεδιαζόμενα μοντέλα η πρόβλεψη επεκτείνεται μέχρι και το έτος 2013 για λόγους ευκολίας και μόνο, καθώς με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάστηκε να γίνουν δραματικές αλλαγές στα δεδομένα του ήδη σχεδιασμένου μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής.

Γενικά, η πρόβλεψη ροής θεωρείται ρεαλιστική όταν περιλαμβάνει χρονική περίοδο μέχρι και δύο φορές την περίοδο αναφοράς ^[1]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η περίοδος αναφοράς (χρονικό "παράθυρο" του μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής) είναι ίση με 4.749 ημέρες. Έτσι, η πρόβλεψη για άλλες 4.749 ημέρες (με δυνατότητα επέκτασης μέχρι και 9.498 ημέρες) παρέχει αρκετή ασφάλεια, όσον αφορά τα παραγόμενα αποτελέσματα.

Τα δεδομένα άντλησης (παροχές) δεν είναι φυσικές μεταβλητές, όπως π.χ. η παροχή της πηγής Αλμυρού, αλλά εξαρτώνται από την υπεύθυνη για την ύδρευση του Δήμου Ηρακλείου επιχείρηση (ΔΕΥΑΗ). Προκειμένου λοιπόν να γίνει πρόβλεψη, θεωρήθηκε ότι οι παροχές αυτές θα παραμείνουν σταθερές στο μέλλον και ίσες με τις τελευταίες καταγραφόμενες (Ιούνιος 2000). Αυτό σημαίνει ότι ως παροχές άντλησης των γεωτρήσεων που εισάχθηκαν στα μοντέλα πρόβλεψης λήφθηκαν οι τελευταίες

τιμές του Πίνακα Δ.1 (Παράρτημα – Μέρος Δ), σταθερές για ολόκληρο το χρονικό φάσμα πρόβλεψης (2000 – 2013).

Σενάρια εκμετάλλευσης

Προκειμένου να ερευνηθούν οι δυνατότητες μελλοντικής υδροδότησης του Δήμου Ηρακλείου, διατυπώθηκαν δύο διαφορετικοί σχεδιασμοί (σενάρια) λειτουργίας της υδρομαστευτικής στοάς, ανάλογα με την θέση που αυτή θα αποφασισθεί να κατασκευασθεί. Τα σενάρια αυτά, τα οποία παρουσιάστηκαν και στο κεφ. 4, παρ. 4.9, είναι τα εξής:

- (1) Σενάριο Α: Λειτουργία της υδρομαστευτικής στοάς στην Κέρη και παύση των αντλήσεων στο εκεί πεδίο εκμετάλλευσης. Οι υπόλοιπες γεωτρήσεις παραγωγής θα αντλούνται με τους τελευταίους ρυθμούς (παροχές) άντλησης του μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής, σταθερούς για ολόκληρο το χρονικό "παραθύρο" πρόβλεψης.
- (2) Σενάριο Β: Λειτουργία της υδρομαστευτικής στοάς στην Τύλισο και παύση των αντλήσεων στο εκεί πεδίο εκμετάλλευσης. Οι υπόλοιπες γεωτρήσεις παραγωγής θα αντλούνται με τρόπο όμοιο με αυτόν που περιγράφηκε στο σενάριο Α.

Με βάση τα παραπάνω, η προσομοίωση έγινε για δύο διαφορετικές καταστάσεις, ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας την κατάλληλη κάθε φορά υδρομαστευτική στοά και το ανάλογο πεδίο γεωτρήσεων παραγωγής. Επίσης, κάθε ένα από τα δύο αυτά σενάρια περιέλαβε δύο διαφορετικές περιπτώσεις για θεωρούμενες πτώσεις στάθμης $\Delta h = 3 \text{ m}$ (περίπτωση 1) και $\Delta h = 5 \text{ m}$ (περίπτωση 2). Με τον τρόπο αυτό επιλύθηκαν συνολικά τέσσερα (4) μοντέλα πρόβλεψης (σενάρια), τα "Α1", "Α2", "Β1" και "Β2" (βλέπε κεφ. 4, παρ. 4.9).

Διακριτοποίηση χρονικού "παραθύρου"

Η διακριτοποίηση του χρονικού "παραθύρου" έγινε, για όλα τα μοντέλα πρόβλεψης (2 μοντέλα με 2 περιπτώσεις το καθένα = 4 επιλύσεις), όμοια με το μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής (παρ. 6.2.2).

Στο σενάριο Α (υδρομαστευτική στοά Κέρης) και στις δύο επιλύσεις του (Α1 και Α2) χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο 3 χρονικά βήματα ανά περίοδο τάσης, με πολλαπλασιαστική ίσο με 1,0. Όμως, οι διαφοροποιήσεις από την βασική αυτή

διακριτοποίηση μεμονωμένων περιόδων τάσης, είναι σαφώς περισσότερες, σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο της μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής.

Έτσι, στο σενάριο A1 ($\Delta h = 3$ m), στις 1^η, 10^η και 23^η περιόδους τάσης χρησιμοποιήθηκαν 2 χρονικά βήματα με πολλαπλασιαστή ίσο με 0,8. Επίσης, στην 4^η περίοδο τάσης επιλέχθηκαν 4 χρονικά βήματα με πολλαπλασιαστή ίσο με 1,0. Τέλος, στις 3^η, 6^η και 9^η περιόδους τάσης χρησιμοποιήθηκε 1 χρονικό βήμα, πάντα με τον ίδιο πολλαπλασιαστή (1,0).

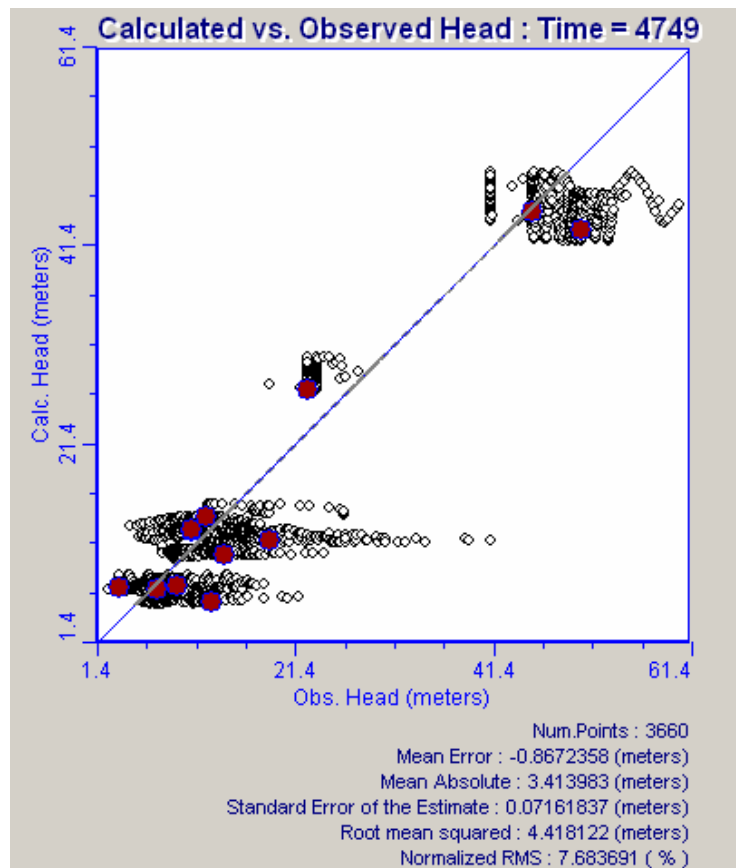
Στο σενάριο A2 ($\Delta h = 3$ m) χρησιμοποιήθηκε η χρονική διακριτοποίηση του σεναρίου A1. Εξαιρέσεις αποτέλεσαν οι 8^η και 10^η περίοδοι τάσης, στις οποίες επιλέχθηκε 1 χρονικό βήμα με μοναδιαίο πολλαπλασιαστή (1,0).

Στο σενάριο B (υδρομαστευτική στοά Τυλίσου), για τις δύο περιπτώσεις διαφορετικής πτώσης στάθμης (B1 και B2), χρησιμοποιήθηκαν και πάλι οι ίδιες κύριες παράμετροι διακριτοποίησης των περιόδων τάσης. Η βασική διακριτοποίηση έγινε με 3 χρονικά βήματα και πολλαπλασιαστή ίσο με 1,0.

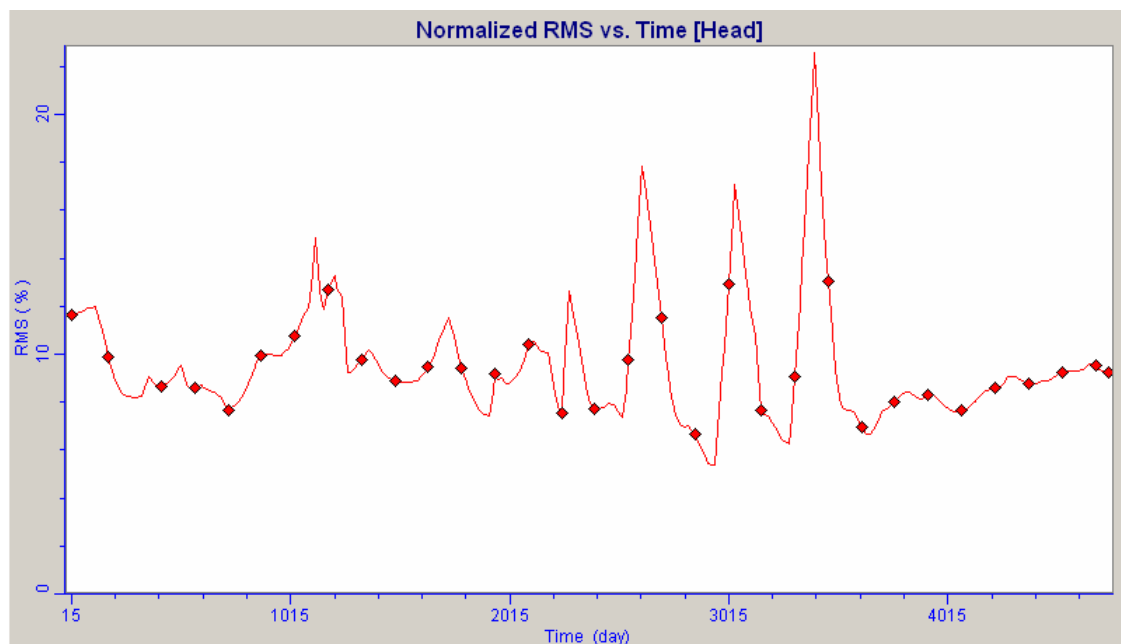
Εξαιρέσεις και για τις δύο περιπτώσεις (σενάριο B1: $\Delta h = 3$ m και σενάριο B2: $\Delta h = 5$ m) αποτέλεσαν οι 1^η, με 2 χρονικά βήματα, 2^η και 11^η, με 4 χρονικά βήματα και 7^η και 12^η περίοδοι τάσης, με 1 χρονικό βήμα. Σε όλες τις προαναφερόμενες περιόδους τάσης ο πολλαπλασιαστής έμεινε ως είχε (1,0). Επίσης, στις 3^η, 8^η, 9^η και 10^η περιόδους τάσης επιλέχθηκαν 2 χρονικά βήματα με πολλαπλασιαστή ίσο με 1,2.

Έλεγχος βαθμονόμησης

Από την επίλυση του σεναρίου A1 (υδρομαστευτική στοά Κέρης, $\Delta h = 3$ m) προέκυψαν τα **Σχήματα 6.35** και **6.36**, στα οποία δίνονται τα αποτελέσματα του ελέγχου καταλληλότητας συνοριακών συνθηκών (τελική βαθμονόμηση) και η χρονική εξέλιξη του **Normalized RMS** για τις 156 περιόδους τάσης του μοντέλου.



Σχήμα 6.35: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A1): Έλεγχος βαθμονόμησης.

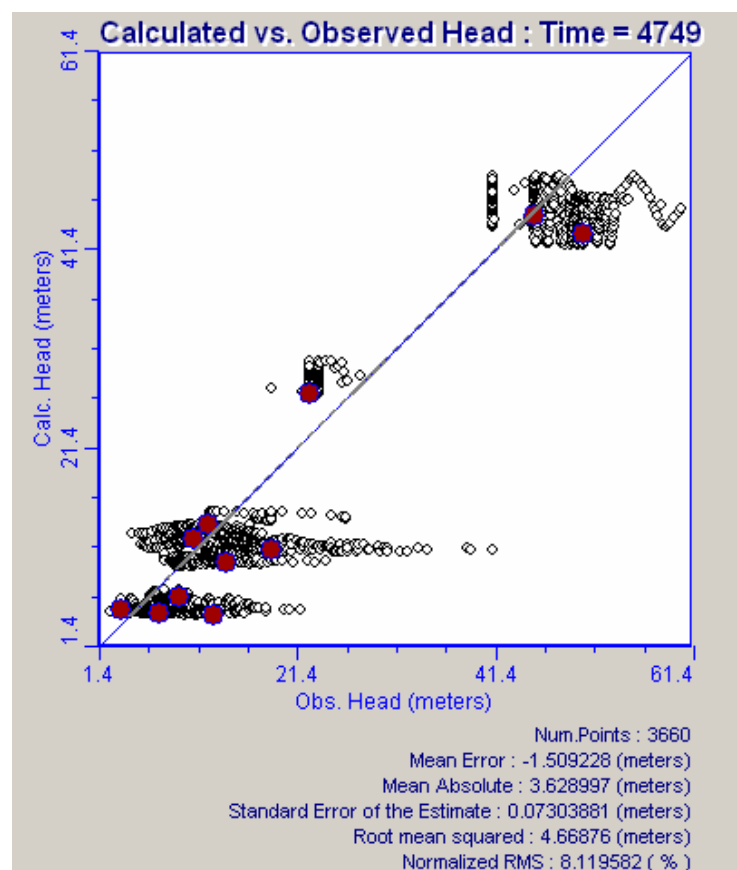


Σχήμα 6.36: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A1): Χρονική εξέλιξη Normalized RMS.

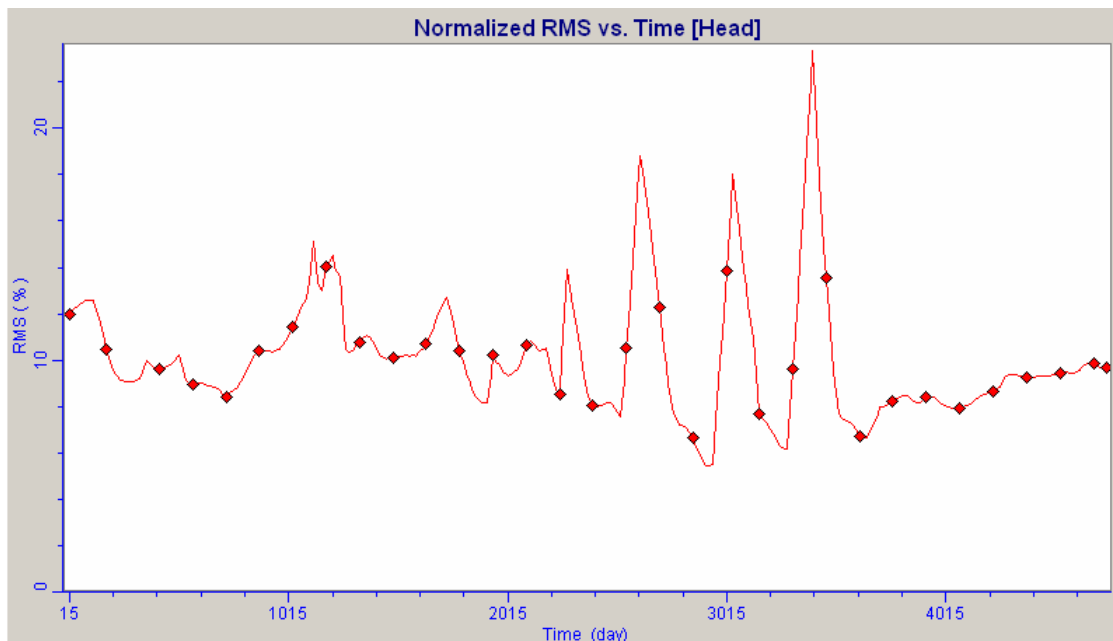
Όπως διαπιστώνεται από τα σχήματα αυτά, το **MAE** είναι ίσο με 3,41 m και το **Normalized RMS** ίσο με 7,58%, για το σύνολο των 4.749 ημερών. Η τελευταία παράμετρος κυμαίνεται από 5,38%, στην 97^η περίοδο τάσης ("ημέρα 2.952"), έως και 22,57%, στην 112^η περίοδο τάσης ("ημέρα 3.408").

Όσον αφορά τον έλεγχο βαθμονόμησης του σεναρίου A2 (υδρομαστευτική στοά Κέρης, $\Delta h = 5$ m), το πρόγραμμα παρήγαγε σειρά διαγραμμάτων, από τα οποία παρουσιάζονται επιλεκτικά η βαθμονόμηση για το σύνολο των 4.749 ημερών (**Σχήμα 6.37**) και η χρονική εξέλιξη του **Normalized RMS** (**Σχήμα 6.38**).

Όπως διαπιστώνεται από τα σχήματα αυτά, το **MAE** είναι ίσο με 3,63 m και το **Normalized RMS** ίσο με 8,12%, κυμαινόμενο, ανά περίοδο τάσης, από 5,42% ("ημέρα 2.922", 96^η περίοδος τάσης) έως και 23,35% ("ημέρα 3.408", 112^η περίοδος τάσης).



Σχήμα 6.37: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A2): Έλεγχος βαθμονόμησης.



Σχήμα 6.38: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A2): Χρονική εξέλιξη Normalized RMS.

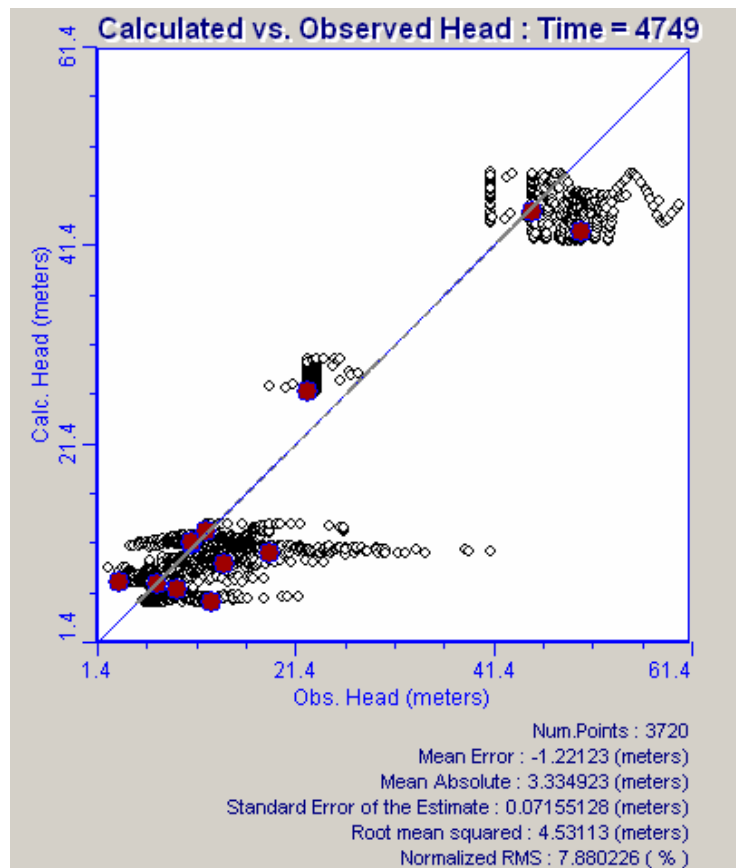
Παρατηρείται ότι η βέλτιστη βαθμονόμηση επιτυγχάνεται σε διαφορετική περίοδο τάσης από τα προηγούμενα μοντέλα (96^η αντί της 97^{ης}), αλλά πάντως στην ίδια ευρύτερη χρονική περίοδο.

Ο έλεγχος βαθμονόμησης του σεναρίου B1 (υδρομαστευτική στοά Τυλίσου, $\Delta h = 3$ m) περιλαμβάνεται στα **Σχήματα 6.39** και **6.40**.

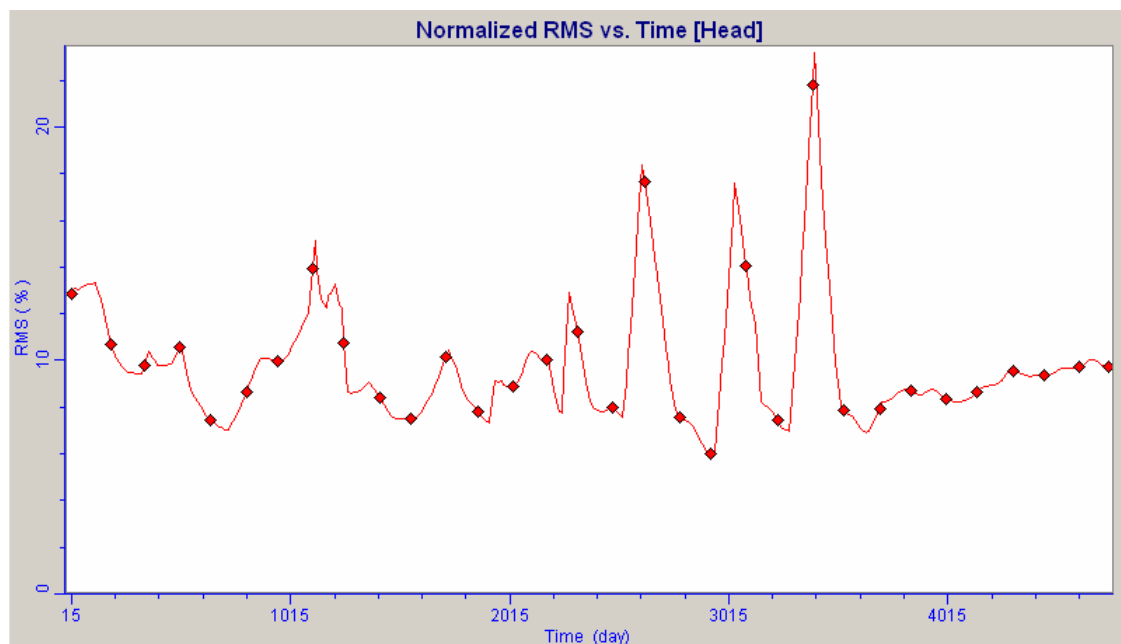
Σε αυτή την περίπτωση, το **MAE** για το σύνολο των 4.749 ημερών φτάνει τα 3,33 m. Το **Normalized RMS** για την ίδια χρονική περίοδο είναι ίσο με 7,88%, κυμαινόμενο, ανά περίοδο τάσης, από 6,02% (97^η περίοδος τάσης, "ημέρα 2.932") έως και 21,81% (112^η περίοδος τάσης, "ημέρα 3.399").

Τέλος, στα **Σχήματα 6.41** και **6.42** παρουσιάζεται (πάντα επιλεκτικά) η βαθμονόμηση του σεναρίου B2 (υδρομαστευτική στοά Τυλίσου, $\Delta h = 5$ m).

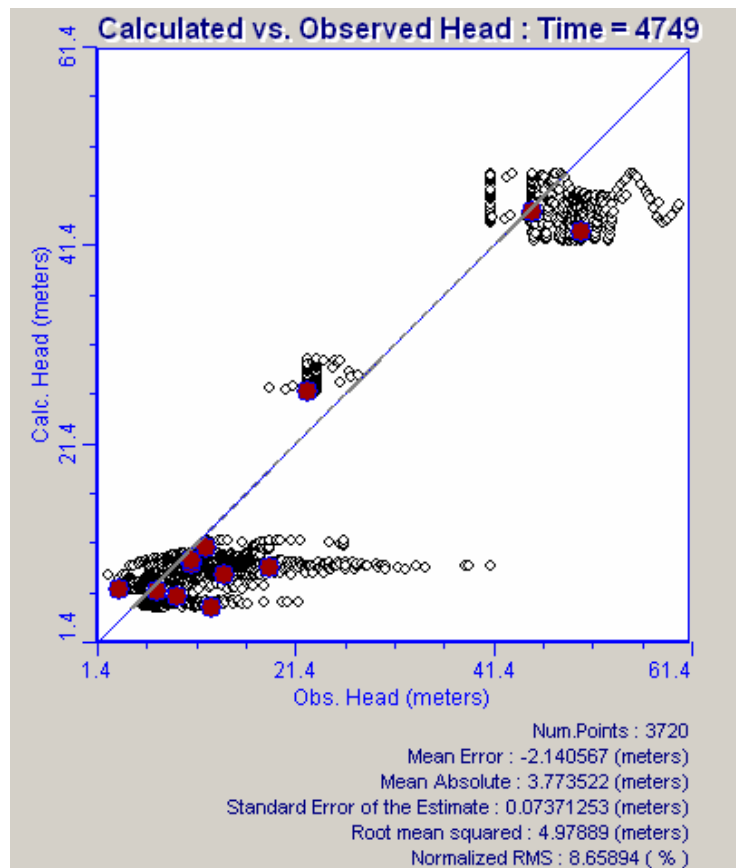
Από την μελέτη των σχημάτων αυτών διαπιστώνεται ότι το **MAE** και το **Normalized RMS**, για το σύνολο των περιόδων τάσης, έχουν τιμές ίσες με 3,77 m και 8,66%, αντίστοιχα. Η βέλτιστη βαθμονόμηση επιτυγχάνεται στην 96^η περίοδο τάσης ("ημέρα 2.922") με **Normalized RMS** ίσο με 6,99% και η χειρότερη συμβαίνει και πάλι στην 112^η περίοδο τάσης ("ημέρα 3.408") με **Normalized RMS** ίσο με 24,45%.



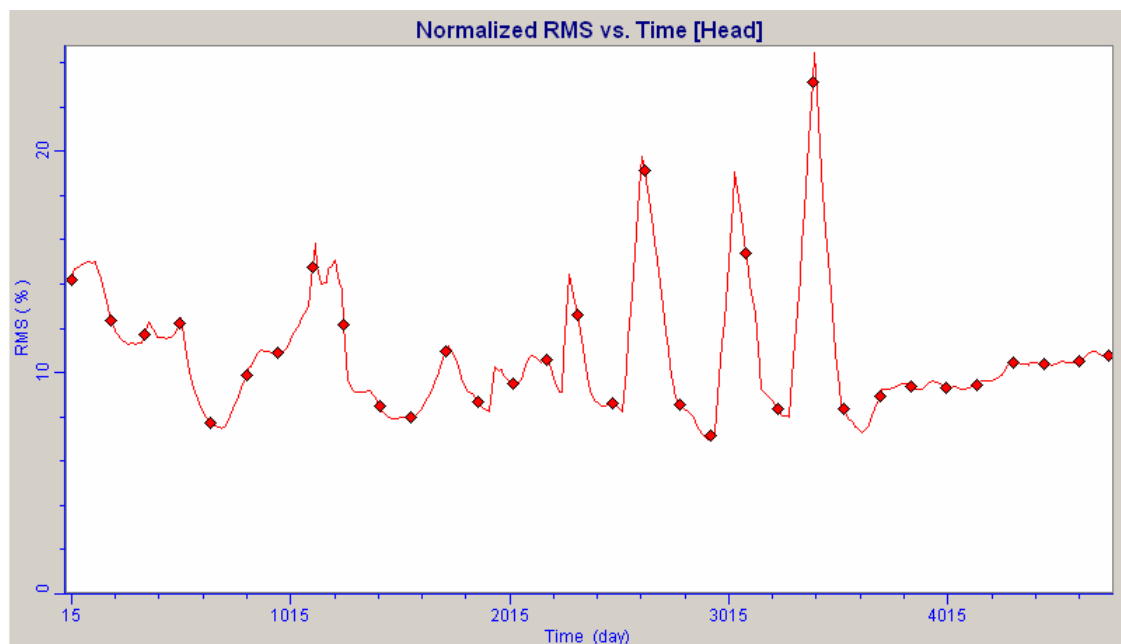
Σχήμα 6.39: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B1): Έλεγχος βαθμονόμησης.



Σχήμα 6.40: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B1): Χρονική εξέλιξη Normalized RMS.



Σχήμα 6.41: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B2): Έλεγχος βαθμονόμησης.



Σχήμα 6.42: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B2): Χρονική εξέλιξη Normalized RMS.

Γενικά παρατηρείται ταύτιση στις περιόδους τάσης που συμβαίνουν οι χειρότερες βαθμονομήσεις. Για αυτές καθοριστικό ρόλο φαίνεται να επιτελεί η "προβληματική" μέτρηση στην γεώτρηση T10 (βλέπε παρ. 6.2.2).

6.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα διάφορα μοντέλα που περιγράφηκαν στα προηγούμενα επιλύθηκαν με την μηχανή επίλυσης WHS, η οποία θεωρείται και η πιο ολοκληρωμένη για προβλήματα ροής. Οι παράμετροι επίλυσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι προτεινόμενες από το πρόγραμμα (βλέπε κεφ. 5, παρ. 5.12.4).

Προκειμένου να προκύψουν, εκτός από γραφικά (χάρτες) και ποσοτικά αποτελέσματα, η επίλυση έγινε με την υποστήριξη και του βοηθητικού προγράμματος Zone Budget, το οποίο περιλαμβάνεται στο Visual ModFlow v.2.8.2.

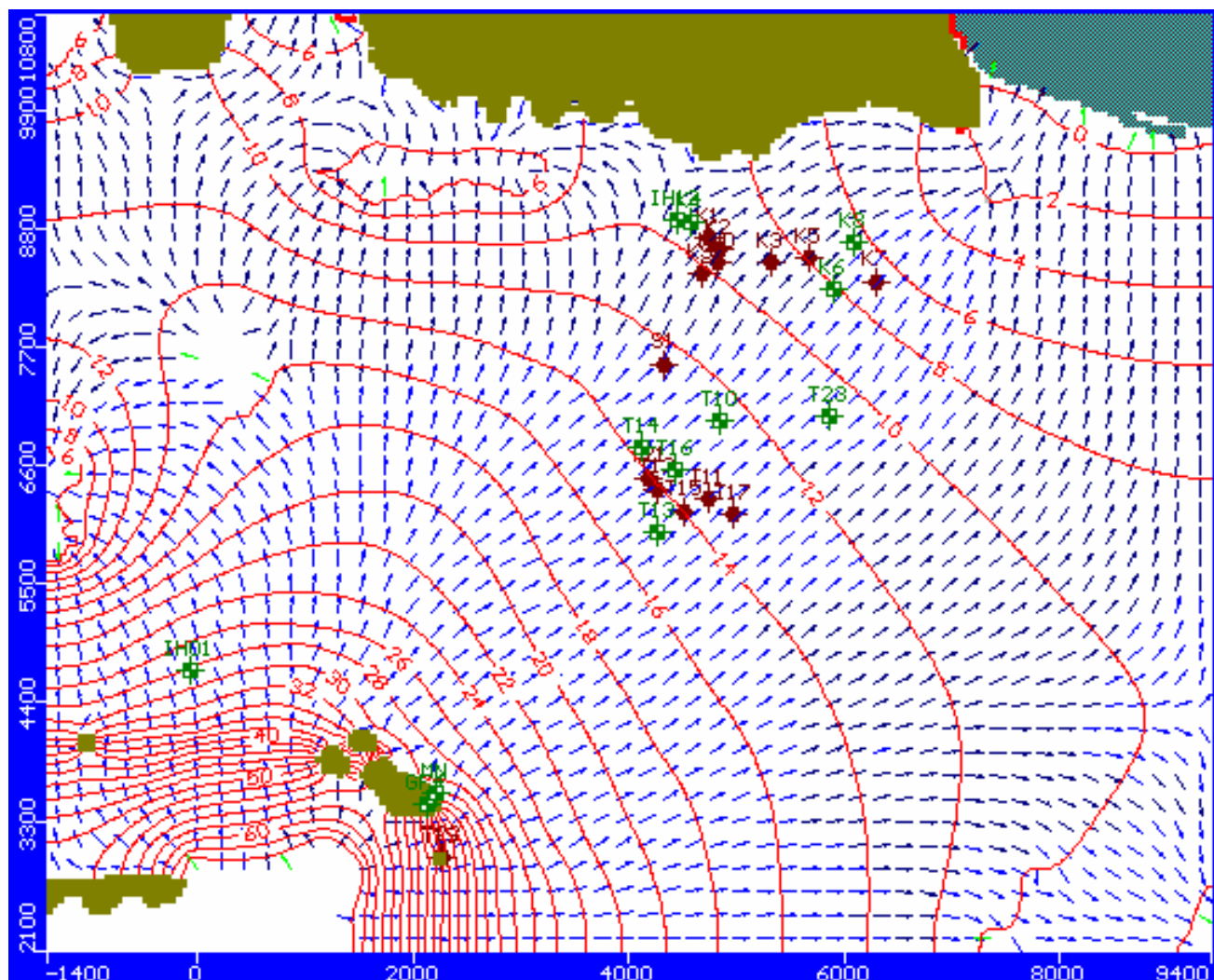
Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις εκτελέσεις (run) των διαφόρων μοντέλων ροής.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα αυτών των επιλύσεων παρουσιάζονται επιλεκτικά και όχι στο σύνολό τους, καθώς το πολύ μεγάλο πλήθος αυτών δεν επιτρέπει ολοκληρωμένη παρουσίαση, τουλάχιστο στο κύριο μέρος της ανά χείρας εργασίας. Στο Παράρτημα – Μέρος Ε παρατίθενται συμπληρωματικά αποτελέσματα για την όσο το δυνατό πληρέστερη εικόνα της προσομοίωσης.

6.3.1. Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής

Στο **Σχήμα 6.43** με κόκκινο χρώμα παριστάνονται οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες (= καμπύλες ίσης στάθμης υπόγειου νερού) στο 2^ο στρώμα του μοντέλου (layer 2: ασβεστόλιθοι "Τριπόλεως"). Η ισοδιάσταση των καμπυλών αυτών ορίστηκε στα 2 m. Τα δύο άλλα υδροφόρα στρώματα (1^ο και 4^ο, το 3^ο στρώμα είναι αδιαπέρατο) δίνονται στο Παράρτημα – Μέρος Ε, στα **Σχήματα Ε.1** και **Ε.2**.

Με το χακί χρώμα παριστάνονται τα "ξηρά κελιά" (dry cells) του πλέγματος, δηλαδή οι περιοχές εκείνες στις οποίες δεν υπάρχει ροή νερού. Τα ξηρά κελιά δεν πρέπει να συγχέονται με τα κελιά "μη ροής" (no flow) που προαναφέρθηκαν και τα οποία απενεργοποιήθηκαν (inactive cells).



Σχήμα 6.43: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα.

Όσον αφορά τα "ξηρά κελιά" πρόκειται για περιοχές, το δάπεδο των οποίων βρίσκεται πάνω από την πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφορέα. Έτσι, θεωρείται ότι δεν συμμετέχουν στην γενική ροή του υπόγειου νερού.

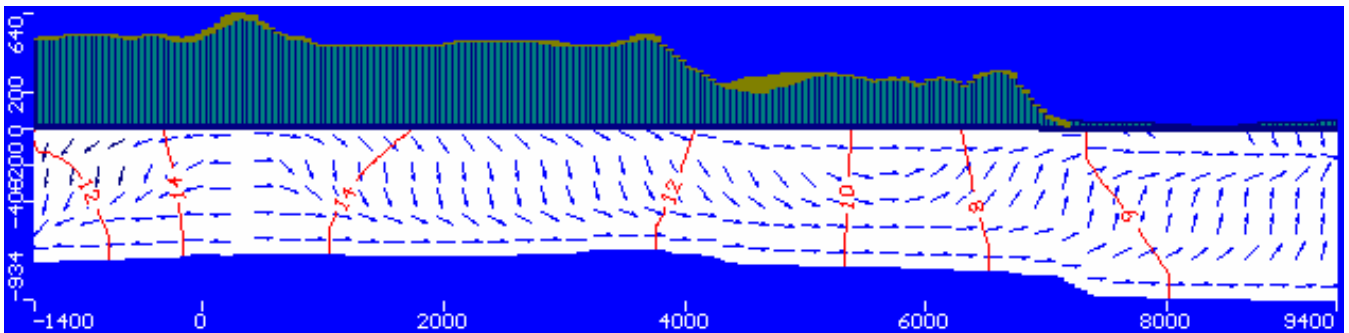
Οι περιοχές ξηρών κελιών είναι περισσότερες στο 1^ο στρώμα (Νεογενές, Σχήμα Ε.1. Επίσης, εμφανίζονται στο 2^ο στρώμα, στην περιοχή του Γωνιανού Φαραγγιού, στην οποία η υδροφορία βρίσκεται στους "Πλακώδεις ασβεστόλιθους".

Στα προαναφερόμενα σχήματα παρουσιάζεται και η πορεία του υπόγειου νερού (διανύσματα ροής) στα τέσσερα στρώματα του μοντέλου. Τα διανύσματα ροής, ανάλογα με την θέση τους, ως προς το επίπεδο προβολής, έχουν διαφορετικούς χρωματισμούς.

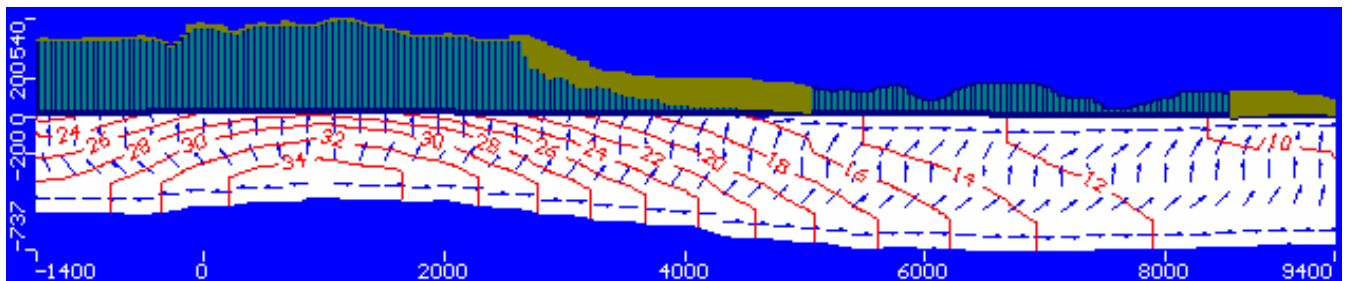
Έτσι, όταν η ροή είναι καθοδική (inward, προς τα μέσα) τα διανύσματα παριστάνονται με σκούρο μπλε χρώμα και όταν είναι ανοδική (outward, προς τα έξω) με μπλε χρώμα. Τέλος, όταν η ροή είναι οριζόντια (in plane, σύμφωνα με την προβολή) τα διανύσματα παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα.

Στα Σχήματα 6.44, 6.45, 6.46 και 6.47, δίνεται η κατακόρυφη κατανομή της πιεζομετρίας και των διανυσμάτων ροής, στις γραμμές "58" (1/3 του συνόλου των γραμμών) και "116" (2/3 του συνόλου των γραμμών) και στις στήλες "72" (1/3 του συνόλου των στηλών) και "144" (2/3 του συνόλου των στηλών) του πλέγματος, αντίστοιχα.

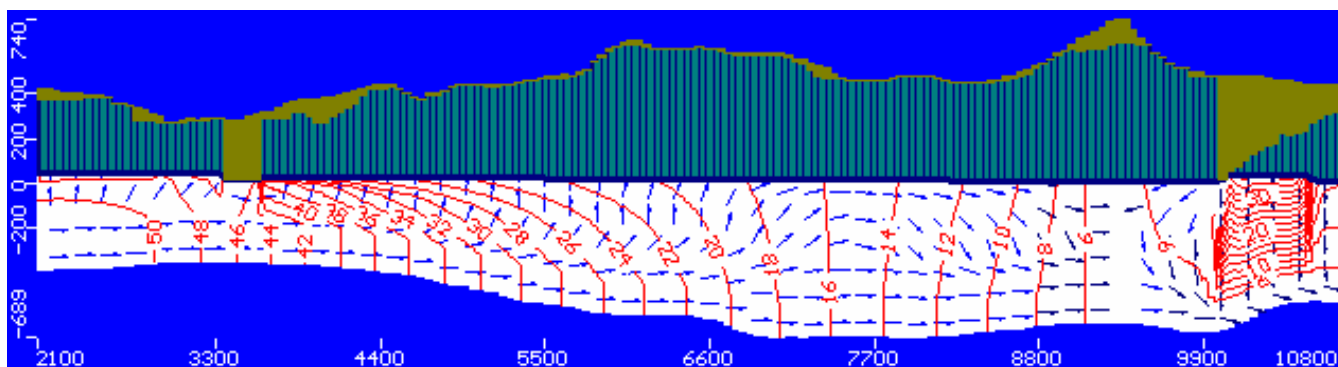
Τα σχήματα αυτά (τομές) αφορούν και τα τέσσερα υδρολιθολογικά στρώματα (δεν διακρίνονται τα όριά τους). Στις ίδιες τομές φαίνεται και η στάθμη του υδροφορέα (πιεζομετρική επιφάνεια) με μπλε χρώμα.



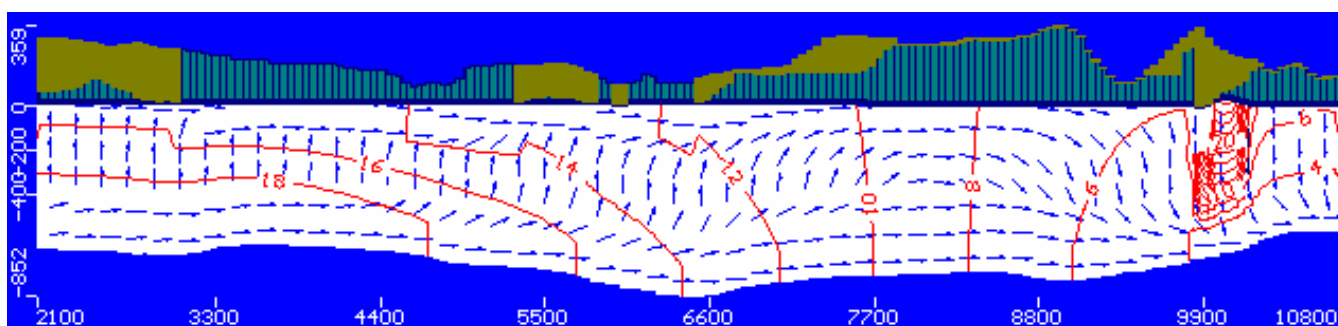
Σχήμα 6.44: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $\Delta \rightarrow A$ στην γραμμή 58.



Σχήμα 6.45: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $\Delta \rightarrow A$ στην γραμμή 116.



Σχήμα 6.46: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 72.



Σχήμα 6.47: : Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 144.

Τα διανύσματα ροής στις τομές παριστάνονται με τρόπο όμοιο με αυτόν που παραστάθηκαν στο Σχήμα 6.43. Όταν κατευθύνονται προς τα μέσα της γραμμής (ή στήλης), δηλαδή $N \rightarrow B$ (ή $\Delta \rightarrow A$, αντίστοιχα, για την στήλη), έχουν σκούρο μπλε χρώμα, ενώ όταν κατευθύνονται προς τα έξω, δηλαδή $B \rightarrow N$ (ή $A \rightarrow \Delta$), έχουν μπλε χρώμα. Επίσης, όταν έχουν κατεύθυνση ίδια με αυτή της γραμμής (ή στήλης), δηλαδή $\Delta \rightarrow A$ (ή $B \rightarrow N$), παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα.

Από την επίλυση του μοντέλου προέκυψε και ο **Πίνακας 6.7**, ο οποίος περιλαμβάνει ποσοτικά αποτελέσματα που αφορούν το υδατικό ισοζύγιο του εξεταζόμενου υδρογεωλογικού συστήματος.

Σύμφωνα με τον πίνακα, ολόκληρο το σύστημα τροφοδοτείται με 1.057.600 m³/day νερού. Από τον όγκο αυτό, τα 64.846 m³/day ($\approx 6,13\%$ του συνόλου) προέρχονται από κατείδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην περιοχή

ενδιαφέροντος (recharge ≈ 258 mm/year) και τα υπόλοιπα $992.730 \text{ m}^3/\text{day}$ ($\approx 93,87\%$) από επιφανειακές και υπόγειες λεκάνες γύρω από την περιοχή (constant heads).

Πίνακας 6.7: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Υδατικό ισοζύγιο.

Είδος ροής	Εισροές (m^3/day)	Εκροές (m^3/day)
Συνοριακές περιοχές	992.754	633.850
Επανατροφοδότηση	64.846	0
Φυσικές εκφορτίσεις	0	423.750
Αντλήσεις	0	0
Τεχνητές εκφορτίσεις	0	0
Αποθέματα	0	0
ΣΥΝΟΛΟ	1.057.600	1.057.600

Η μόνη "ορατή" εκφόρτιση εντοπίζεται στην πηγή Αλμυρού (drain) με $Q' = 423.750 \text{ m}^3/\text{day}$ ($\approx 40,07\%$ του συνολικού δυναμικού του υδροφορέα), ενώ οι υπόλοιποι όγκοι νερού φαίνεται να αποφορτίζονται εκτός περιοχής μοντέλου (π.χ. στην θάλασσα). Η τιμή της παροχής (Q') της πηγής Αλμυρού συμφωνεί σχεδόν απόλυτα με την μέτρηση πεδίου ($Q = 423.749 \text{ m}^3/\text{day}$, βλέπε Πίνακα Δ.3 στο Παράτημα – Μέρος Δ, 1^{ος} μήνας παρατήρησης).

Αυτό συμβαίνει γιατί όπως προαναφέρθηκε κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου, η συνολικά αντλούμενη ποσότητα από τις γεωτρήσεις είναι μηδενική, εφόσον το μοντέλο σταθερής κατάστασης λαμβάνει υπόψη του μόνο την πρώτη μέτρηση παροχής (αρχική παροχή σε όλες τις γεωτρήσεις = $0 \text{ m}^3/\text{day}$). Έτσι, τα αποτελέσματα των "τοπικών ρυθμίσεων" που έγιναν στην πηγή Αλμυρού δεν αλλοιώνονται από αντλήσεις ανάντη της πηγής.

Υπογραμμίζεται ότι στον Πίνακα 6.7 τα αποθέματα του υδροφορέα είναι μηδενικά. Αυτό συμβαίνει γιατί η ειδική αποθηκευτικότητα (S_s), κατά την επίλυση του μοντέλου σταθερής κατάστασης ροής, θεωρείται από το ModFlow ίση με 0 (βλέπε υποσημείωση στην παρ. 6.1.4). Η θεώρηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς το μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής δεν λαμβάνει υπόψη του προηγούμενες (χρονικά) καταστάσεις, με τις οποίες θα είχε έννοια ο όρος "αποθέματα".

Στο **Σχήμα 6.48** παρουσιάζεται τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου, από NND προοπτική, με την κατανομή της ροής (heads). Το σχήμα αυτό προέκυψε με την εφαρμογή του βοηθητικού προγράμματος 3D-Explorer που περιέχεται στο ModFlow.

Σημειώνεται ότι οι "ξηρές περιοχές" (dry cells) εμφανίζονται με μπεζ χρώμα.

6.3.2. Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής

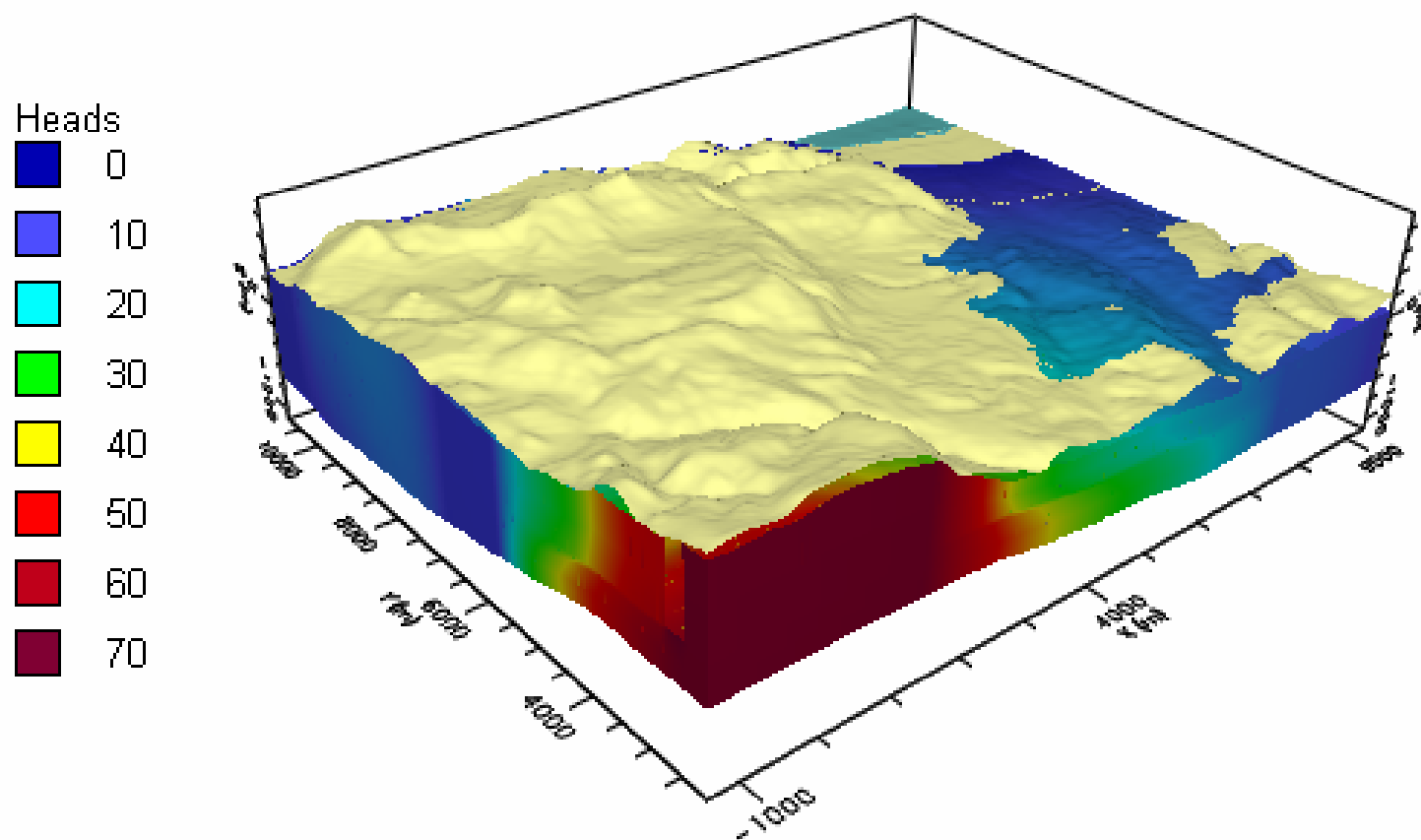
Το μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής δείχνει ουσιαστικά την μέχρι σήμερα εποχιακή συμπεριφορά του εξεταζόμενου υδροφορέα, λαμβάνοντας υπόψη και τις αντλήσεις από τα "ενεργά" πλέον πεδία Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού και Κέρης (ανενεργά στο μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής). Επίσης, μέσω των παραμέτρων αποθηκευτικότητας υπολογίζει τα αποθέματα του υδροφορέα.

Οι παραγόμενοι από το ModFlow χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών ήταν συνολικά 624 (= 156 περίοδοι τάσης × 4 στρώματα) και ως εκ τούτου δεν ήταν δυνατό να παρουσιαστούν όλοι. Προτιμήθηκε λοιπόν η επιλεκτική παρουσίαση τεσσάρων χαρτών που αντιστοιχούν σε "αντιπροσωπευτικούς" μήνες του "χειμώνα" (Νοέμβριος – Απρίλιος) και του "καλοκαιριού" (Μάιος – Οκτώβριος) του 1995 και του 2000.

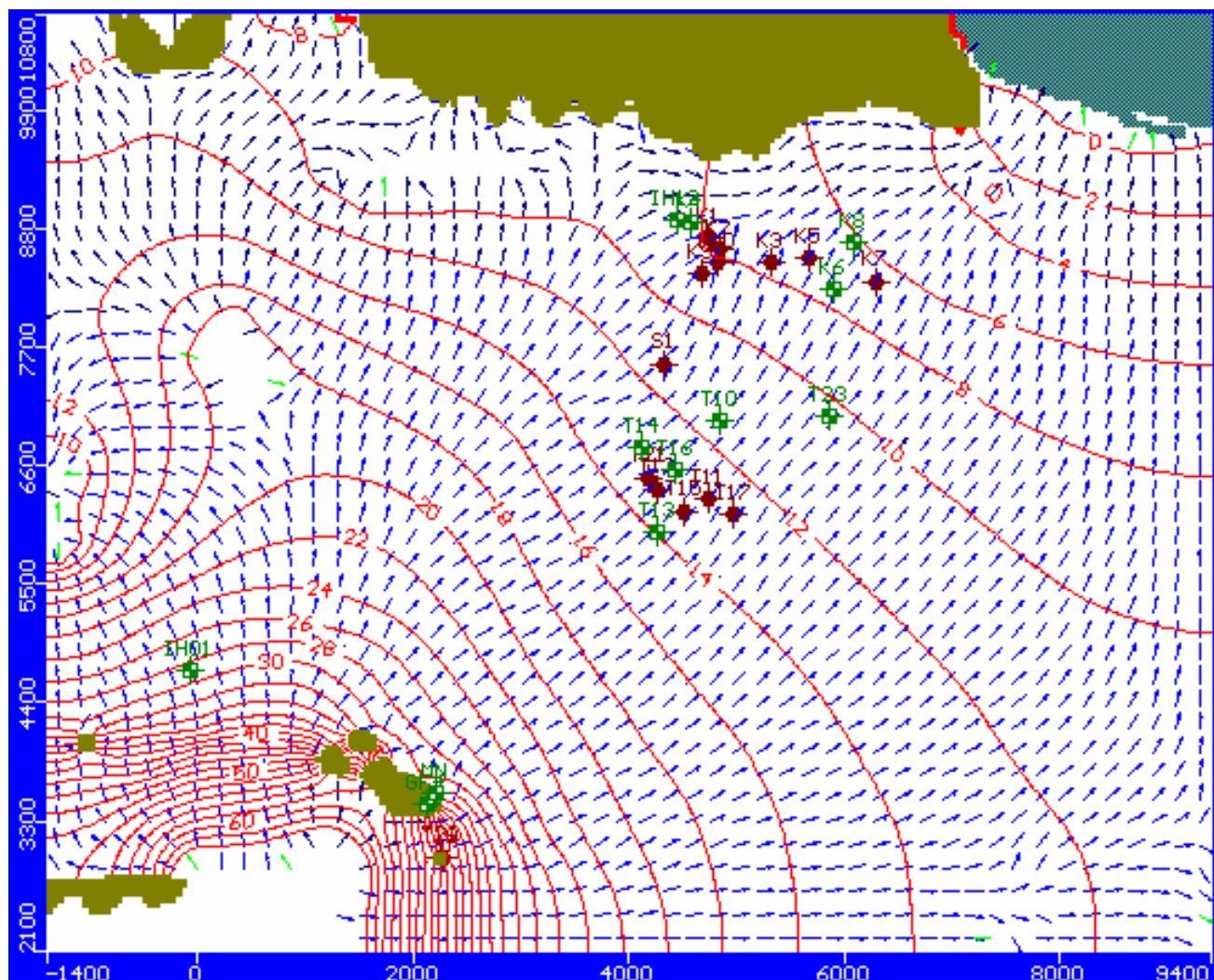
Στα **Σχήματα 6.49, 6.54, 6.59 και 6.64** δίνονται χάρτες με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες (ανά 2 m) και τα διανύσματα ροής, στο 2^ο στρώμα του μοντέλου, στην 87^η (Ιανουάριος 1995), 93^η (Ιούλιος 1995), 147^η (Ιανουάριος 2000) και 153^η (Ιούλιος 2000) περίοδο τάσης, αντίστοιχα.

Συμπληρωματικά, στο Παράρτημα – Μέρος Ε δίδονται ανάλογοι χάρτες στα δύο άλλα υδροφόρα στρώματα του μοντέλου. Συγκεκριμένα, στο 1^ο στρώμα (Νεογενείς – Τεταρτογενείς σχηματισμοί) αναφέρονται τα **Σχήματα Ε.3** έως και **Ε.6** και στο 4^ο στρώμα (Πλακώδεις ασβεστόλιθοι) τα **Σχήματα Ε.7** έως και **Ε.10**, πάντα στις επιλεγμένες περιόδους τάσης.

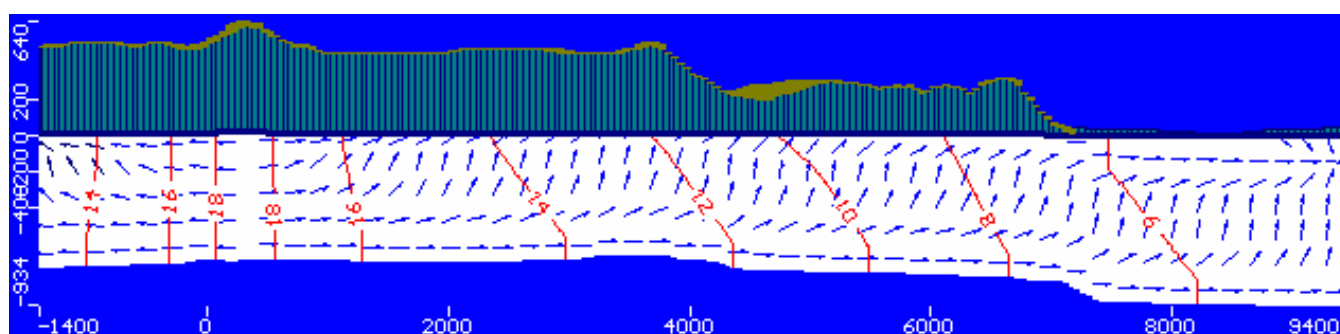
Επίσης, στα **Σχήματα 6.50** έως και **6.53** (87^η περίοδος τάσης), **6.55** έως και **6.58** (93^η περίοδος τάσης), **6.60** έως και **6.63** (147^η περίοδος τάσης) και **6.65** έως και **6.68** (153^η περίοδος τάσης) παρουσιάζεται η κατακόρυφη κατανομή της ροής, στις γραμμές "58" και "116" και στις στήλες "72" και "144" του πλέγματος.



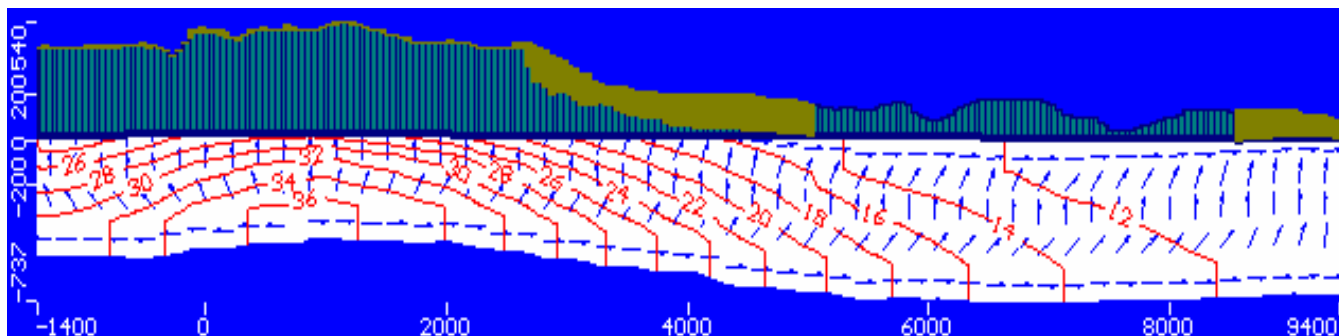
Σχήμα 6.48: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Τρισδιάστατη απεικόνιση ροής (προοπτική από NNΔ).



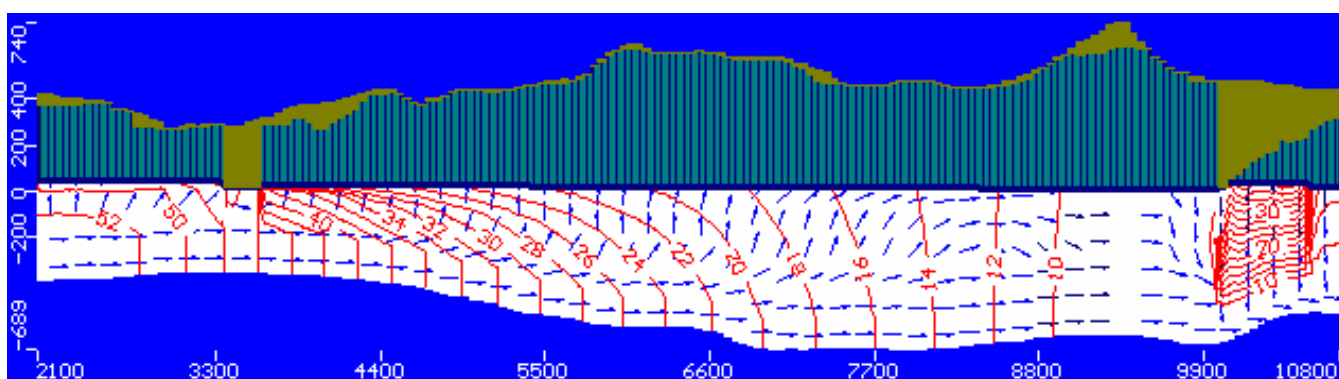
Σχήμα 6.49: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 8^η περίοδο τάσης.



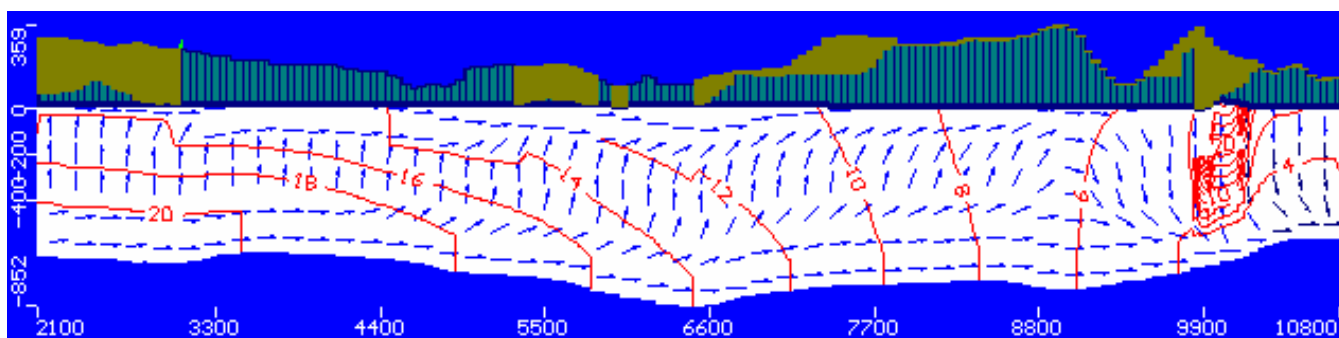
Σχήμα 6.50: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης Δ → Δ στην γραμμή 58, στην 8^η περίοδο τάσης.



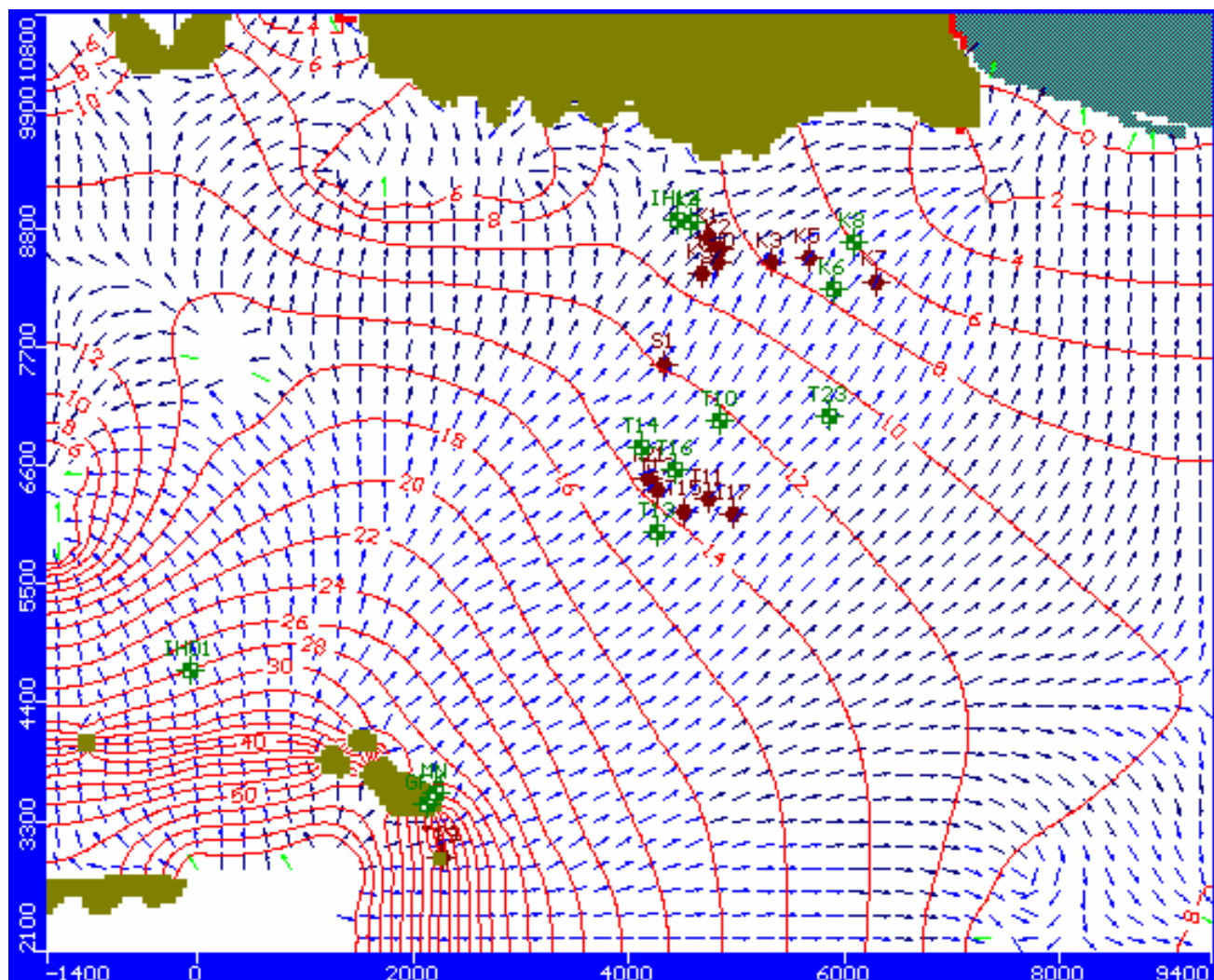
Σχήμα 6.51: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $\Delta \rightarrow A$ στην γραμμή 116, στην 87^η περίοδο τάσης.



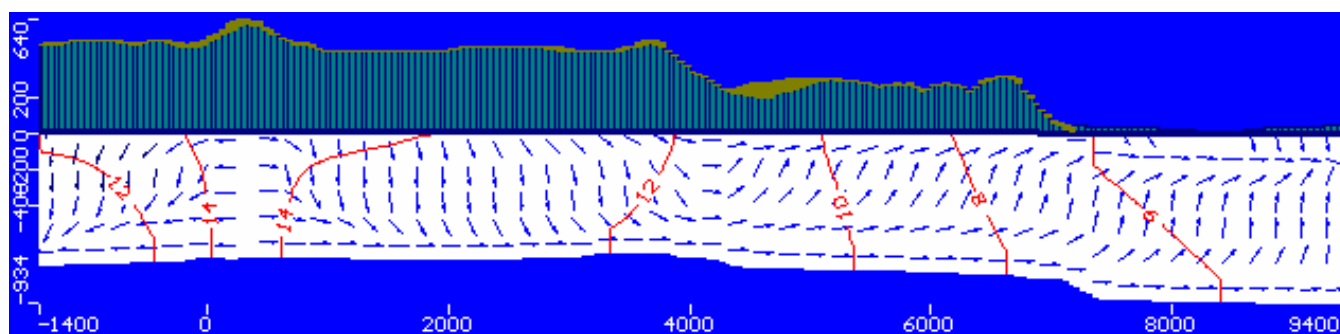
Σχήμα 6.52: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 72, στην 87^η περίοδο τάσης.



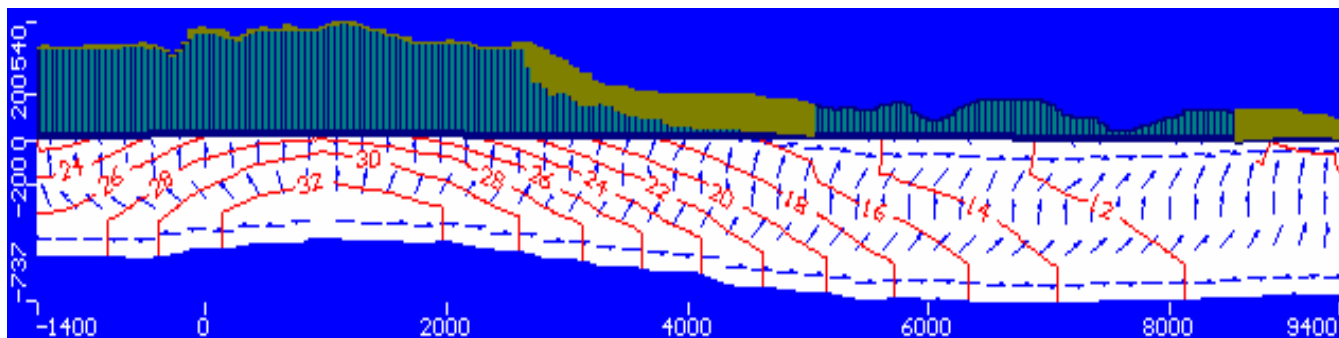
Σχήμα 6.53: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 144, στην 87^η περίοδο τάσης.



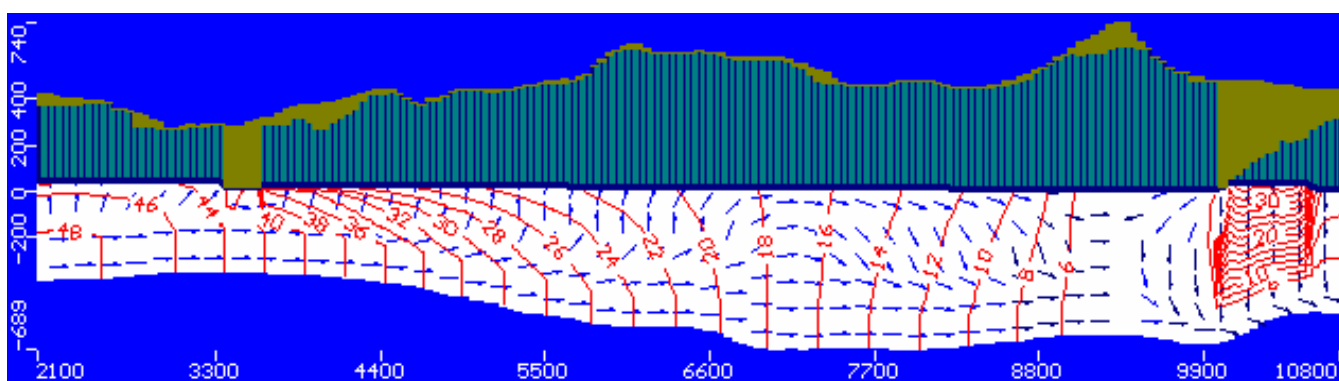
Σχήμα 6.54: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 93^η περίοδο τάσης.



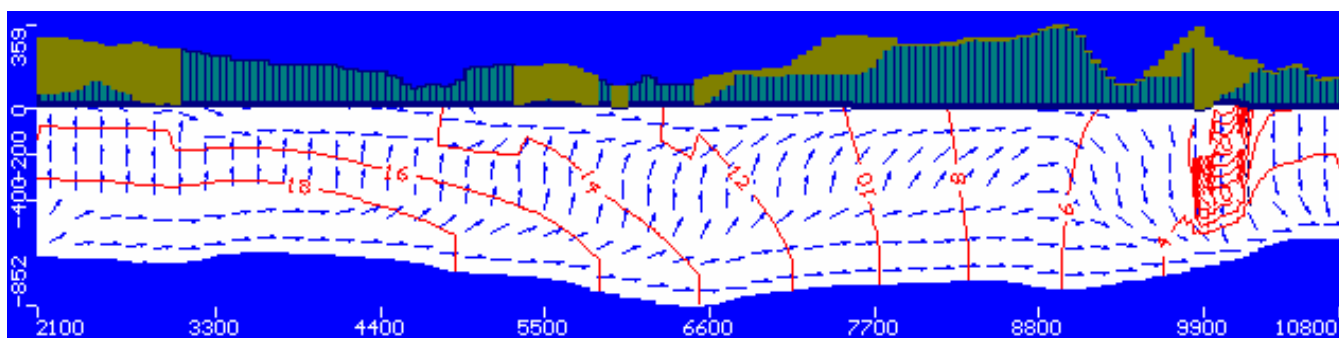
Σχήμα 6.55: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $\Delta \rightarrow A$ στην γραμμή 58, στην 93^η περίοδο τάσης.



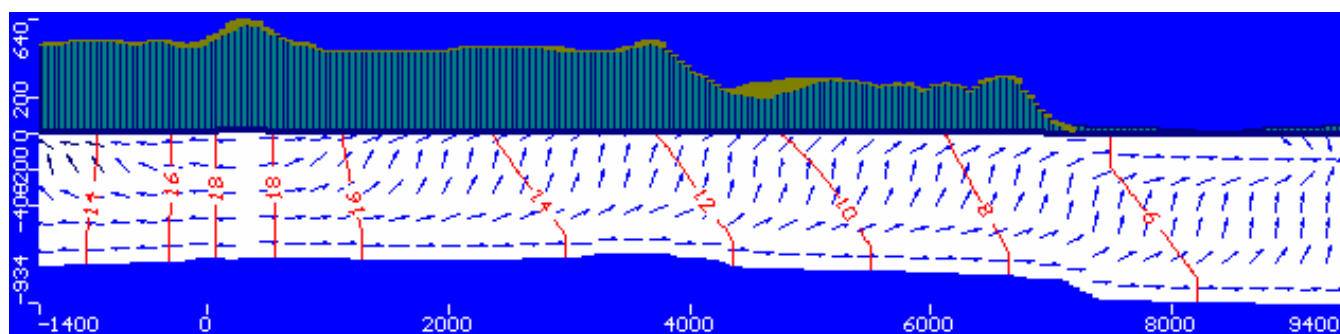
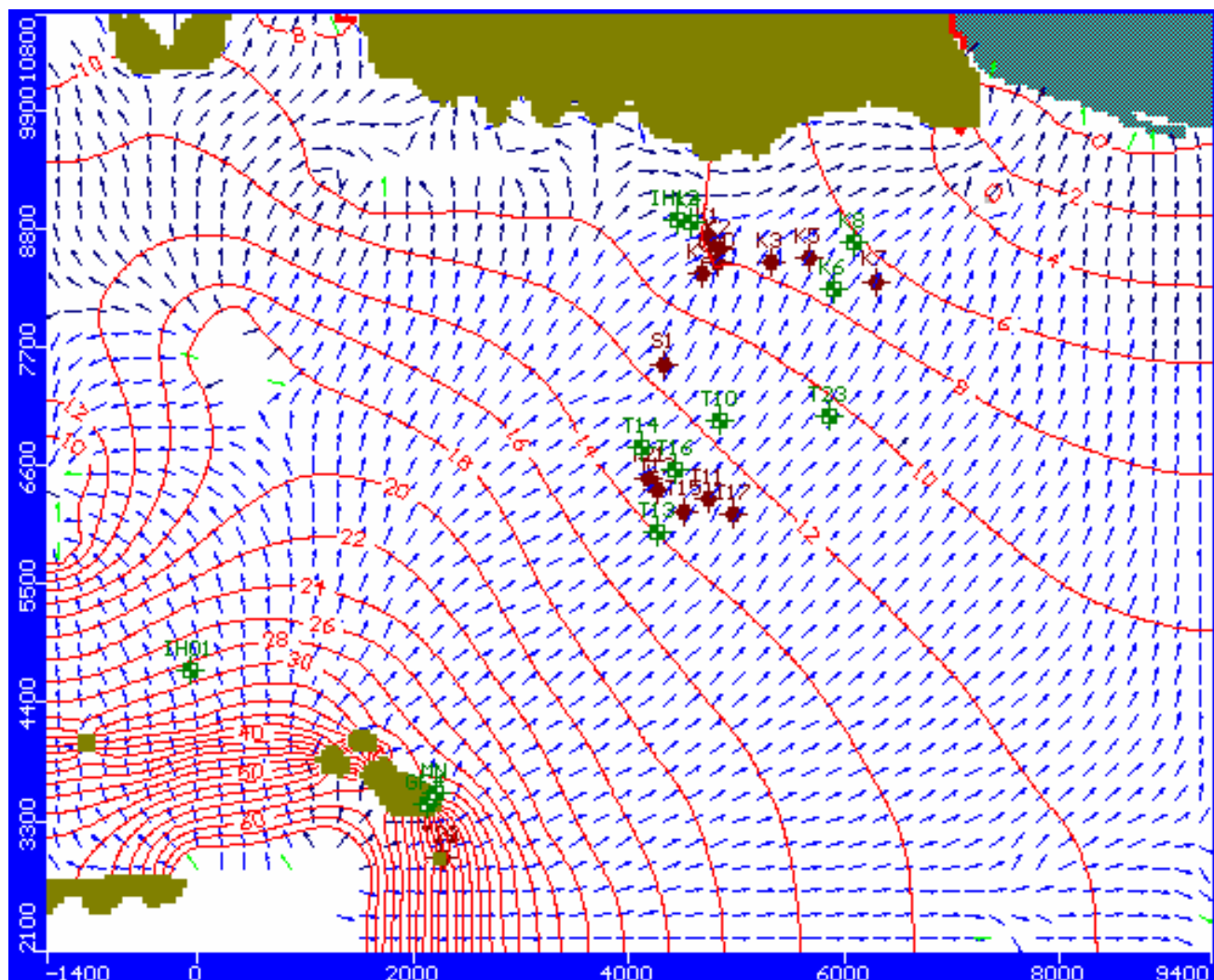
Σχήμα 6.56: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $A \rightarrow A$ στην γραμμή 116, στην 93^η περίοδο τάσης.

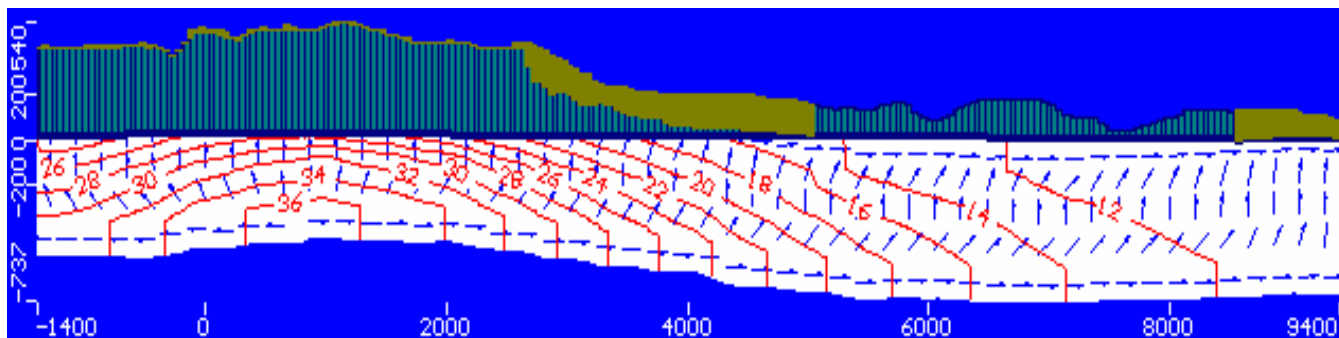


Σχήμα 6.57: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 72, στην 93^η περίοδο τάσης.

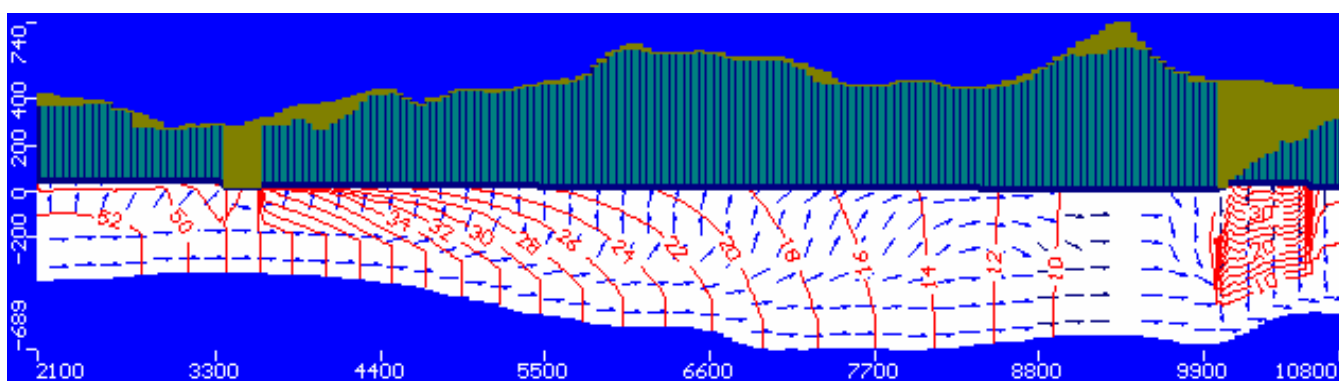


Σχήμα 6.58: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 144, στην 93^η περίοδο τάσης.

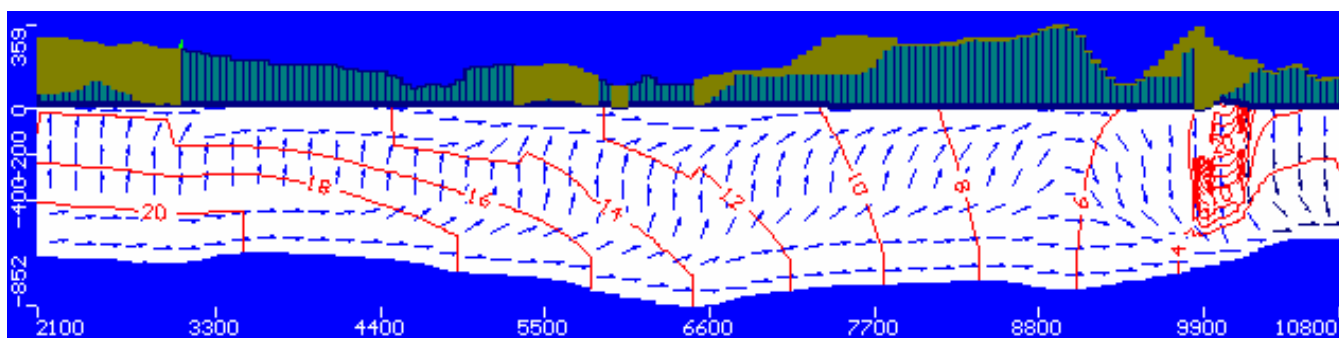




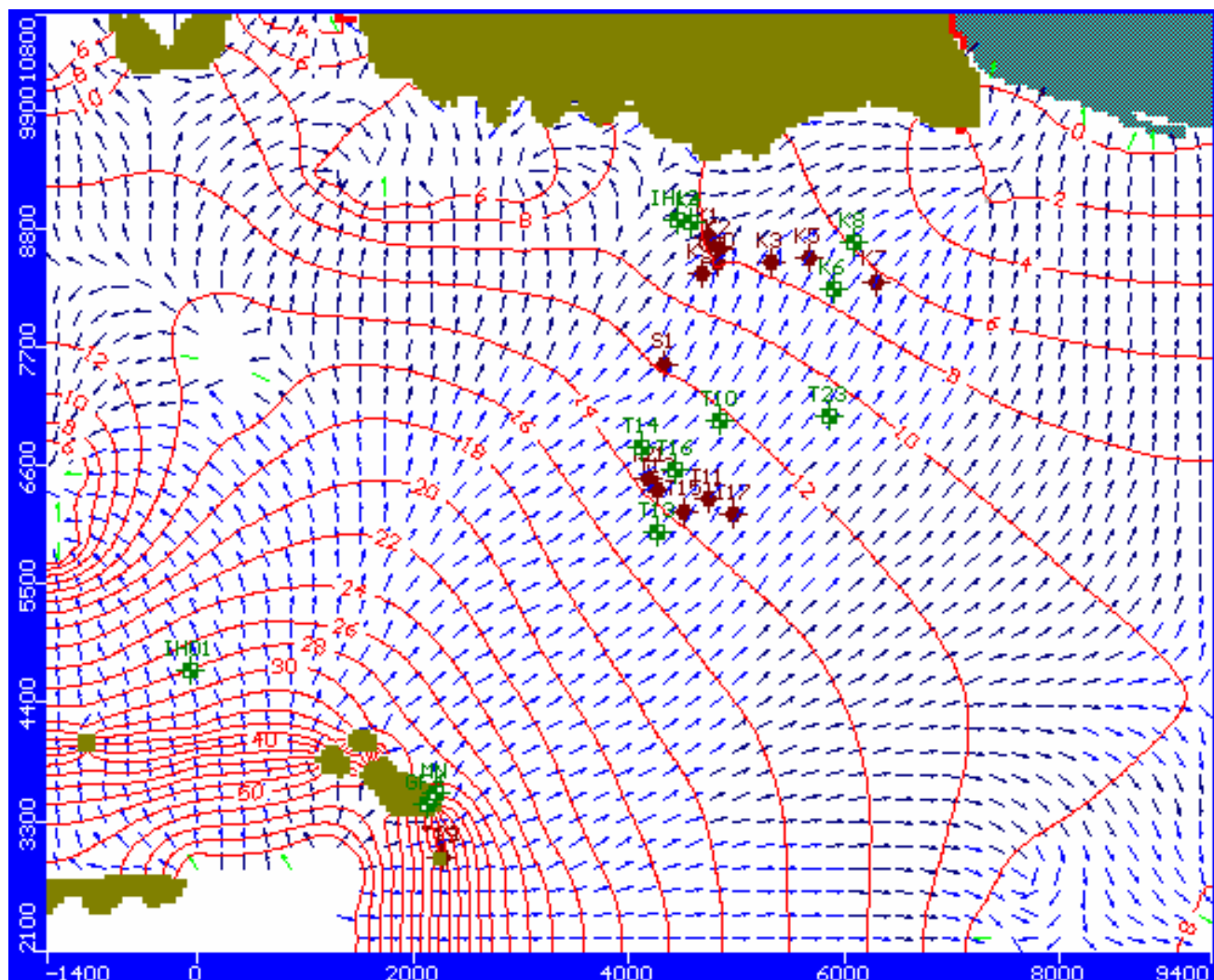
Σχήμα 6.61: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $A \rightarrow A$ στην γραμμή 116, στην 147^η περίοδο τάσης.



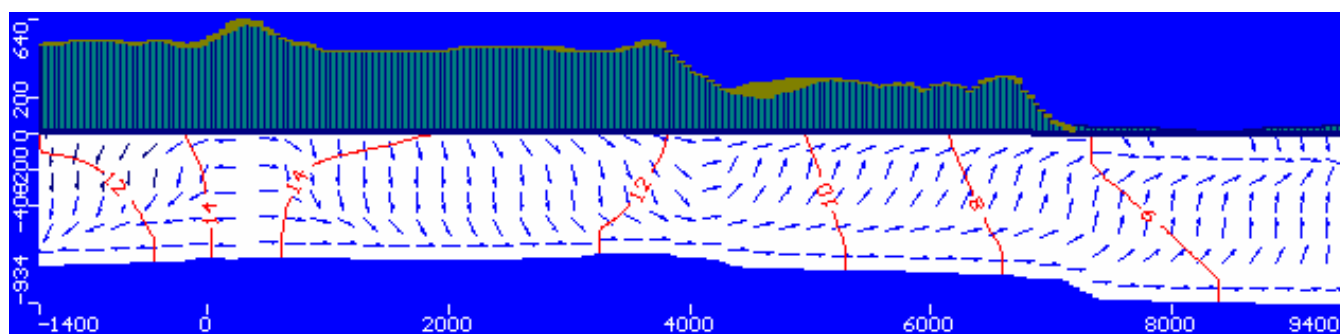
Σχήμα 6.62: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 72, στην 147^η περίοδο τάσης.



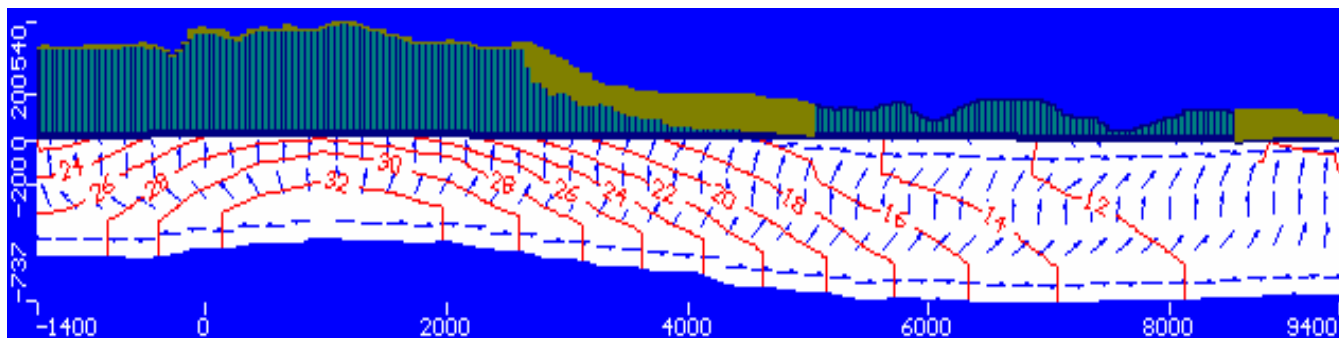
Σχήμα 6.63: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 144, στην 147^η περίοδο τάσης.



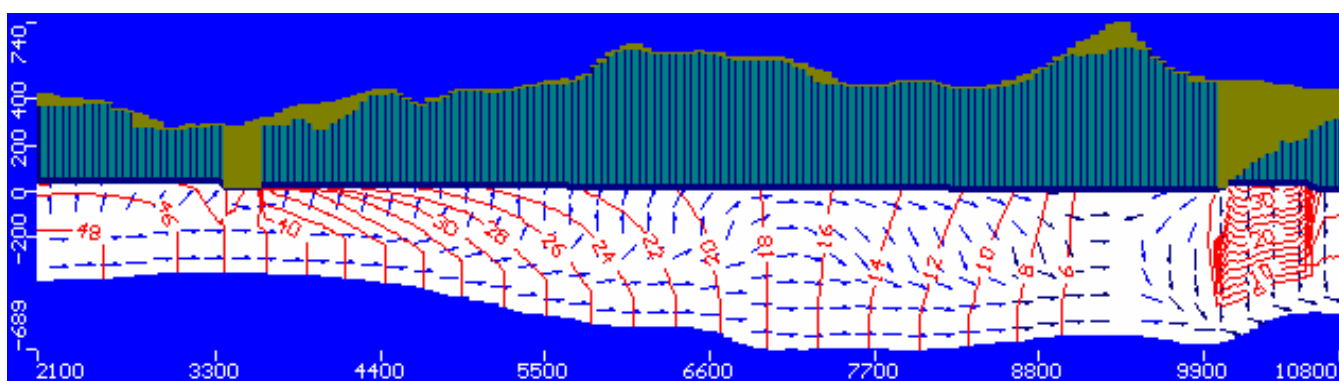
Σχήμα 6.64: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 153^η περίοδο τάσης.



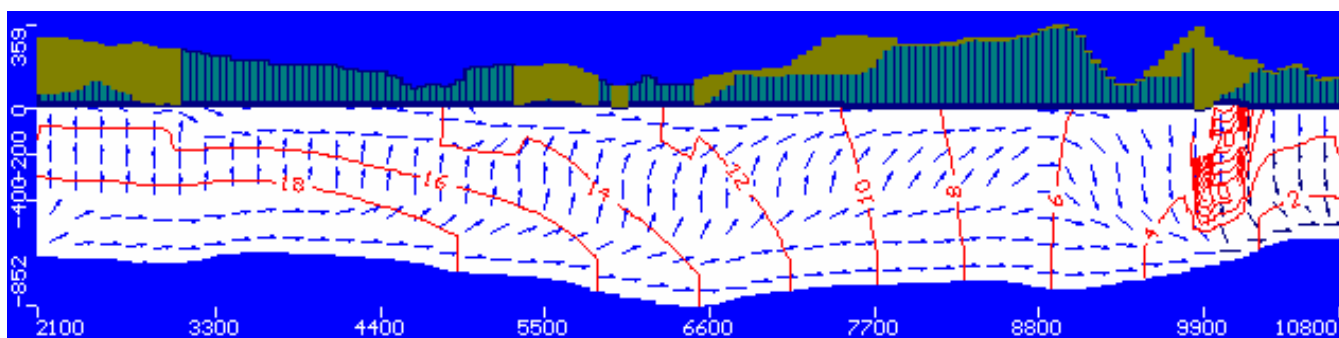
Σχήμα 6.65: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης Δ → Α στην γραμμή 58, στην 153^η περίοδο τάσης.



Σχήμα 6.66: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $A \rightarrow A$ στην γραμμή 116, στην 153^η περίοδο τάσης.



Σχήμα 6.67: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 72, στην 153^η περίοδο τάσης.



Σχήμα 6.68: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Τομή διεύθυνσης $B \rightarrow N$ στην στήλη 144, στην 153^η περίοδο τάσης.

Όλοι οι παραπάνω χάρτες, με τον τρόπο που κατασκευάστηκαν, δείχνουν ότι τους θερινούς μήνες υπάρχει ταπείνωση του υδροφορέα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει κατά την διάρκεια του χειμώνα (υψηλές στάθμες). Πράγματι, στο ΝΔ άκρο του χάρτη, κατά τις "χειμερινές" περιόδους τάσης (87^η και 147^η) η στάθμη του υδροφορέα φτάνει τα 64 m, ενώ κατά τις "θερινές" περιόδους τάσης (93^η και 153^η) "πέφτει" στα 58 m.

Στους ίδιους χάρτες είναι σαφής και η κύρια διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού που συμβαίνει από ΝΔ (πρόποδες Ψηλορείτη) προς ΒΑ (πηγή Αλμυρού).

Στον **Πίνακα 6.8** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου (υδατικό ισοζύγιο). Τα αποτελέσματα αφορούν τις τέσσερις επιλεγμένες περιόδους τάσης, προκειμένου να είναι αντίστοιχα των παρουσιαζόμενων χαρτών.

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 6.8, στο εξεταζόμενο υδρογεωλογικό σύστημα ρέουν κατά μέσο όρο 1.486.450 m³/day νερού. Από τον όγκο αυτό, τα 64.845 m³/day ($\approx$ 4,36%) προέρχονται από επανατροφοδότηση (ορίστηκε σταθερή για όλες τις χρονικές περιόδους), τα 72.102 m³/day ($\approx$ 4,85%) προέρχονται από τα ρυθμιστικά αποθέματα του υδροφορέα (storage) και τα υπόλοιπα 1.349.503 m³/day ($\approx$ 90,79%) από επιφανειακές και υπόγειες λεκάνες, γύρω από την περιοχή ενδιαφέροντος (συνοριακές περιοχές).

Από το προαναφερόμενο ετήσιο δυναμικό του υδροφορέα, ο μεγαλύτερος όγκος νερού περνάει ανεκμετάλλευτος, είτε σε γειτονικές υπόγειες λεκάνες, είτε στην θάλασσα (συνοριακές περιοχές), ενώ μεγάλο ποσοστό αναβλύζει από την πηγή Αλμυρού. Τελικά, το νερό που εκμεταλλεύεται η ΔΕΥΑΗ μέσω των γεωτρήσεων είναι μόλις 14.491 m³/day ($\approx$ 0,97% του δυναμικού του υδροφορέα).

Οι παραπάνω μέσες τιμές είναι ενδεικτικές και σε καμία περίπτωση ακριβείς, καθώς η εποχιακή διακύμανσή τους είναι αξιοσημείωτη. Προκειμένου λοιπόν να εξετασθεί η συμπεριφορά του υδροφορέα είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός των τιμών του πίνακα εποχιακά.

Μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις παρατηρούνται και στην παροχή της πηγής Αλμυρού. Έτσι, τον "χειμώνα" οι εκφορτίσεις (**Q'**) φτάνουν τα 1.088.200 m³/day, ενώ το "καλοκαίρι" μόλις τα 387.970 m³/day.

Παρατηρείται ότι οι υπολογιζόμενες από το ModFlow παροχές της πηγής στις 87^η και 147^η και στις 93^η και 153^η περιόδους τάσης είναι ίσες. Το γεγονός αυτό είναι τυχαίο και οφείλεται στο ότι για αυτές τις περιόδους χρησιμοποιήθηκαν ίδιες στάθμες

Hm' για την προσομοίωση των πραγματικών παροχών της πηγής, καθώς και αυτές οι τελευταίες τυχαίνει να είναι ίσες (βλέπε παρ. 6.1.8).

Πίνακας 6.8: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Υδατικό ισοζύγιο.

Π.Τ.	Είδος ροής	Εισροές (m ³ /day)	Εκροές (m ³ /day)
8 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.839.599	633.685
	Επανατροφοδότηση	64.845	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.088.200
	Αντλήσεις	0	15.665
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	0
	Αποθέματα	356	167.250
	ΣΥΝΟΛΟ	1.904.800	1.904.800
93 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	859.995	664.978
	Επανατροφοδότηση	64.845	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	387.970
	Αντλήσεις	0	13.637
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	0
	Αποθέματα	142.260	515
	ΣΥΝΟΛΟ	1. 067.100	1. 067.100
147 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.838.503	634.223
	Επανατροφοδότηση	64.845	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.088.200
	Αντλήσεις	0	14.377
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	0
	Αποθέματα	352	166.900
	ΣΥΝΟΛΟ	1. 903.700	1. 903.700
153 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	859.915	667.937
	Επανατροφοδότηση	64.845	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	387.970
	Αντλήσεις	0	14.285
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	0
	Αποθέματα	145.440	8
	ΣΥΝΟΛΟ	1.070.200	1.070.200

Στις 87^η και 147^η περιόδους τάσης αντιστοιχεί παροχή (μέτρηση πεδίου) $Q = 1.088.055 \text{ m}^3/\text{day}$, ενώ για τις 93^η και 153^η περιόδους τάσης $Q = 438.992 \text{ m}^3/\text{day}$ (βλέπε Πίνακα Δ.3, Παράρτημα – Μέρος Δ). Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με τις προηγούμενες (υπολογιζόμενες από το πρόγραμμα) προκύπτει ότι η υπολογιζόμενη παροχή (Q') της πηγής Αλμυρού δεν συμφωνεί απόλυτα με την μέτρηση πεδίου (Q).

Η παραπάνω ασυμφωνία των τιμών παροχής της πηγής Αλμυρού οφείλεται στην ύπαρξη αντλήσεων στα πεδία παραγωγής ανάντη της πηγής που αλλοιώνουν τις όποιες "τοπικές ρυθμίσεις". Οι "τοπικές ρυθμίσεις", με τον τρόπο που έγιναν (βλέπε παρ. 6.1.8), δεν ήταν δυνατό να λάβουν υπόψη τους και τις αντλήσεις των γεωτρητικών πεδίων. Πάντως, οι όποιες αποκλίσεις είναι αμελητέες σε σχέση με τον όγκο των εκροών και δεν αλλοιώνουν την γενικότερη εικόνα της ροής.

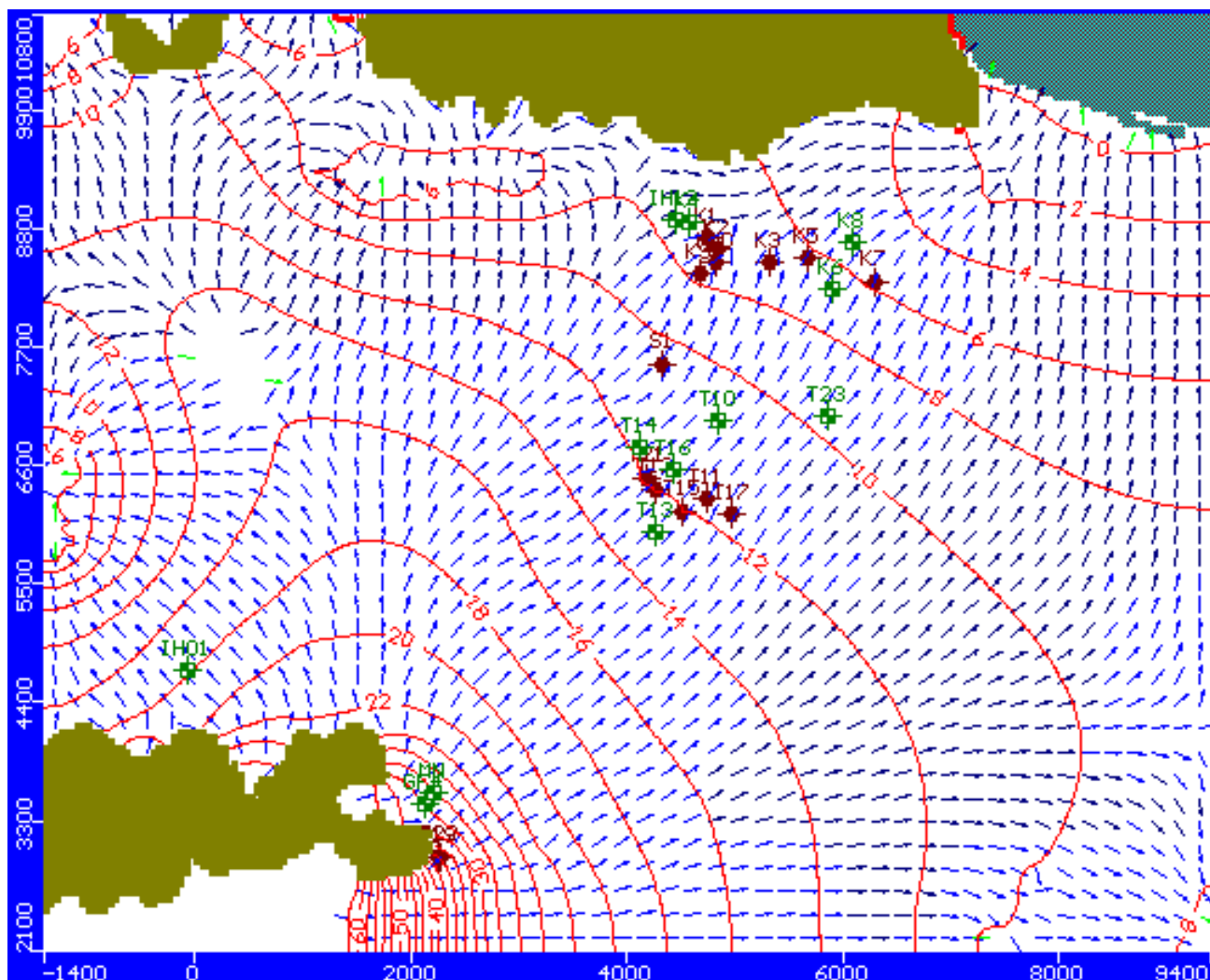
Πέρα των προαναφερόμενων ισοπιεζομετρικών χαρτών (Σχήματα 6.49, 6.54, 6.59 και 6.64) είναι αναγκαίο, όσον αφορά το μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής, να παρουσιασθούν και οι τελικές συνθήκες της προσομοίωσης, οι οποίες αποτελούν τις αρχικές συνθήκες για τα μοντέλα πρόβλεψης (βλέπε παράγραφο 6.2.3).

Οι αρχικές αυτές συνθήκες δίνονται στο **Σχήμα 6.69**. Πρόκειται για 156^η περίοδο τάσης του μοντέλου μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής, η οποία αντιστοιχεί στον μήνα Οκτώβριο του 2000.

6.3.3. Μοντέλο πρόβλεψης – Σενάριο Α

Με την επίλυση του σεναρίου Α (λειτουργία υδρομαστευτικής στοάς Κέρης), προέκυψαν τα **Σχήματα 6.70, 6.71, 6.72 και 6.73**. Στα σχήματα αυτά εμφανίζονται χάρτες με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες (ισοδιάσταση ανά 2 m) και τα διανύσματα ροής στις 51^η (Ιανουάριος 2005), 57^η (Ιούλιος 2005), 111^η (Ιανουάριος 2010) και 117^η (Ιούλιος 2010) περιόδους τάσης, αντίστοιχα.

Η επιλογή των συγκεκριμένων περιόδων τάσης έγινε με σκεπτικό ανάλογο με εκείνο στο μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής. Οι 51^η και 111^η περίοδοι τάσης αντιπροσωπεύουν τον "χειμώνα" του 2005 και του 2010 (έτος πρόβλεψης), αντίστοιχα. Επίσης, οι 57^η και 117^η περίοδοι τάσης εκφράζουν χαρακτηριστικούς θερινούς μήνες των συγκεκριμένων ετών.



Σχήμα 6.69: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 156^η περίοδο τάσης (αρχικές συνθήκες μοντέλων πρόβλεψης).

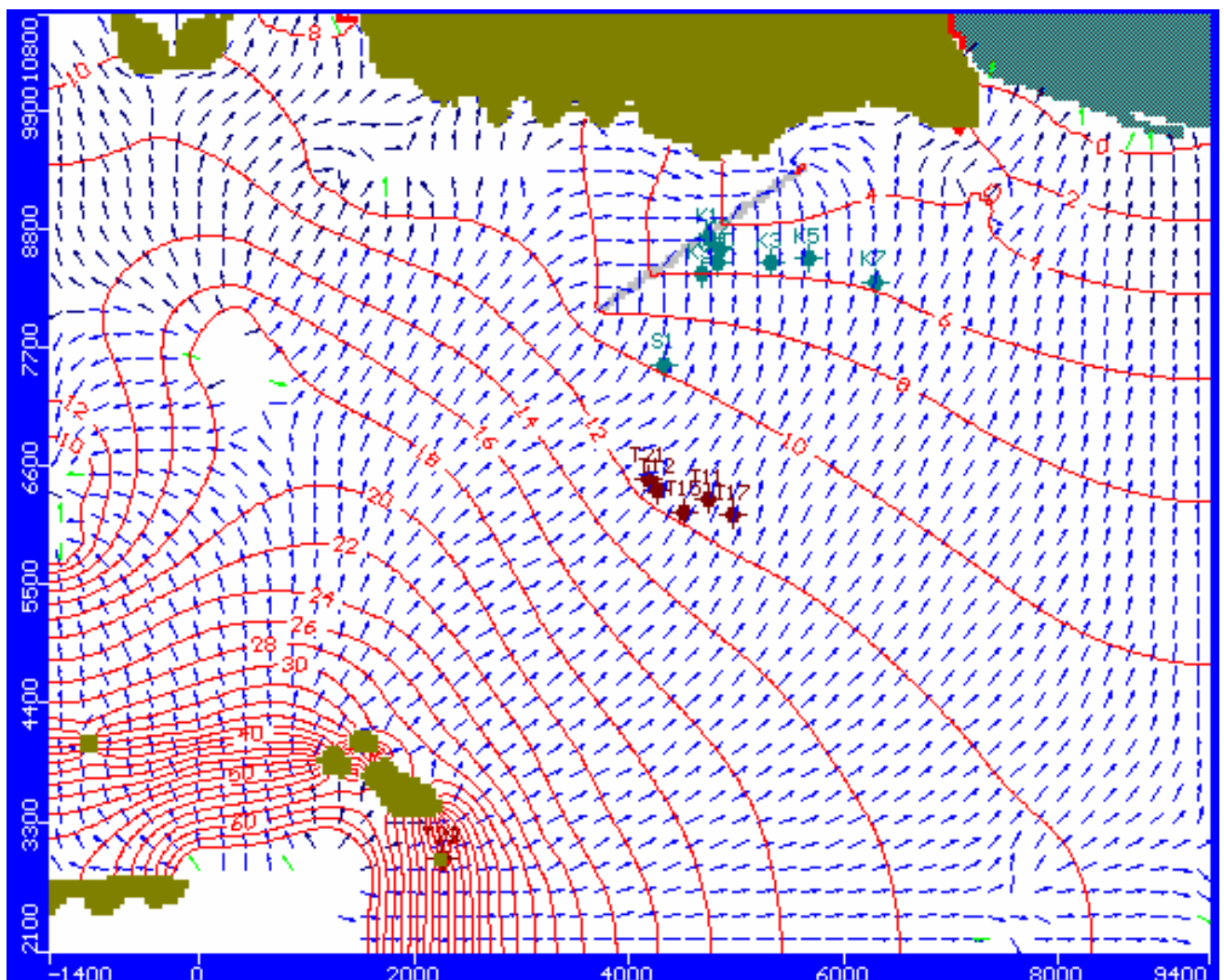
Όλοι οι παρουσιαζόμενοι χάρτες αναφέρονται στο 2^ο στρώμα του μοντέλου (ανθρακικά πετρώματα "Τριπόλεως") και στην δεύτερη περίπτωση του σεναρίου Α (σενάριο Α2, υποθετική πτώση στάθμης $\Delta h = 5$ m).

Συμπληρωματικά, στο Παράρτημα – Μέρος Ε (Σχήματα Ε.11 έως και Ε.14), παρουσιάζονται ανάλογοι χάρτες που προέκυψαν από την επίλυση της πρώτης περίπτωσης (σενάριο Α1, $\Delta h = 3$ m), πάντα για το 2^ο στρώμα και στις επιλεγμένες περιόδους τάσης.

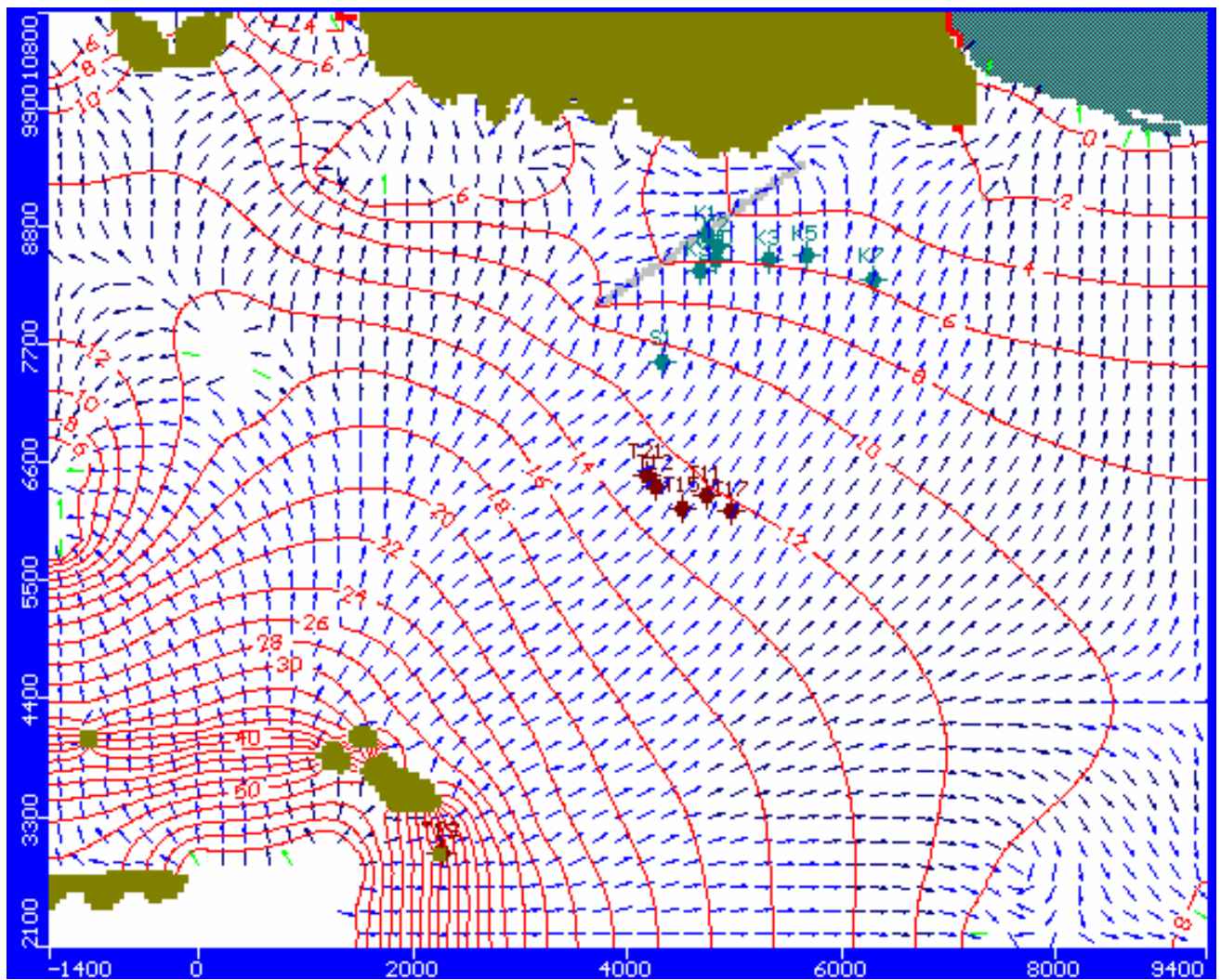
Στα μοντέλα πρόβλεψης δεν κρίθηκε σκόπιμη η παρουσίαση τομών, ανάλογων με αυτές που παρουσιάστηκαν στα δύο προηγούμενα μοντέλα. Κι αυτό γιατί η

παρουσία της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς δεν αλλάζει την γενική εικόνα του υδροφορέα, η οποία αναλύθηκε εκτενώς στο μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής. Η υδρομαστευτική στοά φαίνεται να επηρεάζει την ροή (ισοπιεζομετρικές καμπύλες και διανύσματα) τοπικά και μόνο.

Για τον ίδιο λόγο, δεν κρίθηκε σκόπιμη η παρουσίαση οριζοντιογραφιών (χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής) στα δύο άλλα υδροφόρα στρώματα (1^ο και 4^ο). Η απόφαση για την μη παρουσίαση των εν λόγω χαρτών ενισχύθηκε και από την παρατήρηση ότι οποιαδήποτε ουσιαστική ανωμαλία προέρχεται από το έργο αφορά μόνο το 2^ο στρώμα, στο οποίο και σχεδιάστηκε.



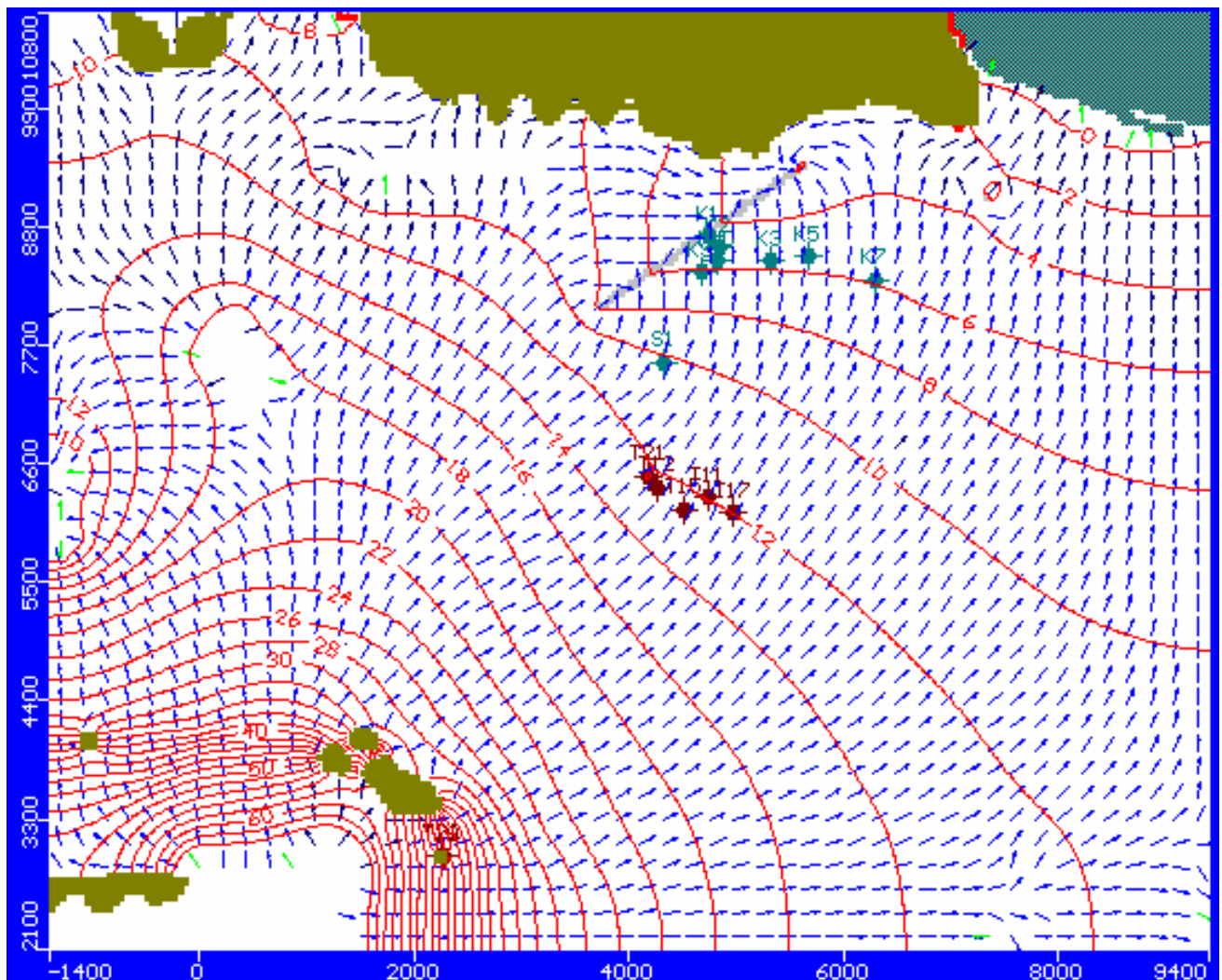
Σχήμα 6.70: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 51^η περίοδο τάσης.



Σχήμα 6.71: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 57^η περίοδο τάσης.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στους πιεζομετρικούς χάρτες όλων των μοντέλων πρόβλεψης, οι απενεργοποιημένες γεωτρήσεις παραγωγής παριστάνονται με πράσινο – σιέλ χρωματισμό, ώστε να ξεχωρίζουν από τις "ενεργές" (αντλούμενες) που έχουν βαθύ κόκκινο χρώμα. Ειδικότερα για το εξεταζόμενο σενάριο A, οι γεωτρήσεις Κέρης θεωρήθηκαν ως "μη ενεργές", ενώ "ενεργές" παραμένουν οι γεωτρήσεις Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού.

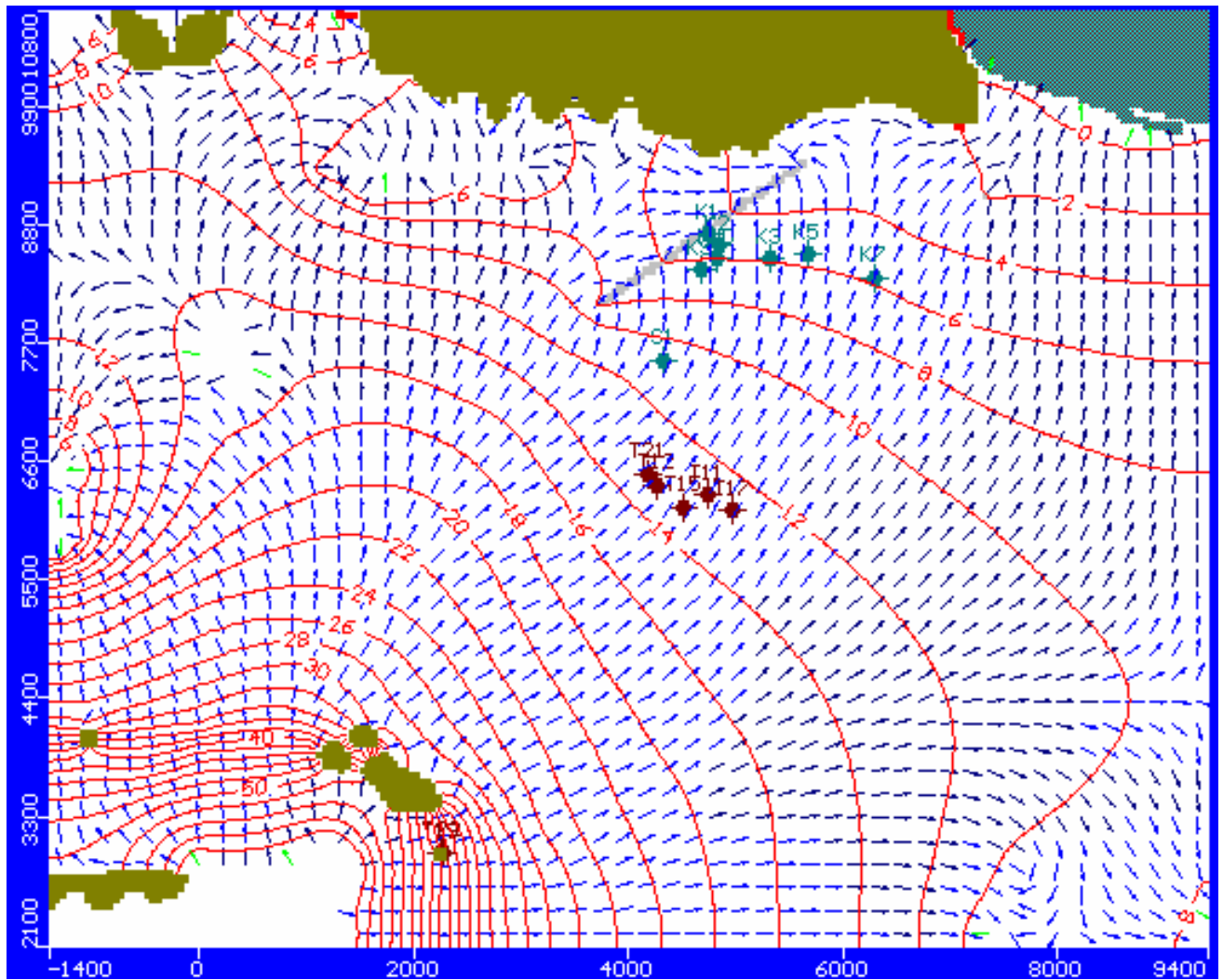
Επίσης, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ευκρίνεια κατά την ανάγνωση των χαρτών, δεν εμφανίζονται οι γεωτρήσεις παρατήρησης.



Σχήμα 6.72: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 111^η περίοδο τάσης.

Τέλος, σημειώνεται ότι μεταξύ των απενεργοποιημένων γεωτρήσεων παραγωγής βρίσκεται και η γεώτρηση Σ1 ("Συνδέσμου", S1), η οποία αν και θεωρητικά ανήκει στο πεδίο Τυλίσου ("ενεργό" στο σενάριο Α), εξαιτίας της θέσης της επηρεάζει και τις δύο προτεινόμενες θέσεις κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς.

Αντίθετα από τους χάρτες, οι πίνακες του υδατικού ισοζυγίου (ανάλογοι των Πινάκων 6.7 και 6.8) έχουν μεγάλη σημασία για τον έλεγχο της απόδοσης του έργου και γι' αυτό το λόγο παρουσιάζονται και για τις δύο περιπτώσεις πτώσης στάθμης που επιλύθηκαν. Τα αποτελέσματα από την επίλυση του σεναρίου Α παρουσιάζονται στους **Πίνακες 6.9** (σενάριο Α1) και **6.10** (σενάριο Α2) και αφορούν τις τέσσερις περιόδους τάσης που επιλέχθηκαν να παρουσιασθούν στην περίπτωση των χαρτών.



Σχήμα 6.73: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 117^η περίοδο τάσης.

Σημειώνεται ότι στους Πίνακες 6.9 και 6.10 με τον όρο "τεχνητές εκφορτίσεις" εννοούνται οι παροχές της υδρομαστευτικής στοάς, καθώς για την πηγή Αλμυρού (το άλλο σημείο εκφόρτισης του υδροφορέα) χρησιμοποιείται ο όρος "φυσικές εκφορτίσεις".

Όπως διαπιστώνεται από την μελέτη των πινάκων, οι παροχές της υδρομαστευτικής στοάς αποτελούν ελάχιστο ποσοστό του δυναμικού του υδροφορέα. Ως εκ τούτου, δεν επηρεάζουν σε αξιόλογο βαθμό την γενική συμπεριφορά του (παροχές πηγής Αλμυρού, διάδοση της ροής στις γύρω περιοχές κ.λπ.).

Πίνακας 6.9: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Α1): Υδατικό ισοζύγιο.

Π.Τ.	Είδος ροής	Εισροές (m ³ /day)	Εκροές (m ³ /day)
51 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.935.349	645.880
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.166.500
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	16.240
	Αποθέματα	338	165.920
	ΣΥΝΟΛΟ	2.000.400	2.000.400
57 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	885.347	664.782
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	407.810
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	13.932
	Αποθέματα	142.840	516
	ΣΥΝΟΛΟ	1.092.900	1.092.900
111 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.843.631	663.237
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.088.200
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	16.153
	Αποθέματα	356	135.250
	ΣΥΝΟΛΟ	1.908.700	1.908.700
117 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	863.627	663.304
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	387.970
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	13.758
	Αποθέματα	143.060	508
	ΣΥΝΟΛΟ	1.071.400	1.071.400

(*) 51^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2005, 57^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2005, 111^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2010 και 117^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2010.

(**) Οι αντλήσεις αφορούν τα πεδία Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού και θεωρήθηκαν σταθερές για όλο το χρονικό "παράθυρο" πρόβλεψης (τελευταίες παροχές του Πίνακα Δ.1 του Παραρτήματος).

Πίνακας 6.10: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Α2): Υδατικό ισοζύγιο.

Π.Τ.	Είδος ροής	Εισροές (m ³ /day)	Εκροές (m ³ /day)
51 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.939.449	641.480
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.166.500
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	24.700
	Αποθέματα	338	165.960
	ΣΥΝΟΛΟ	2.004.500	2.004.500
57 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	886.527	657.454
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	407.810
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	22.460
	Αποθέματα	142.860	516
	ΣΥΝΟΛΟ	1.094.100	1.094.100
111 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.847.931	629.026
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.088.200
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	24.614
	Αποθέματα	356	165.300
	ΣΥΝΟΛΟ	1.913.000	1.913.000
117 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	864.797	655.976
	Επανατροφοδότηση	64.713	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	387.970
	Αντλήσεις	0	5.860
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	22.286
	Αποθέματα	143.090	508
	ΣΥΝΟΛΟ	1.072.600	1.072.600

(*) 51^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2005, 57^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2005, 111^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2010 και 117^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2010.

(**) Οι αντλήσεις αφορούν τα πεδία Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού και θεωρήθηκαν σταθερές για όλο το χρονικό "παράθυρο" πρόβλεψης (τελευταίες παροχές του Πίνακα Δ.1 του Παραρτήματος).

Στον **Πίνακα 6.11** παρουσιάζονται οι υπολογισμένες από το πρόγραμμα παροχές της υδρομαστευτικής στοάς μέχρι και το έτος πρόβλεψης (2010). Οι παροχές αυτές είναι ανηγμένες σε εποχιακή βάση ("χειμώνας" = Νοέμβριος – Μάρτιος και "καλοκαίρι" = Απρίλιος – Οκτώβριος), προκειμένου να είναι εύκολα συγκρίσιμες.

Πίνακας 6.11: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Α): Παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Χρονική περίοδος	Περίοδοι τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
		Δh = 3 m	Δh = 5 m
N 2000 – M 2001	1η – 5η	16.232	25.965
A 2001 – O 2001	6η – 12η	13.957	22.756
N 2001 – M 2002	13η – 17η	15.924	24.442
A 2002 – O 2002	18η – 24η	13.823	22.376
N 2002 – M 2003	25η – 29η	15.308	23.782
A 2003 – O 2003	30η – 36η	13.654	22.188
N 2003 – M 2004	37η – 41η	16.018	24.482
A 2004 – O 2004	42η – 48η	13.796	22.328
N 2004 – M 2005	49η – 53η	16.297	24.758
A 2005 – O 2005	54η – 60η	13.945	22.504
N 2005 – M 2006	61η – 65η	15.448	23.913
A 2006 – O 2006	66η – 72η	13.777	22.308
N 2006 – M 2007	73η – 77η	16.099	24.561
A 2007 – O 2007	78η – 84η	13.854	22.384
N 2007 – M 2008	85η – 89η	16.046	24.508
A 2008 – O 2008	90η – 96η	13.895	22.425
N 2008 – M 2009	97η – 101η	16.066	24.529
A 2009 – O 2009	102η – 108η	13.908	22.439
N 2009 – M 2010	109η – 113η	16.055	24.518
A 2010 – O 2010	114η – 120η	13.898	22.429
M.O. "Χειμώνα" (N – M)		15.949	24.546
M.O. "Καλοκαιριού" (A – O)		13.851	22.414

(*) N = Νοέμβριος, M = Μάρτιος, A = Απρίλιος, και O = Οκτώβριος.

Η 1^η περίοδος τάσης θεωρήθηκε ότι εκφράζει τον μήνα Νοέμβριο 2000. Στην πραγματικότητα, η συγκεκριμένη περίοδος αρχίζει στις 21 Οκτωβρίου του 2000 και τελειώνει στις 20 Νοεμβρίου του ίδιου έτους, δηλαδή περιλαμβάνει 20 ημέρες από τον Νοέμβριο και 11 ημέρες από τον Οκτώβριο.

Με βάση την παραπάνω επισήμανση, οι "χρονικές περίοδοι" του Πίνακα 6.11 δεν αναφέρονται σε πλήρη σειρά μηνών. Το "πεντάμηνο" Νοεμβρίου – Μαρτίου περιλαμβάνει μερικές ημέρες από τον Οκτώβριο, αντί για τον ίδιο αριθμό ημερών του Απριλίου που μετατίθενται στο "επτάμηνο" Απριλίου – Οκτωβρίου, στη θέση μερικών ημερών του Οκτωβρίου κ.ο.κ. Πάντως, τα όποια σφάλματα είναι αμελητέα (περίπου 10 ημέρες ανά "εξάμηνο") και δεν αλλοιώνουν την ουσία του διαχωρισμού "χειμώνα" – "καλοκαιριού".

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.11, η δεύτερη περίπτωση (σενάριο A2, $\Delta h = 5$ m) είναι η πλέον αποδοτική, εξασφαλίζοντας στον Δήμο Ηρακλείου κατά μέσο όρο 24.546 m³/day "γλυκού" νερού κατά την διάρκεια του "χειμώνα" και 22.414 m³/day κατά την διάρκεια του "καλοκαιριού".

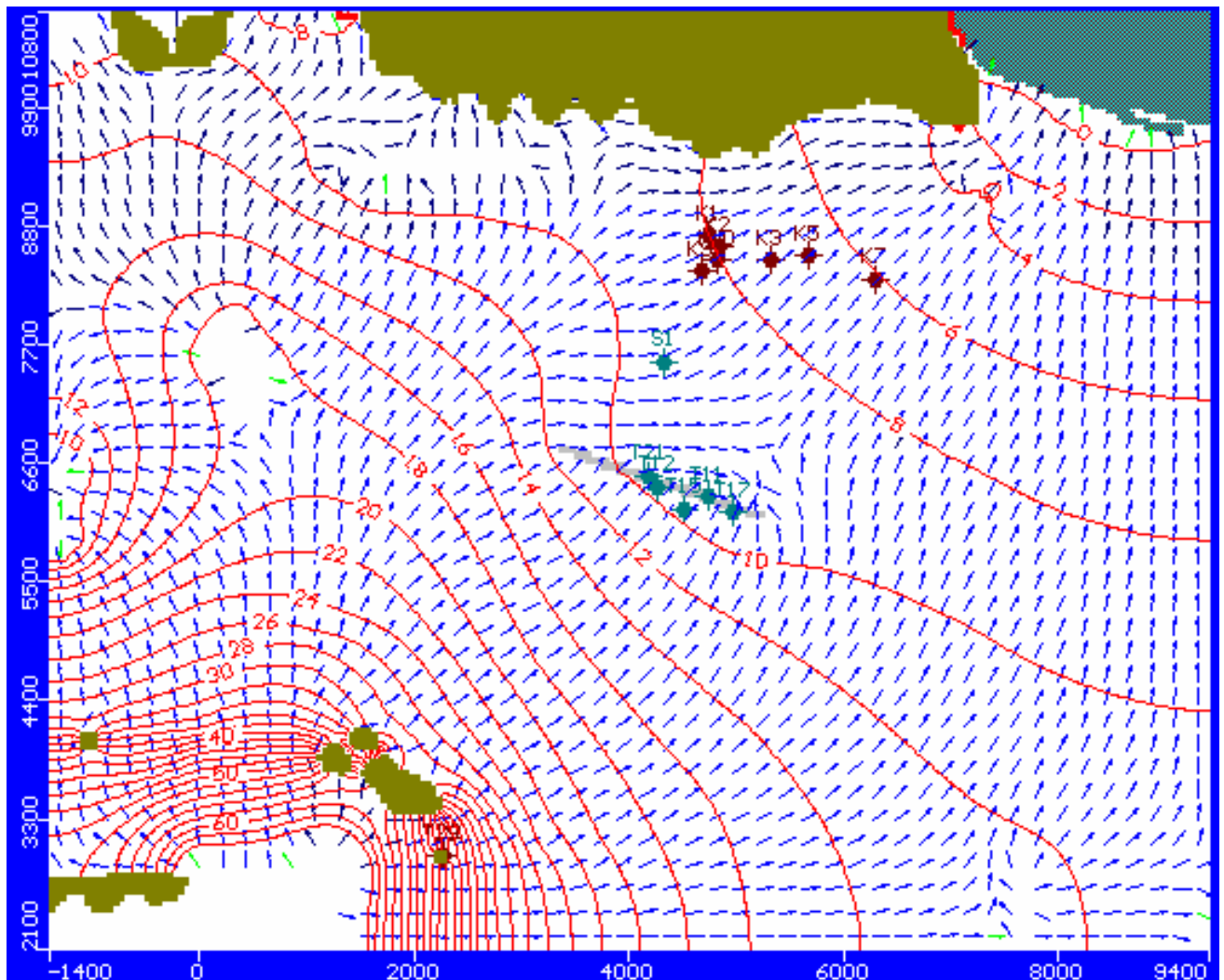
Στον **Πίνακα E.1 (α – δ)** του Παραρτήματος – Μέρος E παρουσιάζονται οι αναλυτικές τιμές παροχής (ανά περίοδο τάσης) που υπολογίσθηκαν, για όλο το εξεταζόμενο χρονικό φάσμα (4.749 ημέρες), δηλαδή, μέχρι και το έτος 2013.

6.3.4. Μοντέλο πρόβλεψης – Σενάριο B

Όμοια με το σενάριο A, τα γραφικά αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου της δεύτερης περίπτωσης (πτώση στάθμης 5 m) του σεναρίου B παρουσιάζονται στα **Σχήματα 6.74** (51^η περίοδος τάσης, Ιανουάριος 2005), **6.75** (57^η περίοδος τάσης, Ιούλιος 2005), **6.76** (111^η περίοδος τάσης, Ιανουάριος 2010) και **6.77** (117^η περίοδος τάσης, Ιούλιος 2010).

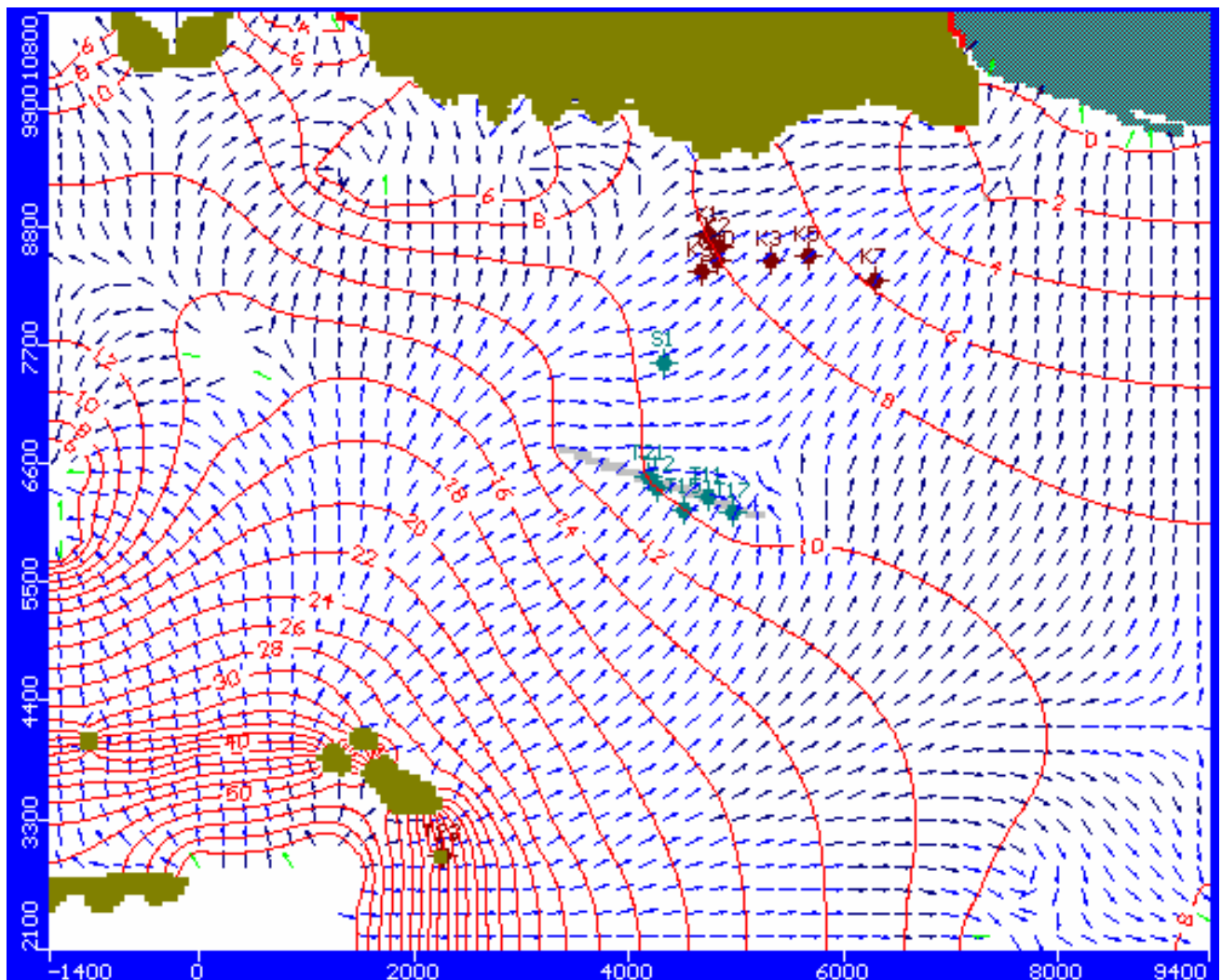
Στο Παράρτημα – Μέρος E (**Σχήματα E.15** έως και **E.18**) δίνονται επιπρόσθετοι χάρτες (για τις επιλεγμένες περιόδους τάσης) που προέκυψαν από την επίλυση της πρώτης περίπτωσης του ίδιου σεναρίου (σενάριο B1, $\Delta h = 3$ m).

Υπενθυμίζεται ότι οι παραπάνω χάρτες αφορούν μόνο το 2^ο στρώμα του μοντέλου, καθώς, όπως επισημάνθηκε και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου σεναρίου, τα υπόλοιπα στρώματα δεν επηρεάζονται ουσιαστικά από την λειτουργία της υδρομαστευτικής στοάς.



Σχήμα 6.74: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 51^η περίοδο τάσης.

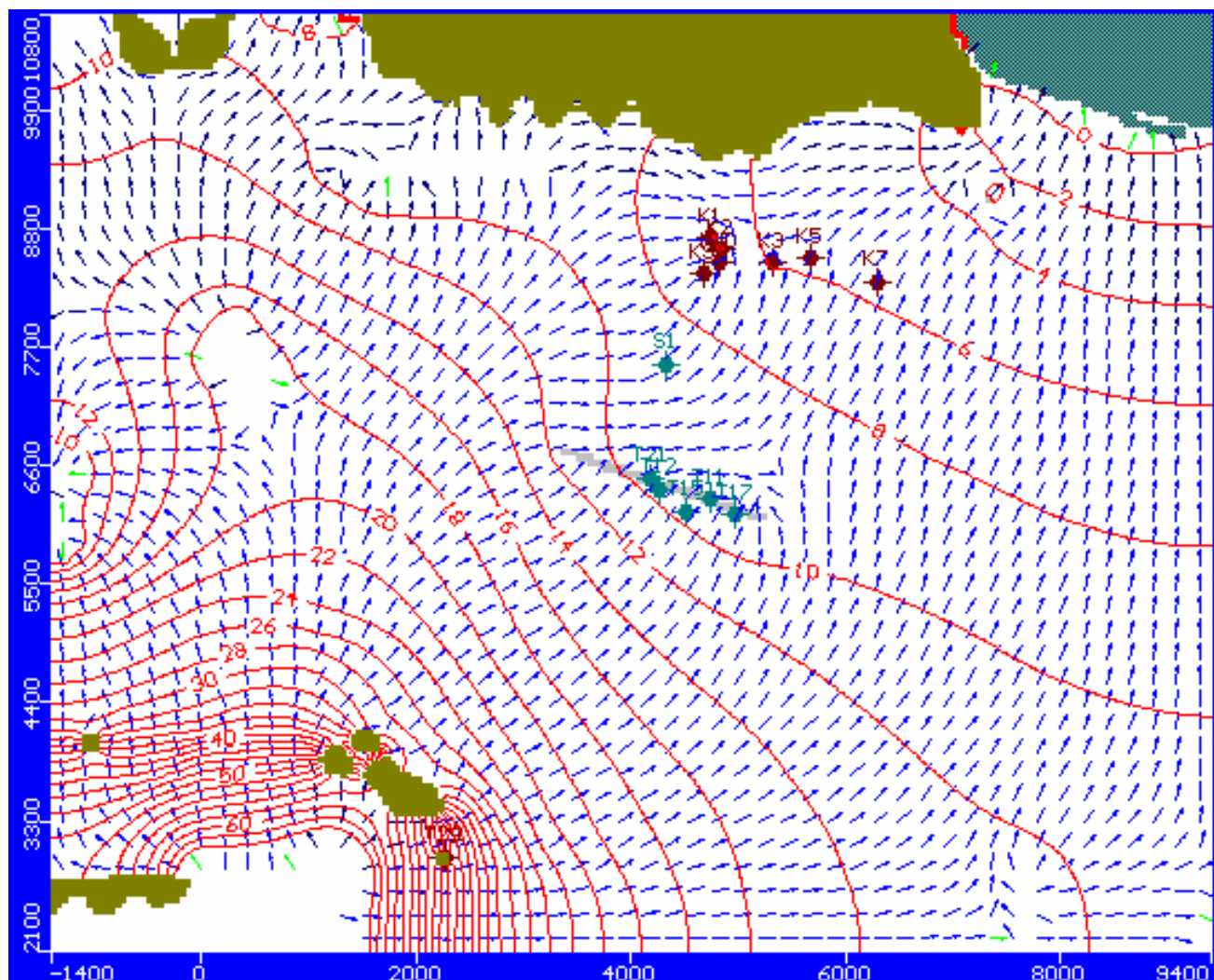
Επίσης, σε όλους τους χάρτες του σεναρίου B οι γεωτρήσεις Τυλίσου απενεργοποιήθηκαν ("μη ενεργές") και παριστάνονται με πράσινο – σιέλ χρώμα, ενώ οι γεωτρήσεις Κέρης και Γωνιανού Φαραγγιού παραμένουν "ενεργές" (αντλούμενες) και έχουν βαθύ κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 6.75: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 57^η περίοδο τάσης.

Σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο (A), στους χάρτες του σεναρίου B παρατηρούνται μικρότερες "ανωμαλίες" της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα στην θέση της υδρομαστευτικής στοάς,. Φαίνεται, δηλαδή, ότι η υδρομαστευτική στοά Τυλίσου δεν επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο την πιεζομετρία, αλλά σε σχέση με την στοά της Κέρης "συνεργάζεται" ομαλότερα με τον υδροφόρο ορίζοντα που αποστραγγίζει.

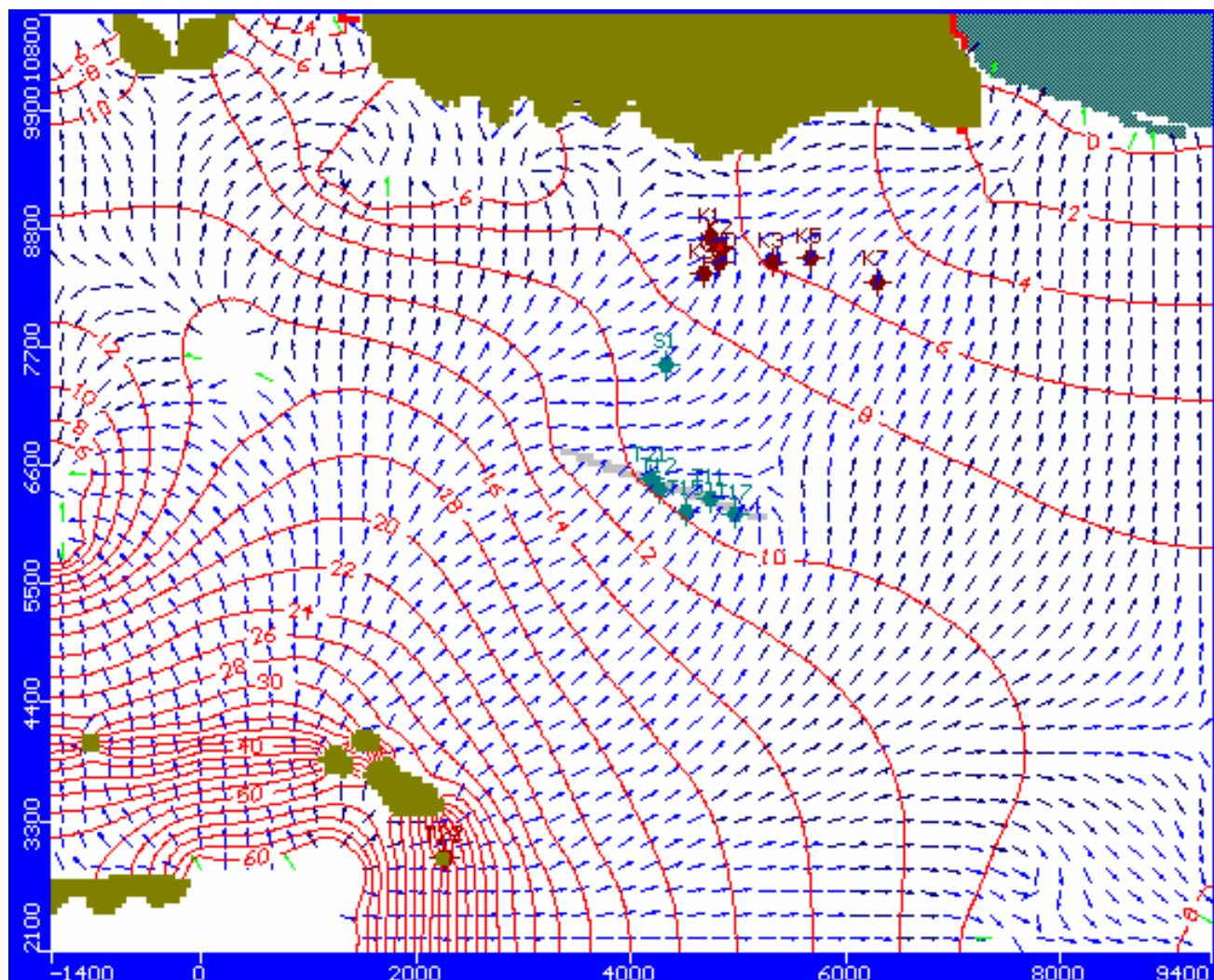
Η διαφορά στον σχεδιασμό των δύο εξεταζόμενων θέσεων εντοπίζεται στον προσανατολισμό του έργου σε σχέση με τις γραμμές ροής. Η υδρομαστευτική στοά στην περίπτωση του σεναρίου A είναι σχεδόν παράλληλη, ενώ στο σενάριο B είναι σχεδόν κάθετη στην ροή.



Σχήμα 6.76: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 111^η περίοδο τάσης.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, μπορεί να υποστηριχθεί ότι ο βέλτιστος σχεδιασμός της υδρομαστευτικής στοάς είναι κάθετα στις γραμμές ροής (παράλληλα στην πιεζομετρία). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το έργο σχεδιαζόμενο κάθετα στην ροή λειτουργεί "εν ηρεμία" και δεν επιβαρύνει σημαντικά τον υδροφόρο ορίζοντα. Ενδεχομένως λοιπόν να δημιουργεί τις προϋποθέσεις "επιβράδυνσης", ή τουλάχιστον "μη επιτάχυνσης" της προχώρησης του μετώπου υφαλμύρισης.

Στους Πίνακες 6.12 και 6.13 παρουσιάζονται τα (ποσοτικά) αποτελέσματα της επίλυσης και των δύο περιπτώσεων του σεναρίου B (πτώση στάθμης 3 m και 5 m, αντίστοιχα), πάντα για τις 51^η, 57^η, 111^η και 117^η περιόδους τάσης.



Σχήμα 6.77: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B2): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 117^η περίοδο τάσης.

Επίσης, στον **Πίνακα 6.14** (ανάλογος του Πίνακα 6.11 για το σενάριο A) παρουσιάζεται η εποχιακή διακύμανση των παροχών της υδρομαστευτικής στοάς, μέχρι και το έτος πρόβλεψης (2010), όπως αυτές υπολογίσθηκαν από το ModFlow.

Από τον τελευταίο αυτόν πίνακα διαπιστώνεται ότι η περίπτωση κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς στην Τύλισο (σενάριο B) είναι περισσότερο συμφέρουσα από άποψη απόδοσης του έργου, σε σχέση με ενδεχόμενη κατασκευή της στην Κέρη.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά την δεύτερη περίπτωση (σενάριο A2, $\Delta h = 5$ m) που και πάλι αποδεικνύεται ως η βέλτιστη σε απόδοση, οι παροχές της στοάς είναι κατά μέσο όρο ίσες με $37.590 \text{ m}^3/\text{day}$, κατά την διάρκεια του "χειμώνα" και $34.967 \text{ m}^3/\text{day}$, κατά την διάρκεια του "καλοκαιριού".

Πίνακας 6.12: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B1): Υδατικό ισοζύγιο.

Π.Τ.	Είδος ροής	Εισροές (m ³ /day)	Εκροές (m ³ /day)
51 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.937.984	635.589
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.166.500
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	22.900
	Αποθέματα	337	169.720
	ΣΥΝΟΛΟ	2.003.100	2.003.100
57 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	887.871	660.650
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	407.810
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	20.934
	Αποθέματα	145.650	515
	ΣΥΝΟΛΟ	1.098.300	1.098.300
111 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.852.165	631.517
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.088.200
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	22.942
	Αποθέματα	356	166.250
	ΣΥΝΟΛΟ	1.917.300	1.917.300
117 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	869.761	659.884
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	387.970
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	20.746
	Αποθέματα	142.960	509
	ΣΥΝΟΛΟ	1.077.500	1.077.500

(*) 51^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2005, 57^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2005, 111^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2010 και 117^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2010.

(**) Οι αντλήσεις αφορούν τα πεδία Κέρης και Γωνιανού Φαραγγιού και θεωρήθηκαν σταθερές για όλο το χρονικό "παράθυρο" πρόβλεψης (τελευταίες παροχές του Πίνακα Δ.1 του Παραρτήματος).

Πίνακας 6.13: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B2): Υδατικό ισοζύγιο.

Π.Τ.	Είδος ροής	Εισροές (m ³ /day)	Εκροές (m ³ /day)
51 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.943.084	626.925
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.166.500
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	36.594
	Αποθέματα	337	169.790
	ΣΥΝΟΛΟ	2.008.200	2.008.200
57 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	888.381	647.487
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	407.810
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	34.697
	Αποθέματα	145.740	515
	ΣΥΝΟΛΟ	1.098.900	1.098.900
111 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	1.856.965	622.543
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	1.088.200
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	36.636
	Αποθέματα	356	166.330
	ΣΥΝΟΛΟ	1.922.100	1.922.100
117 ^η περίοδος τάσης	Συνοριακές περιοχές	869.781	646.223
	Επανατροφοδότηση	64.779	0
	Φυσικές εκφορτίσεις	0	387.970
	Αντλήσεις	0	8.391
	Τεχνητές εκφορτίσεις	0	34.507
	Αποθέματα	143.040	509
	ΣΥΝΟΛΟ	1.077.600	1.077.600

(*) 51^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2005, 57^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2005, 111^η περίοδος τάσης = Ιανουάριος 2010 και 117^η περίοδος τάσης = Ιούλιος 2010.

(**) Οι αντλήσεις αφορούν τα πεδία Κέρης και Γωνιανού Φαραγγιού και θεωρήθηκαν σταθερές για όλο το χρονικό "παράθυρο" πρόβλεψης (τελευταίες παροχές του Πίνακα Δ.1 του Παραρτήματος).

Πίνακας 6.14: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Β): Παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Χρονική περίοδος	Περίοδοι τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
		Δh = 3 m	Δh = 5 m
N 2000 – M 2001	1η – 5η	28.529	47.313
A 2001 – O 2001	6η – 12η	21.846	36.520
N 2001 – M 2002	13η – 17η	23.048	36.969
A 2002 – O 2002	18η – 24η	21.077	34.891
N 2002 – M 2003	25η – 29η	22.394	36.112
A 2003 – O 2003	30η – 36η	20.736	34.493
N 2003 – M 2004	37η – 41η	22.785	36.489
A 2004 – O 2004	42η – 48η	21.008	34.763
N 2004 – M 2005	49η – 53η	22.949	36.651
A 2005 – O 2005	54η – 60η	21.228	34.982
N 2005 – M 2006	61η – 65η	22.433	36.136
A 2006 – O 2006	66η – 72η	20.944	34.698
N 2006 – M 2007	73η – 77η	22.826	36.528
A 2007 – O 2007	78η – 84η	21.038	34.792
N 2007 – M 2008	85η – 89η	22.844	36.546
A 2008 – O 2008	90η – 96η	21.075	34.829
N 2008 – M 2009	97η – 101η	22.888	36.590
A 2009 – O 2009	102η – 108η	21.112	34.867
N 2009 – M 2010	109η – 113η	22.860	36.562
A 2010 – O 2010	114η – 120η	21.079	34.833
M.O. "Χειμώνα" (N – M)		23.356	37.590
M.O. "Καλοκαιριού" (A – O)		21.114	34.967

(*) N = Νοέμβριος, M = Μάρτιος, A = Απρίλιος, και O = Οκτώβριος.

Παρατηρούνται δηλαδή παροχές αρκετά μεγαλύτερες από αυτές της υδρομαστευτικής στοάς Κέρης. Και αυτό παρά το γεγονός ότι το έργο στην Τύλισο σχεδιάστηκε με μήκος κατά 600 m μικρότερο απ' ότι στην Κέρη.

Οι αυξημένες παροχές της υδρομαστευτικής στοάς Τυλίσου, σε σχέση με αυτές της υδρομαστευτικής στοάς Κέρης, πιστεύεται ότι οφείλονται σε δύο λόγους:

- (1) Η θέση της στοάς αποστράγγισης της Τυλίσου συμπίπτει με περιοχή εντός της κύριας ροής από ΝΔ (πρόποδες Ψηλορείτη) προς ΒΑ, η οποία τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού. Αντίθετα, η υδρομαστευτική στοά Κέρης βρίσκεται σε περιοχή δευτερεύουσας ροής και ως εκ τούτου διαχειρίζεται μικρότερους όγκους νερού.
- (2) Η υδρομαστευτική στοά Τυλίσου είναι σχεδιασμένη σχεδόν κάθετα στη ροή (διανύσματα ροής), παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα στην πιεζομετρία. Για το λόγο αυτό, διαχειρίζεται μεγάλο μέρος των όγκων νερού που οδεύουν προς την πηγή. Αντίθετα, η υδρομαστευτική στοά Κέρης, αν και μεγαλύτερη (σε μήκος) δεν εκμεταλλεύεται την ροή νερού προς αυτήν σε όλη της την έκταση (είναι σχεδόν παράλληλη στην ροή).

Οι τιμές παροχής της "υδρομαστευτικής στοάς Τυλίσου" που υπολογίσθηκαν, για κάθε μία από τις 156 εξεταζόμενες περιόδους τάσης (δηλαδή, για την χρονική περίοδο 21 Οκτωβρίου 2000 – 22 Οκτωβρίου 2013) παρατίθενται στον **Πίνακα Ε.2 (α – δ)** του Παραρτήματος – Μέρους Ε. Στον πίνακα αυτόν διακρίνονται σαφώς μεγαλύτερες παροχές σε σχέση με αυτές της "υδρομαστευτικής στοάς Κέρης" (Πίνακας Ε.1), σε όλες τις περιόδους τάσης.

Τέλος, στο Παράρτημα – Μέρος Ε, στα **Σχήματα Ε.19** έως και **Ε.22** παρουσιάζονται, υπό μορφή ιστογραμμάτων, οι μηνιαίες διακυμάνσεις των παροχών που αναμένεται να δώσει η υδρομαστευτική στοά και για τα τέσσερα σενάρια λειτουργίας που εξετάσθηκαν. Οι παροχές προέκυψαν από τις μέσες τιμές των Πινάκων Ε.1 (σενάριο Α) και Ε.2 (σενάριο Β) που αντιστοιχούν στους εκάστοτε μήνες (μέσο υδρολογικό έτος).

Στα ίδια σχήματα σημειώνονται οι ελάχιστες (MIN) και μέγιστες (MAX) μηνιαίες παροχές της υδρομαστευτικής στοάς. Παρατηρείται, όπως αναμενόταν, ότι ελάχιστη παροχή λαμβάνει χώρα κατά το τέλος του "καλοκαιριού" (Σεπτέμβριος ή Οκτώβριος), πριν δηλαδή τις πρώτες βροχές του υδρολογικού έτους. Επίσης, η μέγιστη παροχή παρατηρείται τον Νοέμβριο ή τον Δεκέμβριο, δηλαδή στην αρχή του "χειμώνα".

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα από τις κατά καιρούς μελέτες που αφορούν τον υδροφορέα που τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού έχουν ως εξής:

- (1) Η υδροφορία του εξεταζόμενου καρστικού συστήματος εντοπίζεται περί το φυσιογραφικό επίπεδο βάσης, δηλαδή, στο ύψος της στάθμης της θάλασσας. Με βάση αυτή την διαπίστωση, σε όποιο σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος κατασκευασθεί γεώτρηση που να ξεπερνάει το βάθος αυτό θα βρεθεί νερό ποικίλης δυναμικότητας (εξαρτάται από τοπικούς παράγοντες).
- (2) Η διαπερατότητα των υδροφόρων σχηματισμών της περιοχής είναι ανεξάρτητη από το βάθος. Έτσι, μια υπο-οριζόντια γεώτρηση (π.χ. υδρομαστευτική στοά) έχει τις ίδιες πιθανότητες εύρεσης αξιόλογης υδροφορίας με μία κατακόρυφη γεώτρηση.
- (3) Η ροή του υπόγειου νερού, τόσο του "γλυκού" όσο και του "αλμυρού" συντελείται κυρίως μέσω καρστικών αγωγών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία επιλεκτικών ζωνών υφαλμύρινσης. Το γεγονός αυτό διαπιστώνεται από την διαφορετική συμπεριφορά στην ρύπανση γειτονικών γεωτρήσεων παραγωγής.
- (4) Το σημερινό υδρευτικό δυναμικό (υδατικοί πόροι) του Δήμου Ηρακλείου, αν παραμείνει ως έχει, δεν θα μπορεί να καλύψει τις αυξημένες μελλοντικές ανάγκες του πληθυσμού. Το δίκτυο υδροληψιών (υδρογεωτρήσεις) του δήμου από την ευρύτερη περιοχή της Επαρχίας Πεδιάδος (πεδία Θραψανού, Μαλλίων κ.λπ.), μοιάζει αφενός να έχει "γεράσει" σαν τεχνικό έργο, αφετέρου να έχει υπερκερασθεί σαν σχεδιασμός δικτύου παραγωγικών γεωτρήσεων. Οι κύριοι λόγοι αυτής της κατάστασης είναι ότι από την ανόρυξη του δικτύου υδροληψιών της ΔΕΥΑΗ μέχρι σήμερα έχει κατασκευασθεί από τρίτους μεγάλος αριθμός νομίμων ή και αυθαιρέτων γεωτρήσεων, οι οποίες υπεραντλούνται επί δεκαετίες, ενώ επί πλέον έχει αλλάξει δραματικά η χρήση γης.
- (5) Μεταξύ των σημαντικότερων δυσμενών επιπτώσεων των παραπάνω είναι οι τοπικές διεισδύσεις της θάλασσας (υφαλμύριση), κυρίως στο πεδίο Μαλλίων, η μείωση των παροχών (πτώση στάθμης), με χαρακτηριστικό παράδειγμα το πεδίο

Θραψανού, η αύξηση της ανθρωπογενούς ρύπανσης, οι ισχυρές καθαλατώσεις του δικτύου, το αυξανόμενο κόστος συντήρησης κ.λπ.

- (6) Εάν στα παραπάνω ληφθούν υπόψη και οι επιπτώσεις από την κατασκευή του φράγματος Αποσελέμη, ενδοχώρια των πεδίων εκμετάλλευσης στην Επαρχία Πεδιάδος, τότε προκύπτει σαφώς η ανάγκη αναδιάταξης ή και ανακατασκευής μέρους των υδροληψιών και η αναζήτηση νέων πόρων νερού.
- (7) Επίσης, όσον αφορά τα πεδία εκμετάλλευσης των Επαρχιών Μαλεβιζίου και Τεμένους (πεδία Κέρης, Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού και Αγίου Μύρωνα), η γενικότερη προχώρηση της υφαλμύρινης ενδοχώρια, με δεδομένο το σημερινό καθεστώς άντλησης, είναι αναπόφευκτη. Η ένταξη στο δίκτυο ύδρευσης του νέου πεδίου Κρουσώνα – Λουτρακίου θα δώσει κάποιες προσωρινές λύσεις, αλλά όχι τόσες ώστε να καλυφθεί επαρκώς το υδρευτικό έλλειμμα του Δήμου Ηρακλείου.
- (8) Οι προτάσεις που προέκυψαν από το ερευνητικό πρόγραμμα συνεργασίας ΔΕΥΑΗ και Πολυτεχνείου Κρήτης με τίτλο: "Υδρευση Ηρακλείου: Αξιοποίηση Πηγών Αλμυρού Ποταμού" (εκτέλεση: 1993-97), για (α) "συνέχιση εκτέλεσης υδρογεωτρήσεων για την ανεύρεση και εκμετάλλευση νέων πόρων νερού στην ευρύτερη περιοχή του Δήμου και γενικότερα των Επαρχιών Μαλεβιζίου και Τεμένους" και (β) "εξόρυξη υδρομαστευτικής στοάς ανάντη των πηγών Αλμυρού και εκείθεν των ζωνών υφαλμύρινης", φαίνεται να είναι ρεαλιστικές. Η πρώτη λύση θα καλύψει άμεσα τα υδρευτικά ελλείμματα του δήμου (μεσοπρόθεσμη), ενώ η δεύτερη λύση αποβλέπει στην οριστική και μακροχρόνια επίλυση του υδρευτικού προβλήματος του δήμου, αλλά και των γειτονικών περιοχών (Δήμοι Γαζίου και Τυλίσου).
- (9) Ο εξεταζόμενος υδροφορέας που ρέει στην πηγή Αλμυρού φαίνεται να τροφοδοτείται κυρίως από ΝΔ, δηλαδή από το ορεινό συγκρότημα Ψηλορείτη. Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί απόλυτα με παλαιότερες παρατηρήσεις της ερευνητικής ομάδας συνεργασίας μεταξύ Πολυτεχνείου Κρήτης (Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας) και ΔΕΥΑΗ (Τμήμα Γεωλογικών Μελετών).

Μετά την επίλυση των διαφόρων μοντέλων που αναλύθηκαν στο κεφ. 6 και την σύγκριση των αποτελεσμάτων, συνάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- (1) Το ModFlow δεν μπορεί να αναπαραστήσει άμεσα καρστικούς υδροφόρους σχηματισμούς, ρήγματα, τεκτονικές μορφές και πηγές. Έτσι, το δυναμικό του

υδροφορέα (συνολικές εισροές – εκροές) υπολογίζεται μάλλον μικρότερο απ' ότι είναι στην πραγματικότητα.

- (2) Η παραπάνω διαπίστωση δημιούργησε σοβαρά προβλήματα στο σχεδιασμό της πηγής. Η πηγή δεν ήταν δυνατό να σχεδιαστεί σημειακά, καθώς η ανυπαρξία πακέτου επεξεργασίας πηγών εξαναγκάζει στην χρησιμοποίηση του Drain Package, το οποίο απαιτεί εισαγωγή διαστάσεων.
- (3) Τελικά, το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα προσομοίωσης δεν μπορεί να αναπαραστήσει σημεία (π.χ. πηγή) ή περιοχές (π.χ. στοά) εκφόρτισης. Κάτι τέτοιο απαιτεί μεγάλη χωρική διακριτοποίηση και προκαλεί αριθμητικά προβλήματα, τουλάχιστο για την συγκεκριμένη περιοχή εφαρμογής των μοντέλων. Αντ' αυτού, το ModFlow αναπαριστά επαρκώς περιοχές αποστράγγισης που τροφοδοτούν τις εκφορτίσεις. Έτσι, τόσο η πηγή Αλμυρού, όσο και η προτεινόμενη υδρομαστευτική στοά σχεδιάστηκαν ως περιοχές αποστράγγισης (drains) και όχι ως θέσεις εκφόρτισης.
- (4) Η αδυναμία του προγράμματος για προσομοίωση ασυνεχειών, όπως ρήγματα και καρστικοί αγωγοί, είναι δυνατό να δημιουργήσει μεγάλες διαφορές από τις μετρήσεις πεδίου. Τα σφάλματα αυτά διορθώθηκαν, όπου ήταν δυνατό, μέσω "τοπικών ρυθμίσεων".
- (5) Παρά τα επιμέρους προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια κατασκευής των μοντέλων, η γενική υδρογεωλογική εικόνα της περιοχής αποδόθηκε με αρκετή αξιοπιστία κάτι που επιβεβαιώνει την αρχική θεώρηση ότι ο νόμος του Darcy μπορεί να εφαρμοσθεί σε καρστικά πετρώματα, όταν αυτά εξετάζονται σε μακροκλίμακα.
- (6) Η κατασκευή – λειτουργία της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς, δεν φαίνεται να επηρεάζει τις παροχές της πηγής Αλμυρού, ή την γενικότερη συμπεριφορά (πιεζομετρία, διεύθυνση ροής) του εξεταζόμενου υδροφορέα που τροφοδοτεί την πηγή. Απλά προκαλεί τοπικές ανωμαλίες, οι οποίες δεν επιδρούν στις γεωτρήσεις παραγωγής των "ενεργών" πεδίων (π.χ. η στοά Κέρης δεν επηρεάζει τις γεωτρήσεις Τυλίσου).
- (7) Η υδρομαστευτική στοά της Τυλίσου (σενάριο Β) φαίνεται περισσότερο αποδοτική (μεγαλύτερες παροχές) από εκείνη της Κέρης, τουλάχιστο με βάση τον προτεινόμενο σχεδιασμό (θέσεις υδρομαστευτικής στοάς). Το γεγονός αυτό

επιβεβαιώνει την διαπίστωση ότι η κύρια ροή προς την πηγή Αλμυρού προέρχεται από ΝΔ (όρος Ψηλορείτης) προς ΒΑ (πηγή Αλμυρού).

- (8) Επίσης, σημαντικό ρόλο στην διαφορά των παροχών ανάμεσα στα δύο σενάρια πρέπει να διατελεί και η θέση της σχεδιαζόμενης στοάς, σε σχέση με την ροή. Έτσι, βέλτιστος σχεδιασμός φαίνεται να είναι αυτός κατά τον οποίο η υδρομαστευτική στοά είναι κάθετη στην ροή (περίπτωση Τυλίσου), κάτι που υποστηρίχθηκε και από την ερευνητική ομάδα συνεργασίας Πολυτεχνείου Κρήτης και ΔΕΥΑΗ.
- (9) Όσον αφορά την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της παροχής της υδρομαστευτικής στοάς, θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει σχετική ταύτιση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης (κεφ. 6) με τις ελάχιστες τιμές της αναλυτικής επίλυσης που παρουσιάσθηκε στο κεφ. 4 (θεώρηση "ελλειψοειδούς δυναμικής επιφάνειας", παρ. 4.9). Προφανώς, τα μοντέλα που κατασκευάσθηκαν παρουσιάζουν απαισιόδοξη εκτίμηση της απόδοσης του έργου, καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τους ορισμένες ιδιαιτερότητες του προβλήματος, όπως για παράδειγμα την καρστικοποίηση του υδροφόρου σχηματισμού (ασβεστόλιθοι "Τριπόλεως"). Η τελευταία αυτή σημαντικότερη παράμετρος λήφθηκε εν μέρει υπόψη στην αναλυτική μέθοδο, μέσω του υπολογισμού της "δυναμικής επιφάνειας αποστράγγισης".
- (10) Τελικά, η κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς, ακόμη και η περίπτωση της σχετικά μικρών αποδόσεων στοάς στην Κέρη (σενάριο Α), θα συντελέσει στην οριστική επίλυση του υδρευτικού προβλήματος του Δήμου Ηρακλείου, τουλάχιστον μέχρι και το έτος πρόβλεψης (2010). Μάλιστα, το περίσσειμα ύδατος πιθανόν να φτάνει (ειδικά για το σενάριο Β) για την ύδρευση και των γύρω δήμων (Γαζίου, Τυλίσου κ.λπ.).

7.2. Προτάσεις

Για την ορθολογική αξιοποίηση του υδροφορέα που δίνει γένεση στην πηγή Αλμυρού, με βάση τα προηγούμενα διατυπώνονται οι εξής γενικές προτάσεις:

- Για την ασφαλή εκμετάλλευση του υδροφορέα με δίκτυα ή συστοιχίες γεωτρήσεων θα πρέπει να αναζητηθεί ο βέλτιστος ρυθμός άντλησης, σε συνδυασμό με την πρακτικά εφικτή επιμήκυνση του χρόνου άντλησης, ανά γεώτρηση.

Προκειμένου να αυξηθούν σημαντικά οι απολήψιμες ποσότητες νερού, τηρούμενης της προηγούμενης προϋπόθεσης και εφόσον πρακτικά έχουν εξαντληθεί οι χρόνοι επιμήκυνσης της άντλησης, θα πρέπει να αναζητηθεί η μέγιστη δυνατή γεωγραφική επέκταση του δικτύου, γεγονός που πολλές φορές ταυτίζεται με μια ελεγχόμενη αύξηση του αριθμού των γεωτρήσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η παράμετρος της μέγιστης ακτίνας επίδρασης, η οποία λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στα δίκτυα και στις συστοιχίες των γεωτρήσεων εκμετάλλευσης στους συμβατικούς υδροφορείς, αποβαίνει μεγάλης σημασίας για τους παράκτιους καρστικούς υδροφορείς, μια και το κύριο πρόβλημα στην δεύτερη αυτή περίπτωση είναι η ετερογενής διάδοση της αλμύρινσης.

- Τα νέα διοικητικά όρια του Δήμου Ηρακλείου επηρεάζουν σημαντικά τις προτεραιότητες και το πρακτικό ενδιαφέρον των υδατοπιθανών περιοχών που έχουν ήδη υποδειχθεί από την ερευνητική ομάδα Πολυτεχνείου Κρήτης και ΔΕΥΑΗ.

Προτείνεται λοιπόν η επανεξέταση και επαναξιολόγηση των περιοχών αυτών, με βάση τα νέα δεδομένα (όρια Δήμου).

- Με δεδομένη την πιεζομετρία της ευρύτερης περιοχής και την κατανομή της ποιότητας του νερού, η ορθολογική εκμετάλλευση του υδροφορέα θα μπορούσε να γίνει με υπο-οριζόντια υδρομαστευτική στοά, καταδυόμενη περί την πιεζομετρική στάθμη, εγκάρσια στην κύρια ροή. Η στοά αυτή θα μπορούσε να εξασφαλίσει παροχές "βάσεως" για την κάλυψη μακροχρόνιων υδρευτικών αναγκών.

Προτείνεται λοιπόν η κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς στην περιοχή της Τυλίσου (σενάριο Β), σχεδόν κάθετα στην κύρια ροή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20 (κεφ. 2). Εναλλακτικά της παραπάνω θέσης, ενδείκνυται η κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς στην περιοχή της Κέρης (σενάριο Α).

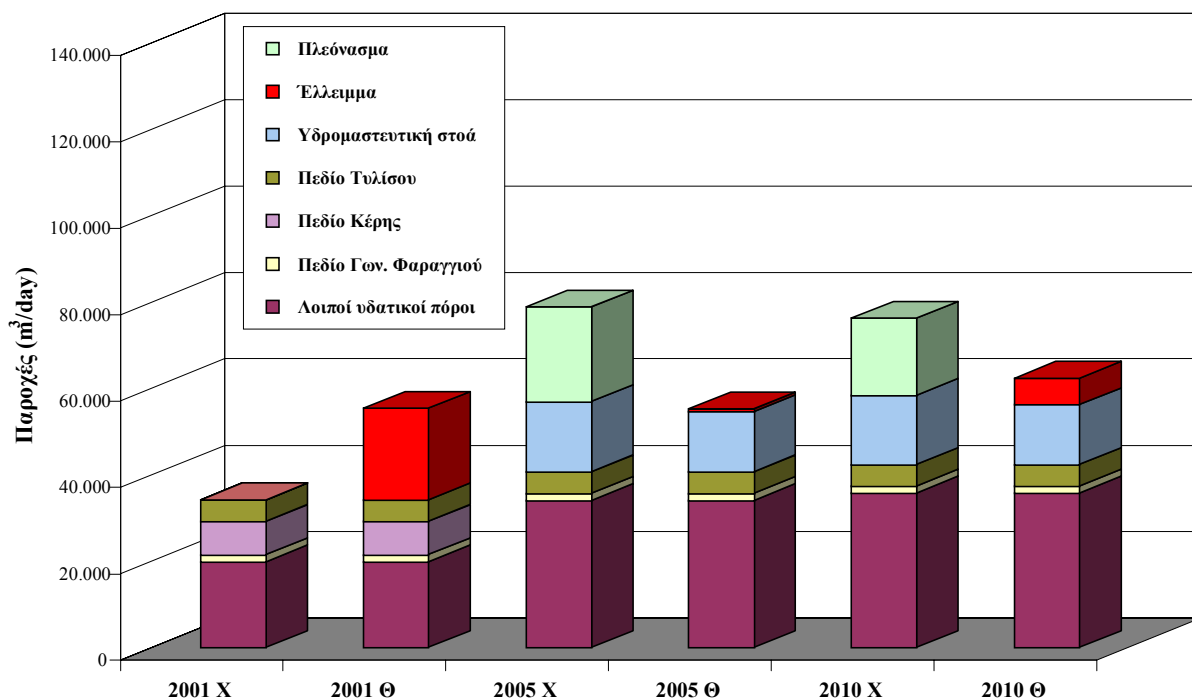
Στα **Σχήματα 7.1** και **7.2** παρουσιάζεται το θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο (2001 – 2010) του Δήμου, με την ένταξη στα δίκτυα ύδρευσης της στοάς Κέρης, για $\Delta h = 3$ m (σενάριο Α1) και $\Delta h = 5$ m (σενάριο Α2), αντίστοιχα.

Επίσης, στα **Σχήματα 7.3** και **7.4** παρουσιάζεται το θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο του Δήμου Ηρακλείου μέχρι και το έτος πρόβλεψης (2010), με την ένταξη στα δίκτυα ύδρευσης της στοάς Τυλίσου, για τις δύο περιπτώσεις πτώσης στάθμης (σενάριο Β1, $\Delta h = 3$ m και σενάριο Β2, $\Delta h = 5$ m) που εξετάστηκαν.

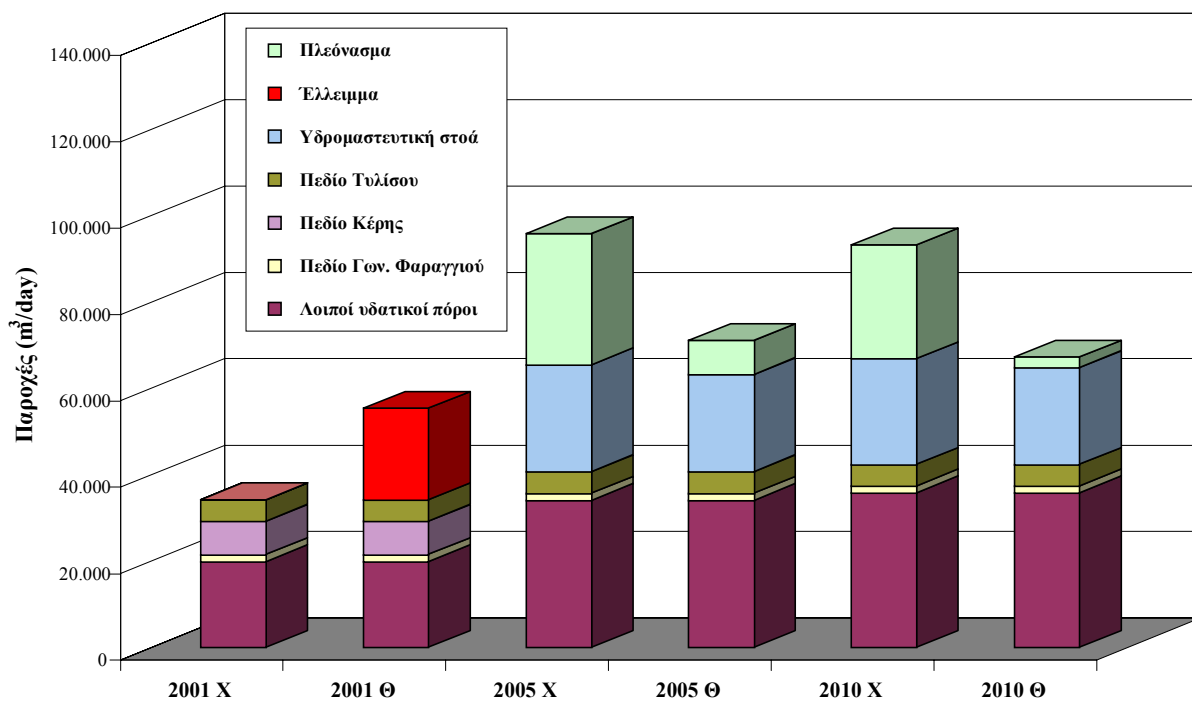
Σημειώνεται ότι, εφόσον η κατασκευή του έργου υπολογίζεται να διαρκέσει 2 έτη (βλέπε κεφ. 2, παρ. 2.4.6), η υδρομαστευτική στοά θα μπορούσε να λειτουργεί από το έτος 2005. Στα Σχήματα 7.1 έως και 7.4 η παραγωγή της στοάς υπολογίζεται από το έτος αυτό (2005).

Επίσης, στα ίδια σχήματα, η παροχή της υδρομαστευτικής στοάς αφορά τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης (κεφ. 6, παρ. 6.3.3 και 6.3.4). Υπενθυμίζεται ότι η εκτιμώμενη με την αναλυτική μέθοδο (κεφ. 4, παρ. 4.9) απόδοση του έργου είναι πολύ μεγαλύτερη.

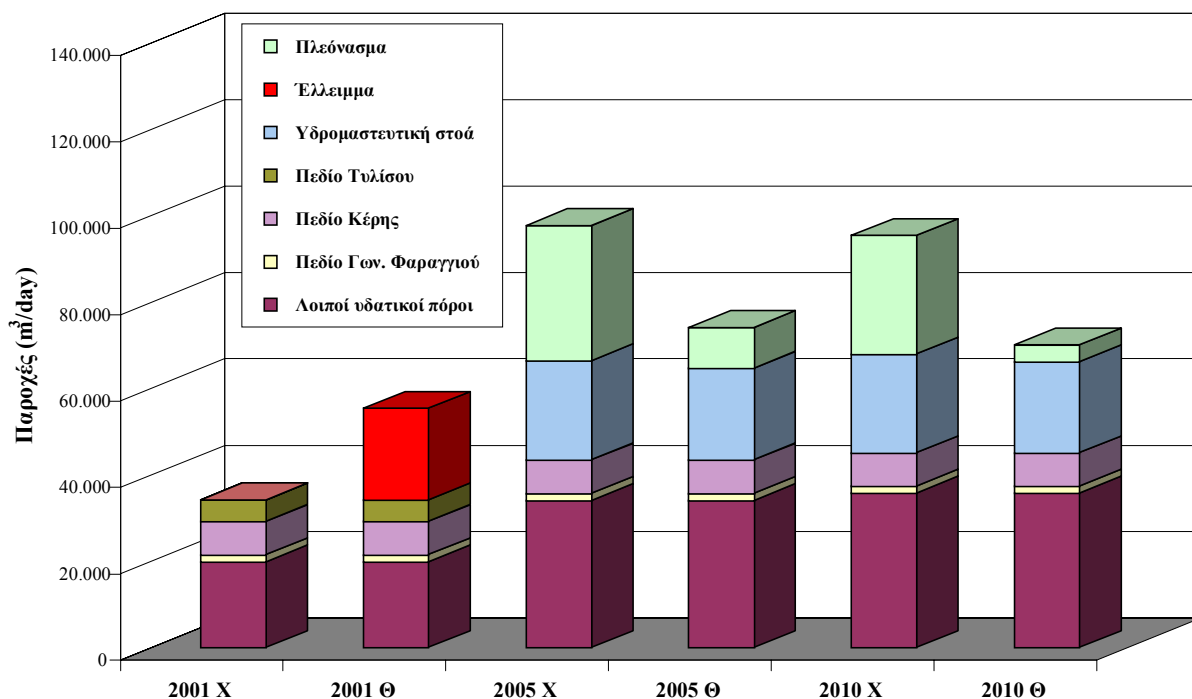
- Στο έργο θα μπορούσαν να επιτευχθούν μεγαλύτερες αποδόσεις (παροχή) με αναλυτικότερη χάραξη των θέσεων, τόσο στην Τύλισο, όσο και στην Κέρη, έτσι ώστε η υδρομαστευτική στοά να είναι κάθετη στην κύρια ροή ($ΝΔ \rightarrow ΒΑ$), δηλαδή από ΒΔ προς ΝΑ.
- Τέλος, όσον αφορά την υδρομαστευτική στοά, θεωρείται αναγκαία η περαιτέρω έρευνα στα εξής επίπεδα:
 - (1) Εγκατάσταση βροχομετρικών σταθμών γύρω από την περιοχή ενδιαφέροντος, για λήψη συχνών και αντιπροσωπευτικών μετρήσεων.
 - (2) Χρονική επέκταση των μοντέλων και διασταύρωση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν με τις μετρήσεις πεδίου.
 - (3) Εξόρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων προκειμένου να διαπιστωθεί το πραγματικό πάχος των διαφόρων υδρογεωλογικών στρωμάτων και ειδικότερα των ασβεστόλιθων "Τριπόλεως".
 - (4) Αν είναι δυνατό, λεπτομερής απεικόνιση ζωνών υψηλής αποκάρσωσης και τεκτονικών ασυνεχειών στην υπό μελέτη περιοχή και καταχώρηση τους στα μοντέλα ως "τοπικές ρυθμίσεις" (βλέπε κεφ. 6).
 - (5) Νέα μοντελοποίηση, η οποία θα λαμβάνει υπόψη της τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, αλλά θα περιορίζεται στα στενά όρια της γύρω από την υδρομαστευτική στοά περιοχής.



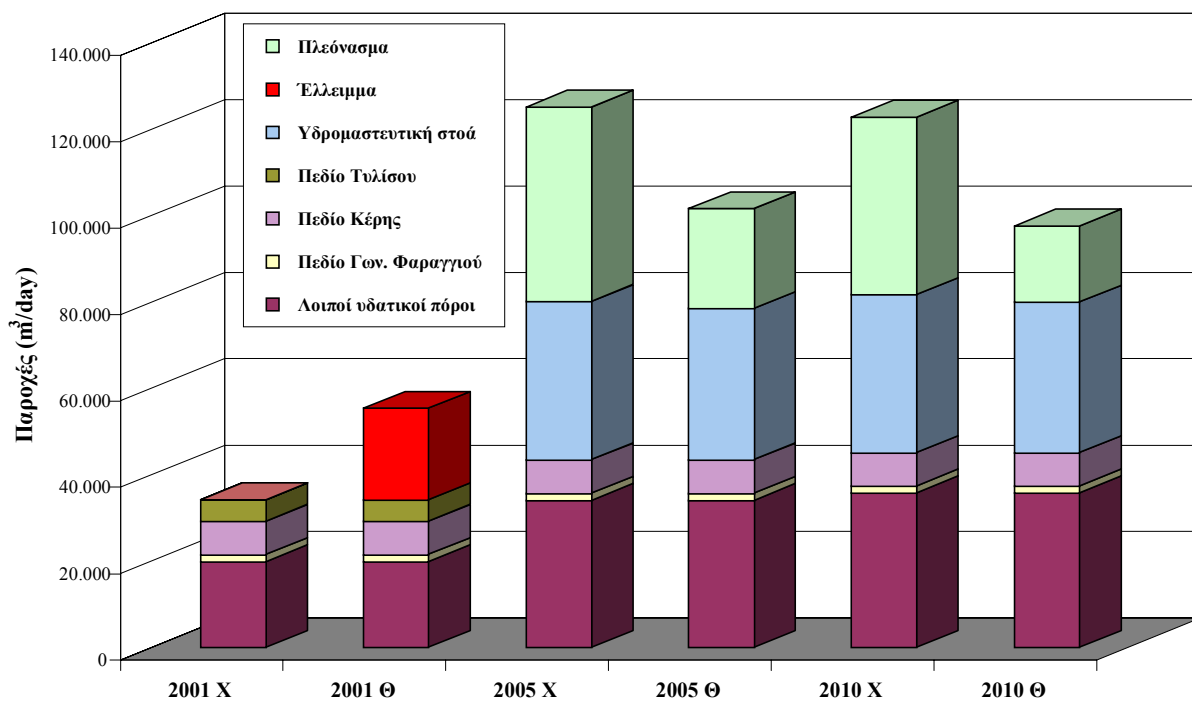
Σχήμα 7.1: Σενάριο A1 - Θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο Δήμου Ηρακλείου.



Σχήμα 7.2: Σενάριο A2 - Θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο Δήμου Ηρακλείου.



Σχήμα 7.3: Σενάριο B1 - Θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο Δήμου Ηρακλείου.



Σχήμα 7.3: Σενάριο B2 - Θεωρητικό υδρευτικό ισοζύγιο Δήμου Ηρακλείου.

- (6) Στην προτεινόμενη νέα προσομοίωση θα πρέπει ο σχεδιασμός των στοών (αγωγοί εκφόρτισης) να είναι ακριβής και να συνδέεται με περιοχές αποστράγγισης ανάντη αυτών, σύμφωνα με τα αποτελέσματα (διανύσματα ροής και πιεζομετρία) της ανά χείρας εργασίας.
- (7) Ο νέος σχεδιασμός των μοντέλων θα πρέπει να περιλαμβάνει και πρόσφατες μετρήσεις πεδίου στην πηγή Αλμυρού, οι οποίες, σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες, θα δώσουν καλύτερη περιγραφή των μελλοντικών εκροών από την πηγή. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι εισροές και εκροές του μοντέλου καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των αναμενόμενων παροχών στην πηγή Αλμυρού.
- (8) Όπως αναφέρθηκε στο κεφ. 2 (παρ. 2.4.6), η επιλογή των θέσεων κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς έγινε με βάση οικονομοτεχνικά κριτήρια, αλλά και λόγω επάρκειας στοιχείων γεωτρήσεων στις συγκεκριμένες περιοχές. Προτείνεται λοιπόν διεξοδική έρευνα για εντοπισμό των βέλτιστων θέσεων κατασκευής του έργου (π.χ. ΝΔ της Τυλίσου) και του βέλτιστου προσανατολισμού αυτών. Ο τελευταίος (προσανατολισμός) θα προκύψει από επιλύσεις μοντέλων πρόβλεψης για τις νέες (βέλτιστες) θέσεις της στοάς.
- (9) Τεχνική μελέτη για την πλήρη περιγραφή των επιμέρους τμημάτων του έργου (υδρομαστευτική στοά, αντλιοστάσιο, αγωγός αερισμού, αγωγοί μεταφοράς νερού στο δίκτυο ύδρευσης κ.λπ.).
- (10) Τεχνική μελέτη για την περιγραφή των κατασκευαστικών λεπτομερειών του έργου (τρόπος διάτρησης, επένδυση κ.λπ.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Anderson, M.P. – Woessner, W.W. (1992), "*Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*", Academic Press, London.
- [2]. Arfib, B. (2001), "*Etude des Circulations d'eaux Souterraines en Aquifere Karstique Cotier: Observations et Modelisation de la Source Saumatre Almyros d'Heraklion, Crete (Grece)*", These de Doctorat, Universite Paris VI-Pierre et Marie Curie.
- [3]. Armstrong, M. – Jabin, R. (1981), "*Variogram Models Must Be Positive – Definite*", Mathematical Geology, Vol. 13, No. 5.
- [4]. Armstrong, M. (1984), "*Common Problems Seen in Variograms*", Mathematical Geology, Vol. 16, No. 3.
- [5]. Ash, S.H. – Doherty, R.E. – Miller, P.S. – Romischer, W.M. – Smith, J.D. (1952), "*Core Drilling at Shaft Sites of Proposed Mine-Water Drainage Tunnel*", Bulletin – United States Department of the Interior, Bureau of Mines.
- [6]. Bear, J. – Beljin, M.S. – Ross, R.R. (1992), "*Fundamentals of Ground Water Modeling*", Ground Water Issue, US EPA, Superfund Technology Support Center for Ground Water, Washington.
- [7]. Beaumont, P. (1967), "*Qanats on the Varamin Plain*", Trans. Institute British Geographers, Iran.
- [8]. Beaumont, P. (1971), "*Qanat Systems in Iran*", Bulletin of the International Association Sch. Hydrology, Vol. 16, Iran, pp. 39–50.
- [9]. Bennett, T.W. (1970), "*On the Design and Construction of Infiltration Galleries*", Ground Water, Vol. 8, No. 3, pp. 16–24.
- [10]. Berkowitz, B. – Bear, J. – Braester, C. (1988), "*Continuum Models for Contaminant Transport in Fractured Porous Formations*", Water Resources Research Vol. 24, No 8, pp. 1225–1236.
- [11]. Blanchard, F.B. – Laverty, L.G. (1966), "*Displacements in the Clavemont Water Tunnel at the Intersection with the Hayward Fault*", Bulletin Seismological Society of America, Vol. 56, No. 2, USA, pp. 291–293.
- [12]. Blyth, F.G.H. – De Freitas, M.H. (1984), "*A Geology for Engineers*", Seventh Edition, Edward Arnold Ltd, London.

- [13]. Boulton, N.S. – Streltsova, T.D. (1978), "*Unsteady Flow to a Pumped Well in a Fissured Aquifer with a Free Surface Level Maintained Constant*", Water Resources Research, Vol.14, No 3.
- [14]. Bouwer, C.H. (1978), "*Groundwater Hydrology*", McGraw-Hill Publishing Company, New York.
- [15]. Bredehoeft, J.D. – Pinder, F.G. (1973), "*Mass Transport in Flowing Groundwater*", Water Resources Research, Vol. 9, American Geophysical Union, pp. 194–210.
- [16]. Breznik, M. (1971), "*Geology and Hydrogeology of the Almyros Spring Area*", Technical Note No. 103, UNDP – FAO / Υπ. Γεωργίας, Αθήνα / Ηράκλειο.
- [17]. Breznik, M. (1978), "*Mechanism and Development of the Brackish Karstic Spring Almyros Irakliou*", Anal. Geolog. des Pays Helléniques, Athènes, pp. 29–46.
- [18]. Breznik, M. (1990), "*Development of the Brackish Karstic Spring Almyros in Greece*", Geologija, Vol. 31–32, 1988/89, Ljubljana, pp. 555–576.
- [19]. Brucker, R.W. – Hess, J.W. – White, W.B. (1972), "*Role of Vertical Shafts in the Movement of Groundwater in Carbonate Aquifers*", Ground Water, Vol. 10, No. 6, pp. 5–13.
- [20]. Brutsaert, W.F. – Gebhard, T.G. (1975), "*Conjunctive Availability of Surface and Ground Water in Albuquerque Area, New Mexico (A Modelling Approach)*", Ground Water, Vol. 13, pp. 345–353.
- [21]. Burdon, D.J. – Παπάκης, Ν.Ι. (1964), "*Υδρογεωλογική Αναγνώρισις Πηγής Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης*", Γεωλογικά και Γεωφυσικά Μελέται, Τόμος ΙΧ, No. 3, Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, Αθήναι.
- [22]. Cacas, M.C. – Ledoux, E. – De Marsily, G. – Tillie, B. – Barbreau, A. – Durand, E. – Feuga, B. – Peaudecerf, P. (1990a), "*Modelling Fracture Flow with a Stochastic Discrete Fracture Network: Calibration and Validation. 1.The Flow Model*" Water Resources Research, Vol. 26, No 3, pp. 479–489.
- [23]. Cacas, M.C. – Ledoux, E. – De Marsily, G. – Tillie, B. – Barbreau, A. – Durand, E. – Feuga, B. – Peaudecerf, P. (1990b), "*Modelling Fracture Flow with a Stochastic Discrete Fracture Network: Calibration and Validation. 2.The Transport Model*" Water Resources Research, Vol. 26, No 3, pp. 491–500.

- [24]. Castany, G. (1962), "*Méthodes d' Etudes et de Recherches des Nappes Aquifères*", Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Paris.
- [25]. Cederstrom, D.J. (1971), "*Ground Water in the Aden Sector of Southern Arabia*", *Ground Water*, Vol. 9, No. 2, pp. 29–34.
- [26]. Cooley, R.L. (1977), "*A Method of Estimating Parameters and Assessing Reliability for Models of Steady State Groundwater Flow (1. Theory and Numerical Properties)*", *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 318–324.
- [27]. Cooley, R.L. (1979), "*A Method of Estimating Parameters and Assessing Reliability for Models of Steady State Groundwater Flow (2. Application of Statistical Analysis)*", *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 3.
- [28]. Cooper, H.H. (1966), "*The Equation of Groundwater Flow in Fixed and Deforming Coordinates*", *J. Geophysical Research*, Vol. 71, No. 2, pp. 4785–4790.
- [29]. Cordes, C. – Kinzelbach, S.D. (1992), "*Continuous Groundwater Velocity Fields and Path Lines in Linear, Bilinear and Trilinear Finite Elements*", *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 11, pp. 2903–2911.
- [30]. Cox, D.C. (1954), "*Water Development for Hawaiian Sugar Cane Irrigation*", *Hawaiian Planters Record*, Vol. 54, pp. 175–197.
- [31]. Cressey, G.B. (1958), "*Qanats, Karez and Foggaras*", *Geographical Review*, Vol. 58, No. 3, pp. 27–44.
- [32]. Creutzburg, N. (1977), "Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης", Κλίμακα 1:200.000, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- [33]. De Marsily (1986), "*Quantitative Hydrogeology*", Academic Press, p. 440.
- [34]. Diamond, P. – Armstrong, M. (1984), "*Robustness of Variograms and Conditioning of Kriging Matrices*", *Mathematical Geology*, Vol. 16, No. 8, pp. 809–822.
- [35]. Dietrich, G. – Re, R. (1972), "*Study of the Almyros Spring of Iraklion*", Technical Report No. 3, UNDP – FAO / Υπ. Γεωργίας, Αθήνα / Ηράκλειο.
- [36]. Domenico, P.A. – Schwartz, H. (1990), "*Physical and Chemical Hydrogeology*", John Wiley & Sons, New York.
- [37]. Driscoll, F.G. (1986), "*Groundwater and Wells*", Second Edition, Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul – Minnesota.

- [38]. Duffield, G.M. – Buss, D.R. – Stephenson, D.E. (1990), "*Velocity Prediction Errors Related to Flow Model Calibration Uncertainty*" Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, IAHS Publ.195, pp.397–406.
- [39]. Dufresne, D.P. – Drake, C.W. (1999), "*Regional Groundwater Flow Model Construction and Well Field Site Selection in a Karst Area, Lake City, Florida*", Engineering Geology, Vol. 52, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 129–139.
- [40]. Dykhuizen, R.C. (1990), "*A New Coupling Term for Dual-Porosity Models*", Water Resources Research, Vol. 26, No 2, pp. 351–356.
- [41]. Edwards, K.B. (1991), "*Estimating Aquifer Parameters from a Horizontal Well Pumping Test in an Unconfined Aquifer*", Water Resources Bulletin, Vol. 27, No. 5, pp. 831–839.
- [42]. Englund, E. – Weber, D. (1992), "*Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators*", International Association for Mathematical Geology, Vol. 24, No. 4, pp. 381–391.
- [43]. Faust, C.R. – Silka, L.R. – Mercer, J.W. (1981), "*Computer Modelling and Groundwater Protection*", Ground Water, 19(4), pp. 362 – 365.
- [44]. Faust, C.R. – Sims, P.N. – Spalding, C.P. – Andersen, P.F. – Stephenson, D.E. (1990), "*FTWORK: A Three-Dimensional Groundwater Flow and Solute Transport Code*", WSRC-RP-89-1085, Westinghouse Savannah River Company, Aiken – SC.
- [45]. Fayed, L.A. – Khattab, A.F. (1973), "*Investigation and Construction of the Wadi El Rayan Tunnel, Egypt*", International J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 10, Pergamon Press, GB, pp. 97–103.
- [46]. Fetter, C.W. (1988), "*Applied Hydrogeology*", Second Edition, Merrill Publishing Company, Columbus – Ohio.
- [47]. Feulner, A.J. – Heyward, H.H. – Angelo, C.G. (1967), "*Use of an Infiltration Gallery to Obtain Fresh Water at Ocean Cape, Alaska*", Geological Survey Research, USA.
- [48]. Ford, D. – Williams, P. (1989), "*Karst Geomorphology and Hydrology*", Unwin Hyman, London, 601 p.
- [49]. Freeze, R.A. – Witherspoon, P.A. (1967), "*Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 2) Effect of Water Table Configuration and Subsurface Permeability Variation*", Water Resources Research, No. 3, pp. 623–634.

- [50]. Freeze, R.A. – Cherry, J.A. (1979), "*Groundwater*", A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- [51]. Freeze, R.A. – Massmann, J. – Smith, L. – Sperling, T. – James, B. (1990), "*Hydrogeological Decision Analysis: 1. A Framework*", *Ground Water*, 28(5), pp. 738–766.
- [52]. Freyberg, D.L. (1988), "*An Exercise in Ground-water Model Calibration and Prediction*", *Ground Water*, 26(3), pp. 350–360.
- [53]. Gale, J.E. (1982), "*Assessing the Permeability Characteristics of Fractured Rock*", *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 189, pp. 163–181.
- [54]. Gelhar, L.W. (1986), "*Stochastic Subsurface Hydrology from Theory to Applications*", *Water Resources Research (Supplement)*, 22(9), pp. 135S–145S.
- [55]. Gheorghe, A. (1978) "*Processing and Synthesis of Hydrogeological Data*", Abacus Press, Kent – England.
- [56]. Goodman, R.E. – Moye, D.G. – Van Schalkwyk, A. – Jawandel, I. (1965), "*Ground Water in Flows during Tunnel Driving*", *Engineering Geology*, Vol. 2, No. 1, Elsevier Science, Amsterdam – Netherlands, pp. 39–56.
- [57]. Grandori, R. – Dolcini, G. – Antonini, F. (1991), "*The Los Rosales Water Tunnel in Bogota*", *Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, Roma, pp. 561–581.
- [58]. Gupta, R.S. (1989), "*Hydrology and Hydraulic Systems*", A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- [59]. Gupta, S.K. – Cole, C.R. – Bond, F.W. – Monti, A.M. (1987), "*Coupled Fluid, Energy and Solute Transport (CFEST) Model: Formulation and User's Manual*", BMI/ONWI-660, Battelle Memorial Institute / Office of Nuclear Waste Isolation, Columbus – OH.
- [60]. Harshbarger, J.W. (1968), "*Ground Water Development in Desert Areas*", *Ground Water*, Vol. 6, No. 3, pp. 2–4.
- [61]. Huber, F. (1989), "*Coquitlam Lake Water Tunnel Upgrading – Design and Construction, A Case History*", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 1, National Research Council of Canada, Ottawa, pp. 90–102.
- [62]. Hunt, B. (1985), "*Seepage to Collection Gallery near Seacoast*", *Water Resources Research*, Vol. 21, No 3, pp. 311–316.

- [63]. Huyakorn, P.S. – Pinder, G.F. (1983), "*Computational Methods in Subsurface Flow*", Academic Press, 473 p.
- [64]. International Mine Water Association (1982), "*Proceedings A, B, C and D*" First International Mine Water Congress, April 19–24, Budapest – Hungary.
- [65]. Kahlown, M.A. – Hamilton, J.R. (1994), "*Status and Prospects of Karez Irrigation*", Water Resources Bulletin, Vol. 30, No 1, pp. 125–134.
- [66]. Kauffmann, C. – Kinzelbach, W. – Fried, J.J. (1990), "*Simultaneous Calibration of Flow and Transport Models and Optimisation of Remediation Measures*", Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, IAHS Publ. 195, pp. 159–170.
- [67]. Keidser, A. – Rosbjerg, D. – Høgh Jensen, K. – Bitsch, K. (1990), "*A joint Kriging and Zonation Approach to Inverse Groundwater Modelling*", Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, IAHS Publ. 195, pp. 171–184.
- [68]. Khan, M.F.K. – Nawaz, M. (1995), "*Karez Irrigation in Pakistan*", Geojournal, Vol. 37, No 1, Kluwer Academic Publishers, Pakistan, pp. 91–100.
- [69]. Kipp, K.L.Jr. (1987), "*HST3D: A Computer Code for Simulation of Heat and Solute Transport in Three-Dimensional Ground-Water Flow Systems*", Report 84-4095, US Geological Survey Water Resources Investigations, USA.
- [70]. Konikow, L.F. – Bredehoeft, J.D. (1978), "*Computer Model of Two-Dimensional Solute Transport and Dispersion in Ground Water*", Book 7, Chapter C2, US Geological Survey Water Resources Investigations, USA, 90.
- [71]. Krabbenhoft, D.P. – Anderson, M.P. – Bowser, C.J. (1990), "*Estimating Groundwater Exchange with Lakes. 2. Calibration of a Three-Dimensional Solute Transport Model to a Stable Isotope Plume*", Water resources Research, Vol. 26, No 10, pp. 2455–2462.
- [72]. Leaman, D.E. (1968), "*Resistivity Investigation of the Proposed Nunamara Water Tunnel*", Engineering Geology, Vol. 11, Australia, pp. 107–108.
- [73]. Long, J.C. – Billaux, D.M. (1987), "*From Field Data to Fracture Network Modelling: An Example Incorporating Spatial Structure*", Water Resources Research, Vol. 23, No 7, pp. 1201–1216.

- [74]. McDonald, M.G. – Harbaugh, A.W. (1988), "*A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*", Book 6, US Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, USA, 586 pp.
- [75]. MacLay, R.W. – Land, L.F. (1988), "*Simulation of Flow in the Edwards Aquifer, San Antonio Region, Texas, and Refinement of Storage and Flow Concepts*", USGS, Water Supply Paper 2336-A, pp. A1-A48.
- [76]. Medina, A. – Carrera, J. – Galarza, G. (1990), "*Inverse Modelling of Coupled Flow and Solute Transport Problems*", Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, IAHS Publ. 195, pp. 185–194.
- [77]. Micklin, P.P. (1985), "*Inter-Basin Water Transfers in the United States*", ISSN 0790-0627, Vol. 2, No. 2–3, USA, pp. 37–65.
- [78]. Moltyaner, G.I. (1993), "*Advection in Geologic Media*", Water Resources Research, Vol. 29, No. 10, pp. 3407–3415.
- [79]. Nace, R.L. (1972), "*Water Problems and Developments of the Past*", Water Resources Bulletin, Vol. 8, No. 1, pp. 101–109.
- [80]. National Research Council (1990), "*Ground Water Models: Scientific and Regulatory Applications*", National Academy Press, 303 p.
- [81]. Neuman, S.P. – Witherspoon, P.A. (1969), "*Theory of Flow in a Confined Two-Aquifer System*", Water Resources Research, No. 5 (4), pp. 803–816.
- [82]. Neville, C.J. (1994), "*Compilation of Analytical Solutions for Solute Transport in Uniform Flow*", S.S. Papadopoulos & Associates Inc., Bethesda – MD.
- [83]. Niini, H. (1967), "*On Engineering – Geological Studies Concerning the Selection of the Course of the Water Tunnel Hausjarvi – Helsinki*", Engineering Geology, Vol. 2, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 39–45.
- [84]. Niini, H. – Ronka, E. – Uusinoka, R. (1972), "*Application of Geomorphologic and Photogeologic Measurements in Rock Excavation Planning in Finland*", International Geological Congress, Vol. 24, No. 13, Finland, pp. 191–196.
- [85]. Noble, D.G. (1963), "*Well Points for Dewatering*", Ground Water, Vol. 1, No. 3, pp. 21–26.
- [86]. Olsthoorn, T.N. (1999), "*A Comparative Review of Analytic and Finite Difference Models Used at the Amsterdam Water Supply*", Journal of Hydrology, Vol. 226, pp. 139–143.

- [87]. Oosterbaan, R.J. (1982), "*Modern Interferences in Traditional Water Resources in Baluchistan*", Annual Report, International Institute for Land Reclamation and Improvements.
- [88]. Peters, H.J. (1972), "*Groundwater Management*", Water Resources Bulletin, Vol. 8, USA, pp. 188–197.
- [89]. Peterson, F.L. (1972), "*Water Development on Tropic Volcanic Islands – Type Example: Hawaii*", Ground Water, Vol. 10, No. 5, pp. 18–23.
- [90]. Pinder, G.F. – Gray, W.G. (1976), "*Is there a Difference in the Finite Element Method?*", Water Resources Research 12 (1), pp. 105-107.
- [91]. Prickett, T.A. – Naymik, T.G. – Lonnquist, C.G. (1981), "*A Random Walk Solute Transport Model for Selected Groundwater Quality Evaluations*", Bulletin 65, Illinois State Water Survey, Champaign – IL.
- [92]. Pulido Bosch, A. – Padilla, A. (1988), "*Some Considerations about the Simulation of Karstic Aquifers*", Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection, Proc. IAH 21st Congress, Geological Publ. House, Guilin, Beijing – China, pp. 583–588.
- [93]. Re, R. – Breznik, M. (1968α), "*Les Problèmes des Sources d' Almyros*", Technical Note No. 1, Project No. 166, UNDP – FAO, Iraklion.
- [94]. Re, R. – Breznik, M. (1968β), "*The Problem of the Almyros Springs of Iraklion*", Προκαταρκτική Τεχνική Έκθεση, Note Technique No. 2, SF: 166/GRE, FAO – Υπ. Γεωργίας, Αθήνα / Ηράκλειο.
- [95]. Re, R. – Thomas, R. (1977), "*Captage des Eaux Douces de la Sources Almyros d' Iraklion Grèce*", Conclusions et Recommandations du Project No. 166, UNDP – FAO, Iraklion.
- [96]. Robertson, T. (1939), "*The Garry-Ericht Water Tunnel*", Bulletin of the Geological Survey of Great Britain, Vol. 2, NK, pp. 78–84.
- [97]. Rubin, J. (1983), "*Transport of Reacting Solutes in Porous Media (Relation Between Mathematical Nature of Problem Formulation and Chemical Nature of Reactions)*", Water Resources Research, Vol. 19, No. 5, pp. 1231–1252.
- [98]. Ruttner, A.W. – Ruttner-Kolisko, E.A. (1972), "*Some Data on the Hydrology of the Tabas – Shirgesht – Ozbak – Kuh Area (East Iran)*", Jahrbuch der Geoloschen Bundesanstalt, Vol. 115, No. 1, Wien, pp. 1–48.

- [99]. Schwartz, F.W. – McClymont, G.L. – Smith, L. (1985), "*On the Role of Mass Transport Modeling*", In Proc. Canadian – American Conference on Hydrogeology, National Water Well Association, Dublin – OH.
- [100]. Soulios, G. (1986), "*Système Karstique Aquifère d' Almyros – Iraklio, Crète (Grèce): Un cas intéressant de fonctionnement de système littoral*", Bulletin Du Centre d' Hydrogéologie, No. 7, Université De Neuchâtel, France.
- [101]. Streltsova Adams, T.D. (1978), "*Well Hydraulics in Heterogeneous Aquifer Formations*", Advances in Hydrosience, Vol. 11, pp. 357–418.
- [102]. Stuyt, L.C.P. (1986), "*Developments in Land Drainage Envelope Materials*", Proceedings of the Symposium 25th International Course on Land Drainage: Twenty-five years of drainage experience, Wageningen – Netherlands, pp. 82–98.
- [103]. Tal, A. – Dagan, G. (1983), "*Flow toward Storage Tunnels beneath a Water Table (I. Two-Dimensional Flow)*", Water Resources Research, Vol. 19, No. 1, pp. 241–249.
- [104]. Theis, C.V. (1935), "*The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage*", Trans. Am. Geophys. Union 16th Ann. Meeting, Part 2, Washington – USA.
- [105]. Thrailkill, J. (1974), "*Pipe Flow Models of a Kentucky Limestone Aquifer*", Ground Water, Vol. 12, No. 4, pp. 202–205.
- [106]. Thrailkill, J. (1989), "*Shallow Conduit – flow Carbonate Aquifers: Conceptual Models and Parameter Evaluation*", In: Recent Advances in Ground – Water Hydrology (J.E. Moore, A.A. Zaporozec, S.C. Csallany and T.C. Varney, eds.), American Institute of Hydrology, pp. 153–159.
- [107]. Todd, D.K. (1980), "*Groundwater Hydrology*", Second Edition, John Wiley and Sons Inc., New York.
- [108]. Viessman, W.Jr. – Lewis, G.L. – Knapp, J.W. (1989), "*Introduction to Hydrology*", Third Edition, Harper Collins Publishers, New York.
- [109]. Voss, C.I. (1984), "*SUTRA: A Finite Element Simulation Model for Saturated – Unsaturated, Fluid – Density – Dependent Ground Water Flow with Energy Transport or Chemical Reactive Single – Species Solute Transport*", Report 84–4369, US Geological Survey Water Resources Investigations, USA.

- [110]. Wang, H.F. – Anderson, M.P. (1977), "*Finite Differences and Finite Elements as Weighted Residual Solutions to Laplace's equation*", Finite Elements in Water Resources, Pentech Press, London, pp. 2167-2178.
- [111]. Ward, D.S. (1991), "*Data Input Guide for SWIFT/386, Version 2.50*", GeoTrans Inc., Sterling – VA.
- [112]. Watson, L.J. (1964), "*Development of Ground Water in Hawaii*", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 90, HY6, Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, pp. 185–202.
- [113]. Waterloo Hydrogeologic (2000), "*Visual MODFLOW User's Manual*", Waterloo Hydrogeologic Inc., Ontario – Canada.
- [114]. Watts, K.R. (1989), "*Potential hydrologic effects of ground-water withdrawals from the Dakota aquifer, southwestern Kansas*", USGS, Water Supply paper 2304, p. 47.
- [115]. Weber, D. – Englund, E. (1992), "*Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators*", Mathematical Geology, Vol. 24, No 4.
- [116]. Wigonyosukarto, B. – Belleudy, Ph. – Delclaux, F. (1984), "*Discharge Releases in a Reach of the Canal de Provence – Comparative Study of Real Life Observation and Mathematical Modelling Results*", Proceedings of the International Conference Hydrossoft 84 Hydraulic Engineering, Elsevier Science, Amsterdam.
- [117]. Wilson, J.L. – Townley, L.R. – Sa da Costa, A. (1979), "*Mathematical Development and Verification of a Finite Element Aquifer Flow Model: AQUIFEM-1*", TAP Report 79-2, MIT, Cambridge – MA.
- [118]. Winston, R.B. (1999), "*MODFLOW: Related Freeware and Shareware Resources on the Internet*", Computers and Geosciences, Vol. 25, pp. 377–382.
- [119]. Witherspoon, P.A. – Long, J.C.S. – Majer, E.L. – Myer, L.R. (1987), "*A new Seismic-Hydraulic Approach to Modelling Flow in Fractured Rocks*", In: Solving Groundwater Problems with Models, National Water Well Association, Dublin, Ohio, pp. 793–826.
- [120]. Woessner, W.W. – Anderson, M.P. (1990), "*Setting Calibration Targets and Assessing Model Calibration – Room for Improvement: An Example from North America*", Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, IAHS Pub. 195, pp. 279–290.

- [121]. Yeh, G.T. – Ward, D.S. (1980), "*FEMWATER: A Finite Element Model of Water Flow through Saturated – Unsaturated Media*", ORNL-5567, Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge – Tenn.
- [122]. Yeh, G.T. (1981), "*On the Computation of the Darcian Velocity and Mass Balance in the Finite Element Modeling of Groundwater Flow*", Water Resources Research, Vol. 17, No. 5, pp. 1529–1534.
- [123]. Yeh, W.W.G. – Yoon, Y.S. – Lee, K.S. (1983), "*Aquifer Parameter Identification with Kriging and Optimum Parameterization*", Water Resources Research, Vol. 19, No. 1, pp. 225–233.
- [124]. Yehuda, P. (1970), "*Model Tests for a Horizontal Well*", Ground Water, Vol. 8, No. 5, pp. 30–34.
- [125]. Yusun, C. – Ji, B. (1988), "*The Media and Movement of Karst Water*", In: Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection, Proc. IAH 21st Congress, Guilin, China, Geological Publ. House, Beijing, pp. 555–564.
- [126]. Zheng, C. (1990), "*MT3D: A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*", Report to the US Environmental Protection Agency, Ada – OK, 170 pp.
- [127]. Zheng, C. – Bennett, G.D. (1995), "*Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice*", International Thomson Publishing Inc., NY, 439 pp.
- [128]. Αλεξόπουλος, Α. (1994), "*Τεχνική Έκθεση Γεωλογικής Χαρτογράφησης του Ανατολικού Περιθωρίου του Ψηλορείτη*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [129]. Βαβλιάκης, Ε. (1989), "*Τα Συστήματα Qanat (Κανάτ) στην Ελλάδα: Μελέτη των Συστημάτων Qanat στην Επαρχία Φυλλίδας Σερρών από Μορφολογική, Υδρογραφική και Κοινωνικο-οικονομική Άποψη*", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [130]. Βαλάλας, Δ. (1972), "*Γεωργική Υδραυλική*", Μέρος Α, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [131]. Βαφείδης, Α. – Αμολοχίτης, Γ. (1993), "*Έκθεση Γεωφυσικής Έρευνας (1η Ομάδα Γεωηλεκτρικών Διασκοπήσεων)*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών

Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.

- [132]. Βαφειδής, Α. – Αμολοχίτης, Γ. (1995), "*Εκθεση Γεωηλεκτρικής Διασκόπησης στην Περιοχή Βασιλειών Ν. Ηρακλείου*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [133]. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (1972), "*Ανώγεια*", Τοπογραφικός χάρτης, Κλίμακα 1:50.000.
- [134]. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (1972), "*Ηράκλειο*", Τοπογραφικός χάρτης, Κλίμακα 1:50.000.
- [135]. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (1996), "*Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος – Φύλλο Ηράκλειο*", Κλίμακα 1:50.000.
- [136]. Καλλέργης, Γ.Α. (1986), "*Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία*", Τόμος Α', Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
- [137]. Κνιθάκης, Μ. – Καλούμενος, Κ. – Τσόμπος, Π. (1990α), "*Εκθεση Ερμηνείας Θερμογραφημάτων Κρήτης (Τμήμα Βορείων Παραλίων Ρεθύμνου – Ηρακλείου)*", Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών Κρήτης, Ρέθυμνο.
- [138]. Κνιθάκης, Μ. – Πολυχρονάκη, Α. – Καλούμενος, Κ. – Καλογιαννάκης, Μ. (1990β), "*Εκθεση Συνθηκών Ύδρευσης Κρήτης*", Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών Κρήτης, Ρέθυμνο.
- [139]. Κνιθάκης, Μ. – Καλούμενος, Κ. (1992), "*Αποτελέσματα Ιχνηθετίσεων σε Καρστικά Συστήματα της Κρήτης*", Πρακτικά 1ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Υδρογεωλογίας, Δελτίο 6, Σύνδεσμος Γεωλόγων – Μεταλλειολόγων Κύπρου, Λευκωσία.
- [140]. Κνιθάκης, Μ. (1996), "*Υδρογεωλογική Έρευνα Περιοχής Νομού Ρεθύμνης*", Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών Κρήτης, Ρέθυμνο.
- [141]. Κωνσταντινίδης, Κ. (1989), "*Τα Εγγειοβελτιωτικά Έργα στην Πεδιάδα Θεσσαλονίκης*", Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Θεσσαλονίκη.
- [142]. Λατινόπουλος, Π. – Θεοδοσίου, Ν. – Ξεφτέρης, Α. (1993), "*Εφαρμογή Γεωστατιστικών Μεθόδων σε Προβλήματα Ποσοτικής και Ποιοτικής Διαχείρισης Υδροφορέων*", Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Πάτρα.
- [143]. Μάστορης, Κ. – Παπαϊωάννου, Κ. (1979), "*Εισαγωγή στη Γεωστατιστική και Εφαρμογές της στην Μεταλλευτική Έρευνα*", Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 3.

- [144]. Μαυρίδης, Β. (1994), "*Τεχνική Έκθεση Φωτογεωλογικής Χαρτογράφησης*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [145]. Μονόπωλης, Δ. – Μάστορης, Κ. (1969), "*Υδρογεωλογική Μελέτη της Καρστικής Υφάλμυρου Πηγής Αλμυρού (Ηράκλειον Κρήτης)*", Υδρολογικά και Υδρογεωλογικά Έρευναι, No. 1, Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, Αθήναι.
- [146]. Μονόπωλης, Δ. (1971), "*Υδρογεωλογική Μελέτη της Καρστικής Περιοχής του Ορεινού Συγκροτήματος Παρνασσού*", Διδακτορική Διατριβή, Ανώτατη Σχολή Χημικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
- [147]. Μονόπωλης, Δ. (1993α), "*Υδατικό Ισοζύγιο – Υδατικό Δυναμικό Κρήτης: Προοπτικές και Προτεραιότητες Έρευνας και Εκμετάλλευσης*", Δημερίδα: Διαχείριση Υδατικών Πόρων Κρήτης, 27–28/5/93, Μ.Α.Ι. Χανίων, Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας – Παράρτημα Κρήτης, Χανιά.
- [148]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. (1993β), "*Έκθεση Προόδου*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [149]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. (1994), "*Έκθεση Προόδου*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [150]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Σανταμούρη, Μ. – Καδιανάκης, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1995α), "*Έκθεση Γεωτρητικής Έρευνας (Δοκιμαστικές Αντλήσεις Γεωτρήσεων Κέρης – Τυλίσσου – Γωνιανού Φαραγγιού)*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [151]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Παπαμαστοράκης, Δ. – Στειακάκης, Ε. – Κλειδοπούλου, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1995β), "*Μελέτη των Υδρολογικών Παραμέτρων της Πηγής Αλμυρού Ηρακλείου (Κρήτη) σε Συνθήκες Φυσικής Ροής*", Πρακτικά 3ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο.
- [152]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Κλειδοπούλου, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1995γ), "*Μελέτη των Υδρολογικών Παραμέτρων της Πηγής*

Αλμυρού Ηρακλείου (Κρήτη) σε Συνθήκες Τεχνητών Παρεμβάσεων", Πρακτικά 3ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο.

- [153]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Καδιανάκης, Μ. – Κλειδοπούλου, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1996α), "*Υδρολογικές Παράμετροι της Πηγής Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης σε Συνθήκες Φυσικής Ροής και Τεχνητών Παρεμβάσεων*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [154]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Καδιανάκης, Μ. – Κλειδοπούλου, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1996β), "*Έκθεση Γεωτρητικής Έρευνας – Συμπλήρωμα Ι (Δοκιμαστικές Αντλήσεις Γεωτρήσεων Κέρης – Τυλίσσου – Κρουσώνα)*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [155]. Μονόπωλης, Δ. – Κλειδοπούλου, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1996γ), "*Πρόβλεψη Υδρευτικών Αναγκών Ηρακλείου*", Τεχνική Έκθεση, Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [156]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Καδιανάκης, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. – Κλειδοπούλου, Μ. (1996δ), "*Πηγή Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης: Ημέρες Γλυκού Νερού*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο (και Ανακοίνωση στο Διεθνές Συνέδριο: Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Λάρισα 13–16/11/96).
- [157]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Κλειδοπούλου, Μ. (1996ε), "*Υδρομαστευτική Στοά Κέρης – Τυλίσσου (Υδρογεωλογική Μελέτη: Θεωρητικός και Εμπειρικός Υπολογισμός Υδρογεωλογικών Παραμέτρων)*", Προκαταρκτική Έκθεση, Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [158]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Κλειδοπούλου, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1996στ), "*Υδατοταμιευτήρας Γαζανού*", Αναγνωριστική Έκθεση, Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική

Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.

- [159]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Καδιανάκης, Μ. – Κλειδοπούλου, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. (1997α), "*Εκθεση Γεωτρητικής Έρευνας – Συμπλήρωμα 2 (Δοκιμαστικές Αντλήσεις Γεωτρήσεων Κέρης – Κρουσώνα – Αγίου Μύρωνα – Βασιλειών)*", Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
- [160]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Καδιανάκης, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. – Κλειδοπούλου, Μ. (1997β), "*Εκμετάλλευση Παράκτιων Καρστικών Υδροφόρων Οριζόντων μέσω Δικτύων Γεωτρήσεων (Παραδείγματα από Κρήτη)*", Πρακτικά 4ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 14–16/11/97, Θεσσαλονίκη, σελ. 309–323.
- [161]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Καδιανάκης, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. – Κλειδοπούλου, Μ. (1998), "*Πρόβλεψη Περιόδων Εμφάνισης Γλυκού Νερού στην Πηγή Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης*", Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Τόμος 9, Τεύχος 2/1998, Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Θεσσαλονίκη, σελ. 36–45.
- [162]. Μονόπωλης, Δ. – Σοφίου, Π. – Στειακάκης, Ε. – Καδιανάκης, Μ. – Βαβαδάκης, Δ. – Κλειδοπούλου, Μ. (1999), "*Προσδιορισμός Υδρογεωλογικών Παραμέτρων στα Ανθρακικά Πετρώματα της Κρήτης (Μεθοδολογία – Στατιστική Ανάλυση)*", Πρακτικά 5ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 12–14/11/99, Λευκωσία.
- [163]. Μονόπωλης, Δ. – Κλειδοπούλου, Μ. (2001α), "*Ενημερωτικό Δελτίο: Η Μόνιμη Λύση του Υδρευτικού Προβλήματος του Δήμου Ηρακλείου*", Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [164]. Μονόπωλης, Δ. – Κλειδοπούλου, Μ. (2001β), "*Αξιοποίηση Αλμυρού Ποταμού (Ηράκλειο Κρήτης)*", Πρόταση Ερευνητικού Έργου, Ημερίδα Δήμου Γαζίου: Περιβαλλοντική Προστασία και Αξιοποίηση του Υγρότοπου του Αλμυρού (23/02/01), Γάζι Ηρακλείου.
- [165]. Μουντράκης, Δ. (1985), "*Γεωλογία της Ελλάδος*", University Press, Θεσσαλονίκη.

- [166]. Μπεζές, Κ. (1987), "*Η Καρστική Πηγή του Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης – Έρευνα του Μηχανισμού Ανάμιξης Γλυκού και Θαλασσινού Νερού*", Πρακτικά 2ου Συνεδρίου Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Θεσσαλονίκη.
- [167]. Μπεζές, Κ. (1992), "*Υδρογεωλογική Μελέτη Ευρύτερης Περιοχής Τυλίσσου – Νομού Ηρακλείου Κρήτης*", Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου, Ηράκλειο.
- [168]. Μπουλουκάκης, Η. – Βουδούρης, Κ. (1997), "*Αξιολόγηση Αντλητικών Δεδομένων στους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους στον Νομό Ηρακλείου Κρήτης*", Πρακτικά 4ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 14–16/11/97, Θεσσαλονίκη, σελ. 324–336.
- [169]. Σούλιος, Γ. (1986), "*Γενική Υδρογεωλογία*", Τόμοι Α & Β, University Press, Θεσσαλονίκη.
- [170]. Φυτρολάκης, Ν. (1980), "*Η Γεωλογική Δομή της Κρήτης*", Διατριβή επί Υφηγεσία, Αθήνα.
- [171]. Χαλκιάς, Ν. (1972), "*Στραγγίσεις Γαιών*", Γεωπονική Σχολή Αθηνών, Αθήνα.
- [172]. Χατζάκης, Κ. (1993), "*Πηγή Αλμυρού: Ποσοτικά – Ποιοτικά – Βροχομετρικά Χαρακτηριστικά*", Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου, Ηράκλειο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΕΡΟΣ Α

(Συμπληρωματικά πληθυσμιακά στοιχεία)

ΜΕΡΟΣ Β

(Συμπληρωματικά στοιχεία σημείων νερού)

ΜΕΡΟΣ Γ

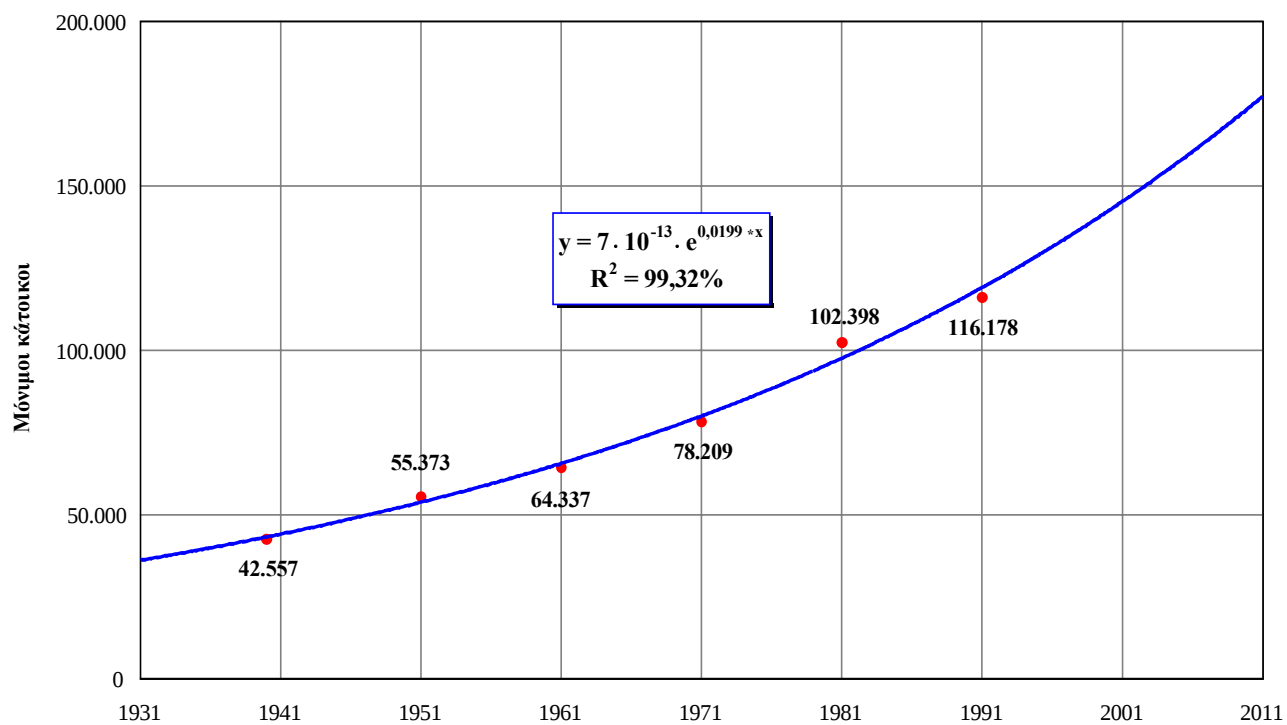
(Συμπληρωματικά τοπογραφικά και υδρολογικά στοιχεία)

ΜΕΡΟΣ Δ

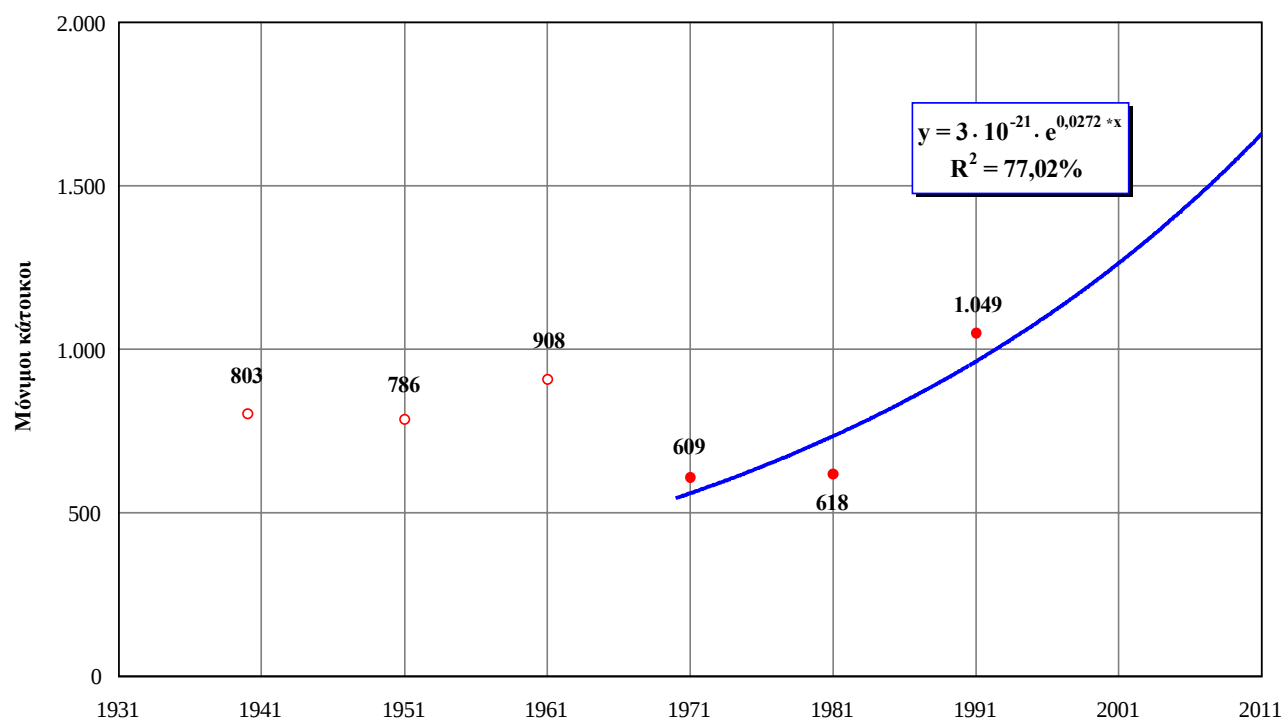
(Συμπληρωματικά δεδομένα μοντελοποίησης)

ΜΕΡΟΣ Ε

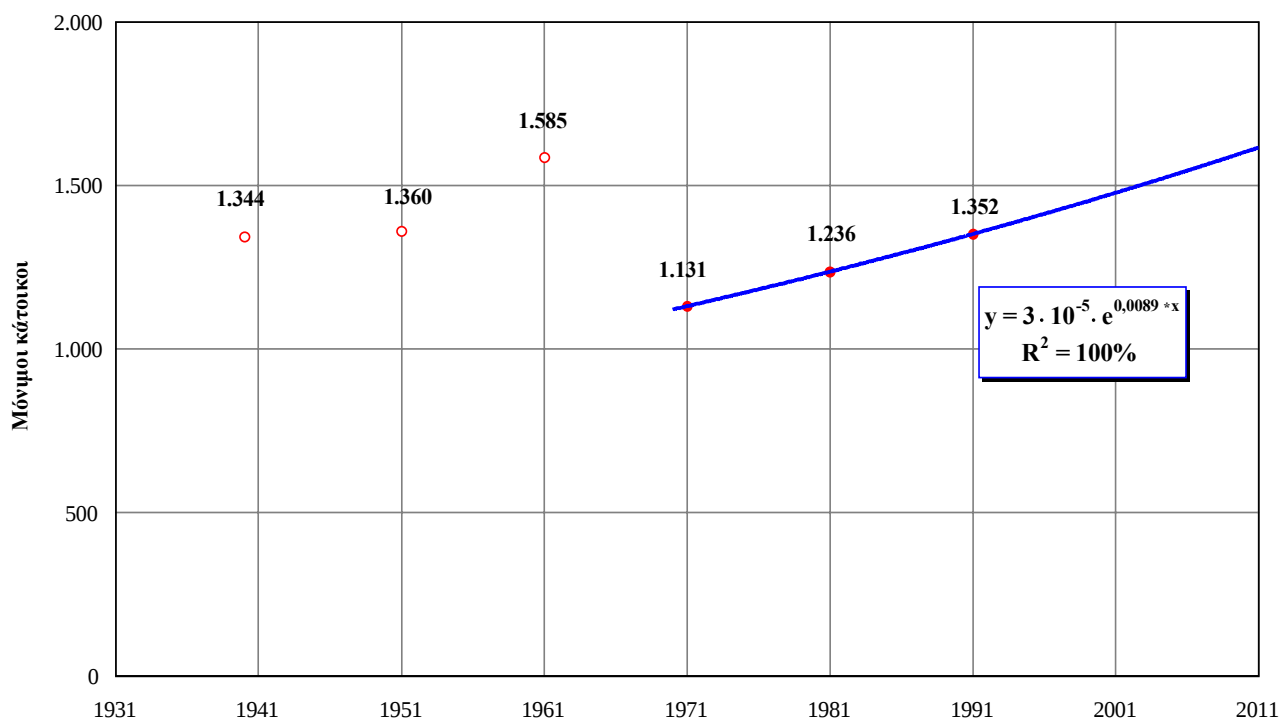
(Συμπληρωματικά αποτελέσματα μοντελοποίησης)



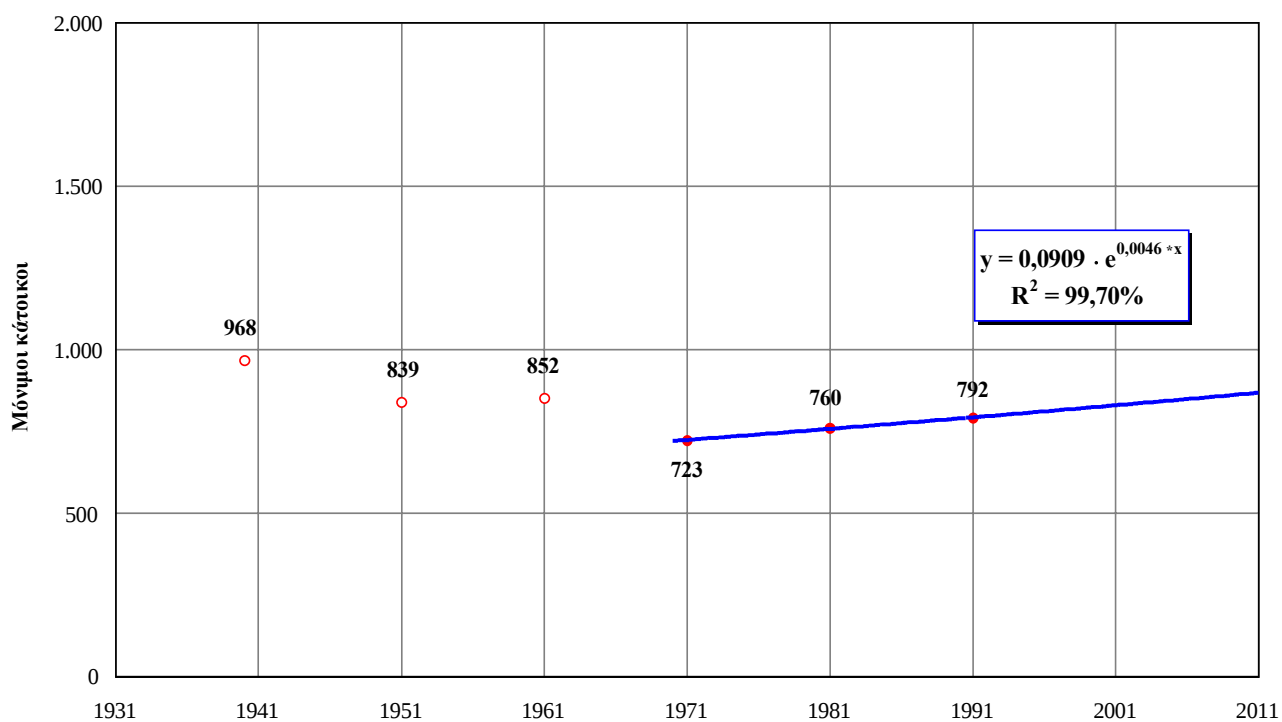
Σχήμα Α.1: Πρόβλεψη εξέλιξης μόνιμου πληθυσμού Α. Α. Ηρακλείου.



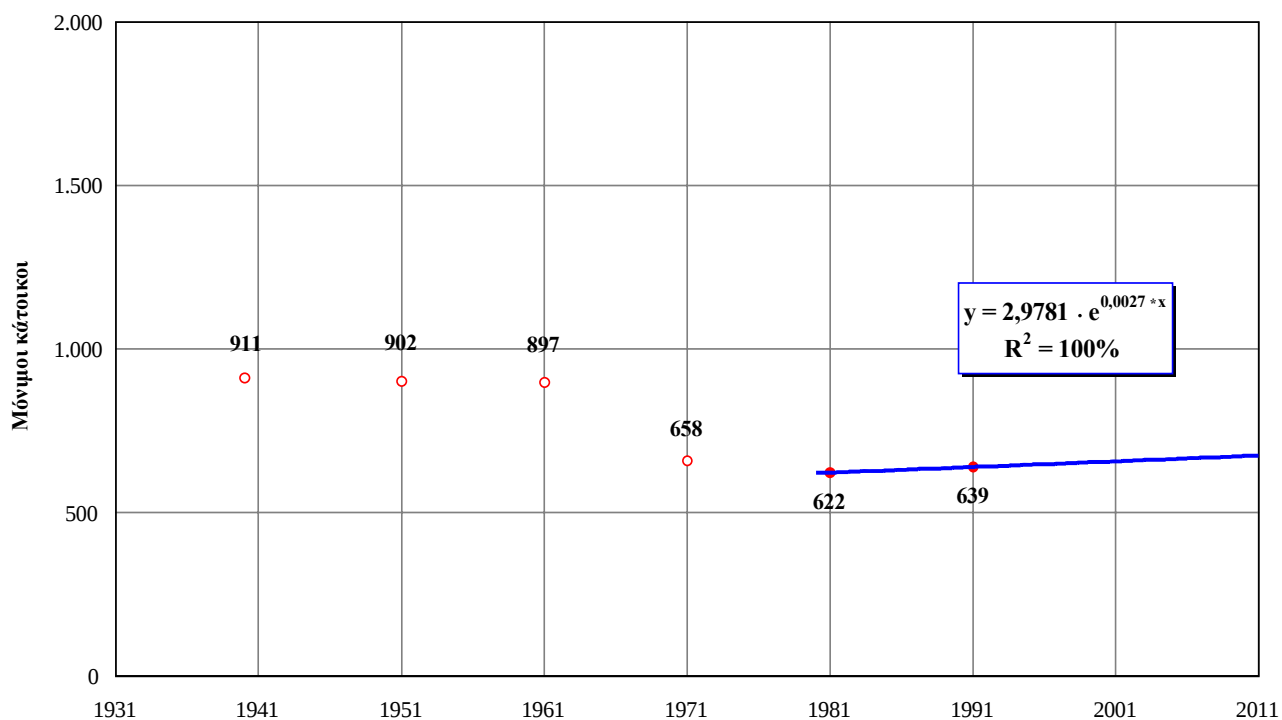
Σχήμα Α.2: Πρόβλεψη εξέλιξης μόνιμου πληθυσμού Κ. Α. Βουτών.



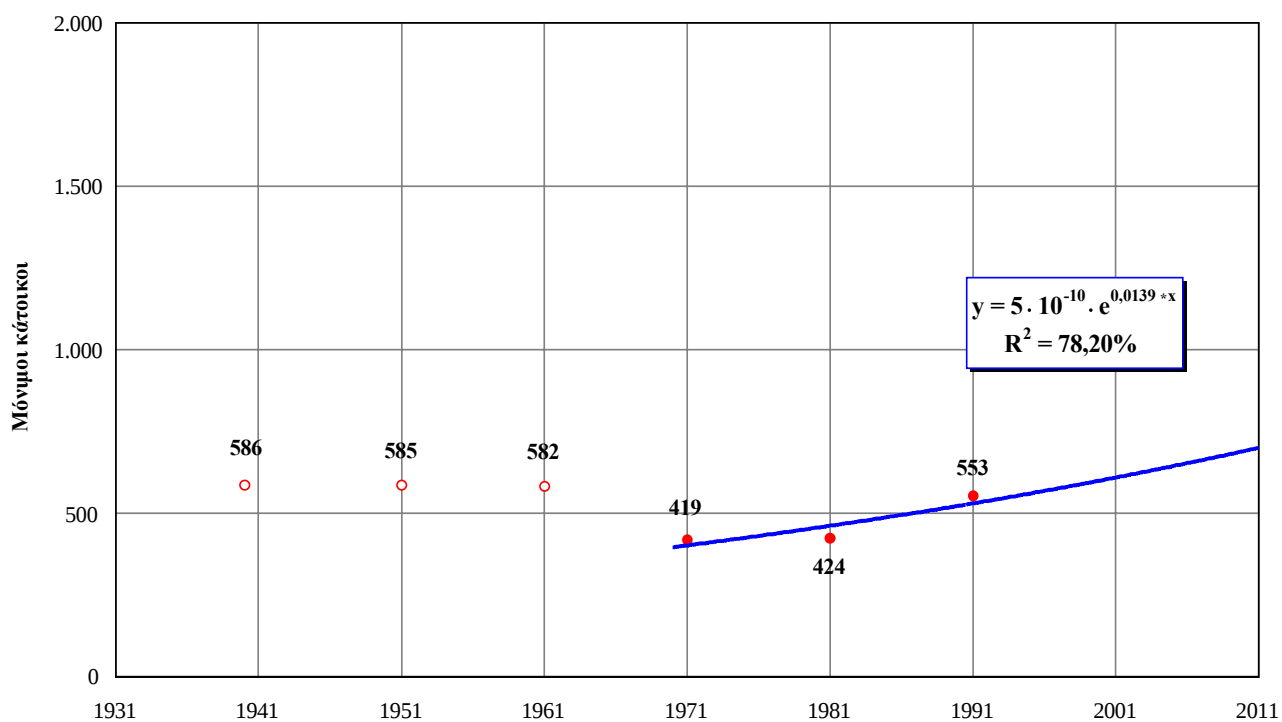
Σχήμα Α.3: Πρόβλεψη εξέλιξης μόνιμου πληθυσμού Κ. Α. Δαφνών.



Σχήμα Α.4: Πρόβλεψη εξέλιξης μόνιμου πληθυσμού Κ. Α. Σκαλανίου.



Σχήμα Α.5: Πρόβλεψη εξέλιξης μόνιμου πληθυσμού Κ. Α. Σταυρακίων.



Σχήμα Α.6: Πρόβλεψη εξέλιξης μόνιμου πληθυσμού Κ. Α. Βασιλειών.

Πίνακας Β.1 (α): Συντεταγμένες και στοιχεία υδροφορίας πηγής Αλμυρού και γεωτρήσεων ΔΕΥΑΗ στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Σημεία νερού	Συντεταγμένες			Απόλυτο βάθος (m)	Υδροφορία	Απόλυτα βάθη φίλτρων (m)
	x (m)	y (m)	z (m)			
Πηγή Αλμυρού	7.369	9.085	2	–	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	–
T10	4.842	7.013	150	-184	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
T11	4.740	6.292	124	-69	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+1,2 → -29,3 -35,5 → -66,7
T12	4.268	6.384	193	-44	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+29,3 → -6,8 -12,8 → -37,0
T13	4.274	5.991	164	-93	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+18,9 → -30,5 -36,4 → -42,1 -47,9 → -75,8
T14	4.121	6.775	204	-164	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+25,6 → +19,3 +13,1 → +6,9 +0,8 → -11,7 -17,8 → -30,3 -36,4 → -54,9 -55,9 → -67,3 -73,4 → -92,1 -98,3 → -117,0 -123,2 → -141,8
T15	4.508	6.171	164	-54	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+29,5 → +5,0 -1,1 → -19,4 -25,4 → -50,0
T16	4.421	6.564	174	-95	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+22,0 → +15,8 +9,8 → -8,6 -14,7 → -27,0 -33,0 → -45,3 -51,4 → -69,8 -75,9 → -94,3
T17	4.966	6.145	128	-102	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+7,1 → +0,9 -17,4 → -23,5 -28,5 → -34,7 -40,8 → -72,2 -78,3 → -97,5
T20	5.077	5.908	165		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
T21	4.189	6.482	207	-66	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+10,1 → -20,9 -27,0 → -51,9

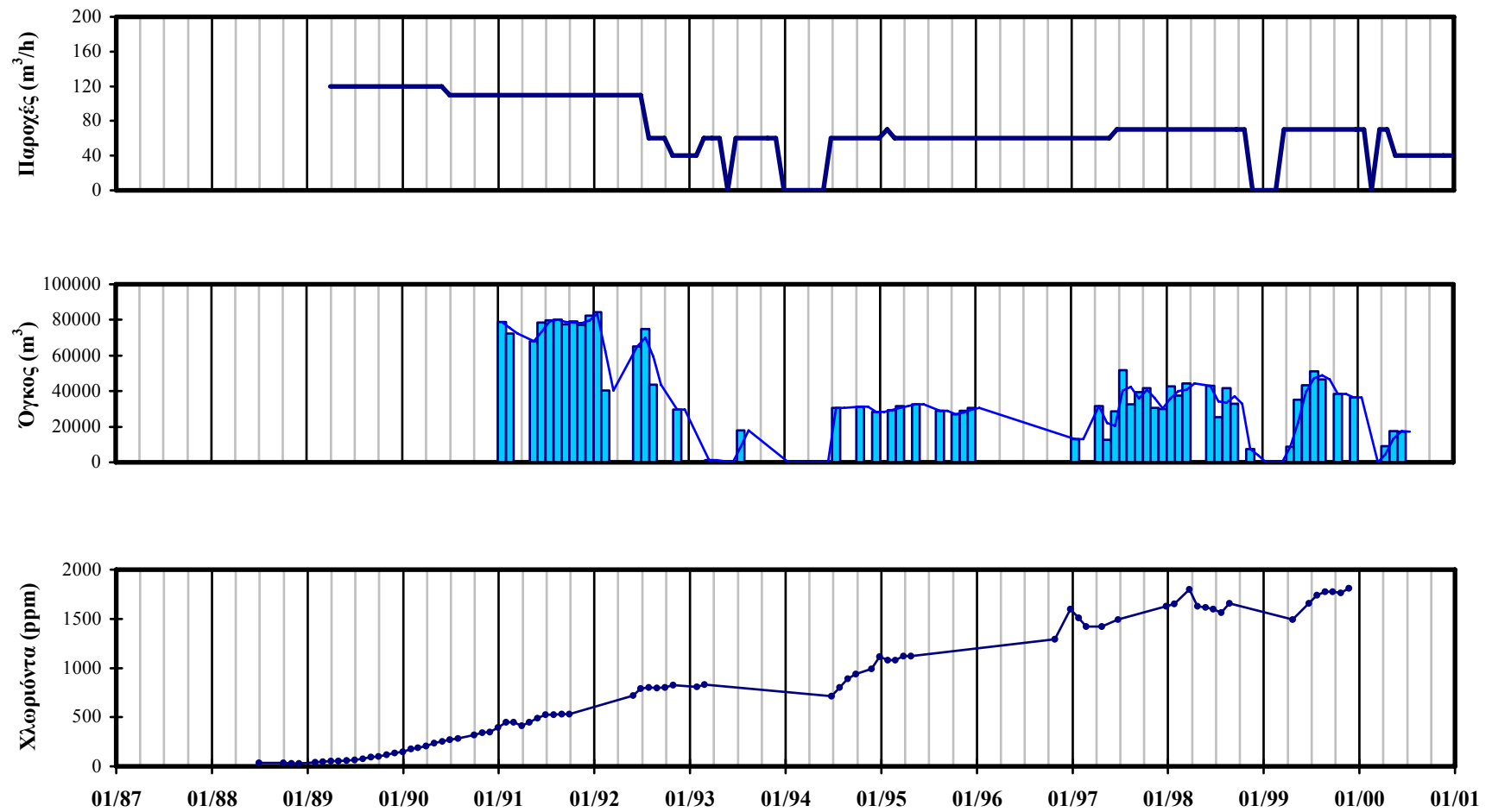
Πίνακας Β.1 (β): Συντεταγμένες και στοιχεία υδροφορίας πηγής Αλμυρού και γεωτρήσεων ΔΕΥΑΗ στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Σημεία νερού	Συντεταγμένες			Απόλυτο βάθος (m)	Υδροφορία	Απόλυτα βάθη φίλτρων (m)
	x (m)	y (m)	z (m)			
T23	5.852	7.058	164	-166	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+5,0 → -13,5 -31,8 → -44,0 -56,3 → -74,7 -86,9 → -93,0 -105,3 → -129,8 -135,9 → -148,1
KT1	4.039	6.187	207		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
KT2	4.983	4.628	175		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
KT3	3.954	6.126	210		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
KT4	4.399	6.997	160	-142	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	-63,3 → -75,6 -81,7 → -87,8 -93,9 → -112,3 -118,4 → -136,8
Σ1	4.327	7.541	201		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
ΙΗ02	4.116	6.500	226		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
ΓΦ1	1.691	3.740	310	-175	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	
ΓΦ4	2.128	3.452	280	-172	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	
ΓΦ5	1.286	3.866	333	-147	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	
ΙΗ01	-64	4.703	388		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	
MN	2.214	3.563	329		Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	
T19	2.253	2.956	226	-154	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	+15,7 → -2,7 -8,8 → -27,2 -33,4 → -70,2 -76,4 → -94,8 -100,9 → -137,8
T22	2.277	2.967	221	-139	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	+13,0 → +0,6 -5,5 → -11,6 -17,7 → -36,1 -42,3 → -66,8 -85,0 → -130,6 -109,7 → -128,2
T24	2.291	3.154	272	-179	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	
T25	2.529	2.512	222	-215	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	+216,0 → +192,0
K1	4.751	8.712	342	-44	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+14,8 → -40,5

Πίνακας Β.1 (γ): Συντεταγμένες και στοιχεία υδροφορίας πηγής Αλμυρού και γεωτρήσεων ΔΕΥΑΗ στην περιοχή ενδιαφέροντος.

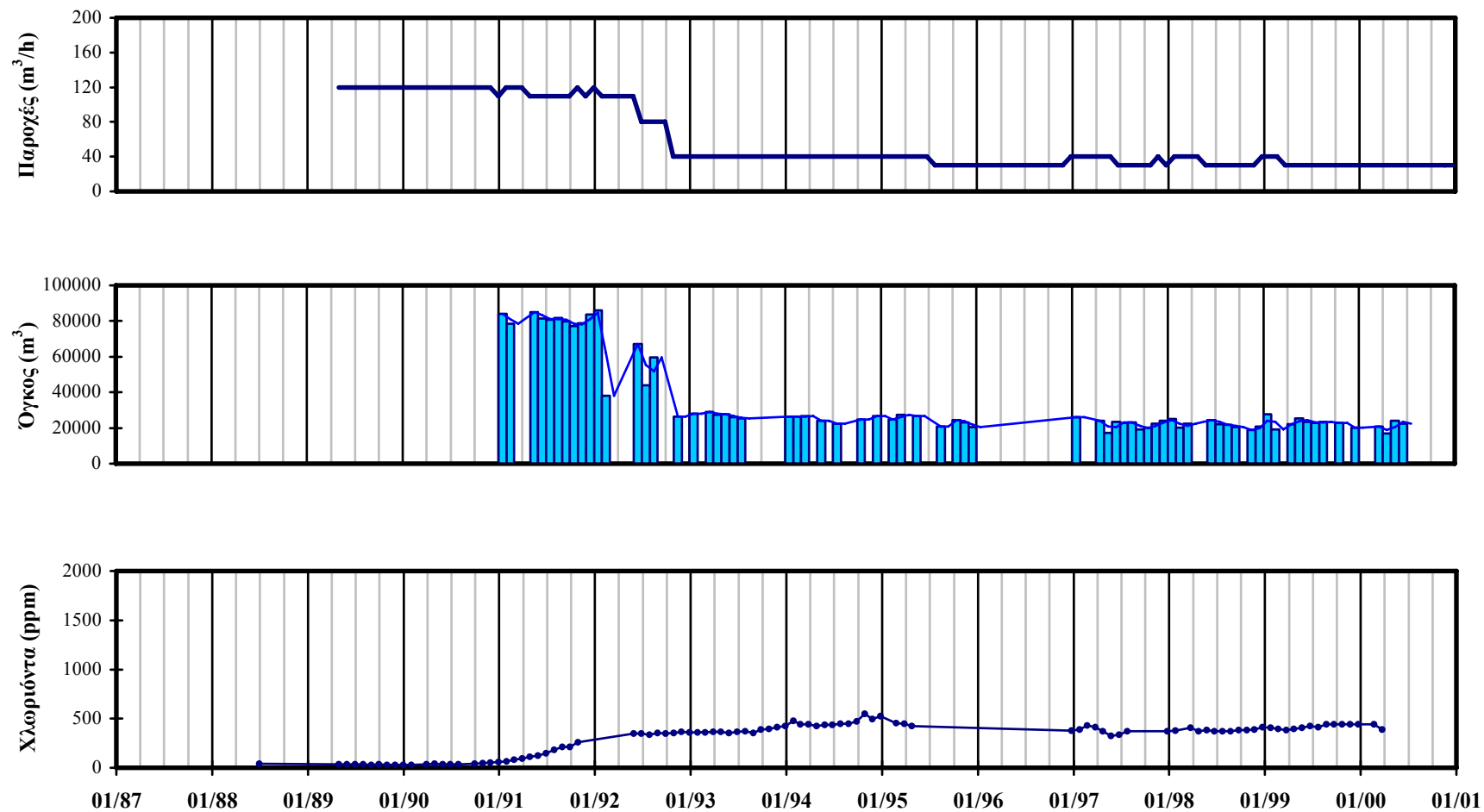
Σημεία νερού	Συντεταγμένες			Απόλυτο βάθος (m)	Υδροφορία	Απόλυτα βάθη φίλτρων (m)
	x (m)	y (m)	z (m)			
K2	4.847	8.611	338	-52	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+11,0 → -5,6 -13,8 → -51,0
K3	5.331	8.482	299	-63	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+12,6 → -30,4 -36,5 → -61,0
K4	4.575	8.857	335	-67	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+20,4 → -4,2 -10,3 → -22,7 -28,8 → -53,4
K5	5.670	8.528	290	-35	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+22,5 → -14,3
K6	5.897	8.246	279	-43	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+9,7 → -14,7 -20,9 → -39,3
K6A	5.902	8.218	279	-45	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+8,8 → -9,8 -16,0 → -40,8
K7	6.291	8.313	289	-36	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+13,6 → -4,7 -10,9 → -29,2
K8	6.088	8.685	303	-60	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+13,9 → +1,6 -4,5 → -16,8 -22,9 → -53,7
K9	4.682	8.385	340	-88	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+7,3 → -11,0 -17,0 → -29,5 -35,5 → -84,5
K10	4.833	8.490	334	-72	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	+7,6 → -10,4 -16,4 → -22,4 -28,4 → -40,5 -46,5 → -70,7
ΠΗ12	4.461	8.878	324		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	

(4)



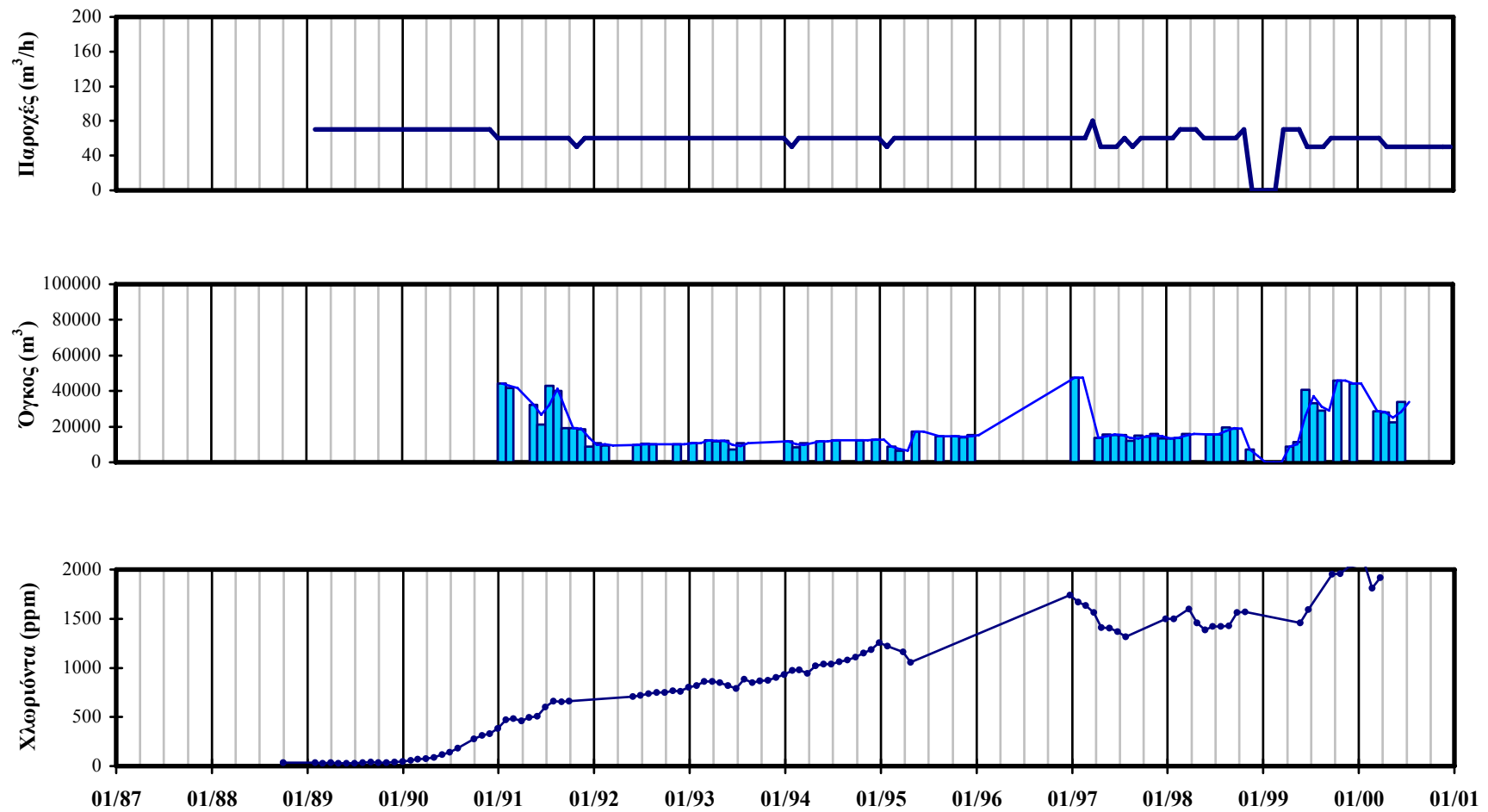
Σχήμα Β.1: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης T11.

(5)



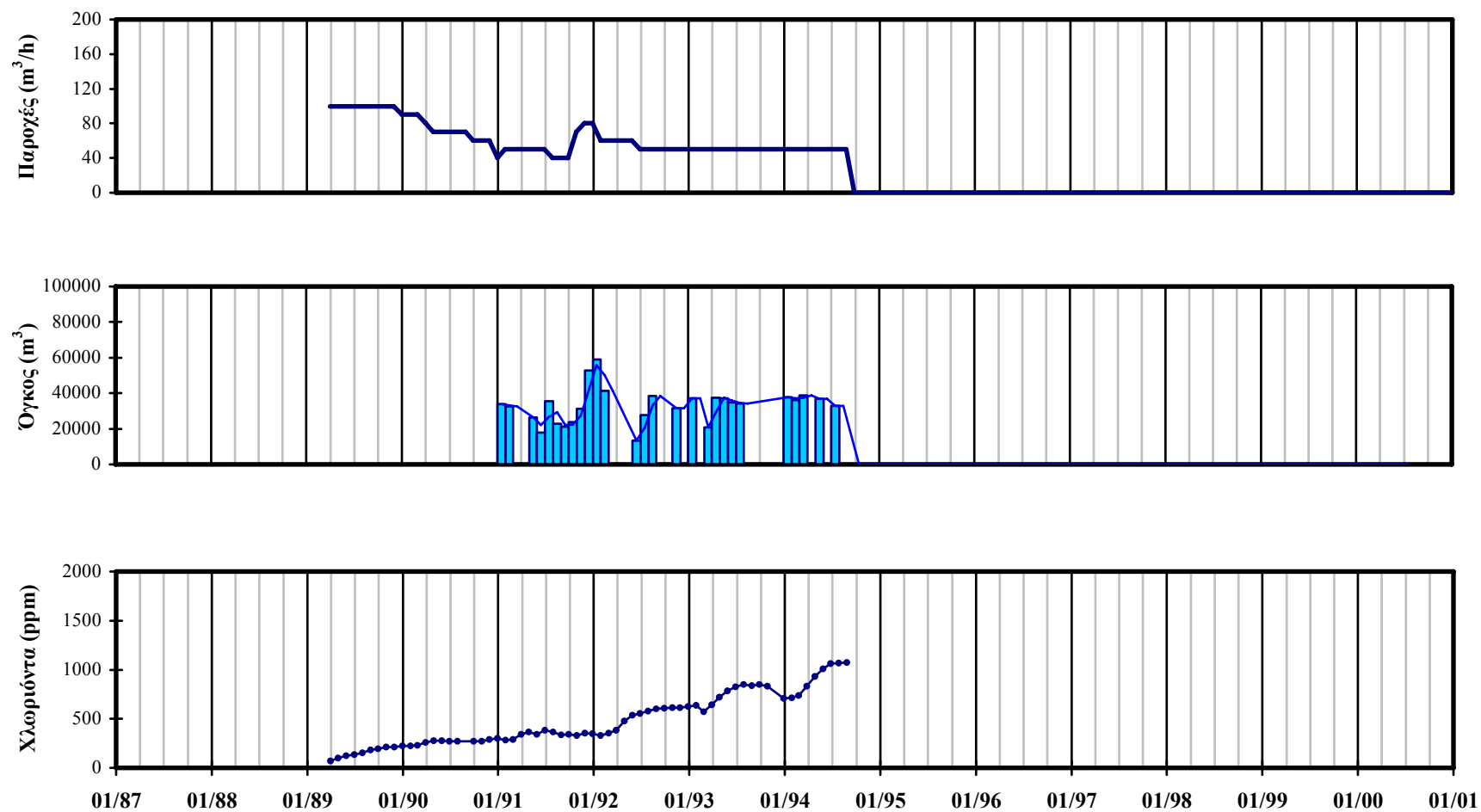
Σχήμα Β.2: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης T12.

(9)



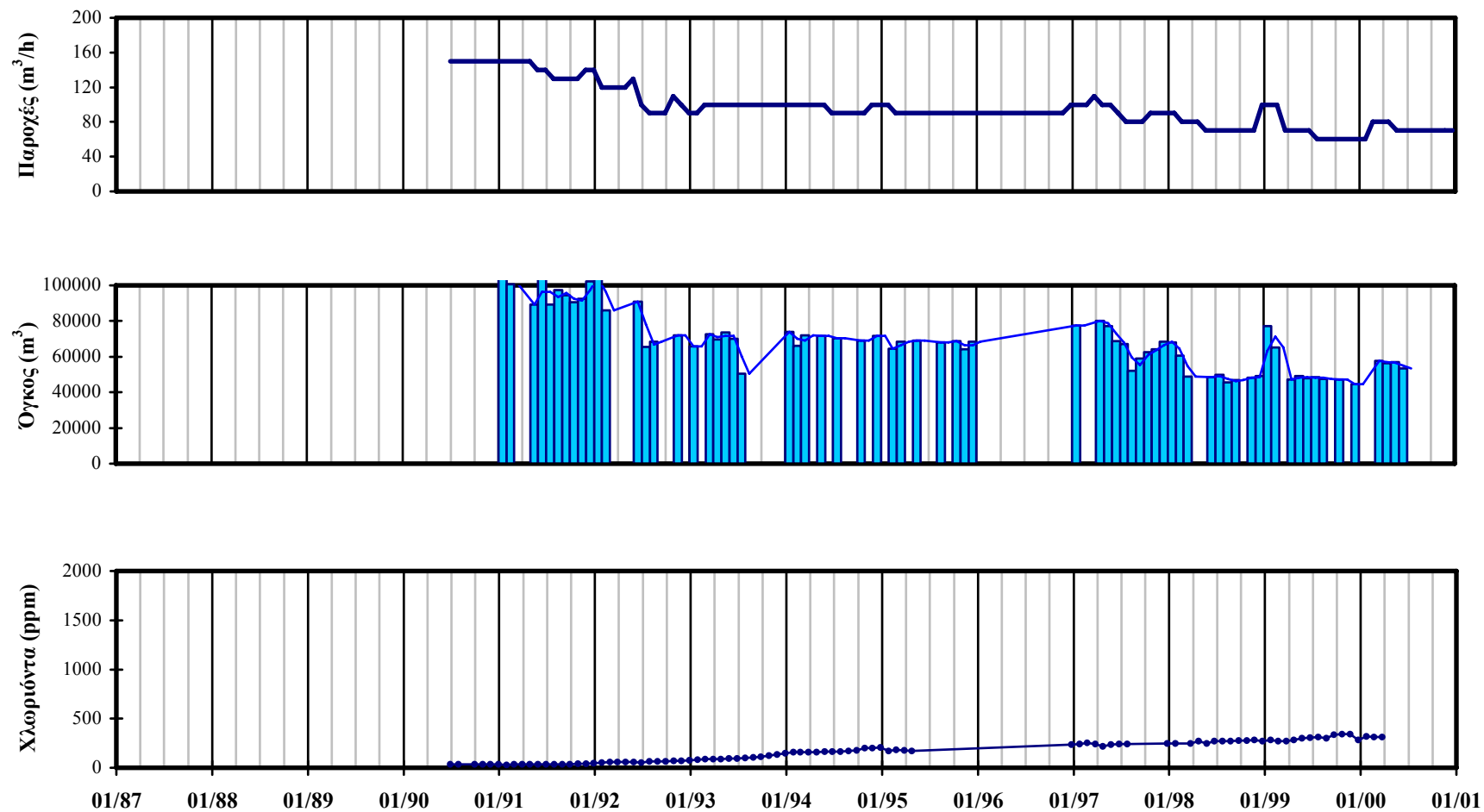
Σχήμα Β.3: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης T15.

(7)



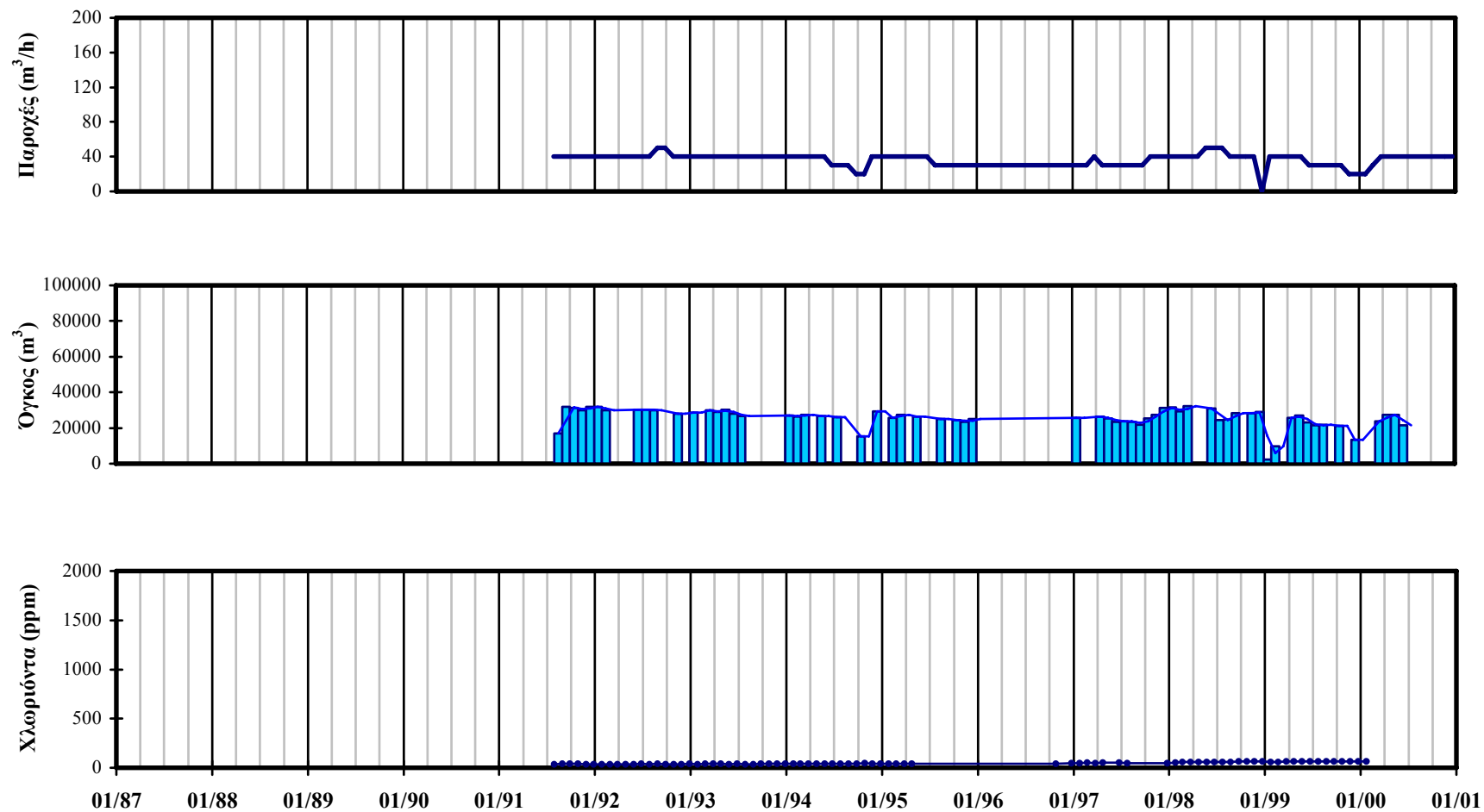
Σχήμα Β.4: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης T17.

(8)



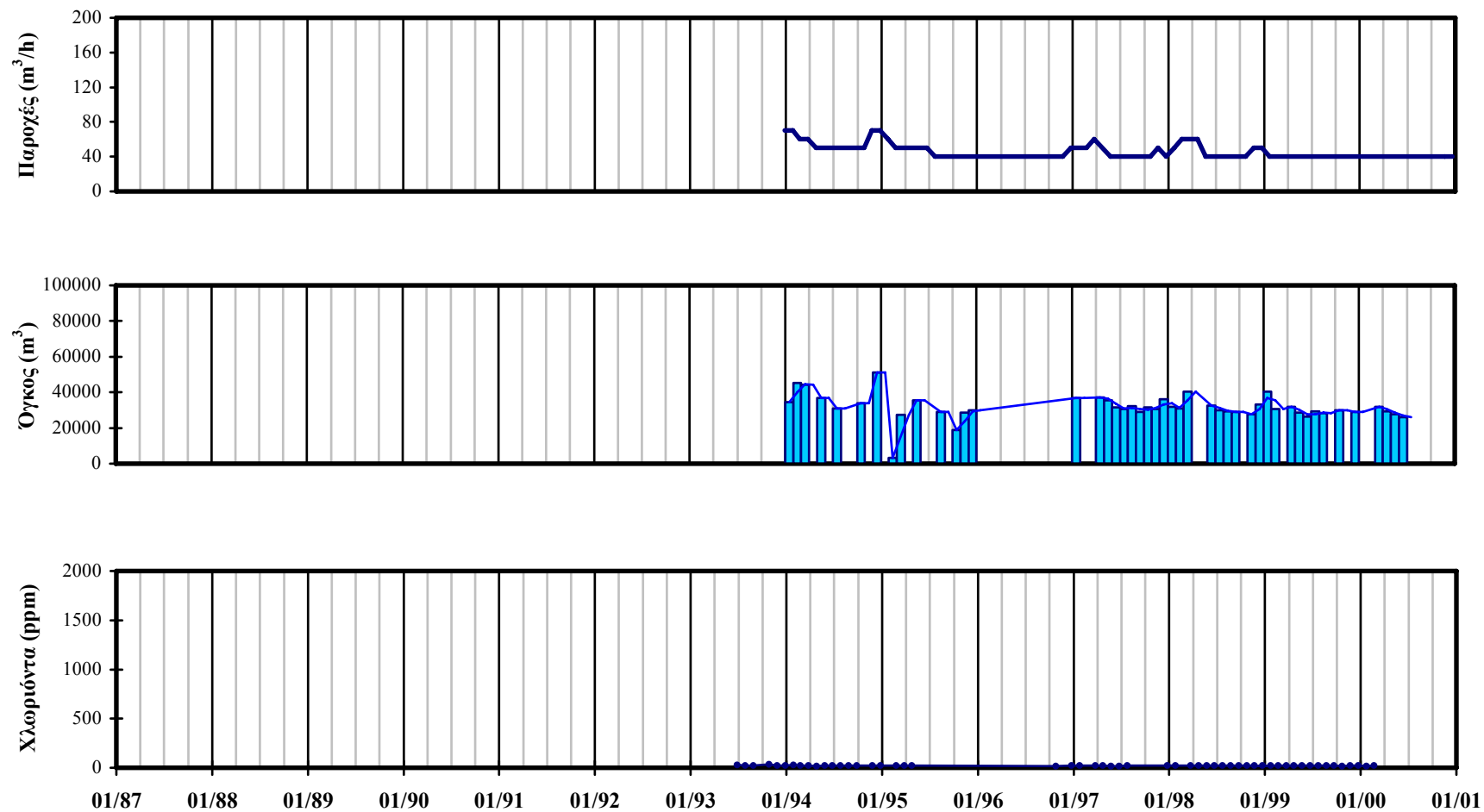
Σχήμα Β.5: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης T21.

(6)



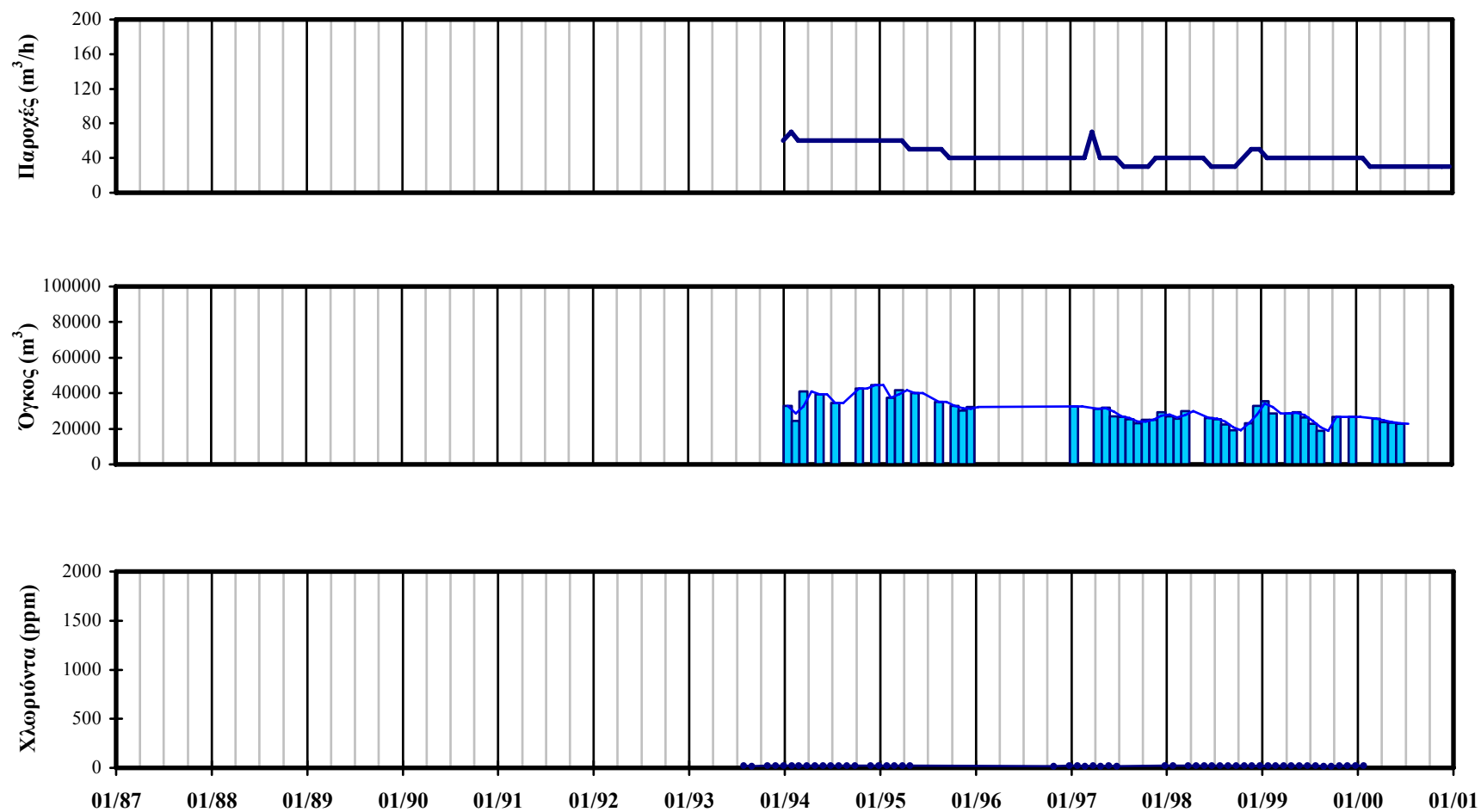
Σχήμα Β.6: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Σ1.

(01)



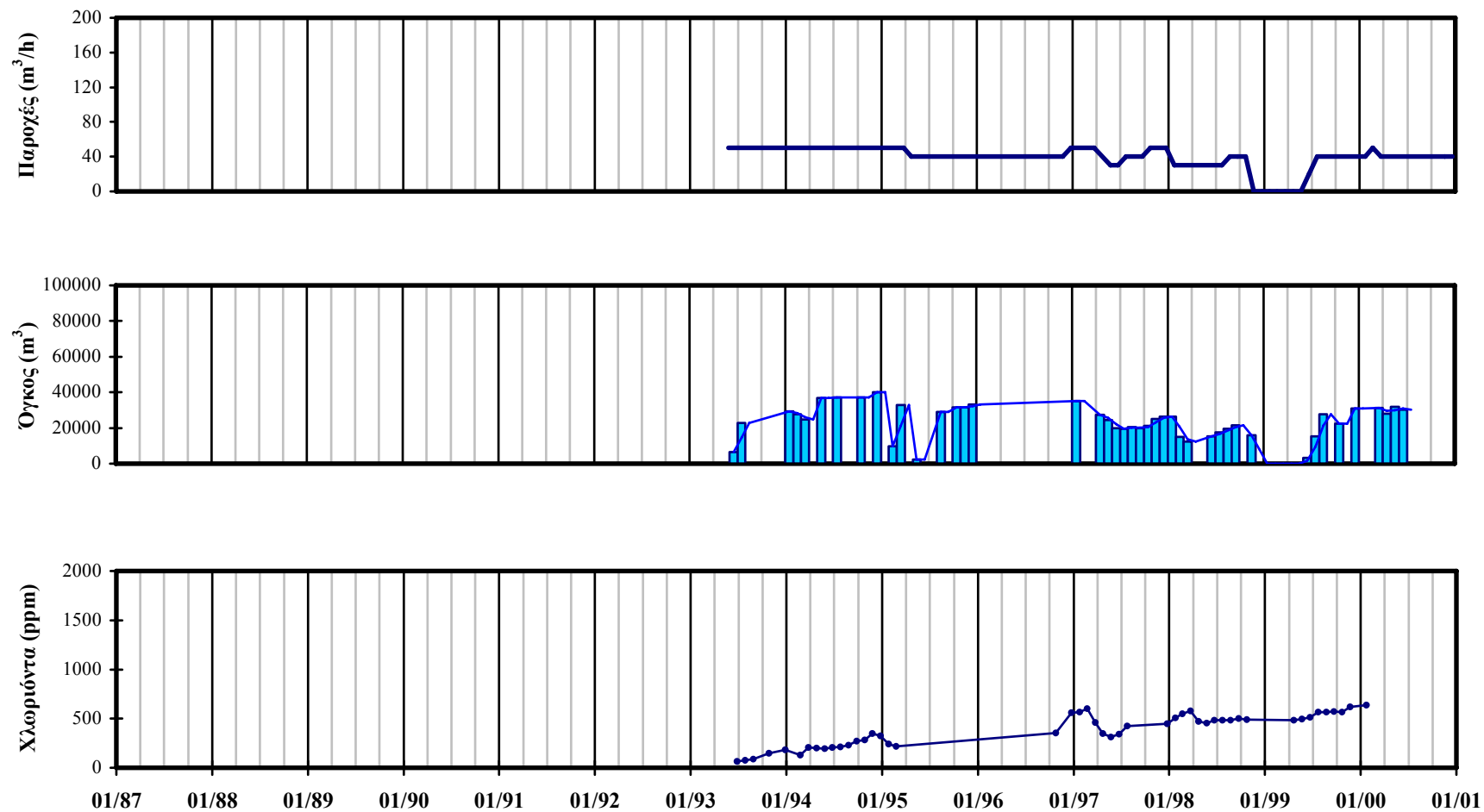
Σχήμα Β.7: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης T19.

(11)



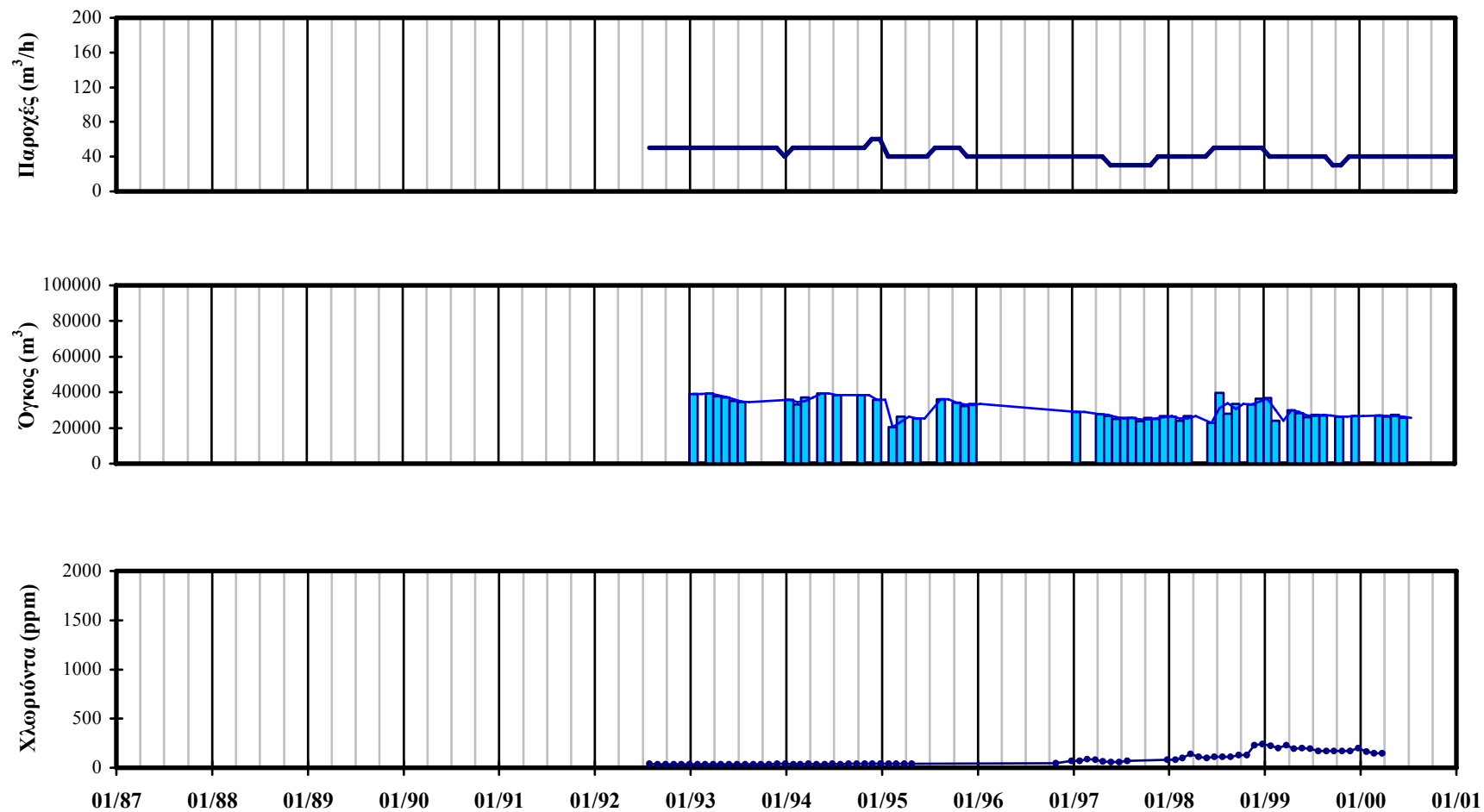
Σχήμα Β.8: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης T22.

(12)



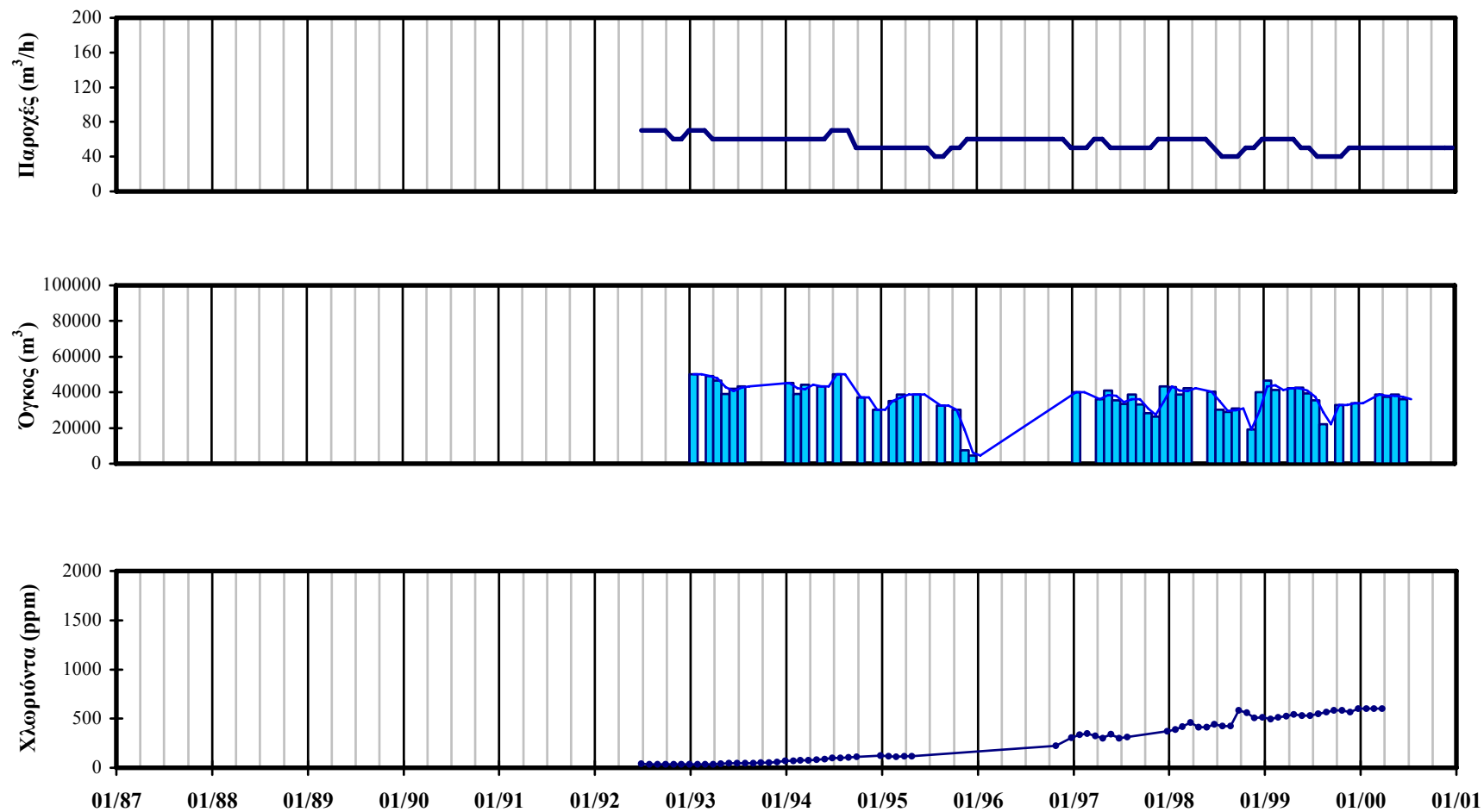
Σχήμα Β.9: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Κ1.

(13)



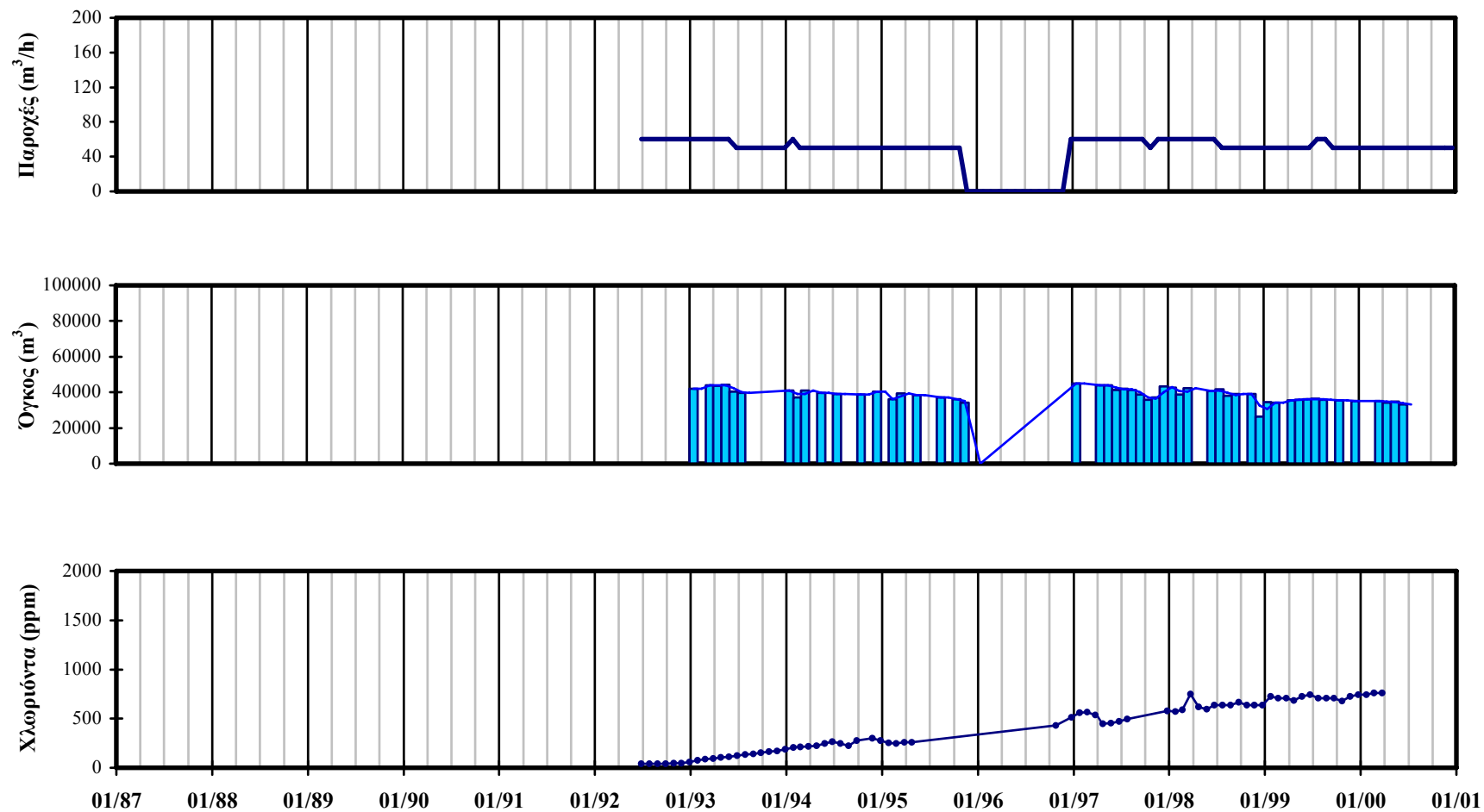
Σχήμα Β.10: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Κ2.

(14)

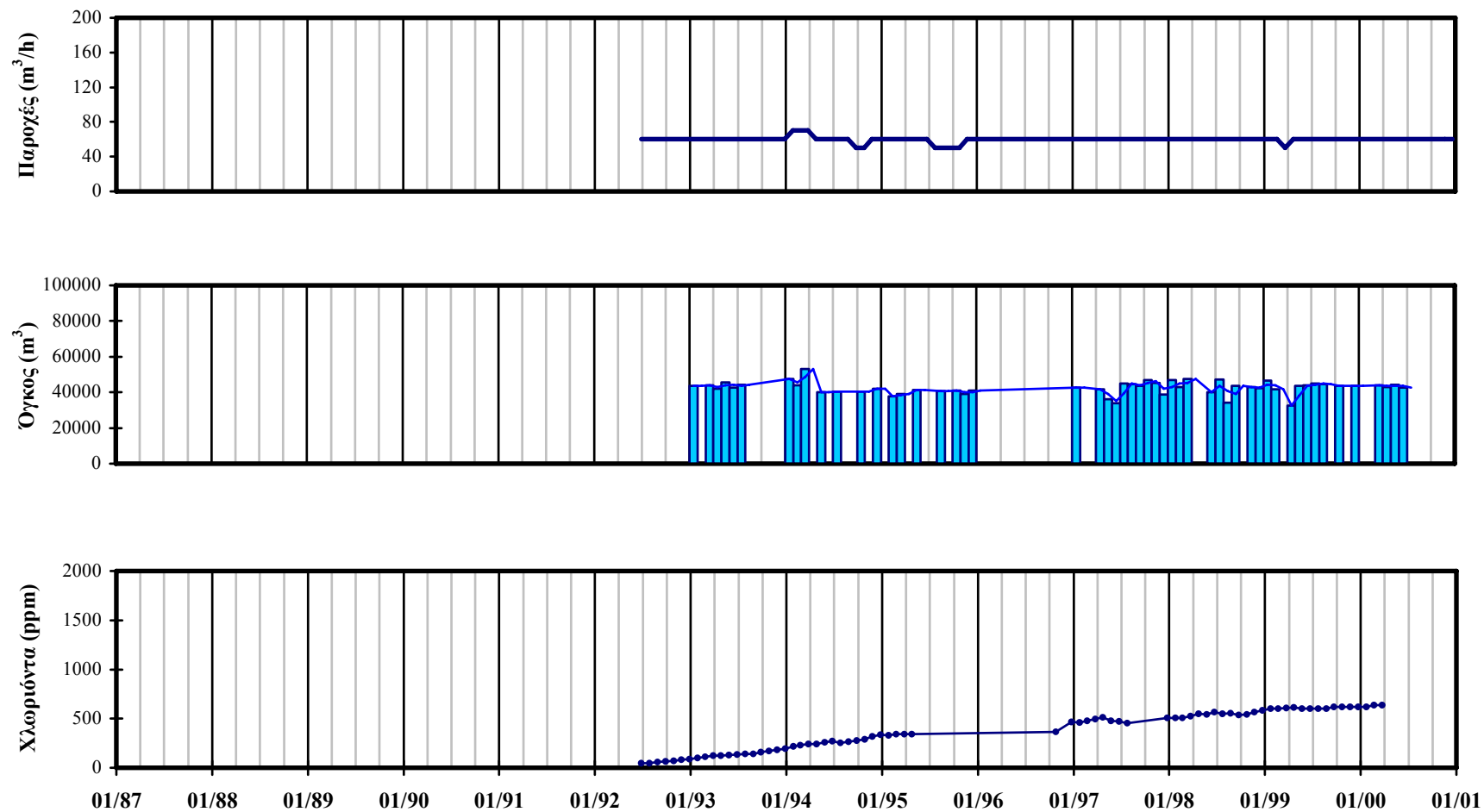


Σχήμα Β.11: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Κ3.

(15)

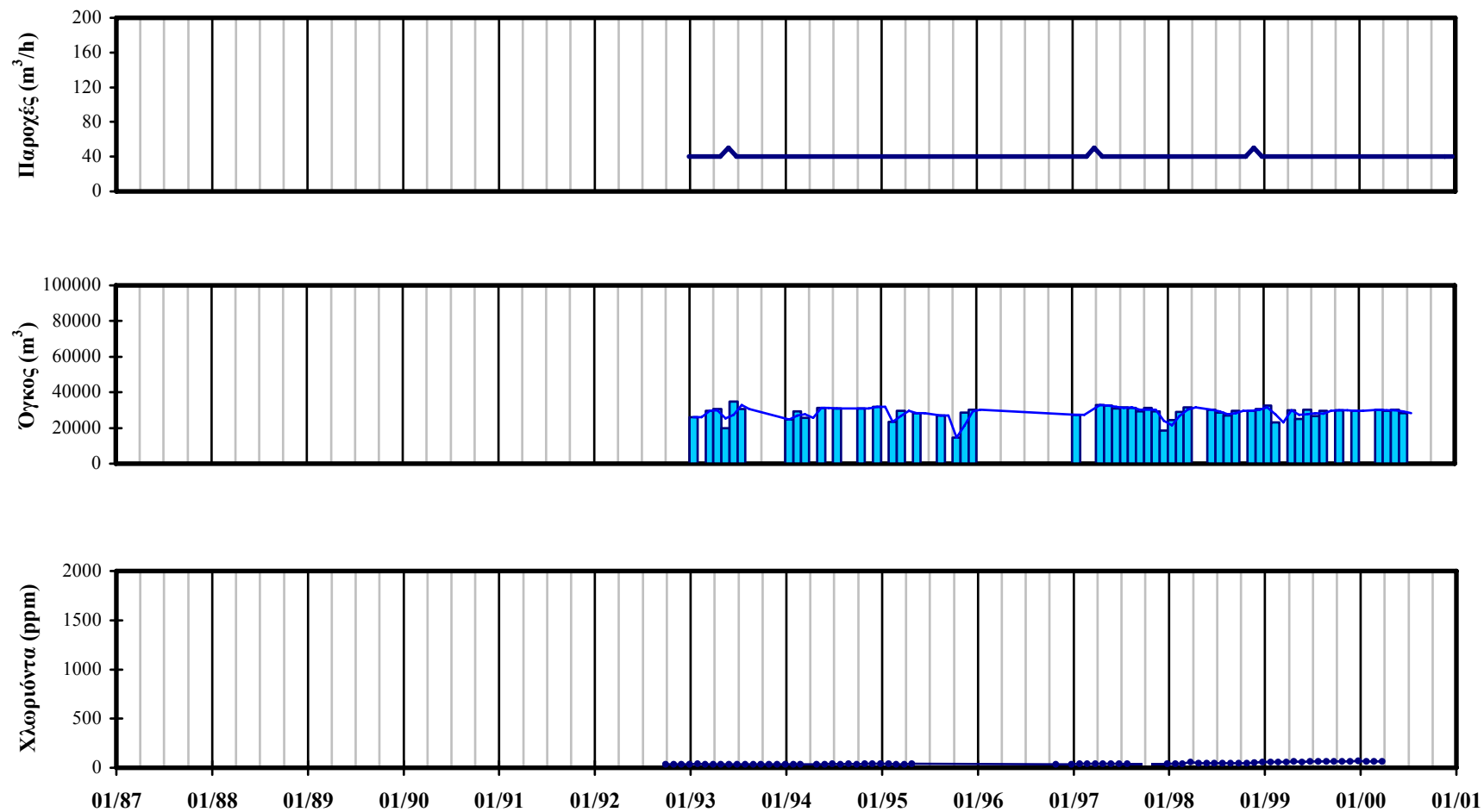


Σχήμα Β.12: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Κ5.

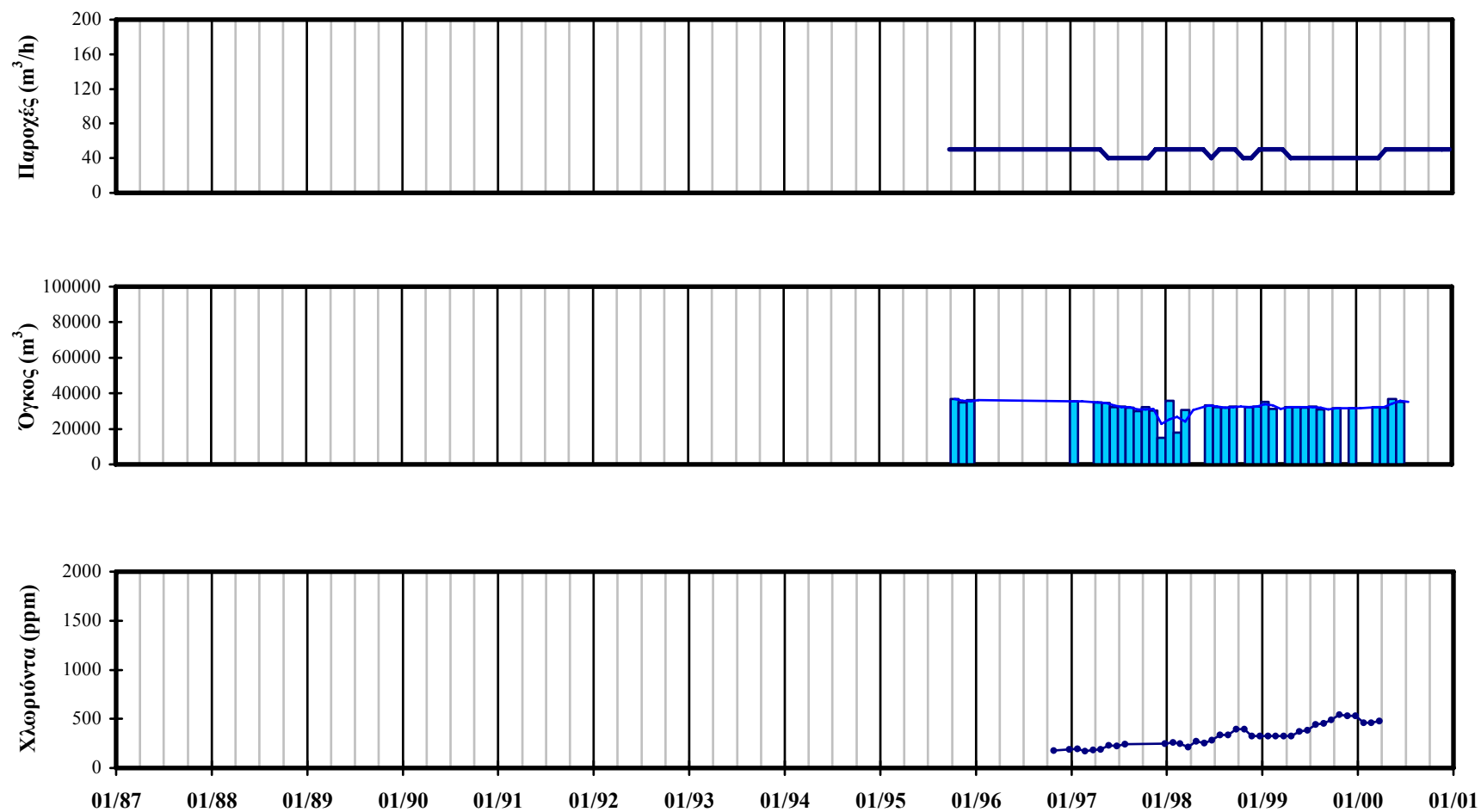


Σχήμα Β.13: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Κ7.

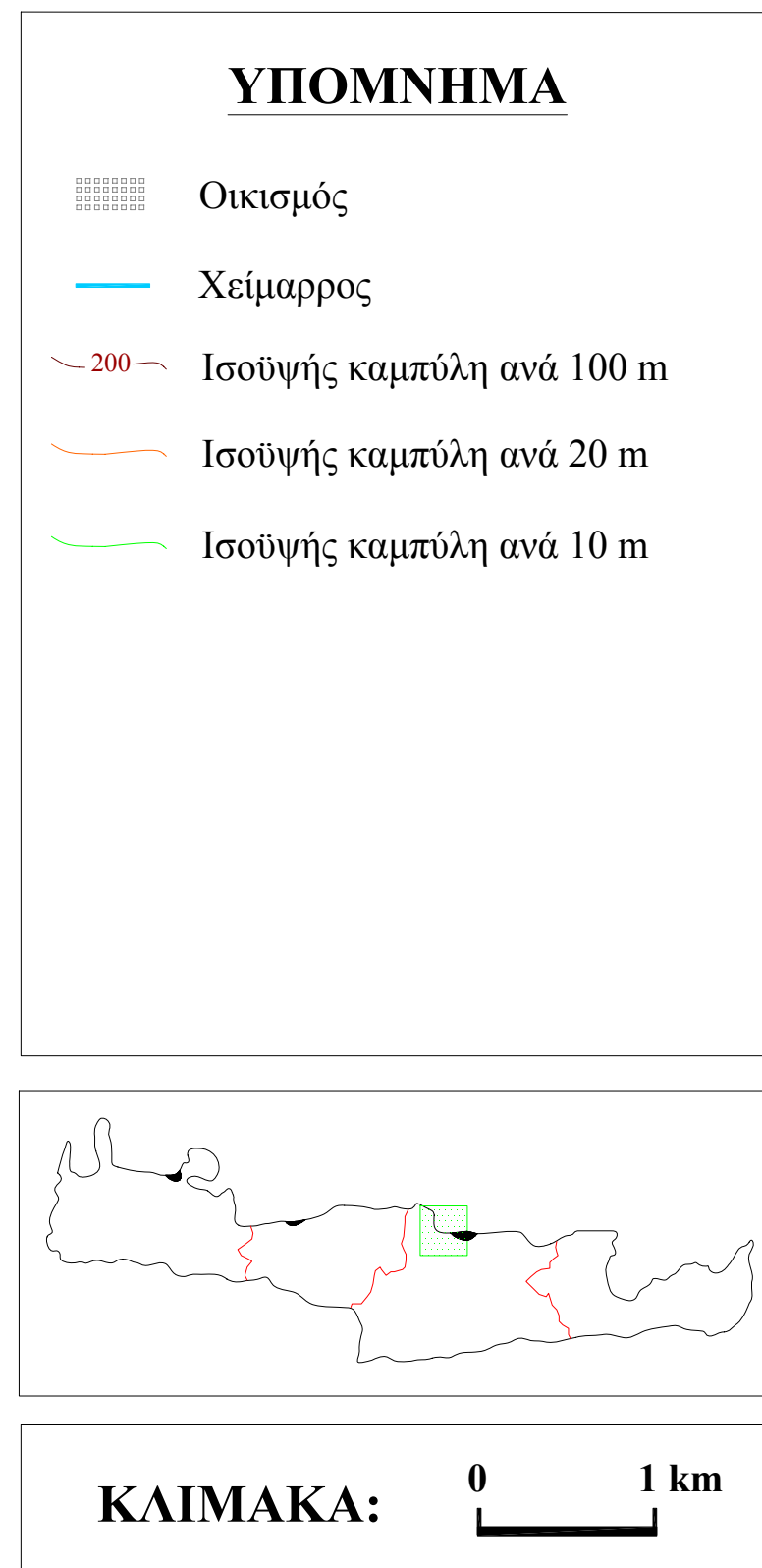
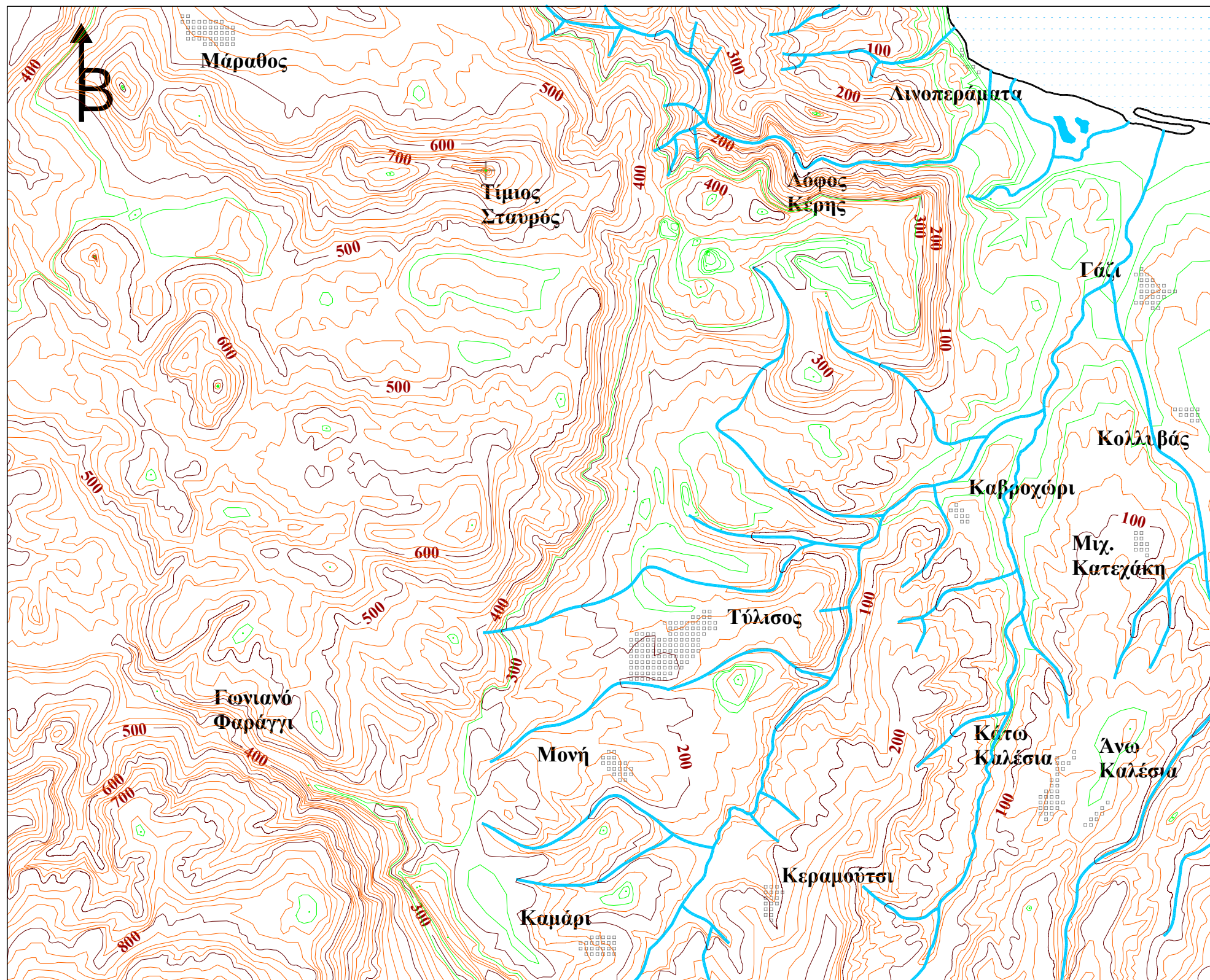
(17)



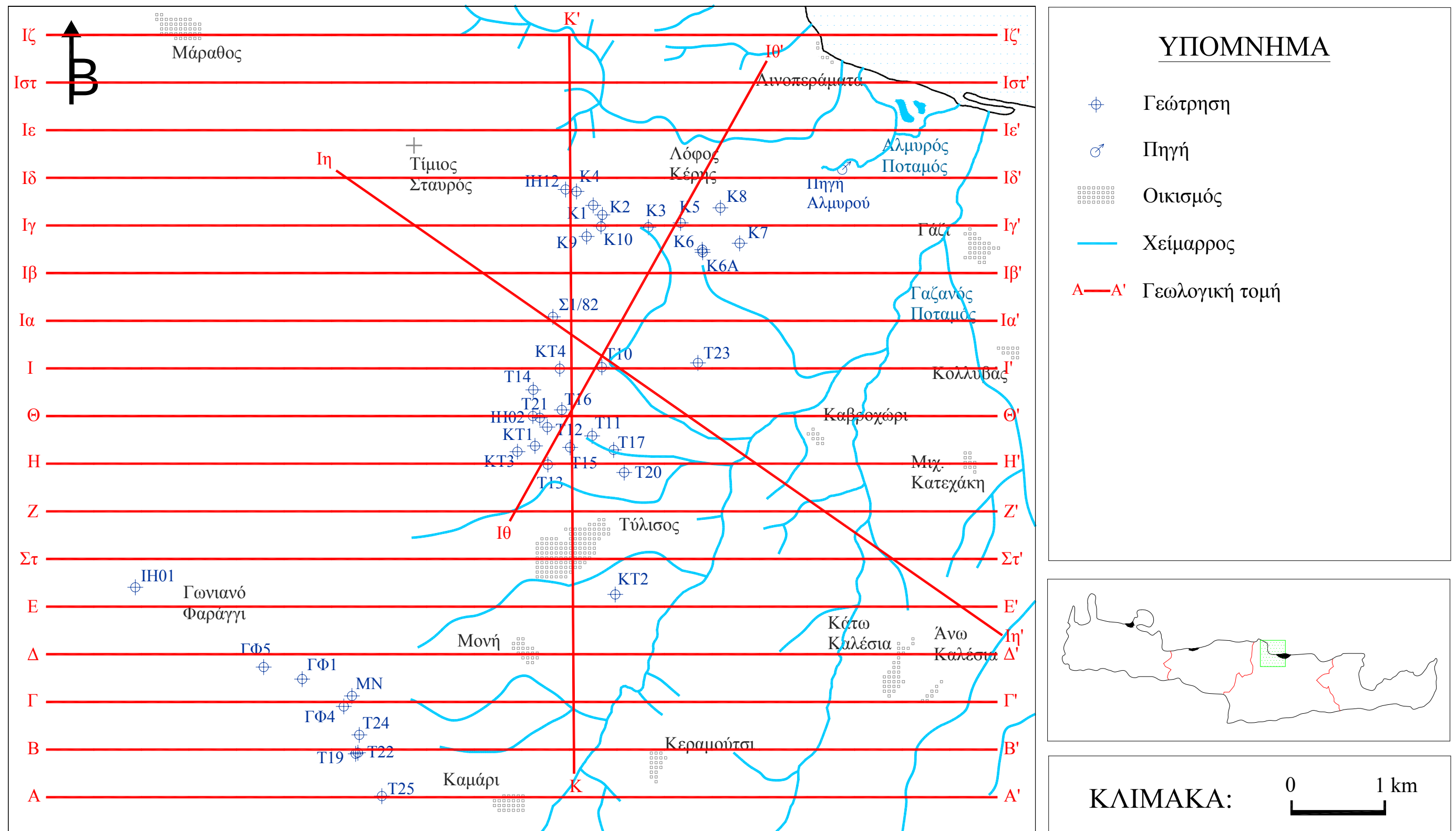
Σχήμα Β.14: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Κ9.



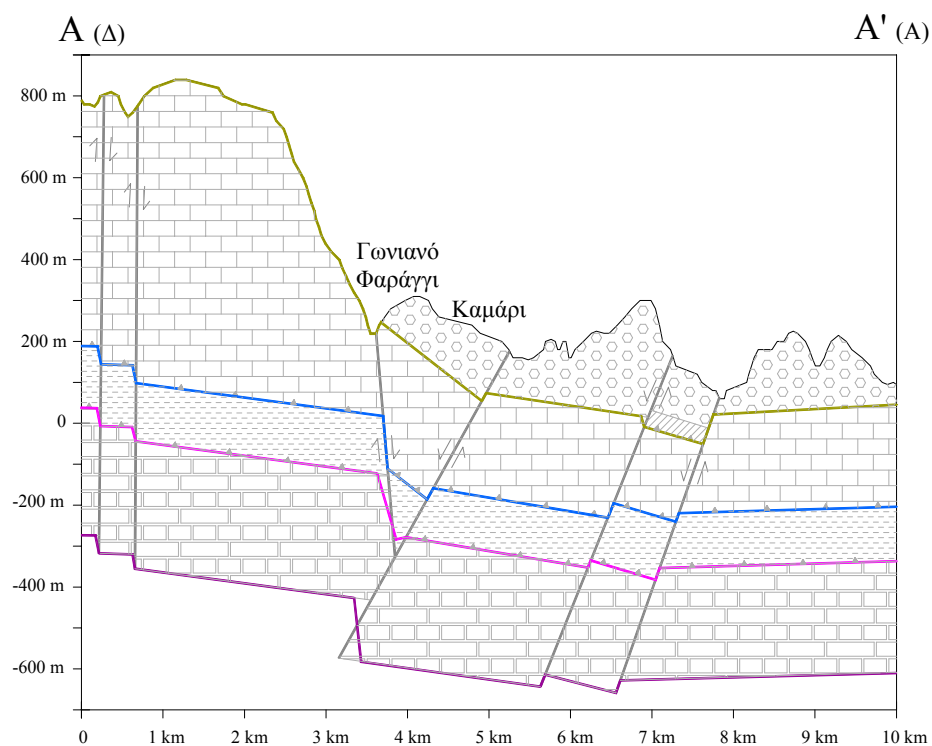
Σχήμα Β.15: Διαγράμματα ενδεικτικής παροχής – απολήψιμου όγκου νερού – συγκέντρωσης χλωριόντων γεώτρησης Κ10.



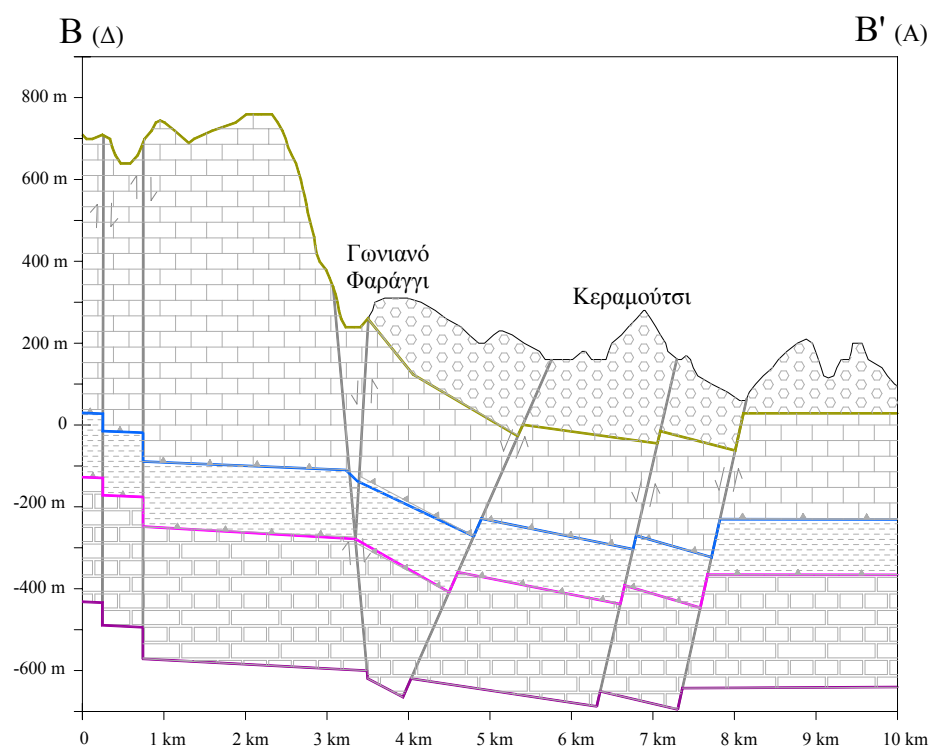
Σχήμα Γ.1: Αναλυτικός τοπογραφικός χάρτης της περιοχής ενδιαφέροντος.



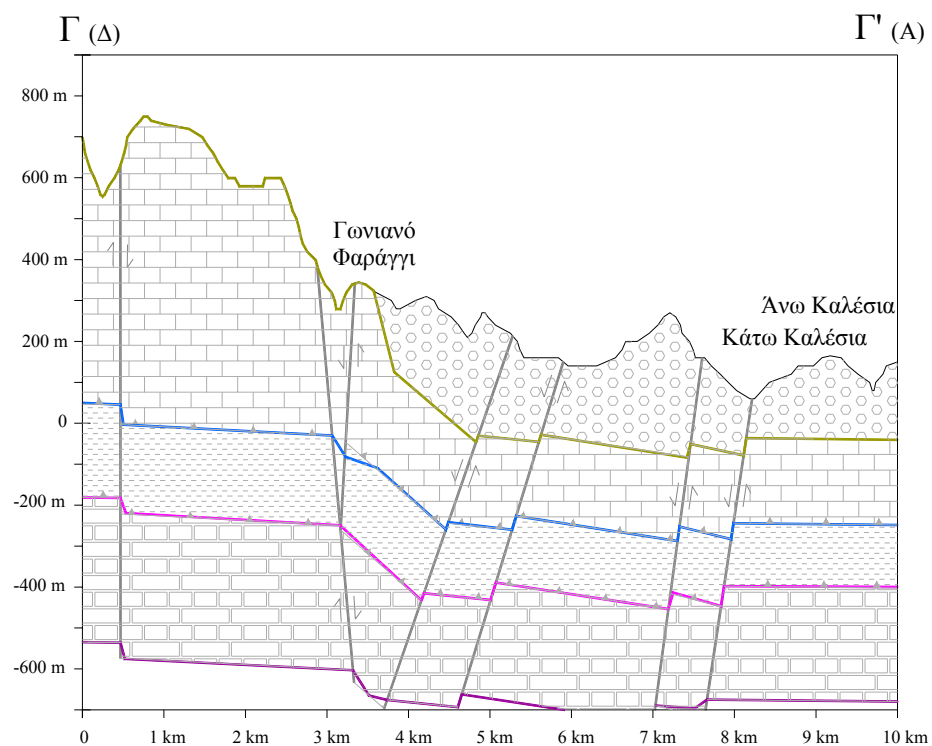
Σχήμα Γ.3: Βροχομετρικοί σταθμοί ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος.



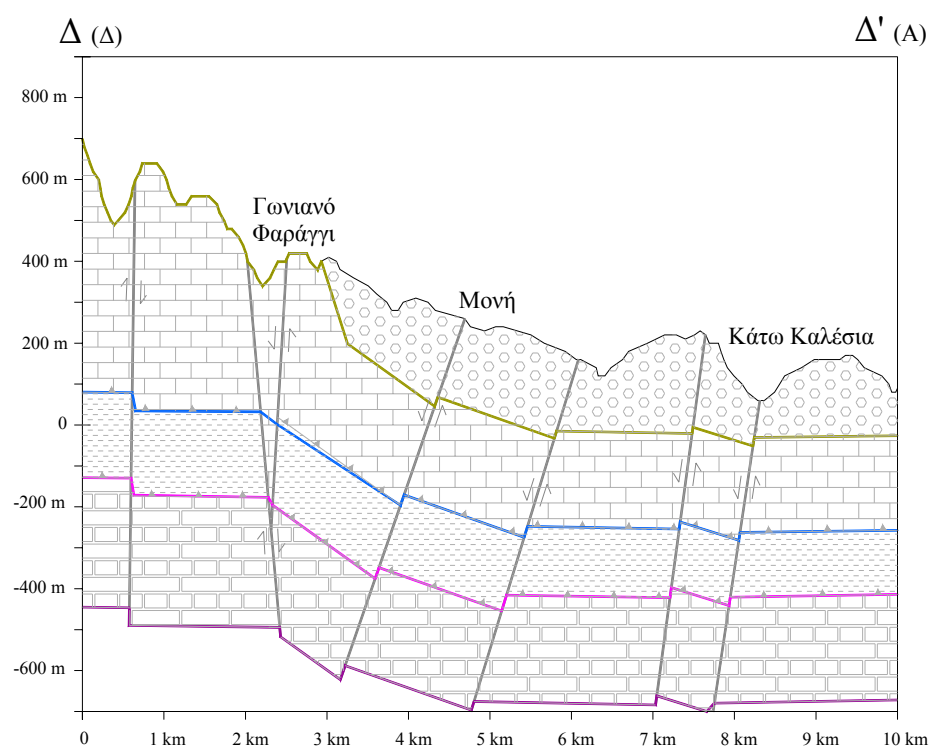
Σχήμα Δ.1: Γεωλογική τομή ΑΑ' (Σχήμα 4.4, κεφ. 4).



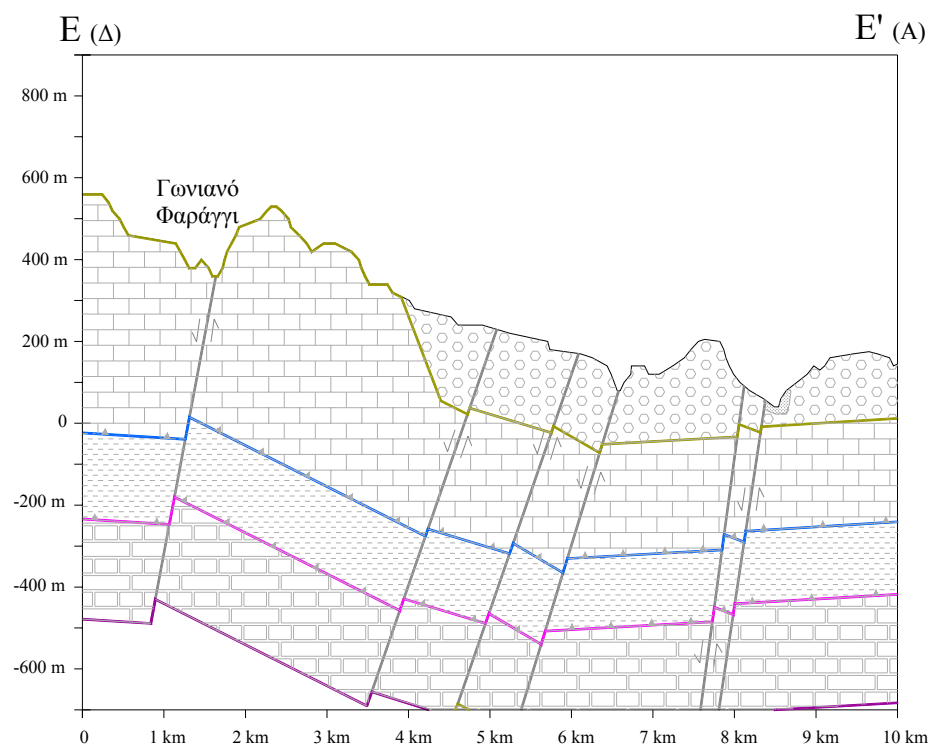
Σχήμα Δ.2: Γεωλογική τομή ΒΒ' (Σχήμα 4.5, κεφ. 4).



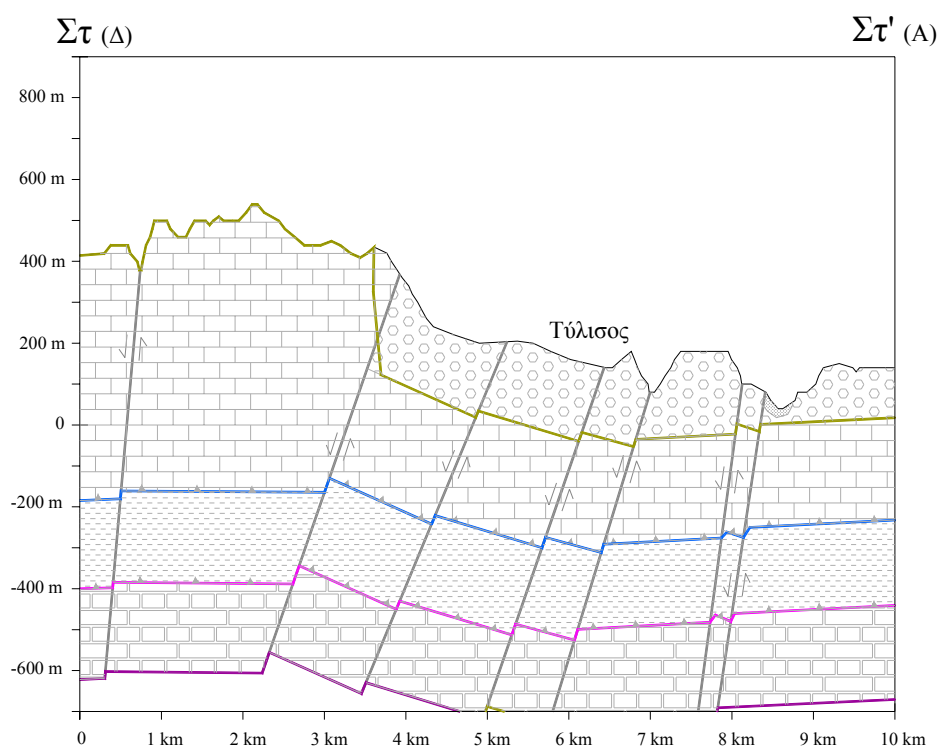
Σχήμα Δ.3: Γεωλογική τομή ΓΓ' (Σχήμα 4.6, κεφ. 4).



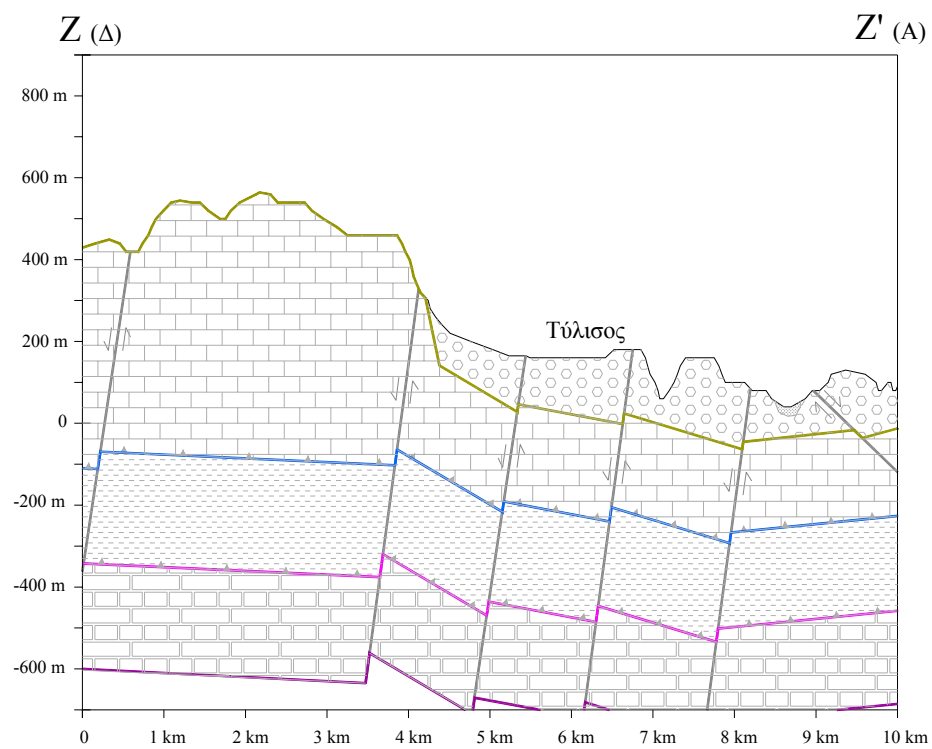
Σχήμα Δ.4: Γεωλογική τομή ΔΔ' (Σχήμα 4.7, κεφ. 4).



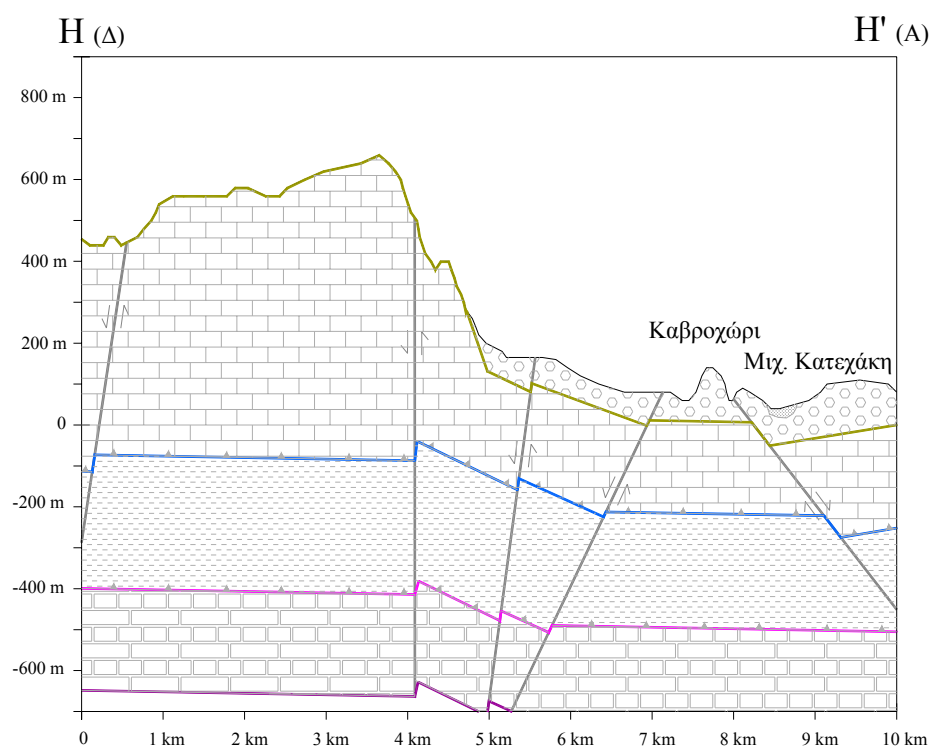
Σχήμα 4.5: Γεωλογική τομή EE' (Σχήμα 4.8, κεφ. 4).



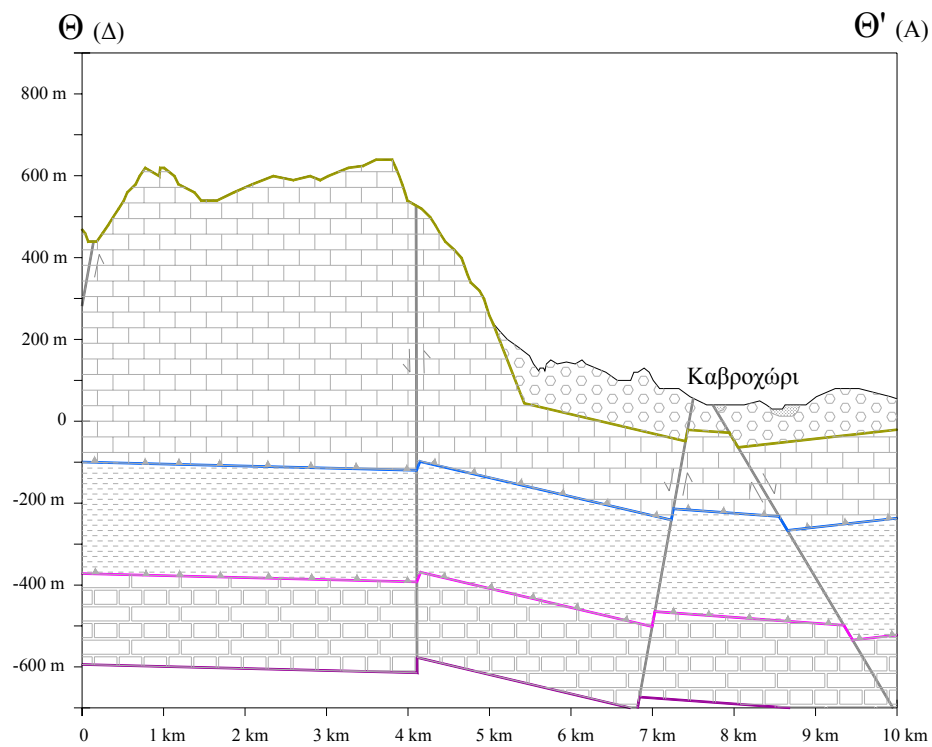
Σχήμα 4.6: Γεωλογική τομή ΣτΣτ' (Σχήμα 4.9, κεφ. 4).



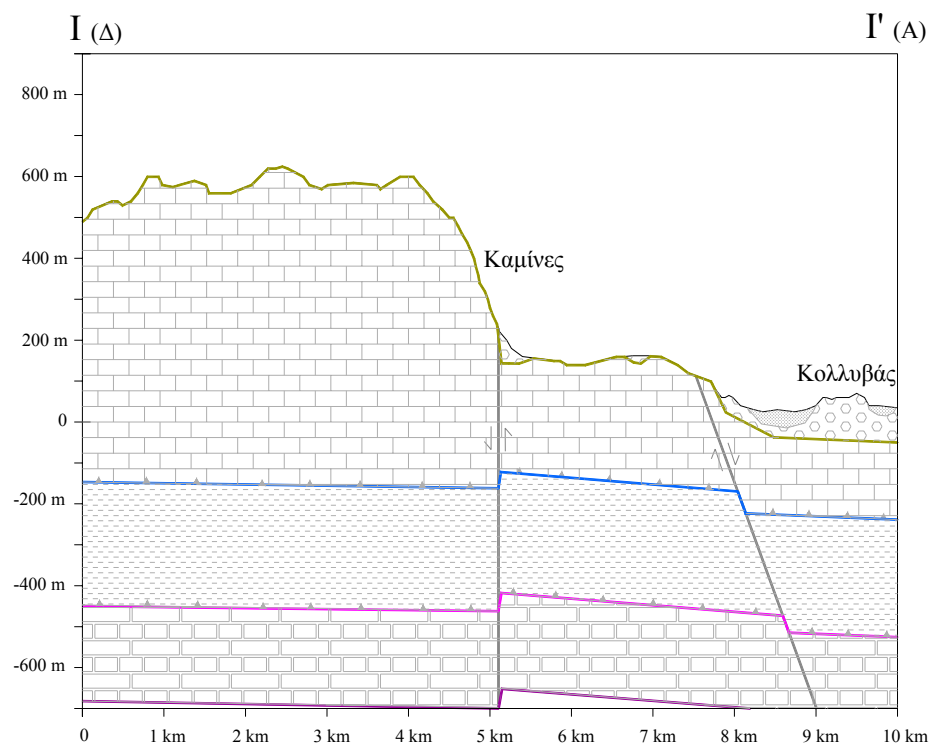
Σχήμα Δ.7: Γεωλογική τομή ZZ' (Σχήμα 4.10, κεφ. 4).



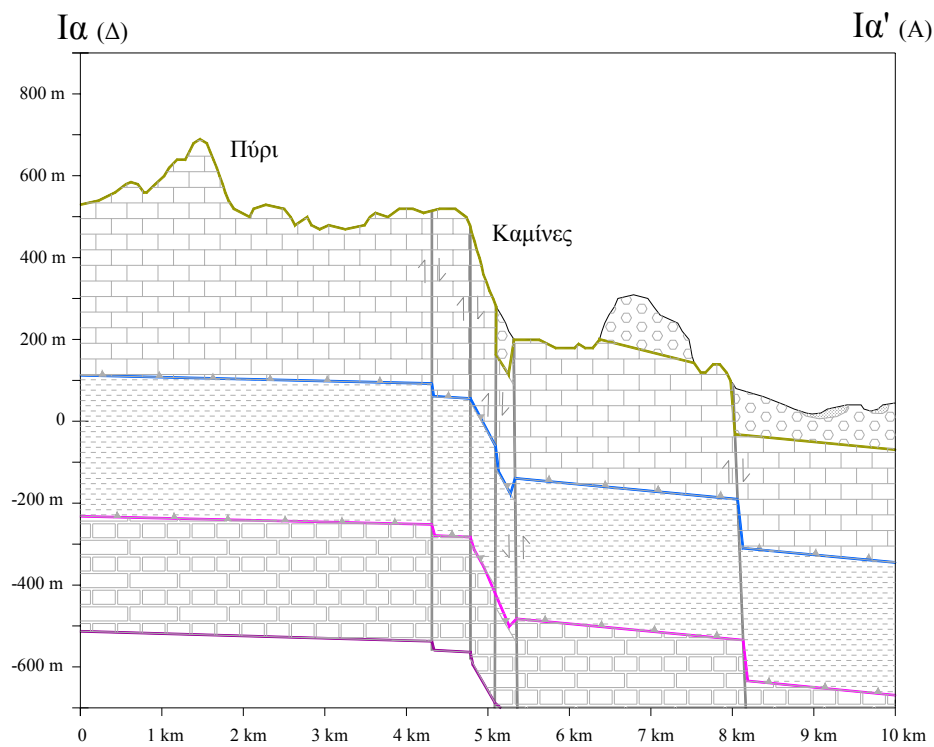
Σχήμα Δ.8: Γεωλογική τομή HH' (Σχήμα 4.11, κεφ. 4).



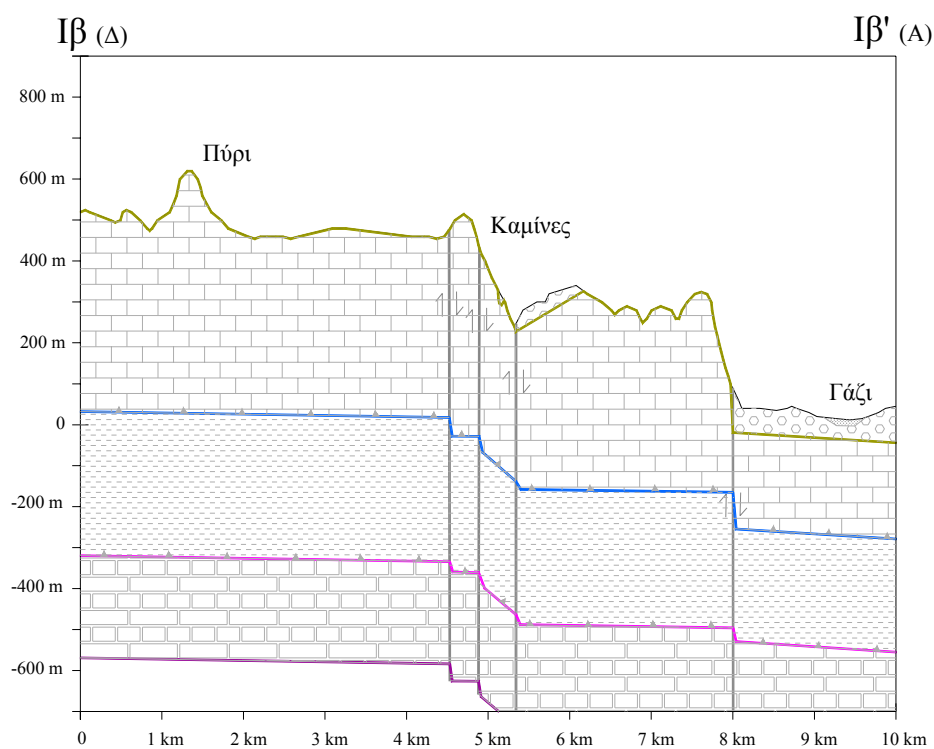
Σχήμα 4.9: Γεωλογική τομή $\Theta\Theta'$ (Σχήμα 4.12, κεφ. 4).



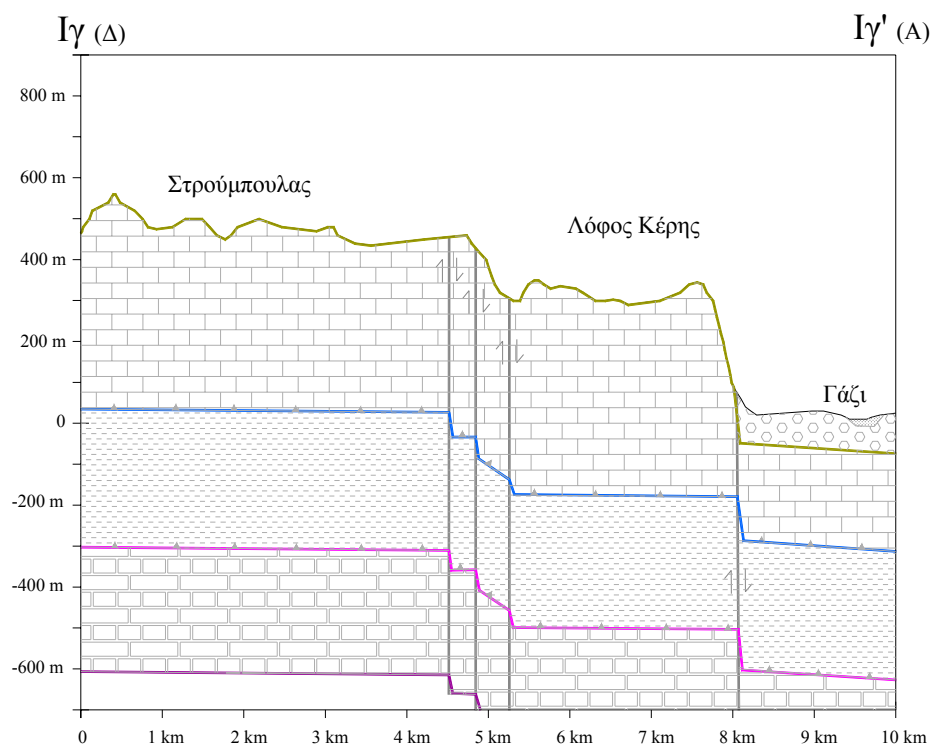
Σχήμα 4.10: Γεωλογική τομή $\text{I}\text{I}'$ (Σχήμα 4.13, κεφ. 4).



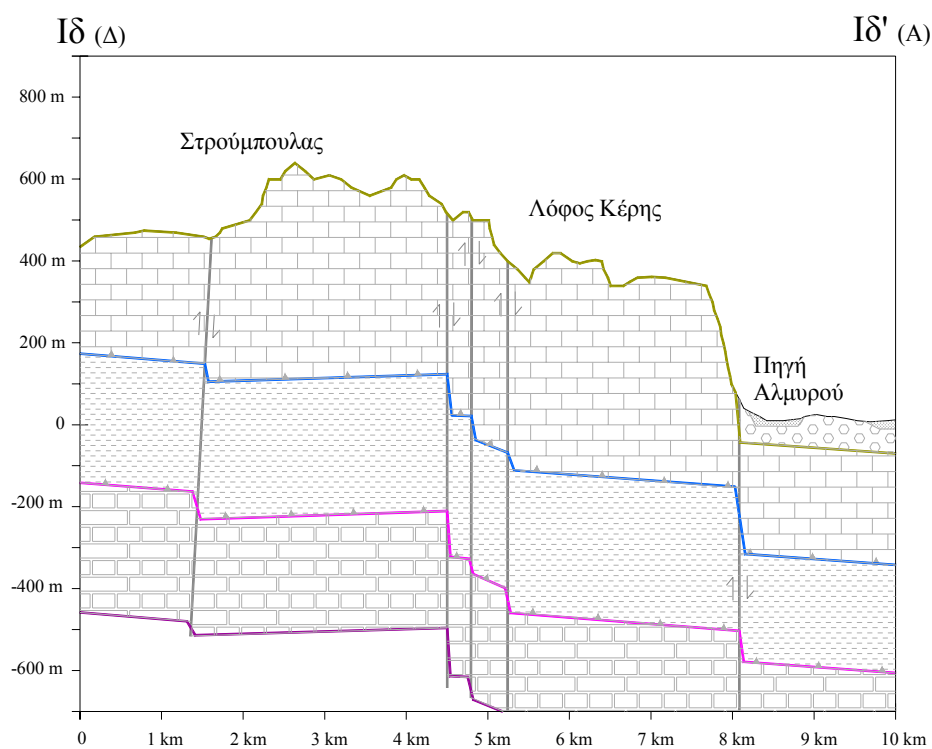
Σχήμα Α.11: Γεωλογική τομή ΙαΙα' (Σχήμα 4.14, κεφ. 4).



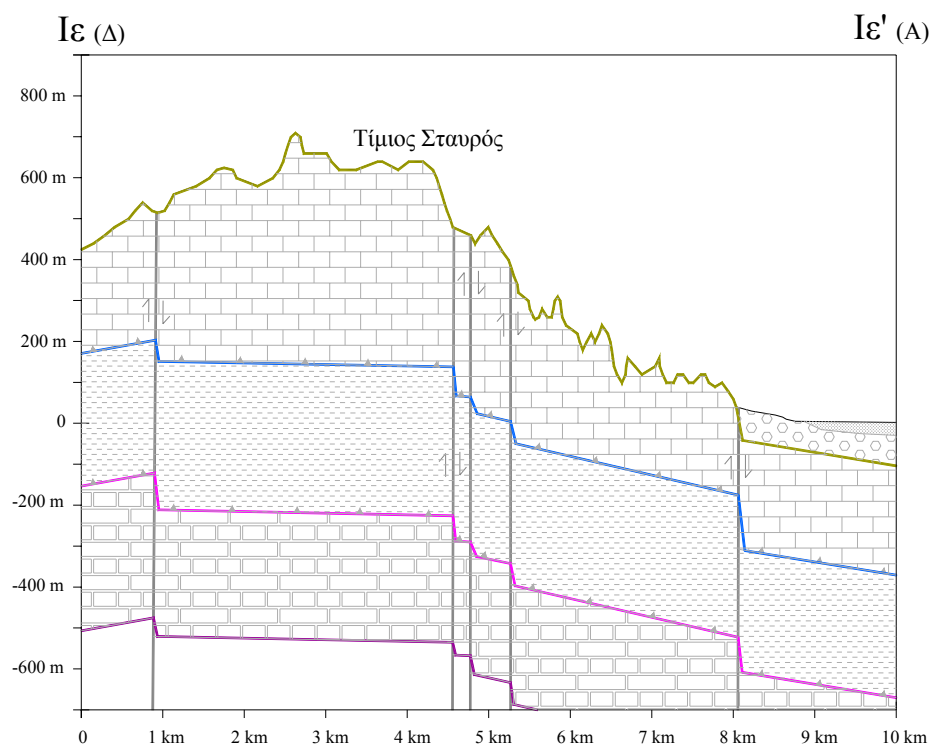
Σχήμα Α.12: Γεωλογική τομή ΙβΙβ' (Σχήμα 4.15, κεφ. 4).



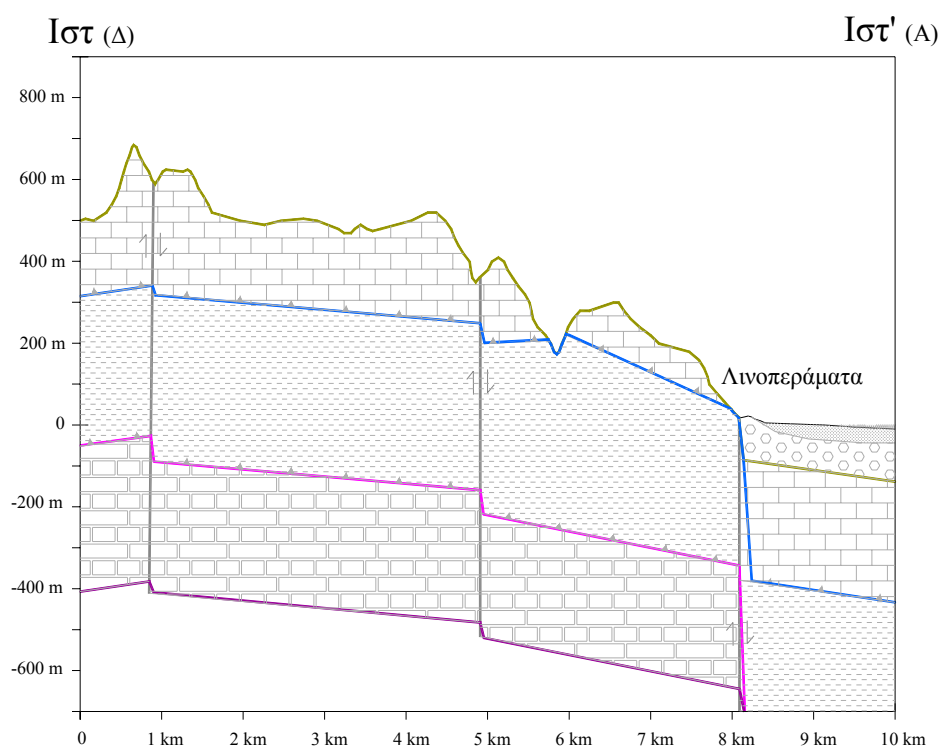
Σχήμα Δ.13: Γεωλογική τομή IγIγ' (Σχήμα 4.16, κεφ. 4).



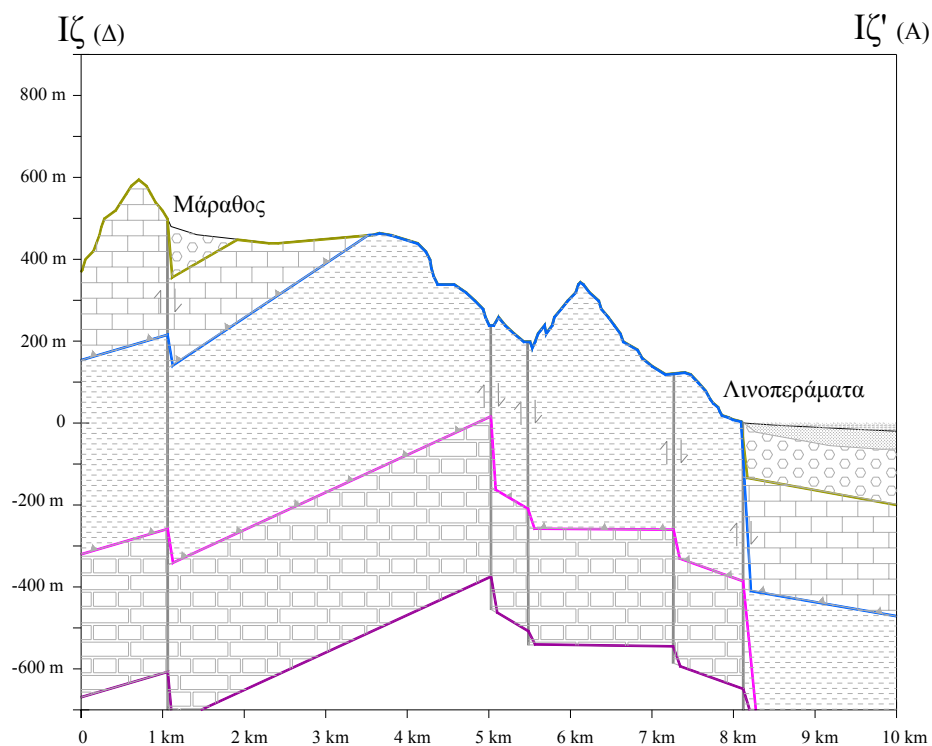
Σχήμα Δ.14: Γεωλογική τομή IδIδ' (Σχήμα 4.17, κεφ. 4).



Σχήμα Δ.15: Γεωλογική τομή ΙεΙε' (Σχήμα 4.18, κεφ. 4).

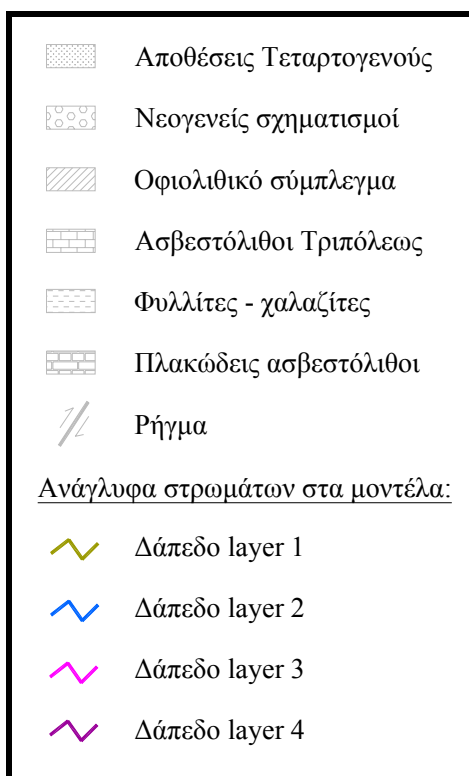


Σχήμα Δ.16: Γεωλογική τομή ΙστΙστ' (Σχήμα 4.19, κεφ. 4).



Σχήμα Δ.17: Γεωλογική τομή ΙΖΙΖ' (Σχήμα 4.20, κεφ. 4).

Υπόμνημα (Σχήματα Δ.1 έως και Δ.17).



Πίνακας Δ.1 (α): Δεδομένα γεωτρήσεων άντλησης.

Ημέρα έναρξης της άντλησης	Ημέρα λήξης της άντλησης	Παροχή (m ³ /day)				
		T11	T12	T15	T17	T21
1.157	1.188	2.545	2.715	1.426	1.089	3.513
1.188	1.277	2.581	2.798	1.490	1.166	3.600
1.277	1.308	2.200	2.747	1.042	853	2.875
1.308	1.338	2.621	2.718	708	592	3.459
1.338	1.369	2.576	2.605	1.388	1.148	2.880
1.369	1.400	2.587	2.634	1.288	740	3.142
1.400	1.430	2.586	2.658	637	708	3.148
1.430	1.461	2.555	2.493	616	765	2.926
1.461	1.491	2.577	2.625	618	1.038	3.081
1.491	1.522	2.655	2.697	285	1.697	3.303
1.522	1.553	2.719	2.776	344	1.902	3.436
1.553	1.674	1.396	1.315	328	1.422	2.967
1.674	1.704	2.174	2.233	330	441	3.029
1.704	1.735	2.413	1.413	331	891	2.110
1.735	1.827	1.409	1.925	326	1.244	2.207
1.827	1.857	983	882	333	1.050	2.394
1.857	1.888	983	882	333	1.050	2.340
1.888	1.947	983	902	350	1.201	2.124
1.947	1.978	43	930	402	676	2.342
1.978	2.008	43	911	394	1.247	2.322
2.008	2.039	43	894	393	1.199	2.373
2.039	2.069	0	864	240	1.159	2.336
2.069	2.253	583	821	351	1.102	1.625
2.253	2.284	0	853	378	1.215	2.384
2.284	2.312	0	943	303	1.296	2.364
2.312	2.373	0	857	352	1.246	2.321
2.373	2.434	0	780	374	1.190	2.316
2.434	2.526	986	725	404	1.059	2.268
2.526	2.587	1.012	803	403	0	2.228
2.587	2.649	910	863	414	0	2.316
2.649	2.677	1.049	880	316	0	2.304
2.677	2.738	1.018	887	208	0	2.207
2.738	2.830	1.054	863	555	0	2.232
2.830	2.891	940	669	472	0	2.195
2.891	2.922	867	788	477	0	2.215
2.922	2.952	962	767	469	0	2.140
2.952	3.349	986	666	489	0	2.208
3.349	3.439	422	841	1.536	0	2.500
3.439	3.469	1.049	806	454	0	2.676
3.469	3.500	406	561	501	0	2.487

Πίνακας Δ.1 (β): Δεδομένα γεωτρήσεων άντλησης.

Ημέρα έναρξης της άντλησης	Ημέρα λήξης της άντλησης	Παροχή (m ³ /day)				
		T11	T12	T15	T17	T21
3.500	3.530	952	779	515	0	2.296
3.530	3.561	1.675	734	496	0	2.167
3.561	3.592	1.054	750	389	0	1.681
3.592	3.622	1.310	639	497	0	1.965
3.622	3.653	1.349	654	463	0	2.018
3.653	3.683	1.020	746	527	0	2.142
3.683	3.714	963	775	426	0	2.211
3.714	3.745	1.377	805	433	0	2.193
3.745	3.773	1.334	719	489	0	2.167
3.773	3.865	1.430	723	518	0	1.580
3.865	3.895	1.437	817	524	0	1.617
3.895	3.926	817	717	506	0	1.603
3.926	3.957	1.340	699	632	0	1.470
3.957	4.018	1.098	685	634	0	1.559
4.018	4.048	252	631	234	0	1.603
4.048	4.079	0	671	0	0	1.584
4.079	4.110	0	894	0	0	2.495
4.110	4.169	0	692	0	0	2.328
4.169	4.199	297	740	297	0	1.579
4.199	4.230	1.139	821	371	0	1.591
4.230	4.260	1.447	786	1.361	0	1.592
4.260	4.291	1.655	735	1.073	0	1.569
4.291	4.352	1.505	752	940	0	1.538
4.352	4.413	1.240	733	1.480	0	1.519
4.413	4.504	1.174	650	1.434	0	1.436
4.504	4.535	0	677	924	0	1.855
4.535	4.565	305	565	929	0	1.880
4.565	4.596	570	783	725	0	1.837
4.596	4.749	577	749	1.132	0	1.777
Ημέρα έναρξης της άντλησης	Ημέρα λήξης της άντλησης	Παροχή (m ³ /day)				
		Σ1	T19	T22	K1	K2
1.369	1.400	551	0	0	0	0
1.400	1.430	1.062	0	0	0	0
1.430	1.461	1.006	0	0	0	0
1.461	1.491	999	0	0	0	0
1.491	1.522	1.031	0	0	0	0
1.522	1.553	1.032	0	0	0	0
1.553	1.674	1.032	0	0	0	0
1.674	1.704	1.014	0	0	0	0

Πίνακας Δ.1 (γ): Δεδομένα γεωτρήσεων άντλησης.

Ημέρα έναρξης της άντλησης	Ημέρα λήξης της άντλησης	Παροχή (m ³ /day)				
		Σ1	T19	T22	K1	K2
1.704	1.735	982	0	0	0	0
1.735	1.827	964	0	0	0	985
1.827	1.888	938	0	0	0	1.188
1.888	1.947	923	0	0	0	1.260
1.947	1.978	967	0	0	0	1.267
1.978	2.008	961	0	0	0	1.255
2.008	2.039	981	0	0	0	1.195
2.039	2.069	929	0	0	217	1.170
2.069	2.153	865	0	0	733	1.114
2.253	2.284	870	1.115	1.062	944	1.151
2.284	2.312	942	1.616	867	988	1.183
2.312	2.373	884	1.428	1.320	799	1.202
2.373	2.434	864	1.183	1.276	1.183	1.267
2.434	2.526	839	995	1.116	1.195	1.237
2.526	2.587	493	1.091	1.372	1.200	1.238
2.587	2.649	947	1.650	1.441	1.298	1.160
2.649	2.677	923	118	1.333	350	737
2.677	2.738	879	883	1.346	1.059	849
2.738	2.830	854	1.150	1.291	72	820
2.830	2.891	808	932	1.132	931	1.169
2.891	2.922	792	606	1.065	1.020	1.105
2.922	2.952	779	953	1.006	1.049	1.079
2.952	3.349	805	964	1.040	1.069	1.087
3.349	3.439	826	1.191	1.052	1.134	939
3.439	3.469	878	1.239	1.041	913	925
3.469	3.500	816	1.146	1.028	783	866
3.500	3.530	782	1.048	904	661	840
3.530	3.561	768	984	865	631	830
3.561	3.592	756	1.039	819	665	828
3.592	3.622	728	964	769	658	798
3.622	3.653	821	1.021	809	684	834
3.653	3.683	907	1.020	837	836	838
3.683	3.714	1.008	1.161	945	856	861
3.714	3.745	1.019	1.027	868	854	852
3.745	3.773	1.043	1.101	916	540	866
3.773	3.865	1.040	1.298	964	403	858
3.865	3.895	1.034	1.090	866	515	760
3.895	3.926	783	969	819	572	1.287
3.926	3.957	800	950	728	629	899
3.957	4.018	944	961	641	713	1.116

Πίνακας Δ.1 (δ): Δεδομένα γεωτρήσεων άντλησης.

Ημέρα έναρξης της άντλησης	Ημέρα λήξης της άντλησης	Παροχή (m ³ /day)				
		Σ1	T19	T22	K1	K2
4.018	4.048	945	927	770	528	1.102
4.048	4.079	934	1.072	1.057	0	1.178
4.079	4.110	69	1.302	1.147	0	1.183
4.110	4.169	350	1.091	1.025	0	863
4.169	4.199	859	1.065	952	0	995
4.199	4.230	873	930	942	0	912
4.230	4.260	773	881	879	111	870
4.260	4.291	691	943	736	495	886
4.291	4.352	699	913	610	890	872
4.352	4.413	681	967	862	720	849
4.413	4.504	431	933	858	993	861
4.504	4.535	770	1.030	828	1.008	874
4.535	4.565	912	980	790	933	878
4.565	4.596	885	896	761	1.028	878
4.596	4.749	711	868	757	1.009	858
Ημέρα έναρξης της άντλησης	Ημέρα λήξης της άντλησης	Παροχή (m ³ /day)				
		K3	K5	K7	K9	K10
1.704	1.735	678	633	599	0	0
1.735	1.827	678	1.437	1.357	0	0
1.827	1.888	1.499	1.357	1.372	854	0
1.888	1.947	1.623	1.351	1.413	844	0
1.947	1.978	1.589	1.415	1.417	952	0
1.978	2.008	1.549	1.460	1.404	1.018	0
2.008	2.039	1.266	1.432	1.471	646	0
2.039	2.069	1.405	1.352	1.423	1.160	0
2.069	2.253	1.401	1.279	1.433	993	0
2.253	2.284	1.462	1.321	1.538	795	0
2.284	2.312	1.397	1.331	1.565	1.052	0
2.312	2.373	1.430	1.327	1.714	830	0
2.373	2.434	1.394	1.278	1.292	1.012	0
2.434	2.526	1.617	1.259	1.305	1.002	0
2.526	2.587	1.201	1.247	1.303	1.000	0
2.587	2.649	973	1.307	1.352	1.034	0
2.649	2.677	1.262	1.286	1.347	842	0
2.677	2.738	1.252	1.271	1.256	958	0
2.738	2.830	1.249	1.245	1.333	919	0
2.830	2.891	1.053	1.194	1.311	868	0
2.891	2.922	977	1.163	1.328	473	1.186
2.922	2.952	251	1.136	1.305	954	1.163

Πίνακας Δ.1 (ε): Δεδομένα γεωτρήσεων άντλησης.

Ημέρα έναρξης της άντλησης	Ημέρα λήξης της άντλησης	Παροχή (m ³ /day)				
		K3	K5	K7	K9	K10
2.952	3.349	151	0	1.328	975	1.170
3.349	3.439	1.297	1.447	1.378	885	1.144
3.439	3.469	1.207	1.466	1.389	1.092	1.158
3.469	3.500	1.319	1.419	1.168	1.054	1.111
3.500	3.530	1.181	1.377	1.133	1.034	1.071
3.530	3.561	1.084	1.352	1.453	1.022	1.053
3.561	3.592	1.253	1.337	1.439	1.009	1.035
3.592	3.622	1.110	1.290	1.455	976	997
3.622	3.653	919	1.156	1.511	1.012	1.036
3.653	3.683	883	1.233	1.514	982	1.012
3.683	3.714	1.401	1.398	1.254	604	488
3.714	3.745	1.386	1.381	1.516	791	1.152
3.745	3.773	1.387	1.386	1.531	1.035	637
3.773	3.865	1.371	1.363	1.533	1.016	989
3.865	3.895	1.341	1.353	1.334	1.006	1.108
3.895	3.926	981	1.340	1.520	924	1.035
3.926	3.957	933	1.229	1.103	871	1.025
3.957	4.018	1.035	1.301	1.459	989	1.083
4.018	4.048	644	1.298	1.436	993	1.073
4.048	4.079	1.288	856	1.371	984	1.055
4.079	4.110	1.497	1.113	1.498	1.051	1.138
4.110	4.169	1.476	1.219	1.489	822	1.120
4.169	4.199	1.409	1.188	1.086	999	1.073
4.199	4.230	1.374	1.160	1.410	805	1.043
4.230	4.260	1.313	1.201	1.461	1.008	1.069
4.260	4.291	1.146	1.174	1.454	857	1.049
4.291	4.352	712	1.153	1.443	957	1.003
4.352	4.413	1.057	1.150	1.406	963	1.015
4.413	4.504	1.092	1.135	1.409	956	1.015
4.504	4.535	1.253	1.134	1.424	976	1.045
4.535	4.565	1.251	1.142	1.434	987	1.061
4.565	4.596	1.250	1.126	1.434	972	1.187
4.596	4.749	1.208	1.104	1.420	948	1.167

Πίνακας Δ.2 (α): Δεδομένα γεωτρήσεων παρατήρησης.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		T10	T13	T14	T16
121	152		26,3		
152	182		24,7		
182	213		21,8		
213	243		19,9		
243	274		18,8		
274	305		17,8		
305	335		17,3		
335	366		17,4		15,2
366	396		18,8	16,5	17,3
396	427		18,7	13,1	16,8
458	486		17,8	14,5	15,2
486	517		17,0	15,2	15,5
517	547		18,7	15,6	15,9
547	578		15,9	13,3	13,2
578	608	16,8	13,9	11,4	11,2
608	639	16,2	12,8	10,3	9,8
639	670	15,3			8,8
670	700	14,5			7,8
700	731	14,3			7,7
731	761				9,9
761	792	15,8			10,3
823	851				13,5
1.096	1.126				5,8
1.126	1.157				4,6
1.157	1.188				7,6
1.188	1.216				12,7
1.216	1.247	25,9	12,4	16,1	15,1
1.247	1.277	23,7		14,9	12,5
1.277	1.308	18,2		11,9	9,5
1.308	1.338	15,3		10,0	8,7
1.369	1.400			8,8	
1.400	1.430	14,1			6,2
1.430	1.461	12,7			5,5
1.704	1.735				10,8
1.857	1.888	16,9			
1.919	1.947	14,5			
1.947	1.978	16,5			
1.978	2.008	17,7			
2.039	2.069	14,7			
2.069	2.100	12,8			

Πίνακας Δ.2 (β): Δεδομένα γεωτρήσεων παρατήρησης.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		T10	T13	T14	T16
2.131	2.161	11,9			
2.161	2.192	12,0			
2.192	2.222	12,4			
2.222	2.253	13,8			
2.253	2.284	14,8			
2.284	2.312	21,6			
2.312	2.343	23,0			
2.343	2.373	20,0			
2.373	2.404	17,2			
2.434	2.465	14,8			
2.465	2.496	12,7			
2.526	2.557	12,5			
2.557	2.587	20,4			
2.618	2.649	32,5			
2.649	2.677	30,3			
2.708	2.738	24,3			
2.769	2.799	17,1			
2.861	2.891	13,4			
2.891	2.922	12,2			
2.952	2.983	12,7			
3.043	3.074	30,4			
3.074	3.104	29,5			
3.135	3.165	24,8			
3.165	3.196	17,3			
3.257	3.288	13,0			
3.288	3.318	13,2			
3.408	3.439	41,0			
3.439	3.469	33,5			
3.469	3.500	27,5		17,8	
3.500	3.530	21,9		13,5	
3.530	3.561	17,9		10,6	
3.561	3.592	15,4		9,2	
3.592	3.622	14,2		8,3	
3.622	3.653	14,0		8,8	
3.714	3.745	18,8		10,9	
Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		T23	ΓΦ4	MN	IH01
152	182			48,9	
182	213			48,4	

Πίνακας Δ.2 (γ): Δεδομένα γεωτρήσεων παρατήρησης.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		T23	ΓΦ4	MN	IΗ01
213	243			48,3	
243	274			48,0	
335	366			48,0	
366	396			49,6	
396	427			48,7	
458	486			47,3	
1.096	1.126			45,2	23,5
1.126	1.157	7,9		41,2	18,7
1.157	1.188	10,6	41,1	46,9	25,8
1.188	1.216	16,0	47,3		27,6
1.216	1.247	16,5	47,5	51,7	25,2
1.247	1.277	13,7	41,1	50,1	25,8
1.277	1.308	11,6	46,0		
1.308	1.338	11,4		50,3	22,5
1.338	1.369	10,2	45,9	49,7	
1.369	1.400	8,5			
1.400	1.430	9,6			
1.430	1.461	8,9	44,6	49,0	
1.735	1.766	10,4			
1.857	1.888	9,7			
1.888	1.919	10,9			
1.919	1.947	11,5			
1.947	1.978	13,6			
1.978	2.008	12,8			
2.039	2.069	10,8			
2.069	2.100	9,9			
2.131	2.161	9,5			
2.161	2.192	9,6			
2.192	2.222	10,3	60,0		
2.222	2.253	12,2			
2.253	2.284	14,0	48,0		
2.284	2.312	16,8	47,0		
2.312	2.343	15,1	46,2		
2.343	2.373	13,9	46,6		
2.373	2.404	12,5	46,3		
2.404	2.434	10,9	45,9		
2.434	2.465	8,9	45,3		
2.465	2.496	9,7			
2.496	2.526	9,8			
2.526	2.557	10,1			

Πίνακας Δ.2 (δ): Δεδομένα γεωτρήσεων παρατήρησης.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		T23	ΓΦ4	MN	IH01
2.557	2.587	11,1			
2.618	2.649	17,7		53,4	
2.649	2.677	16,0		51,2	
2.677	2.708			49,7	
2.708	2.738	14,1		49,8	
2.738	2.769	12,4		49,8	
2.769	2.799	10,4		49,4	
2.799	2.830	9,5		49,1	
2.830	2.861	8,8		48,9	
2.861	2.891	8,6		49,0	
2.891	2.922	8,4		48,5	
2.922	2.952	9,1		47,9	
2.952	2.983	9,6		47,7	
2.983	3.014	15,5		51,8	
3.043	3.074	19,9			
3.074	3.104	17,2		50,0	
3.135	3.165	11,8		49,2	
3.165	3.196	10,3		49,3	
3.196	3.227	9,4		48,4	
3.257	3.288	9,4		48,2	
3.288	3.318	9,9		48,6	
3.408	3.439	24,2		54,8	
3.439	3.469	18,8			
3.469	3.500	15,2		51,0	
3.500	3.530	12,1		50,2	
3.530	3.561	9,9		49,9	
3.561	3.592	9,1		49,6	
3.592	3.622	8,8		49,7	
3.622	3.653	9,5		49,9	
3.714	3.745	12,4		49,5	
3.834	3.865	12,3		50,2	
4.444	4.475	14,1			
Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		K4	K6	K8	IH12
1.096	1.126				6,6
1.126	1.157				2,5
1.157	1.188				8,1
1.188	1.216				13,9
1.216	1.247				14,8

Πίνακας Δ.2 (ε): Δεδομένα γεωτρήσεων παρατήρησης.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		K4	K6	K8	IH12
1.400	1.430	8,9			
1.430	1.461	7,5	8,0		
1.704	1.735			11,1	
1.735	1.766	17,4		8,8	
1.766	1.796			8,6	
1.796	1.827		6,4	7,9	
1.827	1.857			7,5	
1.857	1.888	5,7		6,6	
1.888	1.919	5,7		7,8	
1.919	1.947	7,2	7,9	8,2	
1.947	1.978	10,1	10,4	10,5	
1.978	2.008	9,3	9,4	9,7	
2.008	2.039	8,2		9,4	
2.039	2.069	7,6		8,5	
2.069	2.100	6,6		7,4	
2.131	2.161	6,2		7,3	
2.161	2.192	6,0		7,4	
2.192	2.222	8,1		8,0	
2.222	2.253	7,9		8,4	
2.253	2.284	8,1		8,5	
2.284	2.312	15,1		12,8	
2.312	2.343	10,7		11,2	
2.343	2.373	9,9		11,2	
2.373	2.404	7,6		9,4	
2.404	2.434	6,7		8,3	
2.434	2.465	6,2		7,7	
2.465	2.496			7,3	
2.496	2.526	5,2		7,5	
2.526	2.557	4,1		7,6	
2.557	2.587	7,3		11,2	
2.618	2.649	16,0		15,9	
2.649	2.677			13,6	
2.708	2.738			11,4	
2.738	2.769	8,0		9,9	
2.769	2.799			8,0	
2.799	2.830			7,2	
2.830	2.861	5,6		6,7	
2.861	2.891	4,5		6,5	
2.891	2.922	3,9		5,9	
2.922	2.952	4,0		6,2	

Πίνακας 4.2 (στ): Δεδομένα γεωτρήσεων παρατήρησης.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Απόλυτη στάθμη (m)			
		K4	K6	K8	IH12
2.952	2.983	4,3		7,0	
2.983	3.014			11,4	
3.043	3.074	16,9		15,6	
3.074	3.104	11,4		14,1	
3.135	3.165	6,5		8,9	
3.165	3.196	5,9			
3.196	3.227	4,7		6,8	
3.257	3.288	4,2		6,3	
3.288	3.318	4,4		6,6	3,6
3.408	3.439	18,2		21,7	
3.439	3.469	13,4		16,6	
3.469	3.500	9,9		12,9	
3.500	3.530	7,4		9,9	
3.530	3.561	5,9		7,8	
3.561	3.592	5,2		6,9	
3.592	3.622	4,9		6,5	
3.622	3.653	5,1		7,1	
3.714	3.745	7,3		9,1	
3.834	3.865			9,9	
3.926	3.957			6,5	
4.444	4.475			12,8	

Πίνακας 4.3 (α): Τιμές παροχής, στάθμης λίμνης και συγκέντρωσης χλωριόντων στην πηγή Αλμυρού, ανηγμένες σε μηνιαία βάση.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Παροχή (m ³ /day)	Στάθμη λίμνης (m)	Χλωριόντα (ppm)
0	30	423.749	3,1	4.287
30	61	602.640	3,4	3.088
61	92	604.800	4,5	1.633
92	121	549.158	5,6	1.413
121	152	1.014.596	6,6	108
152	182	644.587	5,4	1.430
182	213	492.178	4,9	2.570
213	243	483.110	5,0	3.293
243	274	441.850	4,7	3.727
274	305	343.526	4,6	3.996
305	335	413.683	3,2	4.215
335	366	374.242	3,6	3.165
366	396	749.578	4,0	1.676
396	427	816.533	3,3	2.538
427	458	758.246	4,7	1.762
458	486	957.139	4,6	1.722
486	517	1.026.720	4,9	800
517	547	673.125	5,3	2.305
547	578	494.770	3,3	3.653
578	608	489.888	3,2	4.212
608	639	417.744	3,1	4.464
639	670	419.040	3,1	4.600
670	700	347.393	3,0	4.714
700	731	369.835	3,1	4.510
731	761	335.578	3,0	3.843
761	792	575.597	4,1	3.001
792	823	561.168	4,2	3.298
823	851	1.098.086	6,6	924
851	882	505.613	6,1	3.332
882	912	418.723	6,0	3.951
912	943	385.114	6,0	4.427
943	973	361.670	5,9	4.815
973	1.004	438.992	5,9	4.824
1.004	1.035	388.215	5,9	4.898
1.035	1.065	375.674	5,9	5.178
1.065	1.096	403.742	5,9	5.287
1.096	1.126	527.325	4,7	4.970
1.126	1.157	816.533	5,9	3.711

Πίνακας 4.3 (β): Τιμές παροχής, στάθμης λίμνης και συγκέντρωσης χλωριόντων στην πηγή Αλμυρού, ανηγμένες σε μηνιαία βάση.

Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Παροχή (m ³ /day)	Στάθμη λίμνης (m)	Χλωριόντα (ppm)
1.157	1.188	971.563	6,3	1.875
1.188	1.216	1.088.055	6,6	501
1.216	1.247	1.014.596	6,2	1.518
1.247	1.277	673.125	4,0	2.923
1.277	1.308	538.797	6,2	4.000
1.308	1.338	483.110	6,2	4.260
1.338	1.369	438.992	6,1	4.782
1.369	1.400	302.314	6,1	5.200
1.400	1.430	303.782	6,1	5.211
1.430	1.461	333.331	3,0	5.539
1.461	1.491	527.325	3,0	4.275
1.491	1.522	761.443	4,6	714
1.522	1.553	971.563	5,2	
1.553	1.582	1.166.314	5,7	735
1.582	1.613	1.503.187	6,8	248
1.613	1.643	673.125	5,8	965
1.643	1.674	538.797	5,7	2.833
1.674	1.704	483.110	5,6	3.955
1.704	1.735	556.027	5,7	4.278
1.735	1.766	407.722	5,7	4.685
1.766	1.796	353.462	5,5	4.782
1.796	1.827	403.742	5,6	4.978
1.827	1.857	305.942	4,2	5.174
1.857	1.888	406.166	4,7	3.808
1.888	1.919	619.920	4,6	2.157
1.919	1.947	882.922	5,5	1.606
1.947	1.978	1.014.596	6,9	1.333
1.978	2.008	673.125	5,3	2.751
2.008	2.039	538.797	6,8	2.201
2.039	2.069	483.110	6,6	4.075
2.069	2.100	438.992	7,6	4.483
2.100	2.131	388.215	6,6	4.739
2.131	2.161	375.674	7,0	5.078
2.161	2.192	313.286	6,5	5.237
2.192	2.222	309.658	6,5	4.689
2.222	2.253	1.214.611	6,8	2.305
2.253	2.284	805.334	6,9	1.278
2.284	2.312	1.088.055	7,7	59

Πίνακας 4.3 (γ): Τιμές παροχής, στάθμης λίμνης και συγκέντρωσης χλωριόντων στην πηγή Αλμυρού, ανηγμένες σε μηνιαία βάση.

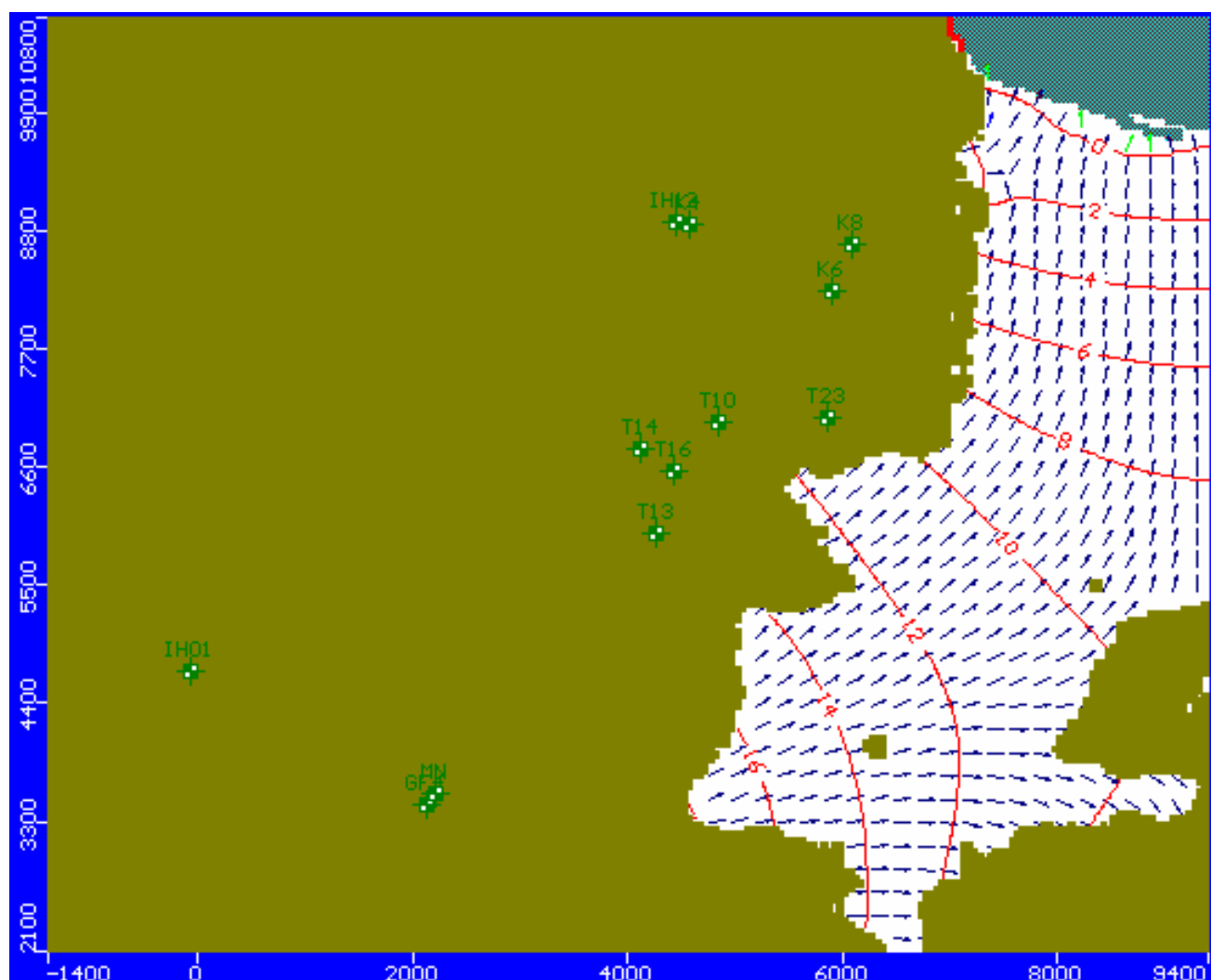
Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Παροχή (m ³ /day)	Στάθμη λίμνης (m)	Χλωριόντα (ppm)
2.312	2.343	1.014.596	6,9	1.698
2.343	2.373	673.125	5,3	2.068
2.373	2.404	455.501	6,7	3.585
2.404	2.434	483.110	6,6	4.169
2.434	2.465	438.992	6,6	4.677
2.465	2.496	388.215	6,6	4.819
2.496	2.526	375.674	6,6	5.005
2.526	2.557	403.742	6,5	4.500
2.557	2.587	527.325	6,7	3.302
2.587	2.618	816.533	4,7	
2.618	2.649	971.563	5,2	
2.649	2.677	1.088.055	6,1	
2.677	2.708	1.014.596	6,3	
2.708	2.738	673.125	5,3	
2.738	2.769	538.797	5,6	
2.769	2.799	483.110	5,6	
2.799	2.830	438.992	5,7	
2.830	2.861	388.215	5,5	
2.861	2.891	375.674	5,5	
2.891	2.922	403.742	4,7	
2.922	2.952	527.325	4,4	
2.952	2.983	816.533	4,7	
2.983	3.014	971.563	5,2	
3.014	3.043	1.088.055	6,1	
3.043	3.074	1.014.596	6,3	
3.074	3.104	673.125	5,3	
3.104	3.135	538.797	5,6	
3.135	3.165	483.110	5,6	
3.165	3.196	438.992	5,7	
3.196	3.227	388.215	5,5	
3.227	3.257	375.674	5,5	
3.257	3.288	403.742	4,7	
3.288	3.318	527.325	4,4	
3.318	3.349	816.533	4,7	
3.349	3.380	971.563	5,2	
3.380	3.408	1.088.055	6,1	
3.408	3.439	1.014.596	6,3	
3.439	3.469	673.125	5,3	

Πίνακας 4.3 (δ): Τιμές παροχής, στάθμης λίμνης και συγκέντρωσης χλωριόντων στην πηγή Αλμυρού, ανηγμένες σε μηνιαία βάση.

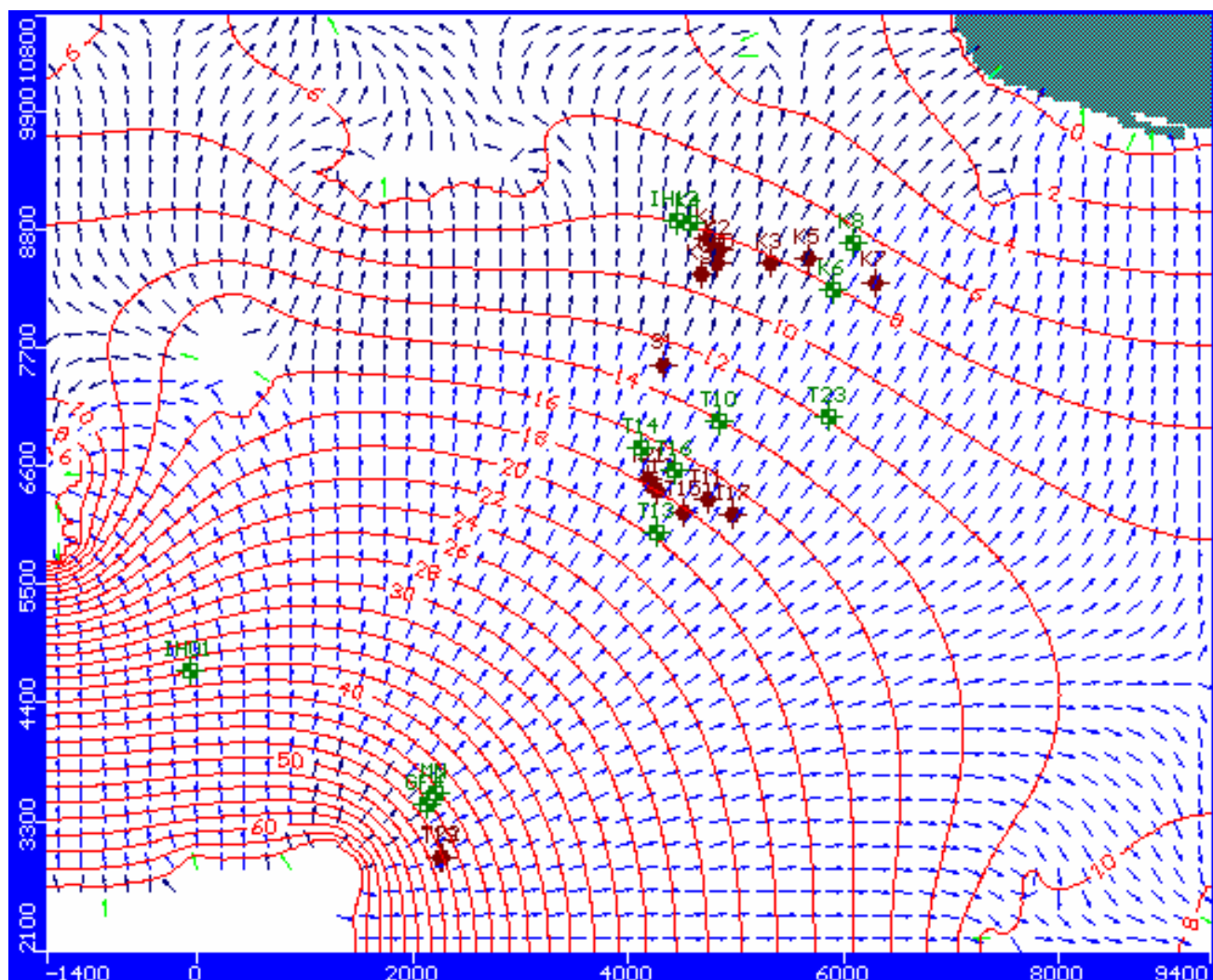
Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Παροχή (m ³ /day)	Στάθμη λίμνης (m)	Χλωριόντα (ppm)
3.469	3.500	538.797	5,6	
3.500	3.530	483.110	5,6	
3.530	3.561	438.992	5,7	
3.561	3.592	388.215	5,5	
3.592	3.622	375.674	5,5	
3.622	3.653	403.742	4,7	
3.653	3.683	527.325	4,4	
3.683	3.714	816.533	4,7	
3.714	3.745	971.563	5,2	
3.745	3.773	1.088.055	6,1	
3.773	3.804	1.014.596	6,3	
3.804	3.834	673.125	5,3	
3.834	3.865	538.797	5,6	
3.865	3.895	483.110	5,6	
3.895	3.926	438.992	5,7	
3.926	3.957	388.215	5,5	
3.957	3.987	375.674	5,5	
3.987	4.018	403.742	4,7	
4.018	4.048	527.325	4,4	
4.048	4.079	816.533	4,7	
4.079	4.110	971.563	5,2	
4.110	4.138	1.088.055	6,1	
4.138	4.169	1.014.596	6,3	
4.169	4.199	673.125	5,3	
4.199	4.230	538.797	5,6	
4.230	4.260	483.110	5,6	
4.260	4.291	438.992	5,7	
4.291	4.322	388.215	5,5	
4.322	4.352	375.674	5,5	
4.352	4.383	403.742	4,7	
4.383	4.413	527.325	4,4	
4.413	4.444	816.533	4,7	
4.444	4.475	971.563	5,2	
4.475	4.504	1.088.055	6,1	
4.504	4.535	1.014.596	6,3	
4.535	4.565	673.125	5,3	
4.565	4.596	538.797	5,6	
4.596	4.626	483.110	5,6	

Πίνακας 4.3 (ε): Τιμές παροχής, στάθμης λίμνης και συγκέντρωσης χλωριόντων στην πηγή Αλμυρού, ανηγμένες σε μηνιαία βάση.

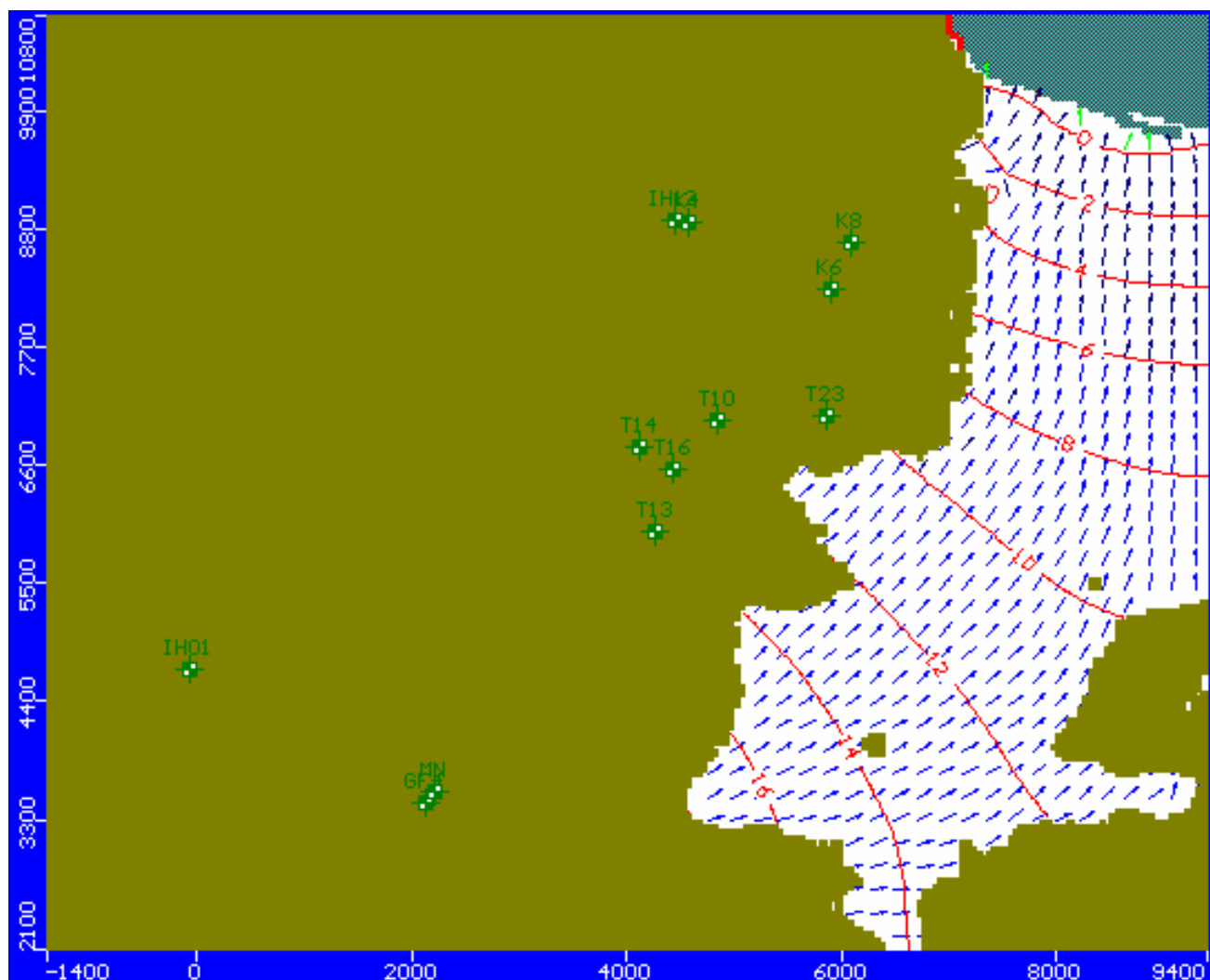
Ημέρα έναρξης της παρατήρησης	Ημέρα λήξης της παρατήρησης	Παροχή (m ³ /day)	Στάθμη λίμνης (m)	Χλωριόντα (ppm)
4.626	4.657	438.992	5,7	
4.657	4.688	388.215	5,5	
4.688	4.718	375.674	5,5	
4.718	4.749	403.742	4,7	



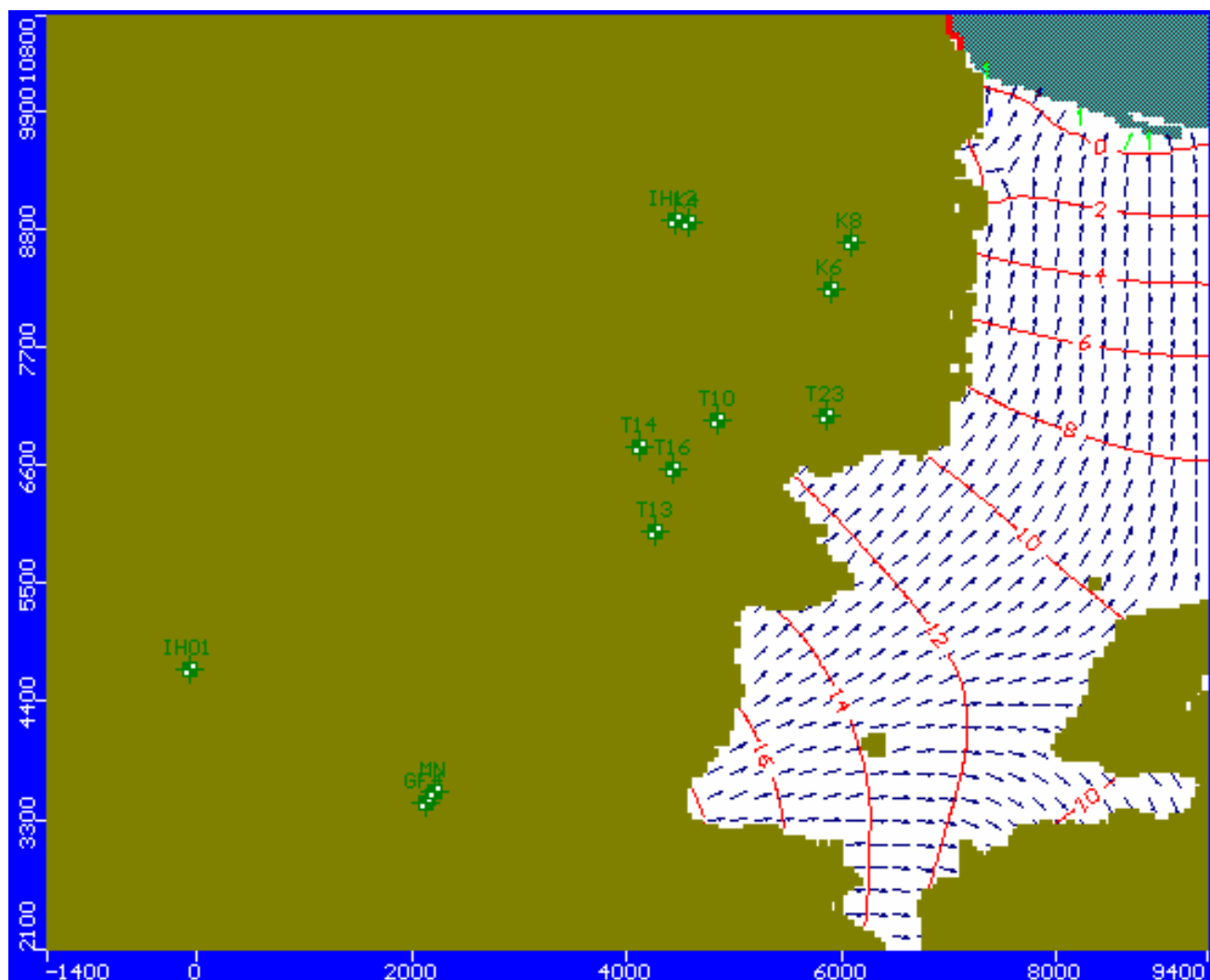
Σχήμα Ε.1: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 1^ο στρώμα.



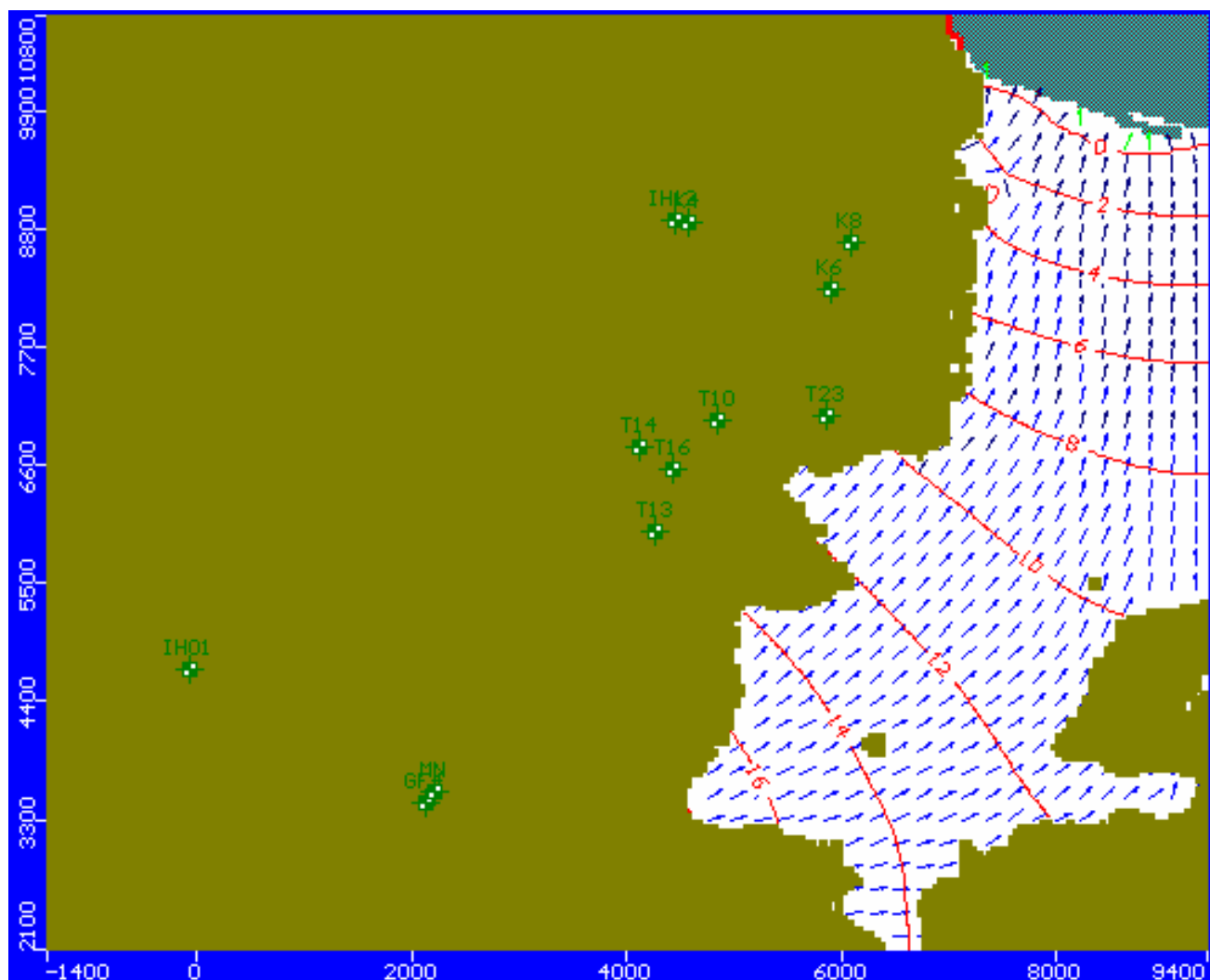
Σχήμα E.2: Μοντέλο σταθερής κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 4^ο στρώμα.



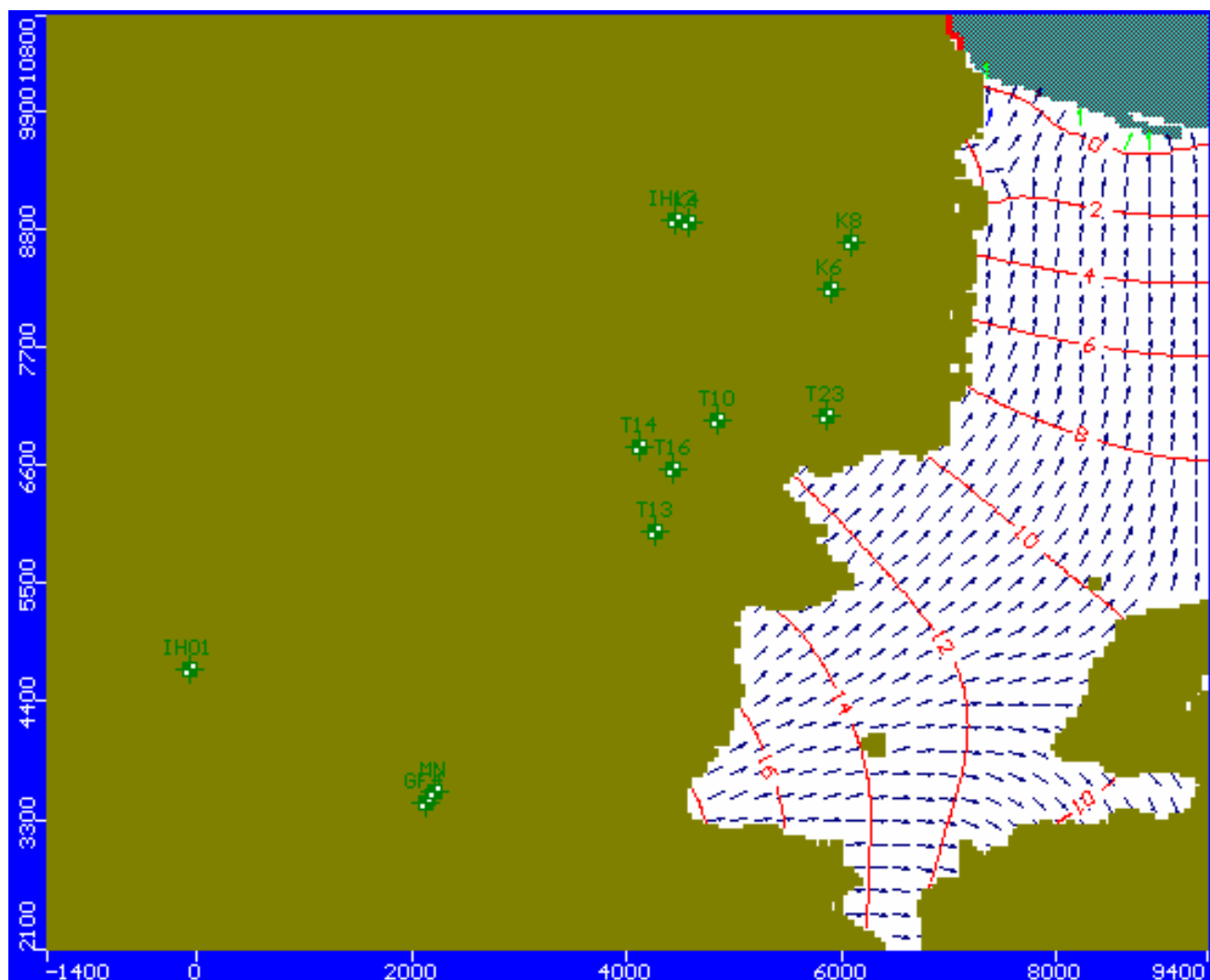
Σχήμα Ε.3: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 1^ο στρώμα, στην 8^η περίοδο τάσης.



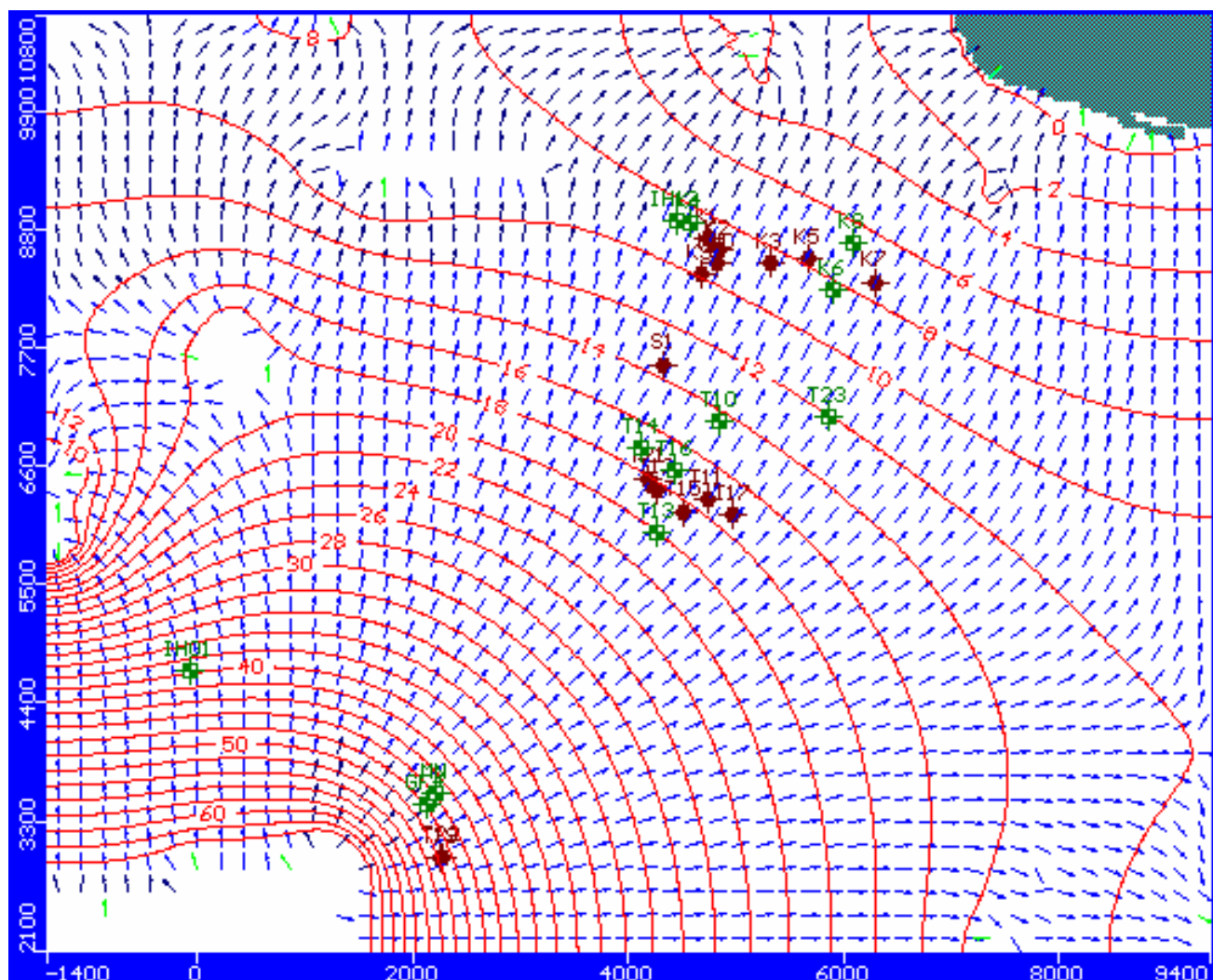
Σχήμα Ε.4: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 1^ο στρώμα, στην 93^η περίοδο τάσης.



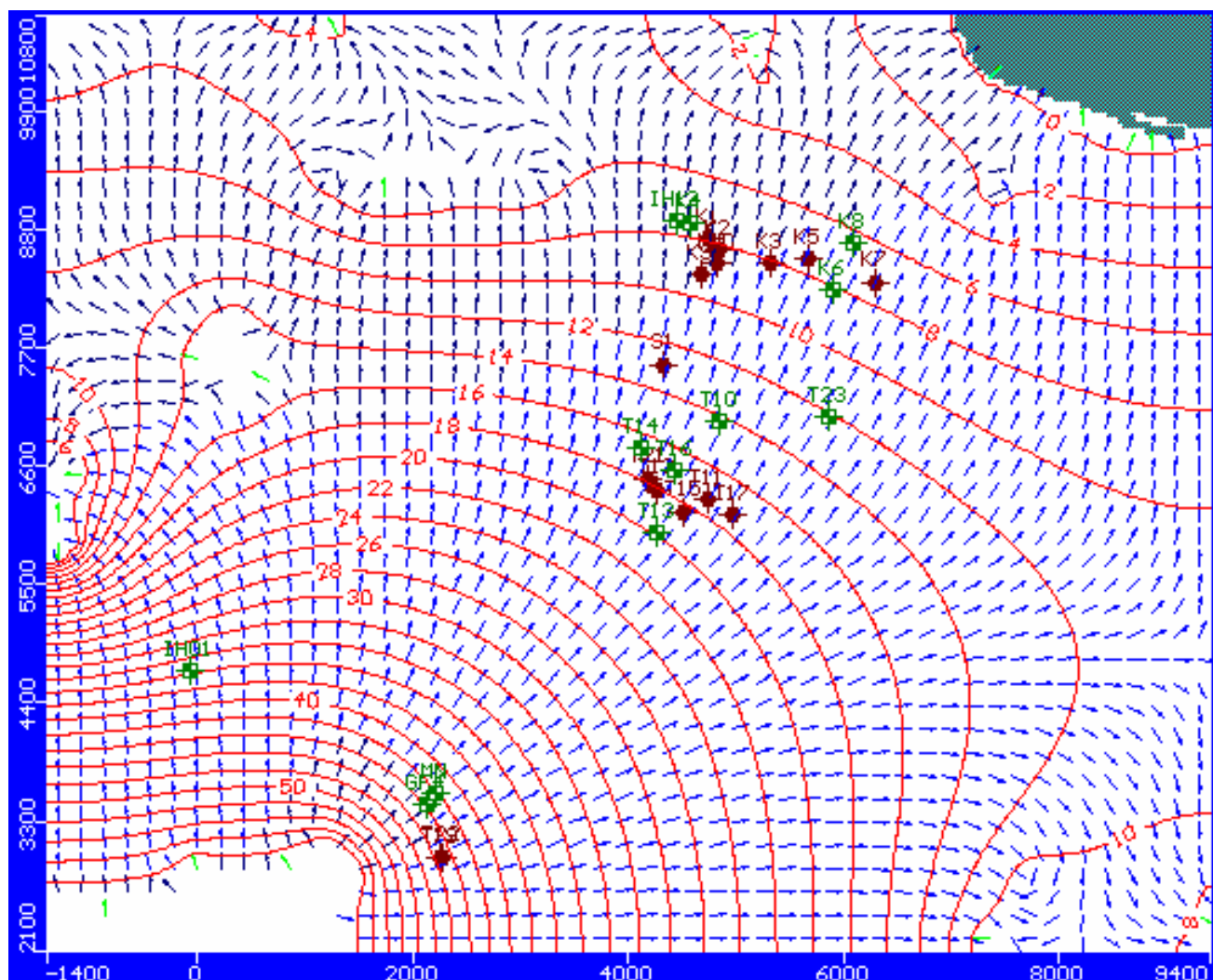
Σχήμα Ε.5: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 1^ο στρώμα, στην 147^η περίοδο τάσης.



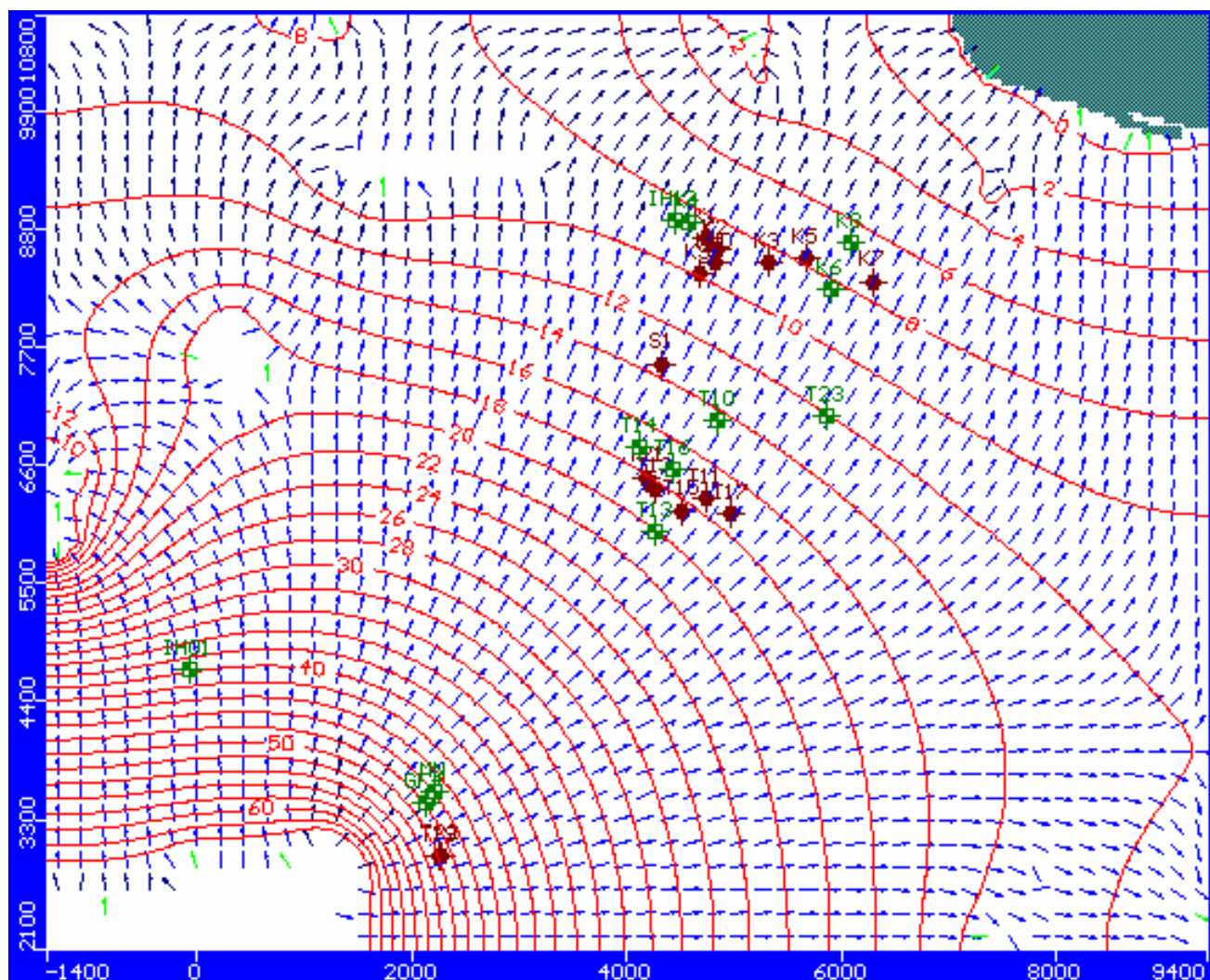
Σχήμα Ε.6: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 1^ο στρώμα, στην 153^η περίοδο τάσης.



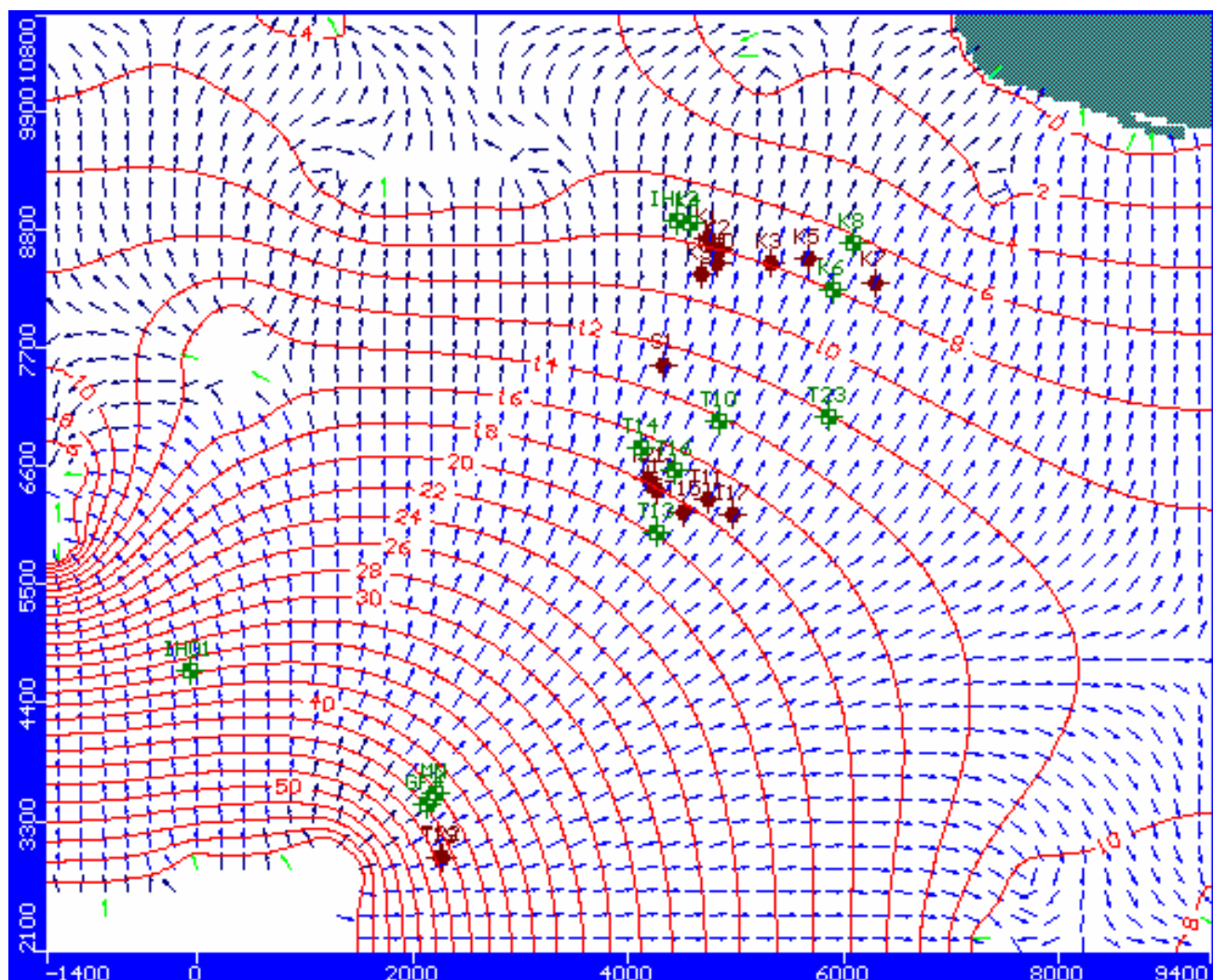
Σχήμα Ε.7: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 4^ο στρώμα, στην 87^η περίοδο τάσης.



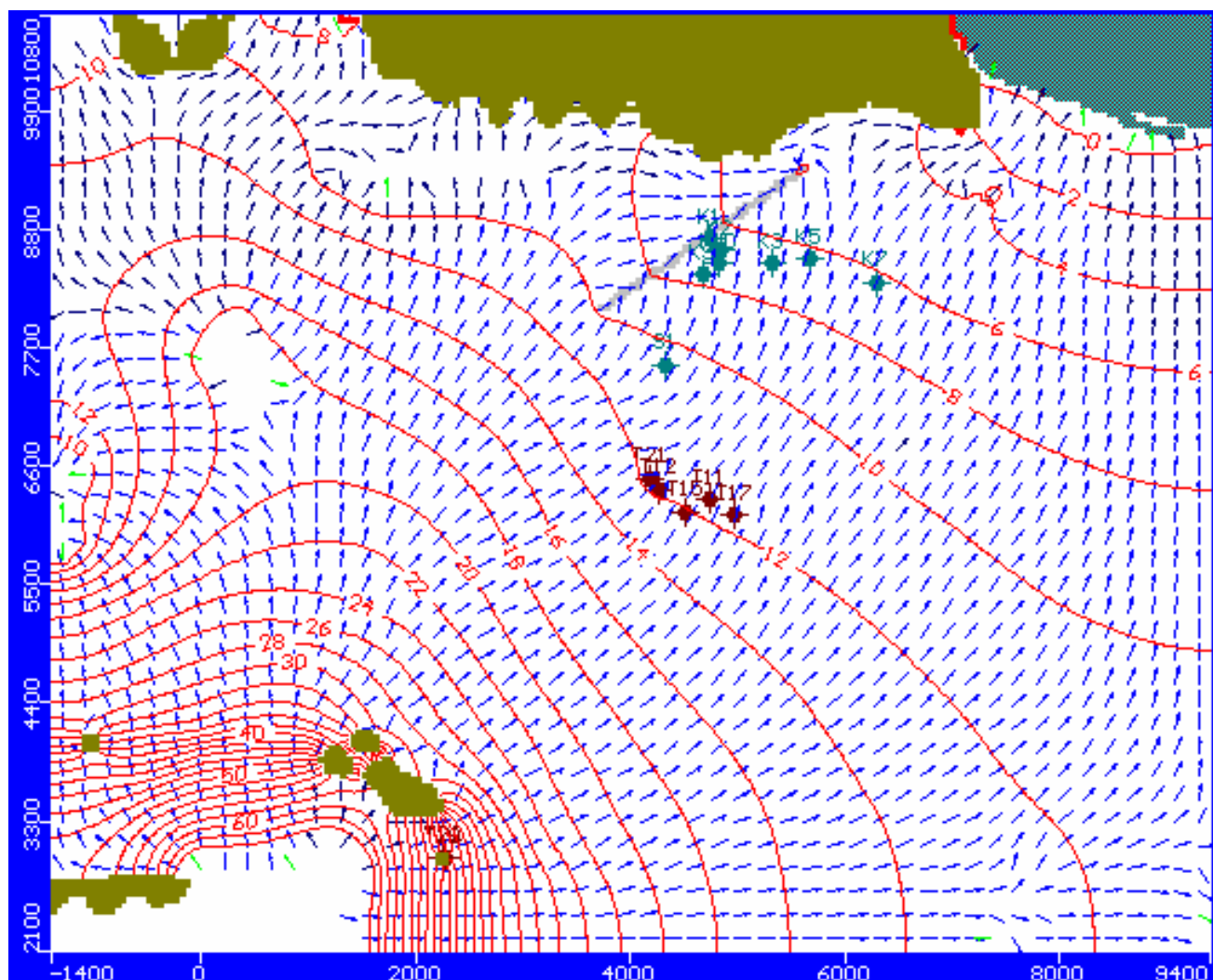
Σχήμα Ε.8: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 4^ο στρώμα, στην 93^η περίοδο τάσης.



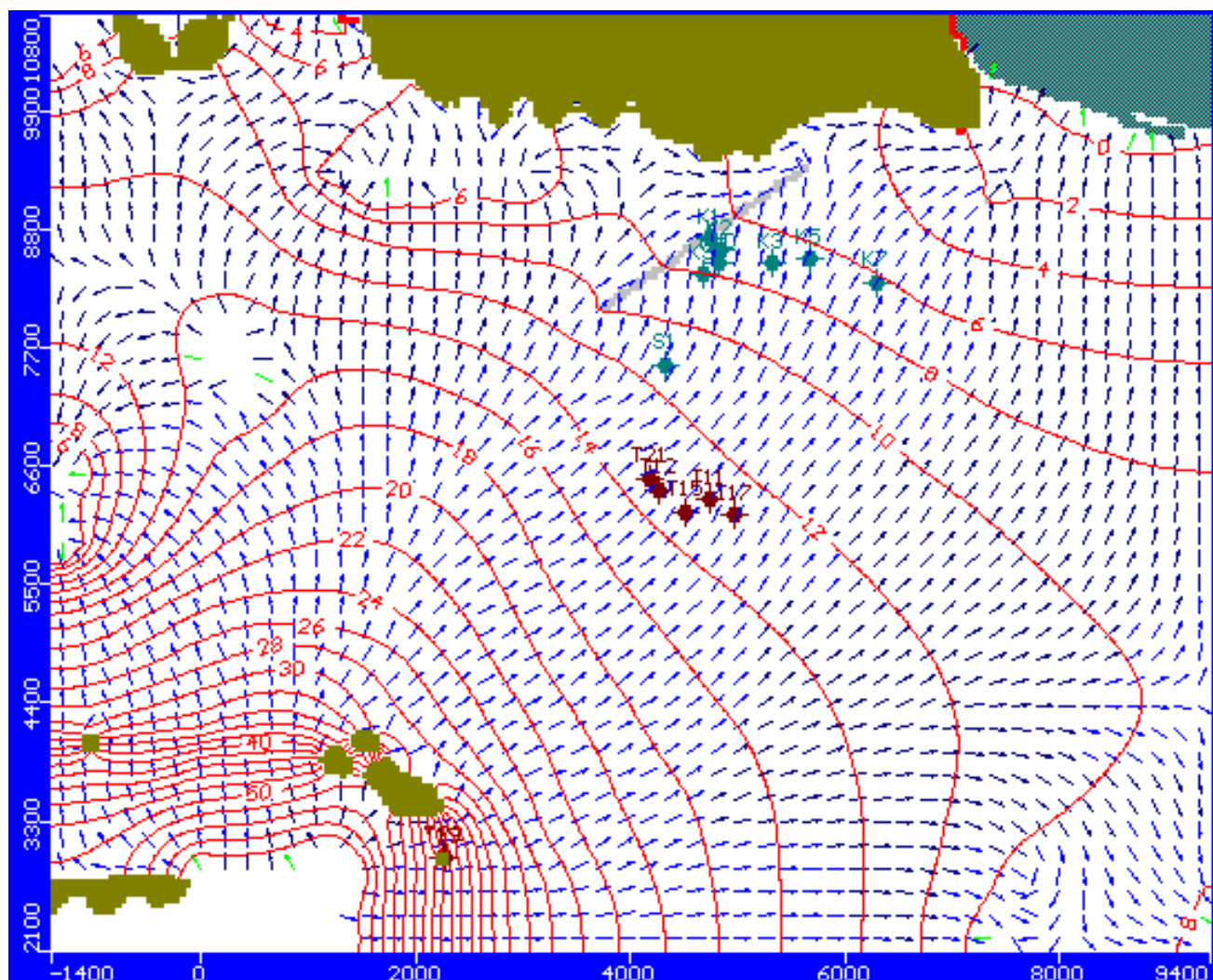
Σχήμα Ε.9: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 4^ο στρώμα, στην 147^η περίοδο τάσης.



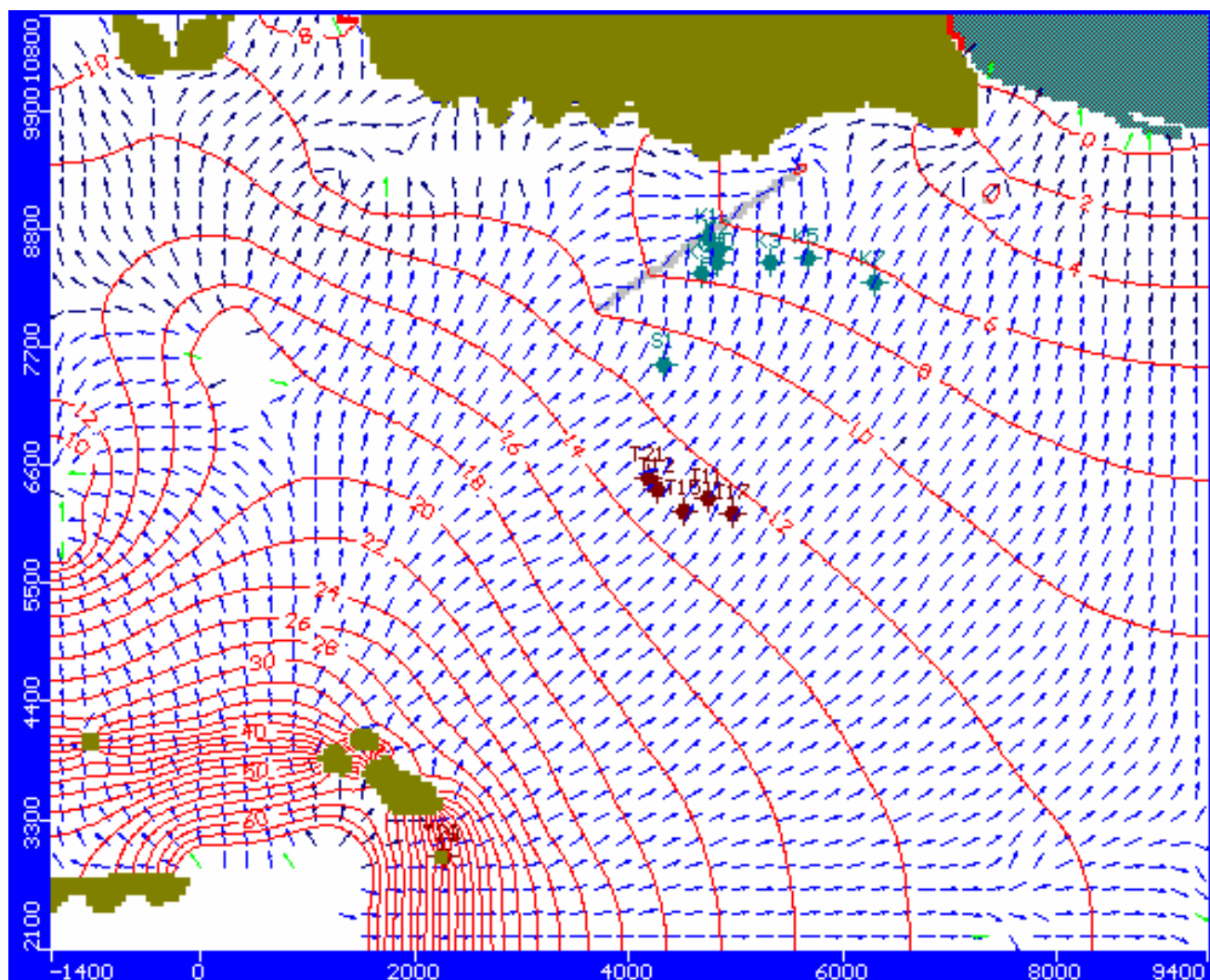
Σχήμα Ε.10: Μοντέλο μεταβαλλόμενης κατάστασης ροής: Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 4^ο στρώμα, στην 153^η περίοδο τάσης.



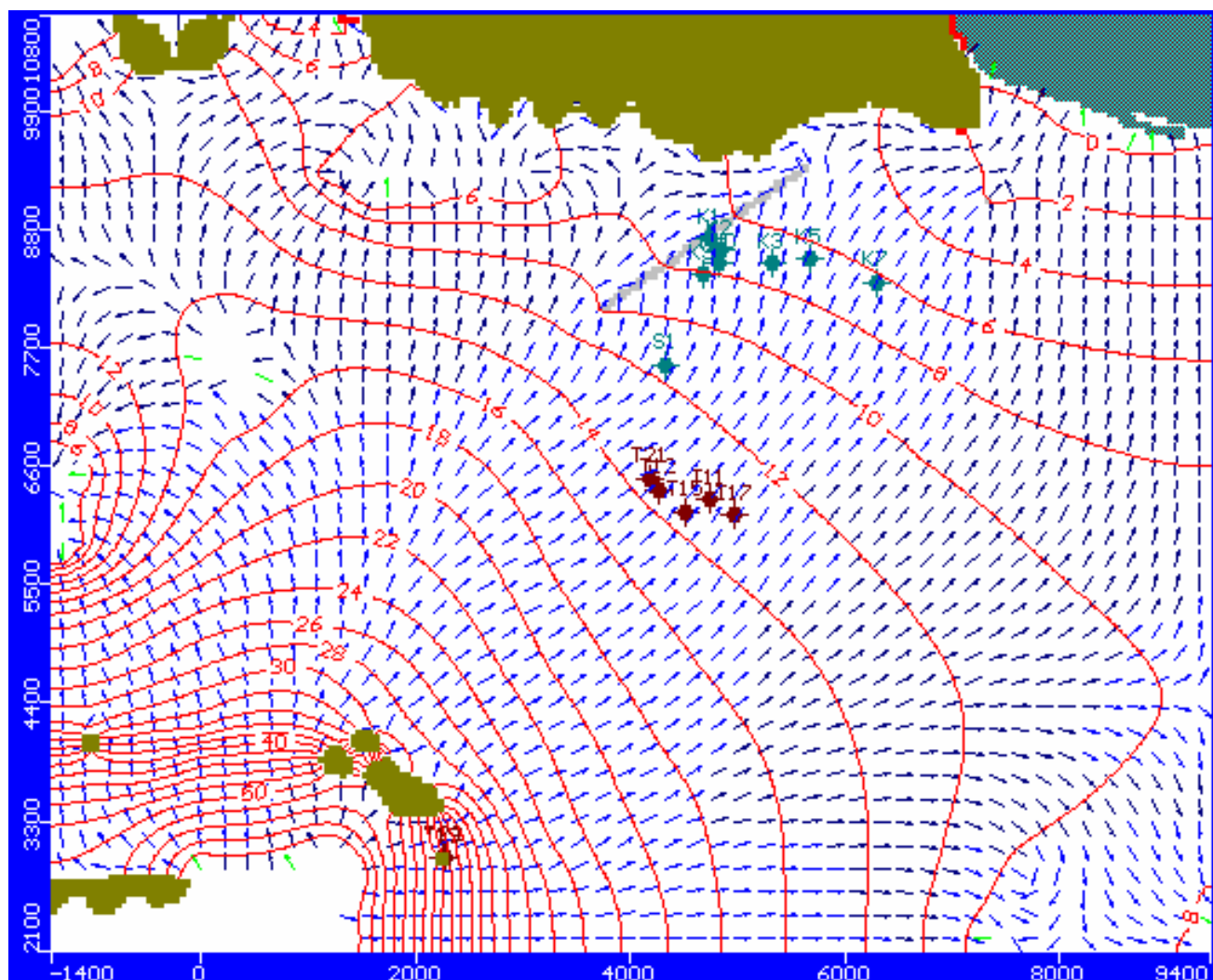
Σχήμα E.11: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 51^η περίοδο τάσης.



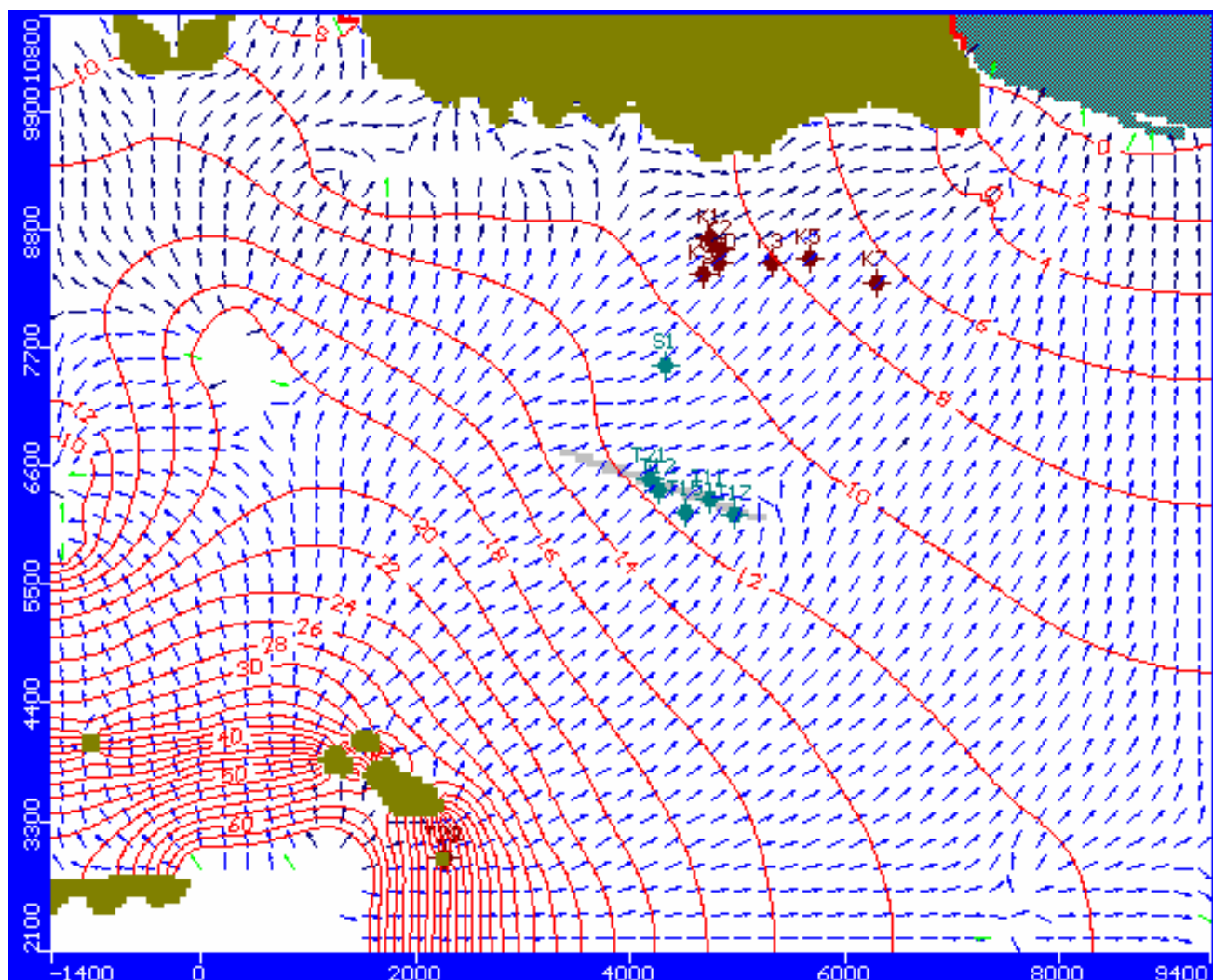
Σχήμα E.12: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 57^η περίοδο τάσης.



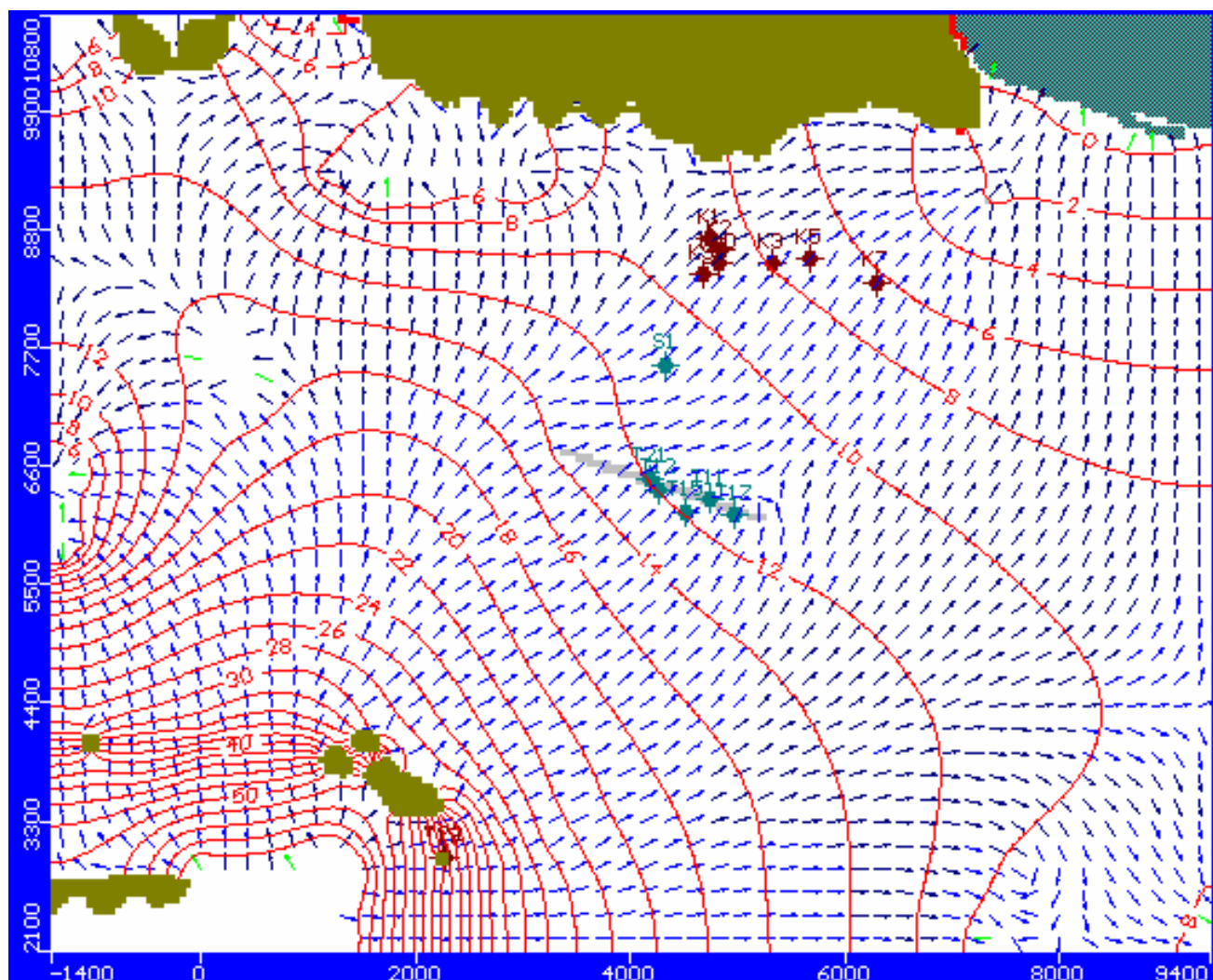
Σχήμα E.13: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 111^η περίοδο τάσης.



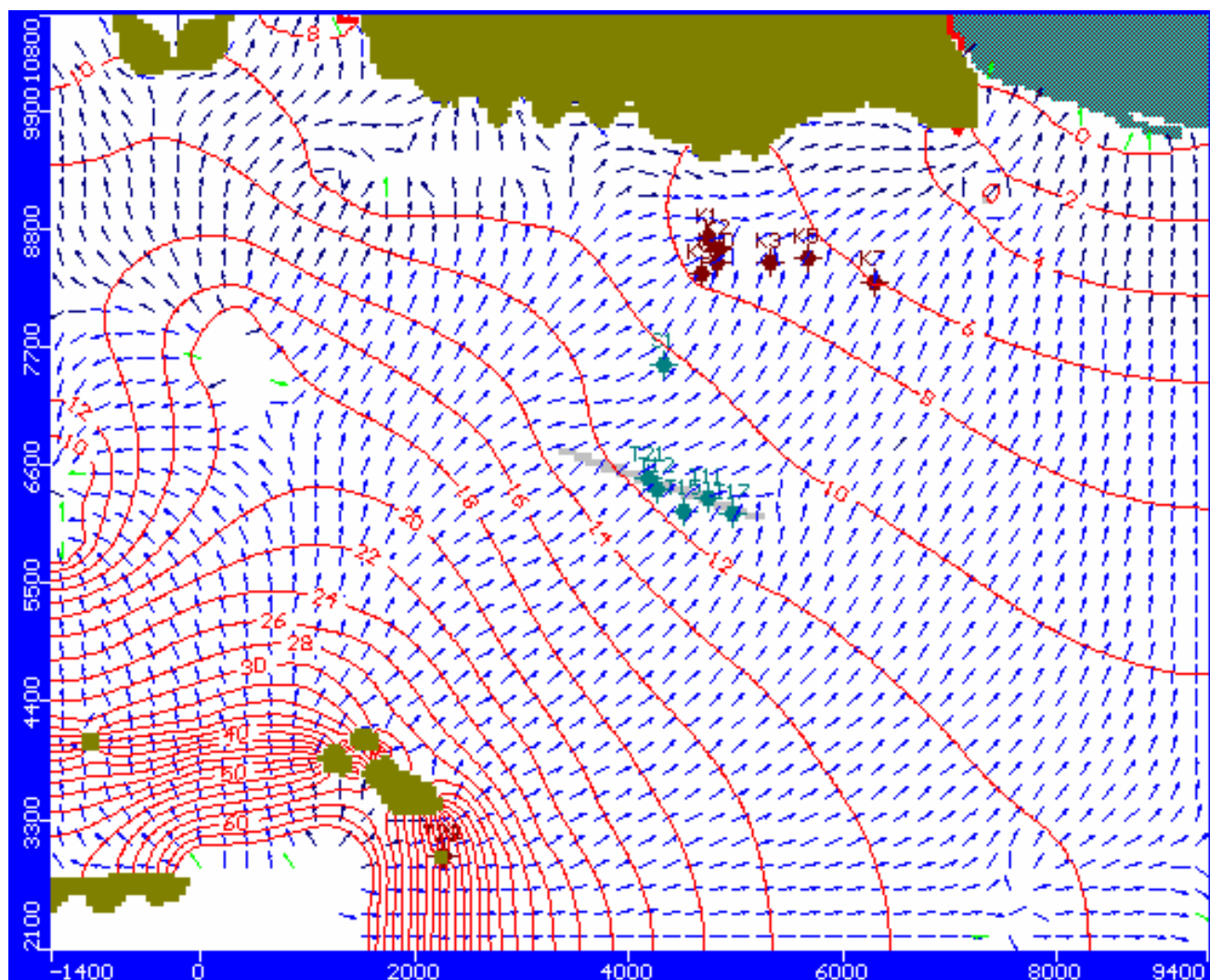
Σχήμα E.14: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο A1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 117^η περίοδο τάσης.



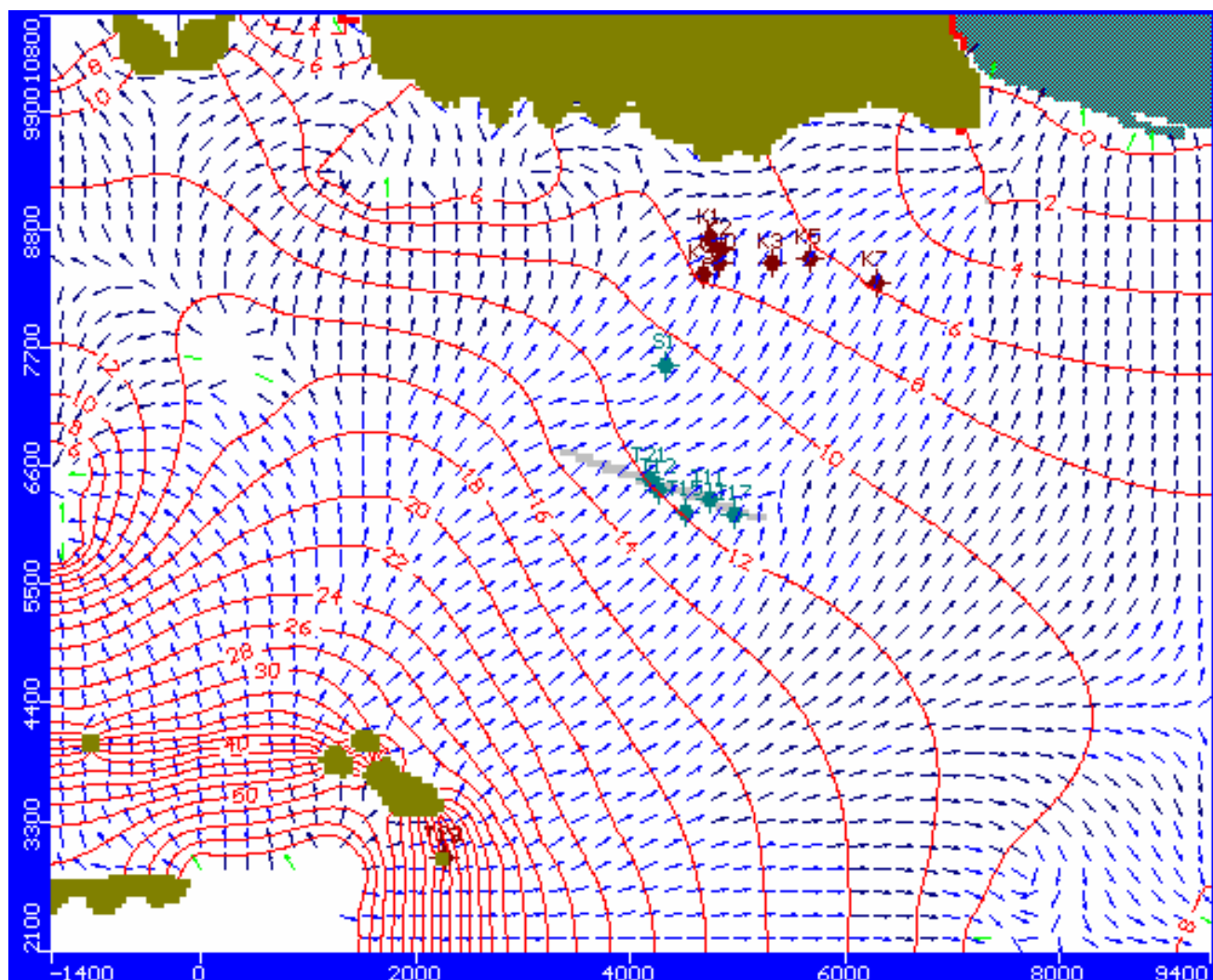
Σχήμα E.15: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 51^η περίοδο τάσης.



Σχήμα E.16: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 57^η περίοδο τάσης.



Σχήμα E.17: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 111^η περίοδο τάσης.



Σχήμα E.18: Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο B1): Χάρτης ισοπιεζομετρικών καμπυλών και διανυσμάτων ροής στο 2^ο στρώμα, στην 117^η περίοδο τάσης.

Πίνακας Ε.1 (α): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Α): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	A1: Δh = 3 m	A2: Δh = 5 m
1	20.151	32.332
2	16.147	25.649
3	14.809	23.951
4	15.213	24.162
5	14.840	23.730
6	14.269	23.118
7	13.854	22.659
8	14.030	23.174
9	14.083	22.765
10	13.859	22.817
11	13.504	22.107
12	14.099	22.652
13	17.770	26.204
14	15.884	24.362
15	15.765	24.281
16	15.394	23.949
17	14.806	23.412
18	14.449	23.068
19	13.890	22.512
20	14.008	22.591
21	13.773	22.322
22	13.697	22.212
23	13.481	21.978
24	13.464	21.947
25	17.012	25.388
26	15.260	23.688
27	15.699	24.168
28	14.671	23.192
29	13.900	22.476
30	13.884	22.475
31	13.447	22.047
32	13.804	22.366
33	13.639	22.171
34	13.643	22.143
35	13.437	21.921
36	13.721	22.191
37	17.513	25.877
38	16.124	24.540
39	16.118	24.580

Πίνακας Ε.1 (β): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Α): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	A1: Δh = 3 m	A2: Δh = 5 m
40	15.521	24.030
41	14.816	23.384
42	14.515	23.100
43	13.917	22.512
44	14.040	22.599
45	13.612	22.142
46	13.521	22.020
47	13.296	21.779
48	13.673	22.141
49	17.436	25.799
50	16.086	24.500
51	16.240	24.700
52	16.391	24.893
53	15.334	23.900
54	14.668	23.253
55	13.998	22.592
56	14.275	22.831
57	13.932	22.460
58	13.764	22.262
59	13.520	22.202
60	13.458	21.928
61	16.744	25.111
62	15.193	23.611
63	15.388	23.851
64	15.198	23.707
65	14.716	23.283
66	14.460	23.045
67	13.879	22.473
68	14.011	22.569
69	13.721	22.249
70	13.694	22.192
71	13.341	21.823
72	13.333	21.803
73	17.910	26.267
74	16.206	24.622
75	16.040	24.502
76	15.517	24.025
77	14.824	23.390
78	14.396	22.981

Πίνακας Ε.1 (γ): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Α): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	A1: Δh = 3 m	A2: Δh = 5 m
79	13.845	22.439
80	14.026	22.584
81	13.740	22.269
82	13.712	22.210
83	13.492	21.974
84	13.766	22.234
85	17.550	25.913
86	16.156	24.570
87	16.144	24.605
88	15.544	24.052
89	14.836	23.402
90	14.531	23.116
91	13.931	22.525
92	14.052	22.610
93	13.754	22.283
94	13.722	22.220
95	13.500	21.982
96	13.772	22.241
97	17.556	25.918
98	16.161	24.575
99	16.148	24.609
100	15.600	24.108
101	14.866	23.433
102	14.553	23.138
103	13.949	22.543
104	14.068	22.625
105	13.767	22.296
106	13.733	22.231
107	13.509	21.991
108	13.780	22.249
109	17.563	25.925
110	16.166	24.580
111	16.153	24.614
112	15.551	24.060
113	14.842	23.409
114	14.537	23.121
115	13.936	22.530
116	14.056	22.614
117	13.758	22.286

Πίνακας Ε.1 (δ): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Α): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	A1: Δh = 3 m	A2: Δh = 5 m
118	13.725	22.223
119	13.503	21.984
120	13.774	22.243
121	17.558	25.920
122	16.162	24.576
123	16.150	24.611
124	15.548	24.057
125	14.840	23.406
126	14.534	23.119
127	13.934	22.528
128	14.055	22.612
129	13.756	22.285
130	13.724	22.222
131	13.502	21.983
132	13.774	22.242
133	17.557	25.919
134	16.161	24.576
135	16.149	24.610
136	15.548	24.056
137	14.839	23.406
138	14.534	23.119
139	13.934	22.528
140	14.054	22.612
141	13.756	22.285
142	13.724	22.222
143	13.501	21.983
144	13.774	22.242
145	17.557	25.919
146	16.161	24.575
147	16.149	24.610
148	15.601	24.108
149	14.867	23.433
150	14.554	23.139
151	13.947	22.541
152	14.060	22.618
153	13.753	22.282
154	13.711	22.209
155	13.480	21.961
156	13.551	22.021

Πίνακας Ε.2 (α): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Β): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	B1: Δh = 3 m	B2: Δh = 5 m
1	36.311	60.860
2	29.610	48.844
3	26.916	44.503
4	25.404	42.023
5	24.405	40.334
6	23.323	38.779
7	22.826	37.929
8	21.756	36.582
9	21.249	35.829
10	21.243	35.640
11	20.988	35.221
12	21.536	35.657
13	23.930	37.936
14	23.619	37.555
15	23.009	36.910
16	22.492	36.378
17	22.188	36.066
18	21.598	35.476
19	22.028	35.890
20	21.171	35.023
21	20.764	34.579
22	20.735	34.530
23	20.712	34.470
24	20.534	34.269
25	23.152	36.853
26	22.893	36.587
27	22.472	36.181
28	21.971	35.701
29	21.481	35.237
30	20.939	34.720
31	21.474	35.256
32	20.732	34.520
33	20.447	34.210
34	20.499	34.253
35	20.557	34.282
36	20.504	34.213
37	23.293	36.973
38	23.246	36.923
39	22.872	36.567

Πίνακας Ε.2 (β): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Β): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

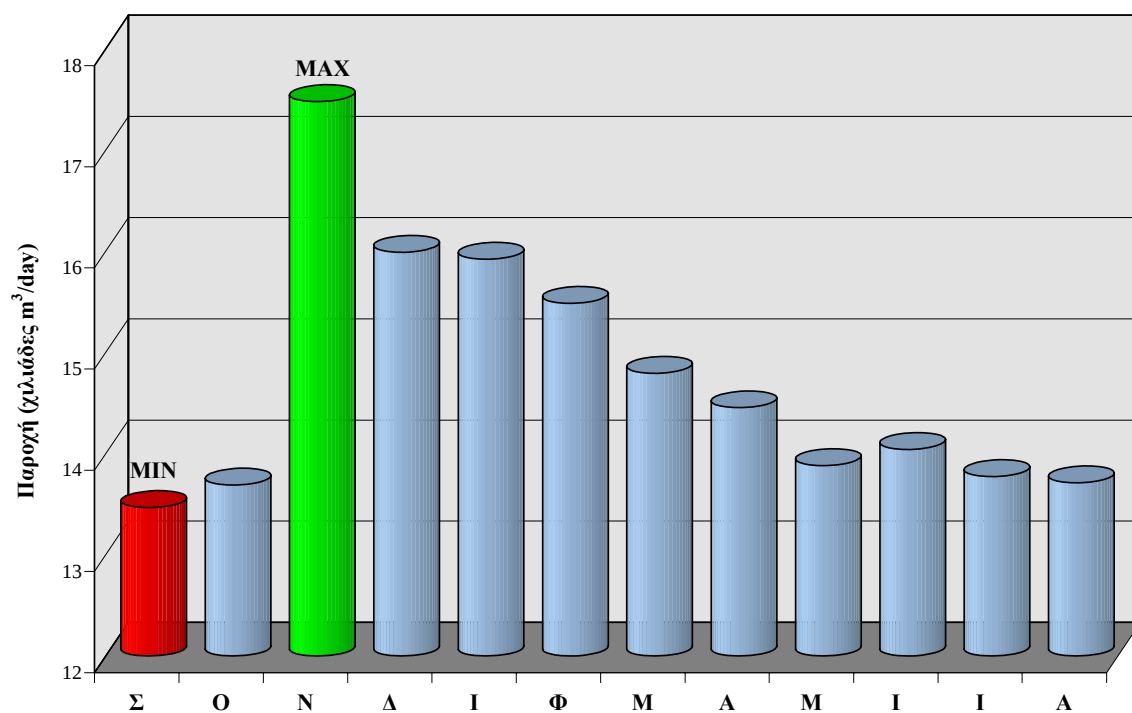
Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	B1: Δh = 3 m	B2: Δh = 5 m
40	22.417	36.135
41	22.099	35.845
42	21.531	35.304
43	21.984	35.761
44	21.135	34.920
45	20.693	34.454
46	20.612	34.364
47	20.591	34.315
48	20.513	34.221
49	23.291	36.970
50	23.230	36.906
51	22.900	36.594
52	22.763	36.480
53	22.561	36.305
54	21.852	35.624
55	22.201	35.979
56	21.338	35.123
57	20.934	34.697
58	20.851	34.604
59	20.810	34.534
60	20.608	34.316
61	23.129	36.808
62	22.832	36.508
63	22.374	36.070
64	21.999	35.717
65	21.829	35.575
66	21.348	35.121
67	21.855	35.632
68	21.039	34.823
69	20.655	34.415
70	20.645	34.397
71	20.630	34.354
72	20.436	34.143
73	23.316	36.994
74	23.378	37.054
75	22.893	36.588
76	22.429	36.147
77	22.113	35.858
78	21.510	35.283

Πίνακας Ε.2 (γ): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Β): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

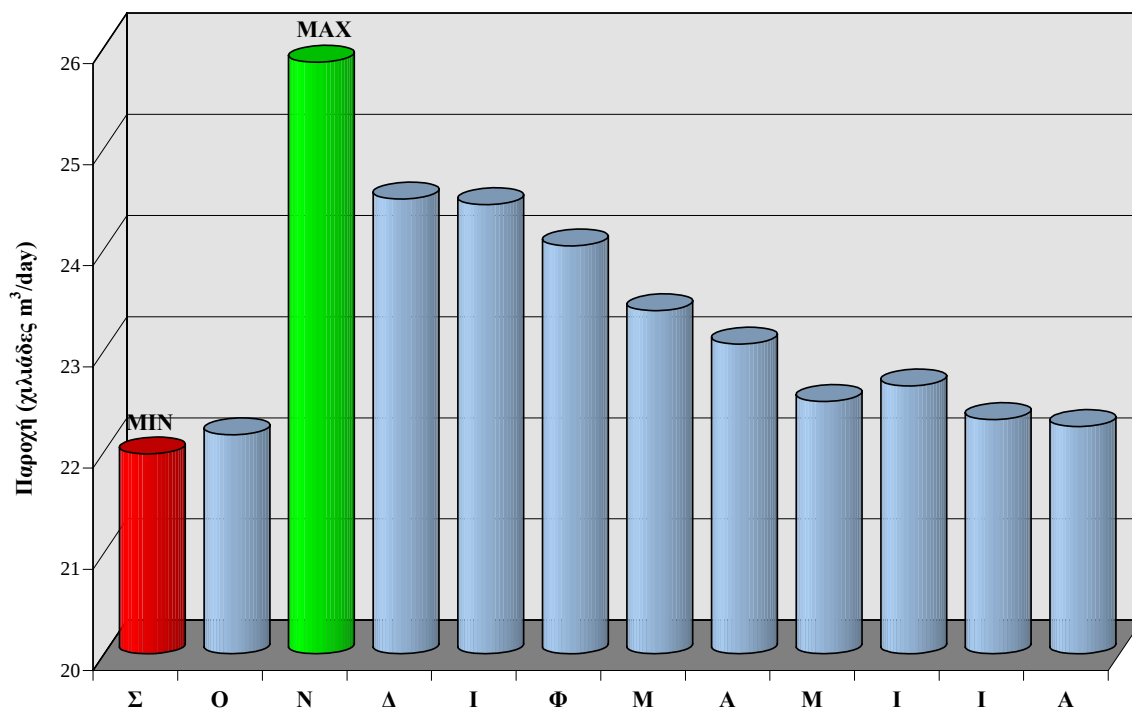
Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	B1: Δh = 3 m	B2: Δh = 5 m
79	21.935	35.713
80	21.104	34.889
81	20.709	34.471
82	20.690	34.442
83	20.702	34.426
84	20.616	34.323
85	23.381	37.060
86	23.315	36.991
87	22.927	36.621
88	22.462	36.179
89	22.135	35.881
90	21.559	35.332
91	22.007	35.784
92	21.153	34.938
93	20.742	34.503
94	20.713	34.466
95	20.720	34.443
96	20.630	34.337
97	23.392	37.070
98	23.324	36.999
99	22.933	36.628
100	22.571	36.289
101	22.219	35.965
102	21.627	35.400
103	22.060	35.838
104	21.196	34.981
105	20.775	34.537
106	20.740	34.492
107	20.740	34.464
108	20.646	34.354
109	23.405	37.084
110	23.334	37.010
111	22.942	36.636
112	22.474	36.192
113	22.145	35.890
114	21.567	35.340
115	22.013	35.790
116	21.158	34.943
117	20.746	34.507

Πίνακας Ε.2 (δ): Μοντέλο πρόβλεψης (σενάριο Β): Υπολογισμένες παροχές υδρομαστευτικής στοάς.

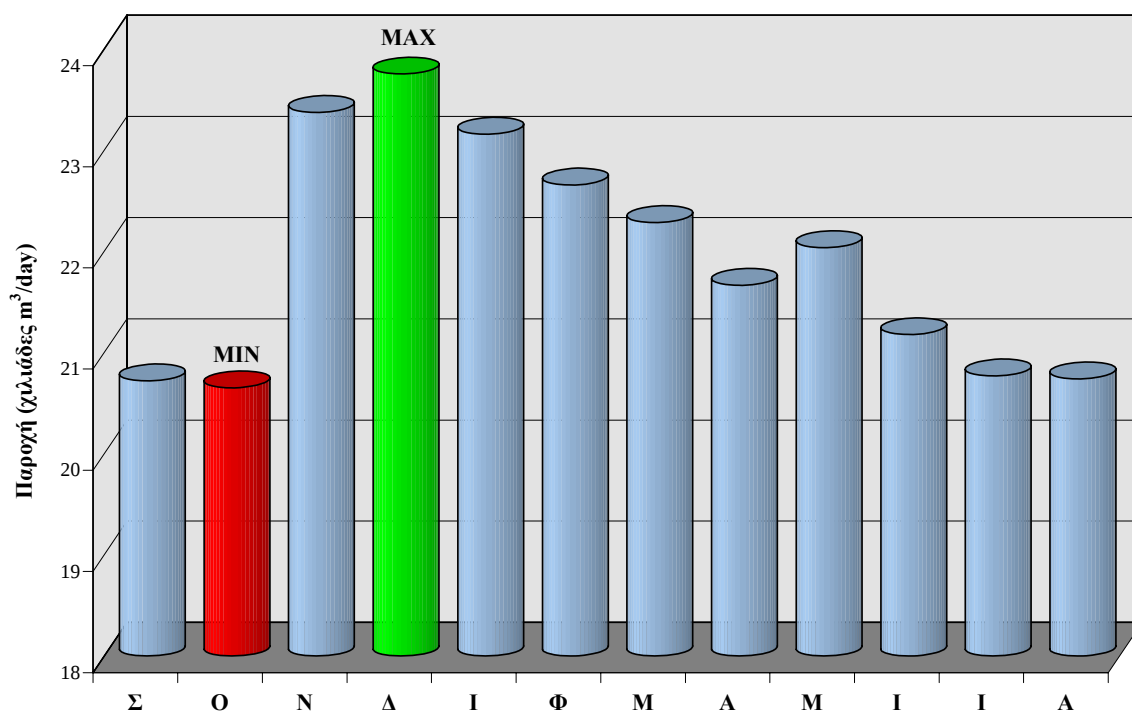
Περίοδος τάσης	Παροχή (m ³ /day)	
	B1: Δh = 3 m	B2: Δh = 5 m
118	20.716	34.469
119	20.722	34.446
120	20.632	34.339
121	23.393	37.072
122	23.325	37.001
123	22.934	36.629
124	22.468	36.186
125	22.140	35.885
126	21.563	35.336
127	22.010	35.787
128	21.156	34.940
129	20.744	34.505
130	20.715	34.467
131	20.721	34.445
132	20.631	34.338
133	23.392	37.071
134	23.324	37.000
135	22.934	36.629
136	22.467	36.185
137	22.140	35.885
138	21.563	35.336
139	22.009	35.787
140	21.156	34.940
141	20.744	34.505
142	20.715	34.467
143	20.721	34.445
144	20.631	34.338
145	23.392	37.071
146	23.324	37.000
147	22.934	36.629
148	22.572	36.289
149	22.220	35.965
150	21.627	35.400
151	22.060	35.837
152	21.193	34.978
153	20.768	34.529
154	20.725	34.477
155	20.717	34.441
156	20.543	34.251



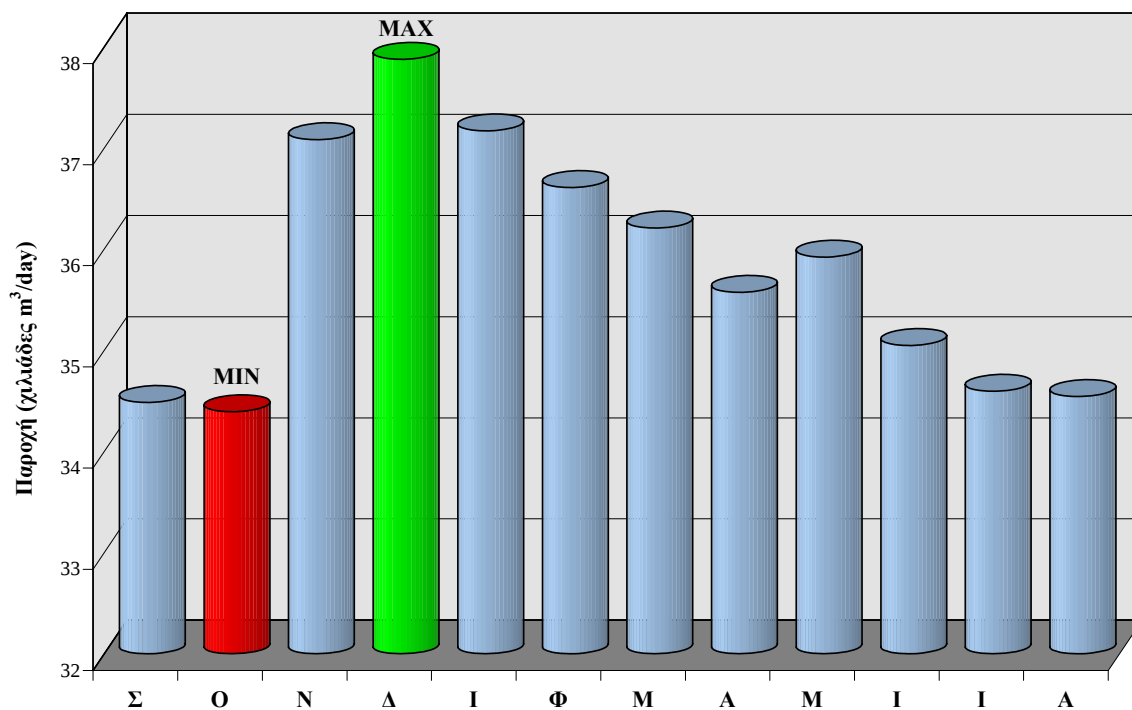
Σχήμα E.19: Σενάριο A1 – Ιστόγραμμα μηνιαίας διακύμανσης παροχών (μέσο υδρολογικό έτος) στην υδρομαστευτική στοά.



Σχήμα E.20: Σενάριο A2 – Ιστόγραμμα μηνιαίας διακύμανσης παροχών (μέσο υδρολογικό έτος) στην υδρομαστευτική στοά.



Σχήμα E.21: Σενάριο B1 – Ιστόγραμμα μηνιαίας διακύμανσης παροχών (μέσο υδρολογικό έτος) στην υδρομαστευτική στοά.



Σχήμα E.22: Σενάριο B2 – Ιστόγραμμα μηνιαίας διακύμανσης παροχών (μέσο υδρολογικό έτος) στην υδρομαστευτική στοά.