

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Διπλωματική Εργασία:

**Προσομοίωση της Υπόγειας Ροής και Προσδιορισμός της Ζώνης
Υφαλμύρινσης στην Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης**

ΤΡΙΧΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)
ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Χανιά, Σεπτέμβριος 2004

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
Πρόλογος	4
Περίληψη	7
Κεφάλαιο 1	8
Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	8
1.1. Οι εξισώσεις του μοντέλου υπόγειας ροής	8
1.1.1. Εξισώσεις του συστήματος.....	8
Εξίσωση Boussinesq.....	11
Παραγωγή των Εξισώσεων του Συστήματος	12
Αριθμητικές Μέθοδοι	16
1.1.2. Οριακές Συνθήκες.....	18
1.1.2.1. Τύποι οριακών συνθηκών	18
1.1.3. Προσομοίωση ακόρεστης ζώνης	19
1.1.3.1. Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών	20
1.1.3.2. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων	21
1.1.4. Διαρροή.....	21
1.2. Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης υπόγειων υδροφορέων	23
1.2.1. Εισαγωγή	23
1.2.2. Μηχανισμοί της Υφαλμύρινσης	23
1.2.3. Αναχαίτιση της Υφαλμύρινσης	24
1.3. Οι εξισώσεις του μηχανισμού της υφαλμύρινσης	25
1.4. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία PTC και ο τρόπος που προσομοιώνει την τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπων	29
1.4.1. Οι Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου PTC	29
1.4.1.1. Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC.....	29
1.4.2. Τρισδιάστατη Ροή Υπογείων Υδάτων	30
1.4.2.1. Βασική Εξίσωση	30
1.4.2.2. Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	31
1.4.2.3. Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών	32
1.4.2.3.1. Η Κάθετη Παράγωγος.....	32
1.4.2.3.2. Η Παράγωγος του Χρόνου.....	32
1.4.2.4. Οριακές Συνθήκες.....	33
1.4.2.4.1. Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος.....	34
1.4.2.4.2. Καθορισμένη Ροή	34
1.4.2.4.3. Τρίτου Τύπου	34
1.4.2.5. Συνθήκες Υδροφόρου Ορίζοντα	35
1.4.3. Τρισδιάστατη Μεταφορά Ρύπου.....	37
1.4.3.1. Εξισώσεις του Συστήματος.....	37
1.4.3.2. Οριακές Συνθήκες.....	38

Κεφάλαιο 2	40
Στοιχεία Νομοθεσίας για τα Υπόγεια Ύδατα	40
2.1. Οδηγία 2000/60.....	40
2.1.1. Ορισμοί	40
2.1.2. Περιβαλλοντικοί στόχοι.....	42
2.1.3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II	43
2.1.4. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V	46
Κεφάλαιο 3	52
Σύντομη περιγραφή της περιοχής.....	52
3.1. Φυσικό Περιβάλλον.....	52
3.1.1. Μετεωρολογικά και κλιματικά στοιχεία.....	52
3.1.1.1. Γενικά για το κλίμα της Κρήτης	52
3.1.1.2. Ειδικά για την περιοχή μελέτης	53
3.1.2. Γεωλογικά χαρακτηριστικά - Έδαφος	54
3.1.2.1. Υδρογεωλογία της περιοχής	54
3.1.2.2. Σεισμικότητα της περιοχής	55
3.1.2.3. Εδάφη.....	55
3.1.3. Οικοσυστήματα - Χλωρίδα - Πανίδα - Φυτοκάλυψη	56
3.1.4. Φυσικό τοπίο.....	56
3.1.4.1. Γεωμορφολογία της περιοχής.....	56
3.1.4.2. Βλάστηση της περιοχής	56
Κεφάλαιο 4	57
Εισαγωγή και Επεξεργασία των Δεδομένων	57
4.1. Διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων της περιοχής στο μοντέλο	57
4.1.1. Βαθμονόμηση του μοντέλου.....	58
4.1.2. Οριακές συνθήκες.....	59
4.1.3. Βροχόπτωση.....	59
4.2. Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης – Περιγραφή Σεναρίων και Αποτελέσματα	60
Αρχική Κατάσταση – Προσομοίωση της Υπόγειας Ροής	66
Σενάριο 1ο.....	68
Σενάριο 2ο.....	71
Σενάριο 3ο.....	73
Σενάριο 4ο.....	76
Σενάριο 5ο.....	78
Σενάριο 6ο.....	81
Σενάριο 7ο.....	84
Σενάριο 8ο.....	87
Σενάριο 9ο.....	89
4.3. Συμπεράσματα – Προτάσεις	91
Βιβλιογραφία	93

Nihil agere delectat
Cicero

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν κατά τη σύνταξη αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα τον καθηγητή Γιώργο Καρατζά και τη Δρ. Μαρία Παπαδοπούλου καθώς και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής καθηγητές Νίκο Καλογεράκη και Νίκο Νικολαΐδη.

Πρόλογος

Από πολλούς ακούγεται ότι ο τέταρτος παγκόσμιος πόλεμος θα γίνει όχι για το πετρέλαιο αλλά για το νερό. Το σίγουρο είναι πάντως ότι το νερό δεν είναι ανεξάντλητο και σίγουρα το υψηλής ποιότητας γλυκό νερό είναι αρκετά δυσεύρετο και σε περιορισμένες ποσότητες. Σε πολλές χώρες του κόσμου υπάρχει ήδη πρόβλημα λειψυδρίας και ακόμα και το πόσιμο νερό είναι πολύ χαμηλής ποιότητας. Με τη διαθεσιμότητα του φυσικού αυτού πόρου συνεχώς να μειώνεται, σίγουρα θα χρειαστεί καλύτερη διαχείριση του και ελαχιστοποίηση της σπατάλης του για να μπορέσουν να καλυφθούν οι ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες και να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα της απευκαΐας κατάστασης που αναφέρθηκε παραπάνω. Επειδή τα αποθέματα νερού στους υπόγειους υδροφορείς είναι ένα πολύ σημαντικό ποσοστό των συνολικών αποθεμάτων γλυκού νερού δίνεται αρκετή προσοχή πλέον στη διαχείρισή του.

Με ολοένα και αυξανόμενη την προσοχή αυτή κρίνονται απαραίτητες πλέον μελέτες που να προσομοιώνουν υπόγειους υδροφορείς και να κάνουν προβλέψεις για τη μελλοντική κατάστασή τους. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται μοντέλα όπως το MODFLOW, το AQUIFEM, το PTC και άλλα. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσομοιώσουν την κίνηση του υπόγειου νερού καθώς επίσης και να προβλέψουν τη διασπορά ενός ρύπου μέσα στον υπόγειο υδροφορέα.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PTC για την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού και τον εντοπισμό του μετώπου της υφαλμύρισης. Μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου εξετάστηκαν σενάρια στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος εξυγίανσης του υπόγειου υδροφορέα. Σύμφωνα με αυτά γίνεται χρήση πηγαδιών για τον εμπλουτισμό και την εξυγίανση του υδροφορέα. Η τεχνική αυτή έχει εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα με επιτυχία σε αντίστοιχες περιπτώσεις στην Αυστραλία και σε άλλες χώρες.

Περίληψη

Η εργασία αυτή εξετάζει τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα διάφορα μοντέλα για να προσομοιωθούν η κίνηση του υπόγειου νερού και η μεταφορά των ρύπων μέσα σε αυτό. Μετά από μια γενική αναφορά στις διαφορετικές μεθόδους και στην πιο λεπτομερή ανάλυση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, αναλύεται το φαινόμενο της υφαλμύρινσης των υπόγειων υδροφορέων και γίνεται μια προσπάθεια μαθηματικής προσομοίωσής του. Κατόπιν αναφέρονται η μέθοδος που χρησιμοποιεί το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία (PTC – Princeton Transport Code) και στοιχεία για το μοντέλο αυτό.

Μετά από μια σύντομη περιγραφή της υπό μελέτη περιοχής (ΒΙ.ΠΕ. Ηρακλείου) με στοιχεία τόσο για το κλίμα (βροχοπτώσεις, ανεμολογικά στοιχεία) όσο και για την γεωλογία της περιοχής, δημιουργείται ένα μοντέλο της περιοχής και γίνεται βαθμονόμησή του με βάση στοιχεία που υπάρχουν για την περιοχή. Αφού βαθμονομηθεί το μοντέλο, παράγει ως αποτελέσματα τις τιμές που θα χρησιμοποιηθούν ως αρχικές για την εξέταση σεναρίων που σκοπό έχουν τη βελτίωση της κατάστασης και τον περιορισμό της ζώνης υφαλμύρινσης.

Για το σύνολο των σεναρίων που εξετάστηκαν η βασική αρχή πάνω στην οποία λειτουργούν είναι ότι αν σε έναν υπόγειο υδροφόρα στον οποίο το υδραυλικό ύψος έχει ταπεινωθεί αρκετά ώστε να έχει επιτραπεί η εισχώρηση αλμυρού νερού, προστεθούν πηγές εμπλουτισμού σε σημεία κατά μήκος της ακτής, το γλυκό νερό από τον εμπλουτισμό θα δημιουργήσει μια τοπική αύξηση του υδραυλικού ύψους και με αυτόν τον τρόπο θα σχηματιστεί ένα φράγμα που θα εμποδίζει την εισχώρηση του αλμυρού στην ενδοχώρα.

Από τα σενάρια που εξετάστηκαν καλύτερα αποτελέσματα έδωσαν εκείνα τα οποία προέβλεπαν τη διάνοιξη τεσσάρων με έξι πηγαδιών κατά μήκος της ακτής τα οποία βοηθούν την αντιστροφή του φαινομένου και τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρα. Επειδή όμως η περιοχή είναι μικρή και οι απαιτήσεις σε νερό των πιο αποτελεσματικών σεναρίων είναι μεγάλες, κρίνεται απαραίτητη η εκπόνηση ενός γενικού σχεδίου για το βόρειο νομό Ηρακλείου που θα προβλέπει όλες τις περιοχές με πρόβλημα υφαλμύρινσης και θα δίνει τη βέλτιστη λύση για το σύνολο της παράκτιας ζώνης.

Κεφάλαιο 1

Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1. Οι εξισώσεις του μοντέλου υπόγειας ροής

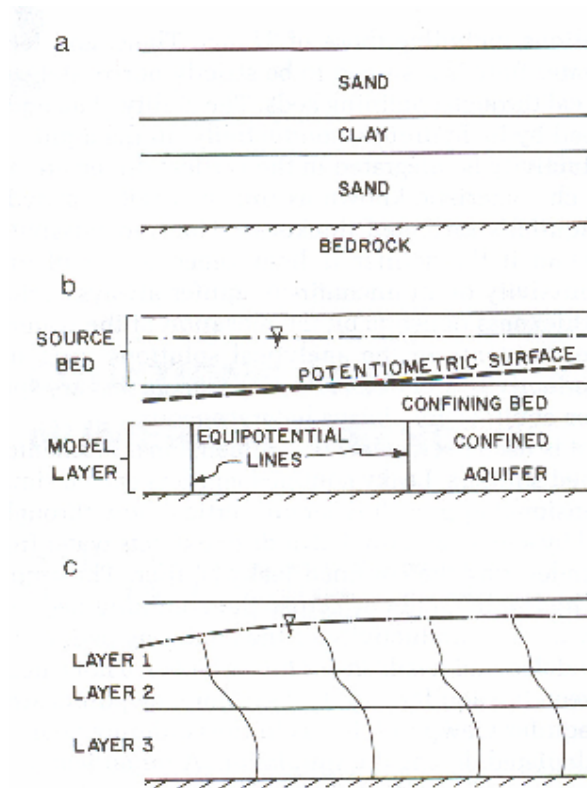
Μία πλήρης μαθηματική περιγραφή ενός μοντέλου περιλαμβάνει την εξίσωση, τις οριακές συνθήκες και τις αρχικές συνθήκες αν το πρόβλημα εξαρτάται από το χρόνο.

1.1.1. Εξισώσεις του συστήματος

Πριν τη διαφόριση μιας εξίσωσης του συστήματος υπάρχουν δύο θεωρήσεις για τα συστήματα υπόγειων υδάτων η θεώρηση υδροφορέα και η θεώρηση συστήματος ροής.

Η θεώρηση υδροφορέα βασίζεται στη λογική των περιορισμένων και ελεύθερων υδροφορέων. Ο υδροφορέας αποτελείται από πορώδες υλικό και με δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων ύδατος σε πηγάδια. Ο περιορισμένος υδροφορέας καλύπτεται από ένα περιοριστικό στρώμα πορώδους υλικού που καθυστερεί την κίνηση του ύδατος, ενώ ο ελεύθερος υδροφορέας έχει για πάνω όριό του τον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτή η θεώρηση βρίσκει εξαιρετική εφαρμογή στην περίπτωση ανάλυσης της ροής προς πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις όπως εκείνες των Thiem, Theis και Jacob. Σε

αυτή τη θεώρηση η ροή του υπόγειου ύδατος θεωρείται αυστηρά οριζόντια μεταξύ των υδροφορέων και αυστηρά κάθετη μεταξύ των περιοριστικών στρωμάτων. Η ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει ύδωρ περιγράφεται από την υδραυλική διαπερατότητά του. Η θεώρηση υδροφορέα υπολογίζει από το ολοκλήρωμα της διαπερατότητας στην κατακόρυφη διάσταση ένα χαρακτηριστικό μέγεθος γνωστό ως μεταβιβασιμότητα, που ισούται με το γινόμενο της διαπερατότητας επί το πάχος της κορεσμένης ζώνης. Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου ομογενούς και με σταθερό πάχος υδροφορέα είναι σταθερή ενώ αυτή ενός ελεύθερου υδροφορέα είναι πάντα μεταβλητή χωρικά αφού το πάχος της κορεσμένης ζώνης εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Βέβαια, αν και στις αναλυτικές λύσεις θεωρούνται σταθερές, τόσο η διαπερατότητα όσο και η μεταβιβασιμότητα είναι μεταβλητές χωρικά αφού οι υδροφορείς που συναντώνται στο πεδίο είναι πάντα ετερογενείς.



Σχήμα 1.1. Θεωρήσεις συστημάτων υπογείων υδάτων

- a. Γεωλογικό σύστημα
- b. Θεώρηση υδροφορέα
- c. Θεώρηση συστήματος ροής

(Πηγή: Anderson και Woessner, 1992)

Με χρήση αυτής της θεώρησης προσομοιώνονται συστήματα δισδιάστατης ροής σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς. Οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή μπορούν να προσομοιωθούν με μία ψευδο-τρισδιάστατη προσέγγιση στην οποία η κάθετη ροή μέσα από τα περιοριστικά στρώματα αντιπροσωπεύεται από έναν όρο διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί ποσότητα ύδατος από τους υποκείμενους ή υπερκείμενους υδροφορείς του περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή. Η ποσότητα της διαρροής εξαρτάται από την υδραυλική κλίση του περιορισμένου υδροφορέα καθώς και από το πάχος και την κάθετη διαπερατότητα του περιοριστικού στρώματος. Τα περιοριστικά στρώματα δεν είναι σαφώς προσομοιωμένα και η οριζόντια ροή σε αυτά δεν υπολογίζεται.

Η γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος για τη θεώρηση του υδροφορέα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (1.1)$$

όπου

$$L = -K'_z \frac{h_{\text{source}} - h}{b'}$$

Οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (1.1) αντιπροσωπεύουν οριζόντια ροή μέσω του υδροφορέα όπου h είναι το υδραυλικό ύψος (:) και T_x και T_y είναι οι συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας. Η τοποθέτηση των όρων T_x και T_y μέσα στα μερικά διαφορικά επιτρέπουν την χωρική μεταβολή τους (ετερογένεια), ενώ οι διαφορετικοί δείκτες για τις δύο διευθύνσεις επιτρέπει την εφαρμογή της εξίσωσης σε ανισότροπους υδροφορείς όπου $T_x \neq T_y$. Το S δηλώνει το συντελεστή αποθηκευτικότητας, το R είναι ένας όρος εμπλουτισμού ή άντλησης που στην εξίσωση θεωρείται θετικό (εμπλουτισμός). Αν συμβαίνει άντληση με ρυθμό W τότε στην εξίσωση πρέπει να τεθεί $R = -W$. Ο τελευταίος όρος στο δεξί μέρος της εξίσωσης (L) δηλώνει διαρροή από ένα περιοριστικό στρώμα όπου K'_z είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητά του, b' το πάχος του και h_{source} το υδραυλικό ύψος στο στρώμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος.

Κατά την εφαρμογή της (1.1) σε ελεύθερο υδροφορέα γίνονται οι παραδοχές Dupuit πως: (1) οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες και (2) η υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και ανεξάρτητη του βάθους. Είναι γνωστό ότι $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$, όπου h είναι η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα από τον πυθμένα του υδροφορέα, δηλαδή το κορεσμένο πάχος, και μπορεί να μεταβάλλεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Το S είναι η ειδική απόδοση και ο όρος της διαρροής συνήθως είναι μηδέν εκτός και εάν υπάρχει διαρροή από η προς κάποιο στρώμα κάτω από τον ελεύθερο υδροφορέα.

Από την εξίσωση (1.1) λείπει η συνιστώσα της μεταβιβασιμότητας στη διεύθυνση z . Αυτό οφείλεται στο ότι η μεταβιβασιμότητα στογκυλοποιείται στο μέσο όρο στην κάθετη διεύθυνση, αφού έχει θεωρηθεί ότι περιγράφεται η δισδιάστατη οριζόντια ροή

σε έναν υδροφορέα και έτσι δεν ορίζεται η μεταβιβασιμότητα στην διεύθυνση z. Η υδραυλική διαπερατότητα ωστόσο περιγράφει τις ιδιότητες της μεταβίβασης σε ένα σημείο του υδροφορέα και για το λόγο αυτό έχει συνιστώσες και στις τρεις διευθύνσεις.

Στην περίπτωση της θεώρησης συστήματος ροής δε χρειάζεται η ταυτοποίηση καθαρών των υδροφορέων και των περιοριστικών στρωμάτων αλλά η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο του συστήματος. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες συνιστώσες ροής στο σύστημα και έτσι επιτρέπει το χειρισμό της ροής είτε σαν δισδιάστατης είτε σε τρεις διαστάσεις. Μια γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (1.2)$$

όπου

K_x , K_y και K_z είναι οι συνιστώσες της υδραυλικής διαπερατότητας

S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα

R^* είναι ένας γενικός όρος εμπλουτισμού ή άντλησης που στην εξίσωση θεωρείται θετικό (εμπλουτισμός) και δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου. Για την προσομοίωση άντλησης $R^* = -W$. (Anderson και Woessner, 1992)

Εξίσωση Boussinesq

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν η εξίσωση (1.1) χρησιμοποιείται για προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων, λαμβάνεται συνήθως $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$ όπου h είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1.1) προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (1.3)$$

όπου το L είναι μηδέν και ο συντελεστής αποθήκευσης είναι ίσος με την ειδική αποθηκευτικότητα.

Επειδή όμως ισχύει και ότι:

$$\frac{\partial h^2}{\partial x} = 2h \frac{\partial h}{\partial x}$$
$$\frac{\partial h^2}{\partial y} = 2h \frac{\partial h}{\partial y}$$

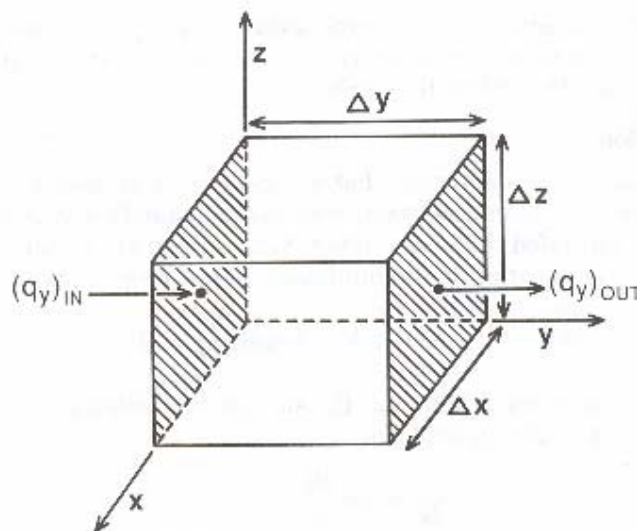
Η εξίσωση (1.3) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (1.4)$$

Η εξίσωση (1.4) είναι μη γραμμική επειδή ο όρος h είναι υψωμένο στη δεύτερη δύναμη στο αριστερό μέλος της εξίσωσης ενώ είναι στην πρώτη δύναμη στο δεξί. Αν και έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι για τη λύση της μη γραμμικής εξίσωσης, υπάρχει πιο εύκολος τρόπος να λυθεί το πρόβλημα. Αν είναι γνωστή μια τιμή του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα η εξίσωση μπορεί να γραμμικοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα αριθμητικό μοντέλο. (Anderson και Woessner, 1992)

Παραγωγή των Εξισώσεων του Συστήματος

Η Εξίσωση 1.2 παραγωγίζεται από τη μαθηματική σύνδεση ενός υδατικού ισοζυγίου με το νόμο του Darcy. Η παραγωγή γίνεται παραδοσιακά με τη χρήση ενός κύβου αναφοράς από πορώδες υλικό το οποίο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό των ιδιοτήτων του πορώδους μέσου ενώ ταυτόχρονα είναι και αρκετά μικρό ώστε η αλλαγή του ρεύματος μέσα στον όγκο ελέγχου να είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 1.2. Ο μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος. (Πηγή: Anderson και Woessner, 1992)

Αυτός ο κύβος από πορώδες υλικό είναι γνωστός ως μοναδιαίος όγκος του πορώδους υλικού (Representative Elementary Volume – REV). Ο όγκος του ισούται με $\Delta x \Delta y \Delta z$. Η ροή του ύδατος μέσα από τον όγκο ελέγχου εκφράζεται από το ρυθμό

άντλησης (q), όπου q είναι ένα διάνυσμα που μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των τριών συνιστωσών του q_x , q_y και q_z . Δηλαδή:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (1.6)$$

όπου i_x , i_y και i_z τα μοναδιαία διανύσματα των αξόνων x , y και z αντίστοιχα.

Το υδατικό ισοζύγιο (αρχή διατήρησης της μάζας) δηλώνει ότι:

$$\text{Έξοδος} - \text{Είσοδος} = \text{Αλλαγή στην Αποθήκευση} \quad (1.7)$$

Θεωρώντας τη ροή κατά μήκος του άξονα y του όγκου ελέγχου, η εισροή διέρχεται από επιφάνεια $\Delta x \cdot \Delta z$ και ισούται με $(q_y)_{IN}$ ενώ η εκροή είναι $(q_y)_{OUT}$. Ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής ισούται με:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \cdot \Delta x \cdot \Delta z \quad (1.8)$$

ή αλλιώς

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y} (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (1.9)$$

και μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα y είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (1.10)$$

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις της αλλαγής του ρυθμού ροής κατά μήκος των αξόνων x και z . Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με την αλλαγή στην αποθήκευση και εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση} \quad (1.11)$$

για να επιτραπεί επίσης η ύπαρξη μιας καταβόθρας (πηγάδι εμπλουτισμού) ή μιας πηγής (πηγάδι εμπλουτισμού) μέσα στον όγκο ελέγχου προστίθεται και ένας όρος $R \cdot \Delta x \Delta y \Delta z$ ο οποίος θεωρείται θετικός όταν πρόκειται για πηγή.

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση} \quad (1.12)$$

Από το δεξί μέλος της (1.7) η αλλαγή στην αποθήκευση ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα S_s , η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (1.13)$$

Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό, ή αλλιώς ότι νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Ο ρυθμός αλλαγής της αποθήκευσης στον όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (1.14)$$

Από το συνδυασμό των (1.12) και (1.14) και διαίρεσή τους δια $\Delta x \Delta y \Delta z$ προκύπτει η τελική μορφή του ισοζυγίου μάζας του νερού:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (1.15)$$

Η εξίσωση όμως αυτή έχει πολύ περιορισμένη χρήση αφού το q δεν είναι άμεσα μετρήσιμο. Όμως ο νόμος του Darcy δίνει μια σχέση μεταξύ των q και h και το υδραυλικό ύψος h είναι φυσικά άμεσα μετρήσιμο. Για τις τρεις διαστάσεις ο νόμος του Darcy γράφεται:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.16)$$

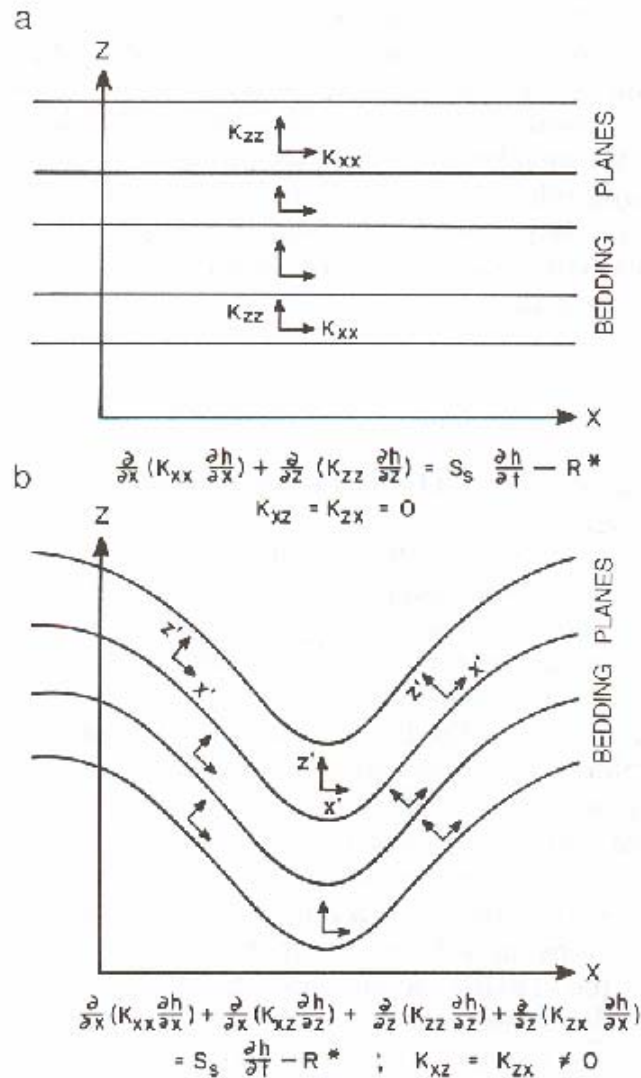
Όταν οι εξισώσεις (1.16) αντικατασταθούν στην (1.15) προκύπτει η (1.2). Η εξίσωση (1.1) παράγεται από την (1.2) θέτοντας $\partial h / \partial x = 0$, πολλαπλασιάζοντας με το b , προσθέτοντας τον όρο της διαρροής και θέτοντας $b \cdot S_s = S$ και $b \cdot R^* = R$.

Στις εξισώσεις (1.1) και (1.2) θεωρείται ότι τα K_x , K_y και K_z (ή T_x , T_y) είναι συγγραμμικά με τους άξονες x , y και z . Αν η γεωλογία είναι τέτοια που να μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του συστήματος που χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα της υδραυλικής αγωγιμότητας (\bar{K}) που γράφεται ως εξής:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται στροφή των συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία του πίνακα που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη της περιοχή μελέτης και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Στα τοπικά συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. Μέσω της στροφής των

συντεταγμένων είναι δυνατό να μετατραπούν εξισώσεις σχετικές με τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τοπικό σύστημα αντίστοιχες με στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο καθολικό σύστημα. (Anderson και Woessner, 1992)



Σχήμα 1.3. Προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων. α. Οι άξονες z και x είναι ευθυγραμμισμένοι με τις κύριες διευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας. β. Ορίζεται ένα καθολικό σύστημα x-z και τα τοπικά συστήματα x'-z' ευθυγραμμίζονται με τις κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας. (Πηγή: Anderson και Woessner, 1992)

Όταν τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι συγγραμμικά με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων τα στοιχεία εκτός διαγωνίου είναι μηδενικά και

ο δεύτερος δείκτης μπορεί να παραλειφθεί όπως στην εξίσωση (1.2). Οι εξισώσεις (1.1) και (1.2) υποθέτουν επίσης ότι η πυκνότητα είναι σταθερή. Η ροή που εξαρτάται από την πυκνότητα είναι ακόμα μια επιπλοκή σε προβλήματα που περιλαμβάνουν αλμυρό νερό όπως το πρόβλημα της υφαλμύρισης. Εάν τα φαινόμενα της πυκνότητας είναι σημαντικά χρειάζεται μια διαφορετική εξίσωση του συστήματος και ένας αριθμητικός κώδικας ειδικός για την περίπτωση.

Αριθμητικές Μέθοδοι

Αν απλοποιηθούν οι εξισώσεις (1.1) και (1.2) μπορούν να λυθούν αναλυτικά. Οι απλοποιήσεις συνήθως περιλαμβάνουν υποθέσεις ομοιογένειας και μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής. Εκτός από τις εφαρμογές σε υδραυλική πηγαδιών, οι αναλυτικές λύσεις δε χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές. Οι αριθμητικές λύσεις είναι πολύ πιο ευπροσάρμοστες και μέσω των υπολογιστών πιο εύκολες στη χρήση από τις πιο σύνθετες αναλυτικές λύσεις.

Στην προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιούνται συνήθως οι παρακάτω πέντε κατηγορίες μοντέλων: i) πεπερασμένων διαφορών, ii) πεπερασμένων στοιχείων, iii) ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών, iv) η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης και v) αναλυτικά στοιχεία. Από αυτές οι δύο τελευταίες είναι σχετικά νέες τεχνικές και δεν είναι ευρέως διαδεδομένες. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών είναι στενά συνδεδεμένη με εκείνη των πεπερασμένων στοιχείων. Οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι για επίλυση προβλημάτων ροής.

Ένα πρόγραμμα υπολογιστή, λύνει μία ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται από προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (εξίσωση του συστήματος, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες) οι οποίες αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Οι τεχνικές προσέγγισης όπως στις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο και το μετατρέπουν σε μια μορφή που να μπορεί να λυθεί γρήγορα από έναν υπολογιστή. Η ομάδα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με τον τρόπο αυτό μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση πινάκων.

Η επιλογή ανάμεσα σε πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα και την προτίμηση του χρήστη. Οι πεπερασμένες διαφορές είναι εύκολες στην κατανόηση και τον προγραμματισμό. Γενικά, απαιτούν λιγότερα στοιχεία για την κατασκευή του πλέγματος. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα στην προσέγγιση ορίων ακανόνιστου σχήματος από ότι οι πεπερασμένες διαφορές. (Οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές όμως μπορούν να χειριστούν τα ακανόνιστα όρια όπως και τα πεπερασμένα στοιχεία.) Είναι ευκολότερο να προσαρμοστεί το μέγεθος των μεμονωμένων στοιχείων όπως και η τοποθεσία των ορίων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διευκολύνοντας τη διερεύνηση της

επίδρασης που έχει στη λύση η διάταξη στο χώρο των κόμβων. Τα πεπερασμένα στοιχεία διαχειρίζονται επίσης καλύτερα τα εσωτερικά όρια όπως οι ελαττωματικές ζώνες και μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα σημειακές πηγές ή καταβόθρες, επιφάνειες με διαρροή και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες από ότι οι πεπερασμένες διαφορές. Για άλλους τύπους προβλημάτων η επιλογή μιας μεθόδου προσέγγισης βασίζεται συνήθως στην προτίμηση του χρήστη. Αν και κατά καιρούς έχουν υπάρξει άρθρα που υποστηρίζουν τη μία ή την άλλη μέθοδο, οι κρίσεις τους δεν είναι αντικειμενικές και πιο σωστή φαντάζει η γνώμη του Gray (1984) ότι «κάθε μέθοδος έχει ειδικά χαρακτηριστικά που μπορούν να είναι επιθυμητά για μια συγκεκριμένη εφαρμογή».

Αν και έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων – αν το πρόβλημα έχει κόμβους ανά ίσα διαστήματα οι παραγόμενες από τις δύο μεθόδους αλγεβρικές εξισώσεις είναι οι ίδιες – οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές. Κυριότερη είναι η θεμελιώδης διαφορά φιλοσοφίας. Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών υπολογίζουν μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο που είναι επίσης και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από τον κόμβο αυτό. Δε γίνεται καμία υπόθεση για τον τρόπο που μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, τα πεπερασμένα στοιχεία ορίζουν ακριβώς τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο με τη βοήθεια πολλαπλασιαστικών (βασικών) συναρτήσεων. Τα υδραυτικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω βασικών συναρτήσεων.

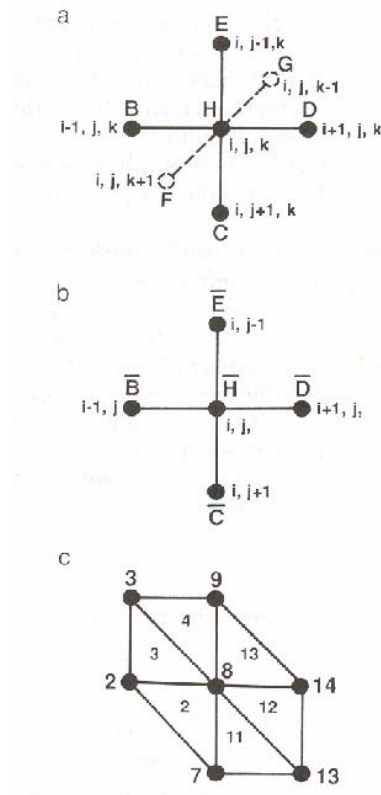
Η γενική μορφή της έκφρασης των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση (1.2) γράφεται για το υπολογιστικό μόριο του σχήματος 1.4.α ως εξής:

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \quad (1.18)$$

Η εξίσωση για το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i, j, k ($h_{i,j,k}$) εμπεριέχει το υδραυλικό ύψος στον ίδιο τον κόμβο καθώς και τα υδραυτικά ύψη στους έξι γειτονικούς κόμβους. Κάθε υδραυλικό ύψος πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή (B, C, D, E, F, G ή H) ο οποίος είναι μια συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των κόμβων. Ο συντελεστής H είναι επίσης συνάρτηση του όρου της αποθήκευσης. Ο όρος $RHS_{i,j,k}$ περιλαμβάνει την αποθήκευση και τους όρους εμπλουτισμού στο δεξί μέλος της εξίσωσης. Μια εξίσωση δισδιάστατης ροής για το σχήμα 1.4.β γράφεται:

$$\bar{B}h_{i-1,j} + \bar{C}h_{i,j+1} + \bar{D}h_{i+1,j} + \bar{E}h_{i,j-1} + \bar{H}h_{i,j} = RHS_{i,j} \quad (1.19)$$

όπου τα $\bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{E}$ και \bar{H} είναι συντελεστές. Και οι δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως εξισώσεις πινάκων υπό την μορφή $[A]\{h\} = \{f\}$, όπου $[A]$ ο πίνακας συντελεστών, $\{h\}$ το διάνυσμα των άγνωστων υδραυλικών υψών και $\{f\}$ το διάνυσμα των όρων του δεξιού μέλους (RHS) της εξίσωσης. (Anderson και Woessner, 1992)



Σχήμα 1.4. Υπολογιστικά στοιχεία

- a. Τρισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών
- b. Δισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών
- c. Κομμάτι με έξι πεπερασμένα στοιχεία γύρω από τον κόμβο 8.

(Πηγή: Anderson και Woessner, 1992)

1.1.2. Οριακές Συνθήκες

1.1.2.1. Τύποι οριακών συνθηκών

Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούνται από τις εξισώσεις του συστήματος, τις οριακές συνθήκες και τις αρχικές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες είναι η μαθηματική δήλωση που καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (στάθμη-head) ή την παράγωγο αυτής (ροή-flux) στα όρια της περιοχής του προβλήματος.

Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών είναι ένα σημαντικό βήμα στην κατασκευή του μοντέλου. Σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης (steady-state), τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της ροής. Από μελέτες που έγιναν

(Franke et al., 1987) εξάγεται το συμπέρασμα ότι η επιλογή των οριακών συνθηκών είναι το βήμα της προσομοίωσης που υπόκειται στα σοβαρότερα σφάλματα.

Τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων σχηματίζονται από τη φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου στρώματος βράχου ή από ένα στρώμα επιφανειακού ύδατος. Άλλα όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών. Αυτά τα αόρατα όρια είναι υδραυλικά όρια που περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και ποτάμια.

Τα υδρογεωλογικά όρια εκφράζονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών.

Τύπος 1: Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους (Συνθήκες Dirichlet) για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο.

Τύπος 2: Όρια καθορισμένης ροής (Συνθήκες Neumann) για τα οποία η παράγωγος της ροής (flux) κατά μήκος του ορίου είναι δεδομένη. Μια οριακή συνθήκη μηδενικής ροής (αδιαπέρατου φράγματος) δίνεται τοποθετώντας τη σταθερή ροή ίση με το μηδέν.

Τύπος 3: Όρια εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος ροής (Συνθήκες Cauchy ή μικτού ορίου) για τα οποία η flux κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μια τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης καλείται μερικές φορές συνθήκη μικτού ορίου επειδή συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή. Υπάρχουν αρκετοί τύποι ορίων ροής εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος.

Η τοποθέτηση μιας οριακής συνθήκης στο πλέγμα εξαρτάται από το αν το χρησιμοποιούμενο πλέγμα είναι πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. (Anderson και Woessner, 1992)

1.1.3. Προσομοίωση ακόρεστης ζώνης

Ένας τρόπος για να προσομοιωθεί εμπλουτισμός είναι η χρήση ενός μοντέλου ροής στην ακόρεστη ζώνη για να καθοριστεί η πορεία του ύδατος που διηθείται προς τον υπόγειο υδροφόρο. Τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης είναι θεωρητικά πιο πολύπλοκα και χρειάζονται περισσότερες παραμέτρους πεδίου από τα μοντέλα κορεσμένης ζώνης. Ακόμα η διήθηση που εισάγεται στο άνω όριο του μοντέλου ακόρεστης ζώνης θα φτάσει τελικά στον υδροφόρο ορίζοντα ως εμπλουτισμός εκτός και αν προσομοιωθεί εξατμισοδιαπνοή. Γι' αυτό το λόγο τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης χρειάζονται ακόμα γνώση του ρυθμού εμπλουτισμού για να καθορίσουν την άνω οριακή συνθήκη. Από τα προηγούμενα φαίνεται ότι τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης δε χρησιμοποιούνται εκτός και αν υφίστανται λόγοι που να δικαιολογούν την πρόσθετη πολυπλοκότητα που εμπεριέχεται σε αυτό το είδος μοντελοποίησης.

Κάποιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης για να προσομοιώσουν τον χρονισμό της άφιξης του εμπλουτισμού στον υδροφόρο

ορίζοντα. Η έξοδος του μοντέλου όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως εμπλουτισμός σε ένα μοντέλο κορεσμένης ζώνης. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα μοντέλα για κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη είναι αποσυνδεδεμένα. Δηλαδή, το πλάτος της ακόρεστης ζώνης δεν μπορεί να μεταβάλλεται ως συνέπεια της μεταβατικής κίνησης του υδροφόρου ορίζοντα.

Εναλλακτικά ένα μοντέλο που περιλαμβάνει και την κορεσμένη και την ακόρεστη ζώνη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απόκρισης του υδροφορέα στον εμπλουτισμό. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου μοντέλου είναι ότι το πεδίο ροής μεταξύ των δύο ζωνών είναι συνεχές και ο υδροφόρος ορίζοντας υπολογίζεται ως η επιφάνεια μηδενικής πίεσης ύδατος. Το μειονέκτημα χρήσης του συγκεκριμένου ή και οποιουδήποτε άλλου τύπου μοντέλου που περιέχει ακόρεστη ζώνη είναι η εισαγωγή σημαντικού βαθμού επιπλέον πολυπλοκότητας.

1.1.3.1. Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών οι ροές κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα αντιπροσωπεύουν έναν όγκο ύδατος που εφαρμόζεται στην άνω περιοχή του κελιού ανά μονάδα χρόνου. Το μοντέλο μπορεί να έχει ένα χωριστό πίνακα όπου να καταχωρεί τον εμπλουτισμό ή μπορεί ο εμπλουτισμός να προσομοιώνεται με πηγάδια. Στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις ο εμπλουτισμός είναι πιο εύκολο να χειρισθεί όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πάντα αναμενόμενο να βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα του μοντέλου. Τότε το ανώτερο στρώμα ορίζεται ως μη περιορισμένο και ένας πίνακας με τους ρυθμούς εμπλουτισμού ή άντλησης καθορίζεται για αυτό. Όταν ο υδροφόρος ορίζοντας περνάει από περισσότερα στρώματα είναι απαραίτητη η χρήση μιας διαφορετικής προσέγγισης. Μια εναλλακτική είναι η τοποθέτηση ενός κόμβου εμπλουτισμού (φρέαρ εμπλουτισμού) σε κάθε κόμβο του υδροφόρου ορίζοντα. Μπορεί να προκύψουν όμως προβλήματα επειδή τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών δεν επιβεβαιώνουν ότι το ύψος του ύδατος ισούται με το υδραυλικό ύψος λόγω πίεσης συν το υδραυλικό ύψος λόγω θέσης ($h = z$) στον υδροφόρο ορίζοντα. Για παράδειγμα αν ο χρήστης ορίσει τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το μοντέλο θα συνεχίσει να εφαρμόζει τον εμπλουτισμό στους καθορισμένους κόμβους του υδροφόρου ορίζοντα ακόμα και αν αυτό προκαλέσει το υδραυλικό ύψος να υπερβεί την κορυφή του στρώματος. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος αναπτύσσονται διάφορα πακέτα που μπορούν να ακολουθήσουν τις μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω.

1.1.3.2. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

Τα περισσότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν στο χρήστη να προσδιορίσει μια κατανεμημένη πηγή ως εμπλουτισμό σε ένα στοιχείο ενώ σημειακές πηγές ή καταβόθρες δίνονται σε κάποιο κόμβο. Η συναρμολόγηση της εξίσωσης του πίνακα όμως μέσα στον κώδικα απαιτεί την αναδιανομή των κατανεμημένων πηγών και καταβόθρων σε κόμβους. Ο κώδικας πολλαπλασιάζει τη ροή για κάθε στοιχείο που δίνει ο χρήστης επί την επιφάνεια του στοιχείου και μετά γίνεται διανομή του ύδατος αναλογικά σε κάθε κόμβο του στοιχείου.

Κάποιοι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνουν ένα μεταβλητό υδροφόρο ορίζοντα με παραμόρφωση των ανώτερων στοιχείων του πλέγματος ώστε να εξασφαλιστεί ότι $h(x,y) = z(x,y)$ στους κόμβους του υδροφόρου ορίζοντα. Βέβαια, ο χρήστης πρέπει να προσέξει κατά τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων έχοντας υπ' όψιν την κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα ώστε η παραμόρφωση να μην αυξήσει το λόγο των δύο διαστάσεων πέρα από το συνιστώμενο όριο του. (Anderson και Woessner, 1992)

1.1.4. Διαρροή

Η διαρροή αναφέρεται σε κίνηση ύδατος διαμέσου ενός στρώματος υλικού του οποίου η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα είναι μικρότερη από αυτήν του υδροφορέα. Η διαρροή μπορεί να μπαίνει ή να βγαίνει από τον υδροφορέα ανάλογα με τη σχετική διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ του υδροφορέα και της πηγής που βρίσκεται από την άλλη πλευρά του στρώματος με διαρροή. Επιπλέον η κατεύθυνση και ο όγκος της διαρροής μπορεί να αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης καθώς το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα αλλάζει. Η πηγή της διαρροής μπορεί να είναι ένας ελεύθερος υδροφορέας, μια λίμνη ή ένα ποτάμι.

Η διαρροή είναι ένα είδος ορίου εξαρτημένου από το υδραυλικό ύψος. Σε δισδιάστατες προσομοιώσεις, η διαρροή μέσα από περιοριστικά στρώματα προσομοιώνεται με έναν όρο διαρροής. Η χρήση αυτού του όρου είναι επίσης ένας βολικός τρόπος προσομοίωσης μερική διείσδυση από λίμνες και ποτάμια σε δισδιάστατα εμβαδικά μοντέλα. Σε μια προσομοίωση που χρησιμοποιεί την επιλογή της διαρροής, η πηγή της διαρροής δεν εμφανίζεται ρητά στο πλέγμα. Ο όγκος ύδατος που διαρρέει προστίθεται ή αφαιρείται από τον κόμβο που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πηγή της διαρροής. Εάν το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι μεγαλύτερο από εκείνο της πηγής, αφαιρείται ύδωρ από το μοντέλο. Στην αντίθετη περίπτωση προστίθεται ύδωρ μέσω διαρροής. Σε κάθε περίπτωση όμως ο όγκος της διαρροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_L^* = -K_z' \cdot \left(\frac{h_{source} - h}{b'} \right) \cdot w \cdot l$$

όπου K_z' είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος από το οποίο γίνεται η διαρροή και b' είναι το πάχος του. Ο λόγος K_z'/b' είναι η *leacance*. Οι παράμετροι w και l είναι το πλάτος και το μήκος αντίστοιχα της πηγής, h_{source} το υδραυλικό της ύψος και h το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα το οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο. Ο χρήστης δίνει τις τιμές στα K_z' , b' , h_{source} , w και l .

Ο ογκομετρικός ρυθμός διαρροής (Q_L^*) πρέπει να μετατραπεί σε επιφανειακό ρυθμό διαρροής εφαρμοσμένο στην κορυφή του κελιού. Και εδώ παρουσιάζεται το πρόβλημα ότι η πηγή (η λίμνη ή το ποτάμι για παράδειγμα) μπορεί να είναι στενότερο από τα κελιά ή στοιχεία του μοντέλου. Τότε ο επιφανειακός ρυθμός διαρροής (L) θα πρέπει να προσαρμοστεί ούτως ώστε ο όγκος που πηγάζει από επιφάνεια $w \cdot l$ να είναι ίσος με το όγκο που εφαρμόζεται στο κελί ή στοιχείο ($\Delta x \cdot \Delta y$). Δηλαδή,

$$Q_L^* = L \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

ή

$$L = Q_L^* / (\Delta x \cdot \Delta y)$$

Σε αυτή την περίπτωση στο μοντέλο πρέπει να μπει ο τροποποιημένος λόγος:

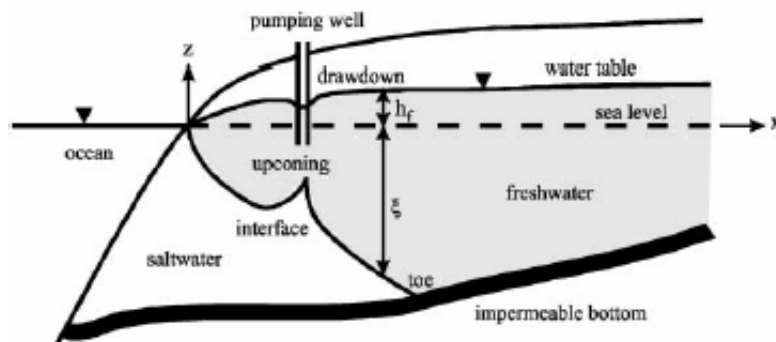
$$\left(\frac{K_z'}{b'} \right)_m = \frac{K_z'}{b'} \cdot \frac{w \cdot l}{\Delta x \cdot \Delta y}$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι διαρροές προς υπονόμους με τη μόνη διαφορά ότι αν οι υπόνομοι λειτουργούν μόνο σαν καταβόθρες. Δηλαδή δεν υπάρχει διαρροή από αυτούς προς τον υδροφορέα ακόμα κι αν το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι μικρότερο από αυτό των υπονόμων. Οι υπόνομοι μπορούν να θεωρηθεί γενικότερα ότι αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία απομάκρυνσης ύδατος των ορυχείων, λατομείων, αγροτικών αποχετευτικών αγωγών και αγωγών γύρω από χωματερές. (Anderson και Woessner, 1992)

1.2. Το φαινόμενο της υφαλμύρινης υπόγειων υδροφορέων

1.2.1. Εισαγωγή

Η πηγή της υφαλμύρινης ενός υπόγειου υδροφορέα μπορεί να είναι φυσική όπως το θαλασσινό νερό και η άλμη που βρίσκεται σε κατώτερα γεωλογικά στρώματα ή ανθρωπογενής όπως το αλάτι που χρησιμοποιείται για την τήξη του πάγου στους δρόμους και το προϊόν διήθησης των χωματερών. Πιο συχνά παρατηρείται το φαινόμενο αυτό σε παραθαλάσσιες περιοχές όπου η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού προκάλεσε την διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσα στους υδροφορείς. Όταν σε έναν υδροφορέα εισχωρήσει αλμυρό νερό μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών δυσκολεύοντας τη διαδικασία αναστροφής και την αποκατάσταση του υδροφορέα. Η αργή κίνηση του υπόγειου νερού αυξάνει επίσης το χρόνο αποκατάστασης. Η αλατότητα στο νερό είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων, καταστρέφει τις καλλιέργειες και αχρηστεύει τα χωράφια, και διαβρώνει σωλήνες και λέβητες σε βιομηχανικές χρήσεις. Γι' αυτό το λόγο η υφαλμύριση ενός υδροφορέα γλυκού νερού σημαίνει και την απώλεια αυτού του υδροφορέα ως πηγή νερού.



Σχήμα 1.5. Υφαλμύριση ενός ελεύθερου υδροφορέα. (Πηγή: A. Cheng)

1.2.2. Μηχανισμοί της Υφαλμύρινης

Το Σχήμα 1 δίνει μια γραφική απεικόνιση υφαλμύρινης από θαλασσινό νερό ενός ελεύθερου υδροφορέα. Όπως φαίνεται στο σχήμα επειδή το θαλασσινό νερό είναι βαρύτερο, τείνει να κινείται κάτω από το στρώμα του γλυκού νερού. Το γλυκό νερό όμως έχει μια υδραυλική κλίση που μειώνεται προς την ακτή και έτσι ρέει προς τη θάλασσα. Αυτή η ορμή του γλυκού νερού εξισορροπεί την κατάσταση αντιστεκόμενη στην κίνηση του θαλασσινού νερού λόγω πυκνότητας. Χωρίς αυτή τη δύναμη το θαλασσινό νερό θα συνέχιζε την πορεία του προς το εσωτερικό μέχρι να καταλάβει

όλο τον υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Επειδή όμως αυτή η υδραυλική κλίση υπάρχει πάντα λόγω του εμπλουτισμού από την βροχόπτωση στην ενδοχώρα, επιτυγχάνεται μια θέση ισορροπίας όπως δείχνει το προφίλ στο σχήμα 1.5. της διεπιφάνειας του μετώπου της υφαλμύρινσης με τον υπόγειο υδροφορέα. Η άκρη (toe) σημειώνει το μέγιστο σημείο διείσδυσης. Μια απλή θεωρία που επιτρέπει μια προσέγγιση της διεπιφάνειας δίνεται από τη σχέση των Ghyben – Herzberg (Bear, J. 1979):

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40h_f$$

όπου ξ η θέση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, h_f το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας (όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.), ρ_f η πυκνότητα του γλυκού νερού (1 g/cm^3) και ρ_s η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (περίπου $1,025 \text{ g/cm}^3$).

Αυτό που φαίνεται από την παραπάνω σχέση είναι ότι για κάθε μέτρο υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, η διεπιφάνεια ωθείται 40 μέτρα προς τα κάτω. Όταν η διεπιφάνεια αγγίζει τον πυθμένα εντοπίζεται η άκρη. Αυτός ο λόγος 40:1 θα ήταν καθησυχαστικός αλλά σε παραθαλάσσιες περιοχές με αυξημένη άντληση το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα το θαλασσινό νερό να προσχωρεί βαθιά μέσα στον υδροφορέα.

Η σχέση των Ghyben – Herzberg είναι ένα πολύ απλουστευμένο μοντέλο. Για μια ακριβέστερη προσέγγιση πρέπει να ληφθούν υπόψη η δυναμική κίνηση της υπόγειας ροής και η μεταφορά μάζας του άλατος. Γενικά δεν υπάρχει η σαφής διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρωμάτων που φαίνεται στο Σχήμα 1. Για να βρεθεί η συγκέντρωση του άλατος στη μεταβατική ζώνη πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο μεταφοράς μάζας που να περιέχει εξισώσεις συμμεταφοράς και διασποράς. Ακόμα, η διαλυμένη ύλη επηρεάζει και την πυκνότητα του διαλύματος γι αυτό ίσως είναι σκόπιμη η χρήση εξειδικευμένου μοντέλου. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις στις οποίες όντως η μεταβατική ζώνη είναι πολύ στενή και έτσι θα ήταν δυνατή η χρήση του πιο απλουστευμένου μοντέλου της απότομης διεπιφάνειας. Ακόμα, εάν γίνεται προσομοίωση του υδροφορέα σε τοπική κλίμακα, η ροή ολοκληρώνεται συχνά σε βάθος για να απλοποιηθούν τα τρισδιάστατα προβλήματα σε δισδιάστατες ζώνες.

1.2.3. Αναχαίτιση της Υφαλμύρινσης

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αντιμετώπισης της υφαλμύρινσης είναι η ομαλοποίηση της αντλητικής δραστηριότητας. Γενικά ο όγκος της άντλησης δε θα πρέπει να υπερβαίνει τη φυσική αναπλήρωση. Η βελτιστοποίηση της άντλησης με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση της διείσδυσης θαλασσινού νερού είναι θέμα πρώτης προτεραιότητας. Η αναπλήρωση με φυσικά επιφανειακά ύδατα ή επεξεργασμένα λύματα μπορεί να αυξήσει την εκροή του

υδροφορέα και να απωθήσει το θαλασσινό νερό. Αναπλήρωση κοντά στην ακτή μπορεί να δημιουργήσει ένα τοπικό φράγμα γλυκού νερού το οποίο θα προστατεύει την πτώση του υδροφόρου ορίζοντα στην ενδοχώρα. Μια άλλη τεχνική είναι η άντληση θαλασσινού νερού από την περιοχή υφαλμύρινσης για να περιοριστεί η εξάπλωση του μετώπου του προς την ενδοχώρα, εάν βρεθεί τρόπος διάθεσης του θαλασσινού νερού που αντλείται. Μια παρόμοια μέθοδος είναι η ταυτόχρονη άντληση και στα δύο στρώματα για να αποφευχθεί η δημιουργία του κώνου που φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Σε χώρες όπως το Ισραήλ με πολύ μικρά αποθέματα νερού χρησιμοποιούν οριζόντια πηγάδια για να αντλήσουν από το λεπτό στρώμα γλυκού νερού που βρίσκεται πάνω από το μέτωπο της υφαλμύρινσης. Η επανόρθωση από ξηράς έχει το πρόσθετο αποτέλεσμα της απώθησης του θαλασσινού νερού προς τη θάλασσα. Τέλος σε περιοχές που μπορούν να εντοπιστούν οι θέσεις από όπου διαφεύγει το γλυκό νερό, μπορούν να τοποθετηθούν φυσικά εμπόδια όπως συμπαγείς ή χαμηλής διαπερατότητας τοίχοι, για να εμποδίσουν τη ροή του γλυκού νερού. (A. Cheng)

1.3. Οι εξισώσεις του μηχανισμού της υφαλμύρινσης

Για να περιγραφεί μαθηματικά ο μηχανισμός της υφαλμύρινσης πρέπει να γίνουν αρχικά κάποιες παραδοχές:

Αρχικά θεωρείται ένας υδροφορέα όπως αυτός του παρακάτω σχήματος, όπου η ροή του γλυκού νερού θεωρείται σταθερή με κατεύθυνση από ανατολικά προς δυτικά και φαίνεται πως το γλυκό νερό απωθεί το αλμυρό εμποδίζοντάς το να εισέλθει στον υδροφορέα.

Ακόμα θεωρείται ότι η διεπιφάνεια που χωρίζει το αλμυρό από το γλυκό νερό είναι πολύ λεπτή και το πάχος του υδροφορέα από το οριζόντιο επίπεδο αναφοράς ως τη στάθμη της θάλασσας είναι d .

Επειδή η οριζόντια διάσταση συνήθως είναι αρκετά μεγαλύτερη από την κάθετη το d είναι μικρότερο από οριζόντιες αποστάσεις στον υδροφορέα όπως το μήκος του, το πάχος του ή η ζώνη υφαλμύρινσης.

Ως αρχή του άξονα x λαμβάνεται το σημείο στην ακτογραμμή και ως αρχή του άξονα z το σημείο στη βάση του υδροφορέα.

Με τ συμβολίζονται τα σημεία όπου η επιφάνεια του μεταβατικού στρώματος τέμνει τον πυθμένα του υδροφορέα (άκρες), και με x_τ η συντεταγμένες τους στον άξονα x . Όταν δεν υπάρχει ροή στην κατεύθυνση y , τα σημεία τ σχηματίζουν μια γραμμή παράλληλη προς την ακτογραμμή. Όταν στον υδροφορέα υπάρχουν πηγάδια άντλησης οι άκρες σχηματίζουν μια περίπλοκη γραμμή.

Ορίζονται $b(x, y)$ το βάθος του γλυκού νερού από την ελεύθερη επιφάνεια ως τη διεπιφάνεια, $\xi(x, y)$ το βάθος του γλυκού νερού από την επιφάνεια της θάλασσας ως

τη διεπιφάνεια και $h_f(x, y)$ το πιεζομετρικό ύψος του γλυκού νερού με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα. Υπάρχουν δύο ζώνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά ροής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5. Στη ζώνη 1, ο υδροφορέας συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ένας ελεύθερος υδροφορέας ενώ στη ζώνη 2 υπάρχει μια διεπιφάνεια με ένα φακό γλυκού νερού να επιπλέει πάνω από το στρώμα του αλμυρού νερού που είναι πυκνότερο. Έστω L το μήκος του υδροφορέα, B το πλάτος του και q ο ρυθμός απορροής προς το περιβάλλον ανά μονάδα πλάτους του υδροφορέα ο οποίος δίνεται από τον τύπο $q = V_c / B$ όπου $V_c = N_c \cdot A$ ο όγκος νερού εμπλουτισμού ανά μονάδα χρόνου από τη χερσαία περιοχή του υδροφορέα, N_c ο ρυθμός εμπλουτισμού ανά μονάδα χρόνου από τη χερσαία περιοχή του υδροφορέα και A η αντίστοιχη επιφάνεια της χερσαίας περιοχής εμπλουτισμού. Η χερσαία επιφάνεια θεωρείται υψηλής διαπερατότητας ενώ το A σχετικά μικρό σε σύγκριση με το μέγεθος του υδροφορέα.

Η παραδοχή πολύ λεπτής διεπιφάνειας υποθέτει ότι δεν υπάρχει καμία ανάμιξη του γλυκού με το αλμυρό νερό στη ζώνη 2. Μία ακόμα παραδοχή είναι ότι η διεπιφάνεια έχει σταθεροποιηθεί και δεν κινείται (η κίνηση του αλμυρού νερού θεωρείται χωρίς τριβή). Η παραδοχή αυτή ενδείκνυται όταν η ροή πλησιάζει σε σταθερή κατάσταση ή όταν παρέλθει πολύς χρόνος από την τελευταία αλλαγή στο σύστημα. Τότε είναι δυνατή η χρήση της εξίσωσης Ghyben – Herzberg.

$$h_f - d = \delta \xi \quad (1)$$

$$\text{όπου } \delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \approx 0,025, \text{ με } \rho_s \text{ την πυκνότητα του αλμυρού νερού και } \rho_f \text{ την}$$

πυκνότητα του γλυκού νερού.

Η εξίσωση σταθερής ροής στον ελεύθερο υδροφορέα της ζώνης 1 γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + N - Q = 0 \quad (2)$$

όπου K η υδραυλική αγωγιμότητα, που είναι συνήθως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων (x, y) , N ο εμπλουτισμός κατανεμημένος στην επιφάνεια του υδροφορέα και Q ο ρυθμός άντλησης από τα πηγάδια που βρίσκονται μέσα στον υδροφορέα.

Το βάθος του γλυκού νερού στη ζώνη 2 είναι b και η εξίσωση της ροής στη ζώνη αυτή γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot b \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot b \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + N - Q = 0 \quad (3)$$

Ορίζοντας για τη

$$\begin{array}{ll} \text{ζώνη 1} & b = h_f \\ \text{ζώνη 2} & b = h_f - d + \xi \end{array} \quad (4)$$

οι εξισώσεις (2) και (3) μπορούν να εκφραστούν με τη μορφή της εξίσωσης (3).

Σύμφωνα με τον Strack [1976], ορίζεται το δυναμικό ροής ϕ :

$$\begin{aligned} \text{ζώνη 1} \quad \phi &= \frac{1}{2} [h_f^2 - (1+\delta) \cdot d^2] \\ \text{ζώνη 2} \quad \phi &= \frac{1+\delta}{2\delta} (h_f - d)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Στη θέση των άκρων ισχύει $\xi = d$ και από την (1) προκύπτει $h_f = (1+\delta) d$ ενώ το δυναμικό της ροής ϕ δίνεται από τον τύπο: $\phi_\tau = \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2$. Από τις εξισώσεις (5) του

δυναμικού ροής λαμβάνεται στο όριο των ζωνών 1 και 2: $\phi_{\text{ζώνης 1}} = \phi_{\text{ζώνης 2}} = \phi_\tau$ και

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\text{ζώνη 1}} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\text{ζώνη 2}} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_\tau. \text{ Αυτό δείχνει ότι το δυναμικό ροής είναι μια συνεχής και}$$

παραγωγίσιμη συνάρτηση κατά μήκος του ορίου ανάμεσα στις ζώνες 1 και 2.

Από τις εξισώσεις (2), (3) και (5) συμπεραίνεται ότι η συνάρτηση $\phi(x, y)$ ικανοποιεί την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + N - Q = 0 \quad (6)$$

με τις εξής οριακές συνθήκες:

- στο όριο της ακτής ($x = 0$) το $\xi = 0$ και από την (5) εξάγεται ότι $\phi = 0$,
- στα όρια μηδενικής ροής η ροή προς την κατεύθυνση n κάθετα στο όριο είναι

$$\text{μηδέν, π.χ. } q_n = -Kb \frac{\partial h_f}{\partial n} = 0 \Rightarrow \frac{\partial h_f}{\partial n} = 0 \text{ άρα από την (5) συνεπάγεται ότι στα όρι}$$

$$\text{μηδενικής ροής ισχύει } \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0.$$

Εάν τα K , N , Q και οι οριακές συνθήκες είναι γνωστές, η εξίσωση (6) λύνεται για $\phi(x, y)$ με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους. Αφού υπολογιστεί το $\phi(x, y)$ η επιφάνεια της διεπιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του ϕ από τις (4) και (5) όπως φαίνεται παρακάτω:

ζώνη 1

$$\xi = d \quad z = 0 \quad \text{όταν} \quad \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2 \leq \phi \quad (7)$$

ζώνη 2

$$\xi = \sqrt{\frac{2\phi}{\delta(1+\delta)}} \quad z = d - \xi \quad \text{όταν} \quad 0 \leq \phi \leq \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2$$

Η πιεζομετρική επιφάνεια h_f λαμβάνεται από

$$\text{ζώνη 1} \quad (8)$$

$$h_f = \sqrt{2\varphi + (1+\delta)d^2} \quad \text{όταν} \quad \frac{(1+\delta)\delta}{2}d^2 \leq \varphi$$

ζώνη 2

$$h_f = \sqrt{\frac{2\delta\varphi}{1+\delta}} + d \quad \text{όταν} \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{(1+\delta)\delta}{2}d^2$$

Η τοποθεσία των άκρων καθορίζεται με την επίλυση για x_τ ως συνάρτηση του y_τ της μη γραμμικής εξίσωσης:

$$\varphi(x_\tau, y_\tau) = \frac{(1+\delta)\delta}{2}d^2 \quad (9)$$

Η εξίσωση (6) μπορεί να λυθεί στη γενική της μορφή αριθμητικά, ενώ σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όταν ο υδροφορέας είναι ορθογωνικός, ομοιογενής (έχει σταθερή υδραυλική αγωγιμότητα K), ο επιφανειακός ρυθμός εμπλουτισμού N είναι κατανεμημένος ομοιόμορφα και ο όρος ροής προς το περιβάλλον q είναι σταθερός και ανεξάρτητος του y , μπορεί να λυθεί και αναλυτικά.

1.4. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία PTC και ο τρόπος που προσομοιώνει την τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπων

1.4.1. Οι Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου PTC

Το **PTC** χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αναπαράσχει ροή υπογείων υδάτων με υδραυλικό ύψος, h ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (1.1)$$

στοιχεία ταχύτητας,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.2)$$

και μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από τη συγκέντρωση, c ,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\ & + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1.3).$$

Αυτές οι εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και τον νόμο του Darcy.

Οι ορισμοί των διάφορων συμβόλων που χρησιμοποιούνται παραπάνω επεξηγούνται στα επόμενα κεφάλαια. Η λύση αυτών των εξισώσεων ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: πρώτα υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη h από την (1.1) μετά, οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y , V_z από την (1.2) και τελικά λύνεται η (1.3) για την εύρεση της συγκέντρωσης του ρύπου c .

1.4.1.1 Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Η επίλυση των εξισώσεων (1.1)–(1.3) για πολύπλοκα φυσικά συστήματα συνήθως απαιτεί την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα σε κλίμακα πεδίου, η υπολογιστική προσπάθεια που σχετίζεται με την επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι πολύ μεγάλη. Το μοντέλο **PTC** χρησιμοποιεί ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για να επιλύει τις πλήρεις τρισδιάστατες εξισώσεις, ο οποίος μειώνει το υπολογιστικό φορτίο σημαντικά.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει το διαχωρισμό της περιοχής σε περίπου παράλληλα οριζόντια στρώματα. Μέσα σε αυτά γίνεται μια διακριτοποίηση (discretization) πεπερασμένων στοιχείων [Pinder and Gray, 1977] με σκοπό να επιτευχθεί η ακριβής απεικόνιση ακανόνιστων περιοχών. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με μια διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Αυτό το υβρίδιο που συνδυάζει μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης συγκεκριμένου χρόνου, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα. Στο δεύτερο βήμα επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα.

Η διαδικασία διαχωρισμού και τα πλεονεκτήματά της αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

1.4.2. Τρισδιάστατη Ροή Υπογείων Υδάτων

1.4.2.1. Βασική Εξίσωση

Το **PTC** προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος βρίσκοντας το υδραυλικό ύψος από την μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (2.1)$$

όπου,

h το υδραυλικό ύψος [L],

K_{xx} η υδραυλική αγωγιμότητα στην x οριζόντια διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{yy} η υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{zz} η υδραυλική αγωγιμότητα στην z (κάθετη) διεύθυνση [LT^{-1}],

S ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης [L^{-1}],

Q_i ένας όρος πηγής/καταβόθρας στη θέση i [L^3T^{-1}] (π.χ. αντλία – θετικές τιμές υποδηλώνουν εμπλουτισμό),

$\delta(\)$ η συνάρτηση δέλτα του Dirac και

r ο αριθμός των σημείων που έχουν πηγή ή καταβόθρα.

Λόγω ευκολίας ο τελευταίος όρος της (2.1) θα γράφεται συντεταγμένα ως Q .

Η εξίσωση του συστήματος (2.1) λύνεται αριθμητικά από το **PTC** με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι μέθοδοι και εφαρμόζονται στην (2.1).

1.4.2.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Το διαχωριστικό πλάνο ενεργειών που χρησιμοποιεί το **PTC** για την επίλυση της (2.1) περιλαμβάνει προσέγγιση των όρων της (2.1) που περιέχουν παραγώγους του x και του y με χρήση μιας μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν ευρεία χρήση σε οριζόντια επίπεδα (για παράδειγμα, Pinder and Gray, 1977).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υποθέτει ότι υπάρχει ένα άπειρο άθροισμα συναρτήσεων που θα αντιπροσωπεύει ακριβώς τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τη ροή του υπόγειου ύδατος.

Μια πεπερασμένη προσέγγιση αυτής της σειράς είναι:

$$h(x, y, z, t) \approx \tilde{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (2.2)$$

όπου

h το υδραυλικό ύψος [L],

\tilde{h} η προσεγγιστική σειρά του h [L],

h_i ένας μη καθορισμένος συντελεστής [L],

w_i μια βασική συνάρτηση (ή παρεμβολής) (αδιάστατη) και

N ο αριθμός των κόμβων του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσεγγιστική σειρά (2.2) δίνει μια ακριβή έκφραση όσο το N τείνει στο άπειρο (το \tilde{h} τείνει στο h). Με μια προσεκτική επιλογή των συναρτήσεων w_i , οι μη καθορισμένοι συντελεστές h_i γίνονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες (x, y, z) . Σημαντική στην υπολογιστική αποτελεσματικότητα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση συνεχών βασικών συναρτήσεων με ξεχωριστά βήματα οι οποίες είναι μη μηδενικές μόνο πάνω από ένα μικρό κομμάτι ολόκληρης της περιοχής μελέτης. Ενώ διαφορετικοί τύποι βασικών συναρτήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν [Lapidus and Pinder, 1982], το **PTC** χρησιμοποιεί γραμμικές βασικές συναρτήσεις με ξεχωριστά βήματα ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συνεχίζει επισημαίνοντας ότι αν και ο διαφορικός τελεστής L (π.χ. εξίσωση 2.1) που λειτουργεί στο h ισούται με μηδέν, όταν το L λειτουργεί στην προσεγγιστική συνάρτηση εισάγεται ένα σφάλμα. Έτσι με μαθηματικούς τύπους η (2.1) γράφεται ως

$$L(h) = 0 \quad (2.3)$$

ενώ

$$L(\tilde{h}) = R \quad (2.4)$$

όπου R το υπολειμματικό σφάλμα.

Για την επίλυση της (2.2) με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του υπολειμματικού R .

Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά με τη θεώρηση μιας ολόκληρης ομάδας συναρτήσεων w_j . Αν τώρα εξαναγκαστεί το υπολειμματικό R να γίνει ορθογώνιο για κάθε πιθανή τιμή του w_j ουσιαστικά εξαναγκάζεται να μηδενιστεί και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια λύση της (2.2). Διαφορετικά αυτό μπορεί να εκφραστεί ως:

$$L(\tilde{h}) = L(h) \text{ όταν } R = 0. \quad (2.5)$$

Το **PTC** χρησιμοποιεί την ίδια ομάδα συναρτήσεων για τις συναρτήσεις βάρους w_j όπως και για τις βασικές συναρτήσεις w_i . Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος Galerkin. Επομένως, τα w_i και w_j χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας.

1.4.2.3 Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών

Η εξίσωση (2.9) μπορεί να γραφεί με τη βοήθεια πινάκων ως:

$$\mathbf{A}\mathbf{h} + \mathbf{B} \quad (2.10)$$

όπου τα έντονα κεφαλαία γράμματα αναπαριστούν τετραγωνικούς πίνακες (τα \mathbf{A} και \mathbf{B} έχουν διαστάσεις $N \times N$) και τα έντονα πεζά γράμματα αναπαριστούν διανύσματα (τα \mathbf{h} , $\partial\mathbf{h}/\partial t$, \mathbf{v} και \mathbf{f} είναι διανύσματα μήκους N). Τα στοιχεία των \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{v} και \mathbf{f} δίνονται από τύπους ενώ το \mathbf{f} περιλαμβάνει, όπως προαναφέρθηκε, τις γνωστές οριακές συνθήκες.

1.4.2.3.1 Η Κάθετη Παράγωγος

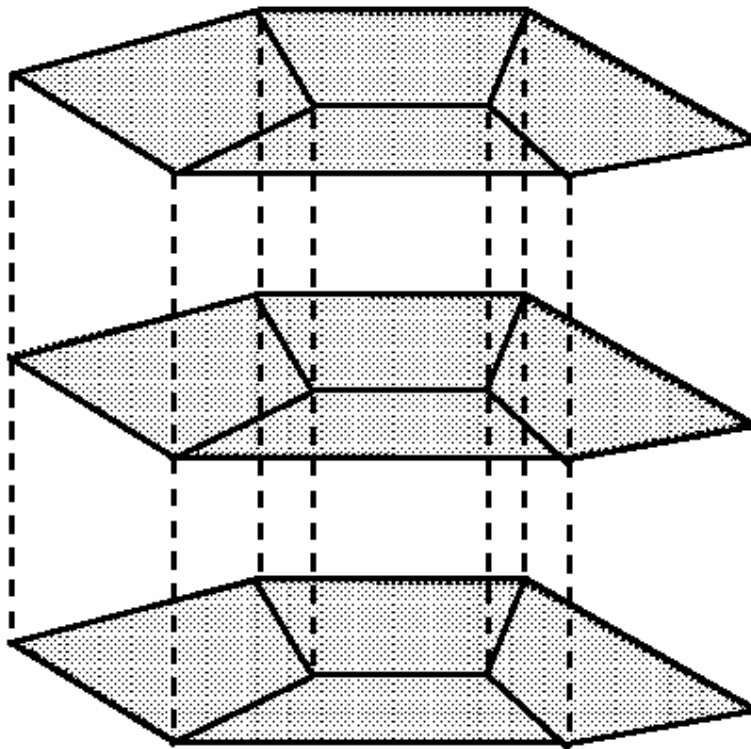
Το κεντρικό στοιχείο αυτού του κώδικα είναι η χρήση ενός κεντρικού σχεδίου διαχωρισμού των χωρικών παραγώγων στην κατεύθυνση z . Ο κάθετος διαχωρισμός επιτυγχάνεται με την απαίτηση ότι τα οριζόντια πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να επαναλαμβάνονται σε στρώματα με κόμβους στοιβαγμένους τον ένα πάνω στον άλλο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Αυτό σημαίνει ότι στην κάθετη διεύθυνση μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσει το \mathbf{v} .

1.4.2.3.2 Η Παράγωγος του Χρόνου

Η εμπειρία δείχνει ότι η ενδεχόμενη προσέγγιση προς τα πίσω διαφοράς της παραγώγου του χρόνου εξασφαλίζει την πιο ακριβή λύση της υπόγειας ροής για δεδομένο κόστος.

Στην αναπαράσταση οπίσθιας διαφοράς χρησιμοποιείται ένα σύστημα διόρθωσης πρώτης τάξης για να προσεγγισθεί η παράγωγος του χρόνου και οι χωρικές παράγωγοι γράφονται για το νέο επίπεδο χρόνου.

Εφαρμόζοντας αυτό το σύστημα για κάθε επίπεδο παράγεται ένας πλήρης διαχωρισμός της (2.1), και λαμβάνεται ένα σύστημα $M \times N$ εξισώσεων με N αγνώστους στην (2.2) για κάθε ένα από τα M επίπεδα.



Σχήμα 1.6: Σχέδιο των οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε στοίβες το ένα πάνω στο άλλο, παράγοντας τον τρισδιάστατο διαχωρισμό. (Πηγή: PTC manual)

1.4.2.4 Οριακές Συνθήκες

Το **PTC** δέχεται τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι τρεις αυτοί τύποι είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann (καθορισμένη ροή) και τρίτου τύπου (διαρροή).

Οι οριακές συνθήκες μπορεί να μεταβληθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενικής ροής. Αυτό υποδηλώνει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατα στρώματα κάτω και

γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής μελέτης, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

1.4.2.4.1 Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Αφού οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος ουσιαστικά απαλοφονται από την εξίσωση του πίνακα οπότε απομένουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου N_c ο ολικός αριθμός κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.

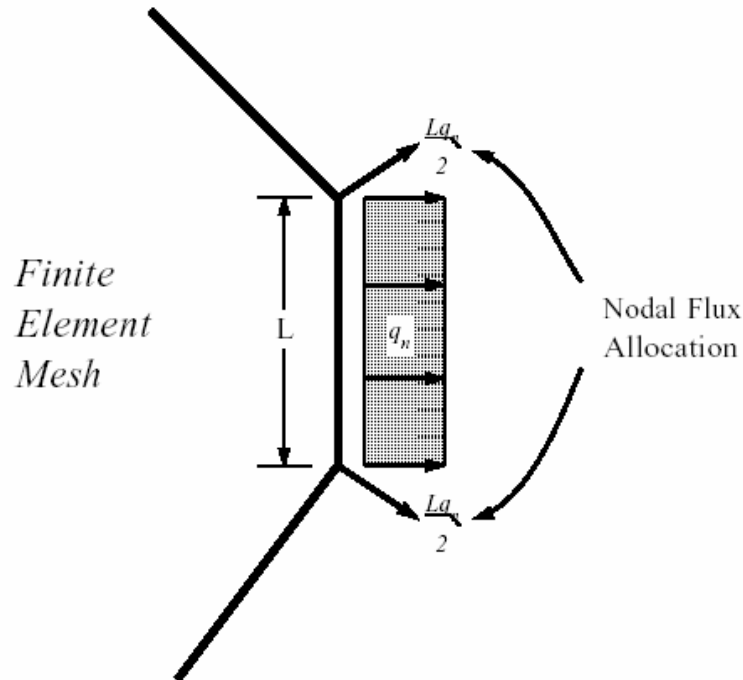
1.4.2.4.2 Καθορισμένη Ροή

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής.

Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές (όπως φαίνεται και στο σχήμα). Έτσι ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται μαθηματικά επίσης με τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής σε ένα κόμβο. Για διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης, ενώ κάνει αυτόματα ολοκλήρωση σε όλη την περιοχή για να καθορίσει την ογκομετρική ροή.

1.4.2.4.3 Τρίτου Τύπου

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Έτσι εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Με τον κατάλληλο ορισμό της παραμέτρου που δηλώνεται από τον χρήστη, k_L , μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή.



Σχήμα 1.7: Κατανομή στους κόμβους της παροχής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία κάθε κόμβος έχει τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας. (Πηγή: PTC manual)

1.4.2.5 Συνθήκες Υδροφόρου Ορίζοντα

Η επιβολή του υδροφόρου ορίζοντα ή οριακών συνθηκών ελεύθερου υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή των δύο οριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στο επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα.

Μια σχηματική αναπαράσταση της κατάστασης που περιέχει έναν κινούμενο υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος υπόκειται σε διήθηση μέτρου $R(x,y,t)$, φαίνεται στο Σχήμα 1.8. η σταθερή ανύψωση του άνω ορίου της περιοχής ροής δίνεται από τη σχέση $z = z_{M+1}(x,y,t)$ και η πραγματική ανύψωση δηλώνεται από τη σχέση $z = z_{WT}(x,y,t)$.

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα (h_M) ορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα ($z_{WT} - z_M$). Σύμφωνα με αυτό σε κάθε κόμβο απαιτείται

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (2.26)$$

θεωρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα στο ανώτερο στρώμα ($k = M$). Έτσι, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει αν οι τιμές του h_M στους κόμβους είναι μέσα στα περιθώρια ανύψωσης που δίνει η εξίσωση

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (2.27)$$

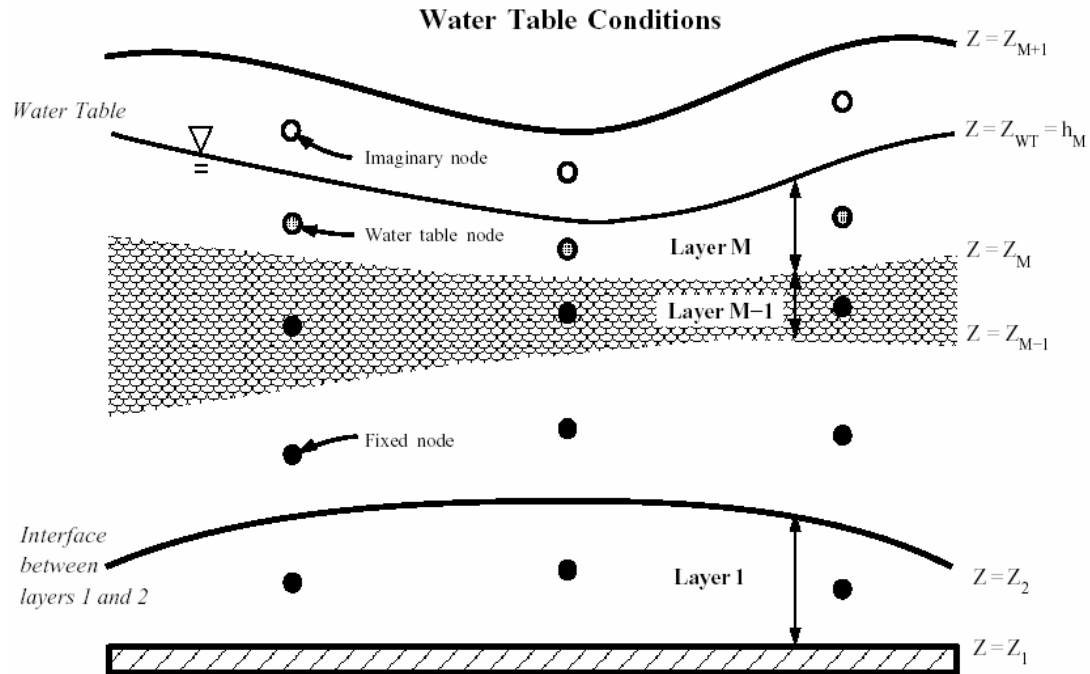
Το **PTC** δίνει ένα μήνυμα εάν παραβιάζεται η παραπάνω συνθήκη. Τυπώνει τη θέση του κόμβου, το μέγιστο πάχος κ.α. σχετικά με αυτή την παραβίαση και σταματά την εκτέλεση του προγράμματος. Εξάλλου η (2.27) πρέπει να ικανοποιείται και από τις αρχικές συνθήκες υδραυλικού ύψους. Αφού το z_{WT} ορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος, το οποίο βρίσκεται μέσα στους πίνακες των συντελεστών η (2.26) εισάγει μη γραμμικότητα στη λύση του συστήματος των εξισώσεων ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα εξομαλύνεται με την επανάληψη του δεύτερου βήματος του χωριστικού αλγορίθμου. Οι επαναλήψεις γίνονται σε ένα συγκεκριμένο βήμα χρόνου, με όλες τις ιδιότητες του πάχους στην (2.23) ενημερωμένες. Όταν το h μεταβάλλεται λιγότερο από το EPSILN, μια δεδομένη τιμή αντοχής, οι επαναλήψεις σταματούν και οι υπολογισμοί προχωρούν στο επόμενο βήμα.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη υδροφόρου ορίζοντα περιγράφει τη μη μόνιμη απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στον εμπλουτισμό. Αν θεωρηθεί ότι το S_y σημαίνει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα. Τότε οι σχετικές με την κατάσταση εξισώσεις δίνονται από την:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (2.28)$$

Χρησιμοποιώντας τους φανταστικούς κόμβους του στρώματος πάνω από το ανώτερο στρώμα ($M + 1$), η παραπάνω εξίσωση γράφεται με μορφή πεπερασμένων διαφορών όπου για κάθε κόμβο i του ανώτερου στρώματος ($k = M$), S_{yi} είναι το πορώδες του υδροφορέα, R_i είναι η καθαρή κάθετη διήθηση, Δz_i είναι το πάχος του στρώματος, και $(K_z)_i$ είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα.

Η εξίσωση που προκύπτει χρησιμοποιείται ως οριακή συνθήκη για τις τελικές εξισώσεις του μοντέλου όταν αυτό επιλύει το ανώτερο στρώμα $k = M$. Οι όροι που περιέχουν παραγώγους του χρόνου εισάγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές (άγνωστοι) στις τελικές εξισώσεις του συστήματος μόνο για το ανώτερο στρώμα.



Σχήμα 1.8: Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και βροχόπτωσης στο ανώτερο στρώμα. Οι επιφάνειες σημασμένες με $z = z_1$, $z = z_2$, κλπ., είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα. Σημείωση: ο κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας $z = z_{WT}$ πρέπει να ικανοποιεί την $z_M \leq z_{WT} \leq z_{M+1}$. (Πηγή: PTC manual)

1.4.3. Τρισδιάστατη Μεταφορά Ρύπου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε περιγραφή σε κάποιο βαθμό της διαδικασίας υπολογισμού των μεταβατικών υδραυλικών υψών $h(x,y,z,t)$ με την επίλυση της εξίσωσης ροής (1.1). Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται σύντομα οι ανάλογες διαδικασίες για την εξίσωση μεταφοράς ρύπων (1.3).

1.4.3.1 Εξισώσεις του Συστήματος

Οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y and V_z υπολογίζονται ως ποσότητες στρογγυλεμένες στο μέσο όρο των στοιχείων. Η εξίσωση μεταφοράς (1.3) είναι

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) \\ & - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.1).$$

Οι όροι διασποράς στην (3.1) δίνονται από τις εξισώσεις (Burnett and Frind [1987]):

$$\begin{aligned} D_{xx} &= (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2) / V + D_M \\ D_{yy} &= (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_V V_z^2) / V + D_M \\ D_{zz} &= (\alpha_V V_x^2 + \alpha_V V_y^2 + \alpha_L V_z^2) / V + D_M \\ D_{yx} &= D_{xy} = (\alpha_L - \alpha_T) V_x V_y / V \\ D_{yz} &= D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_V) V_y V_z / V \\ D_{zx} &= D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_V) V_z V_x / V \end{aligned} \quad (3.2)$$

και οι υπόλοιποι όροι είναι

D_M ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, συνήθως μικρός $[L^2/T]$,

α_L ο συντελεστής κατά μήκους διασποράς $[L]$,

α_T ο συντελεστής εγκάρσιας οριζόντιας διασποράς $[L]$,

α_V ο συντελεστής εγκάρσιας κάθετης διασποράς $[L]$,

V το μέτρο του διανύσματος της ταχύτητας $[L/T]$ ($V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$),

c η συγκέντρωση στο σημείο (x,y,z) σε χρόνο t $[M/L^3]$,

θ το πορώδες του υδροφορέα $[αδιάστατο]$,

$E(c)$ η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης,

Q η δύναμη άντλησης / εμπλουτισμού $[1/T]$ ($Q \equiv Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$),

Q_i ο ογκομετρικός ρυθμός άντλησης / εμπλουτισμού $[L^3/T]$ στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

c_w η συγκέντρωση του νερού στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

$\delta()$ είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac.

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ($Q_i \leq 0$), θεωρείται ότι η συγκέντρωση του νερού που αντλείται c_w ισούται με τη συγκέντρωση του νερού στο περιβάλλον γύρω από το σημείο αυτό c . Έτσι, σε όλες τις αντλίες ο όρος $Q(c_w - c) \equiv 0$ στην (3.1). Το πρόγραμμα λοιπόν συγκρατεί τους όρους με το Q στην (3.1) μόνο όταν η αντλία εμπλουτίζει τον υδροφορέα ($Q_i > 0$), με συγκέντρωση του νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα c_w .

1.4.3.2. Οριακές Συνθήκες

Το **PTC** δέχεται δύο τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση μεταφοράς, την καθορισμένη συγκέντρωση σε κάποιο κόμβο και την καθορισμένη ροή συμμεταφοράς. Οι οριακές συνθήκες είναι μηδενική ροή από διασπορά στα κάθετα όρια και μηδενική ολική ροή ρύπου στα άνω και κάτω όρια.

Οι καθορισμένες συγκεντρώσεις κόμβων δίνονται απευθείας από το χρήστη, ενώ οι καθορισμένες ροές συµµεταφοράς δίνονται μέσω δήλωσης µιας συγκέντρωσης συσχετισµένης µε τις ογκοµετρικές ροές υγρών στα δεδοµένα του προγράµµατος. Οµοίως έµµεσα η καθορισµένη ροή συµµεταφοράς εισάγεται μέσω της συγκέντρωσης που σχετίζεται µε το διαρρέον υγρό στην οριακή συνθήκη ροής τρίτου τύπου. (Πηγή: PTC manual)

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία Νομοθεσίας για τα Υπόγεια Ύδατα

2.1. Οδηγία 2000/60

2.1.1. Ορισμοί

Στην Οδηγία 2000/60 εφαρμόζονται οι ακόλουθοι ορισμοί:

Άρθρο 2

§2. "Υπόγεια ύδατα": το σύνολο των υδάτων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στη ζώνη κορεσμού και σε άμεση επαφή με το έδαφος ή το υπέδαφος.

§3. "Εσωτερικά ύδατα": το σύνολο των στάσιμων ή των ρεόντων επιφανειακών υδάτων και όλα τα υπόγεια ύδατα που βρίσκονται προς την πλευρά της ξηράς σε σχέση με τη γραμμή βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων.

§11. "Υδροφόρος ορίζοντας": υπόγειο στρώμα ή στρώματα βράχων ή άλλες γεωλογικές στοιβάδες επαρκώς πορώδεις και διαπερατές ώστε να επιτρέπουν είτε σημαντική ροή υπόγειων υδάτων είτε την άντληση σημαντικών ποσοτήτων υπόγειων υδάτων.

§12. "Σύστημα υπόγειων υδάτων": συγκεκριμένος όγκος υπόγειων υδάτων εντός ενός ή περισσότερων υδροφόρων οριζόντων.

§19. "Κατάσταση υπόγειων υδάτων": η συνολική έκφραση της κατάστασης υπογείου υδατικού συστήματος, που καθορίζεται από τις χαμηλότερες τιμές της ποσοτικής και της χημικής του κατάστασης.

§20. "Καλή κατάσταση υπόγειων υδάτων": η κατάσταση υπογείου υδατικού συστήματος που χαρακτηρίζεται τουλάχιστον "καλή", τόσο από ποσοτική όσο και από χημική άποψη.

§25. "Καλή χημική κατάσταση υπόγειων υδάτων": η χημική κατάσταση συστήματος υπόγειων υδάτων, η οποία πληροί όλους τους όρους του πίνακα 2.3.2 του παραρτήματος V.

§26. "Ποσοτική κατάσταση": η έκφραση του βαθμού στον οποίο ένα σύστημα υπόγειων υδάτων επηρεάζεται από άμεσες και έμμεσες αντλήσεις.

§27. "Διαθέσιμοι πόροι υπόγειων υδάτων": ο μακροπρόθεσμος μέσος ετήσιος ρυθμός γενικής ανατροφοδότησης ενός συστήματος υπόγειων υδάτων μείον τον μακροπρόθεσμο μέσο ετήσιο ρυθμό ροής που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων οικολογικής ποιότητας για τα συναφή επιφανειακά ύδατα οι οποίοι ορίζονται στο άρθρο 4, για την αποφυγή οιασδήποτε σημαντικής μείωσης της οικολογικής κατάστασης των υδάτων αυτών και για την αποφυγή οιασδήποτε σημαντικής ζημίας των συναφών χερσαίων οικοσυστημάτων.

§28. "Καλή ποσοτική κατάσταση": η κατάσταση που ορίζεται στον πίνακα 2.1.2 του παραρτήματος V.

§31. "Ρύπος": κάθε ουσία που εμπεριέχει τον κίνδυνο να προκαλέσει ρύπανση, ιδίως αυτές που απαριθμούνται στο παράρτημα VIII.

§32. "Απευθείας απόρριψη στα υπόγεια ύδατα": απόρριψη ρύπων στα υπόγεια ύδατα χωρίς να διαπεράσουν το έδαφος ή το υπέδαφος.

§33. "Ρύπανση": η, συνεπεία ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άμεση ή έμμεση εισαγωγή, στον αέρα, το νερό ή το έδαφος, ουσιών ή θερμότητας που μπορούν να είναι επιζήμια για την υγεία του ανθρώπου ή για την ποιότητα των υδατικών οικοσυστημάτων ή των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από υδατικά οικοσυστήματα, συντελούν στη φθορά υλικής ιδιοκτησίας, ή επηρεάζουν δυσμενώς ή παρεμβαίνουν σε λειτουργίες αναψυχής ή σε λοιπές νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος.

§34. "Περιβαλλοντικοί στόχοι": οι στόχοι που θεσπίζει το άρθρο 4.

Σχόλιο

Από τους ορισμούς αυτούς ο ορισμός §11 δεν είναι πολύ ακριβής. Ως υδροφόρος ορίζοντας νοείται στην εργασία αυτή το ανώτερο στρώμα του υπογείου νερού και για το «υπόγειο στρώμα ή στρώματα βράχων ή άλλες γεωλογικές στοιβάδες επαρκώς

πορώδεις και διαπερατές ώστε να επιτρέπουν είτε σημαντική ροή υπόγειων υδάτων είτε την άντληση σημαντικών ποσοτήτων υπόγειων υδάτων» ο όρος που υιοθετείται είναι υδροφορέας ως μετάφραση της αγγλικής λέξης aquifer.

Οι περιβαλλοντικοί στόχοι για τα υπόγεια νερά που θέτει το άρθρο 4 φαίνονται παρακάτω:

2.1.2. Περιβαλλοντικοί στόχοι

Άρθρο 4

β) για τα υπόγεια ύδατα

i) τα κράτη μέλη λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα ώστε να προληφθεί ή να περιορισθεί η διοχέτευση ρύπων στα υπόγεια ύδατα και να προληφθεί η υποβάθμιση της κατάστασης όλων των συστημάτων των υπόγειων υδάτων, με την επιφύλαξη της εφαρμογής των παραγράφων 6 και 7 και με την επιφύλαξη της παραγράφου 8 του παρόντος άρθρου, καθώς και με την επιφύλαξη της εφαρμογής του άρθρου 11 παράγραφος 3 στοιχείο i).

ii) τα κράτη μέλη προστατεύουν, αναβαθμίζουν και αποκαθιστούν όλα τα συστήματα των υπόγειων υδάτων, διασφαλίζουν ισορροπία μεταξύ της άντλησης και της ανατροφοδότησης των υπόγειων υδάτων, με στόχο την επίτευξη καλής κατάστασης των υπόγειων υδάτων το αργότερο δεκαπέντε έτη από την ημερομηνία έναρξης ισχύος της παρούσας οδηγίας, σύμφωνα με τις διατάξεις του παραρτήματος V, με την επιφύλαξη της εφαρμογής των παρατάσεων που καθορίζονται σύμφωνα με την παράγραφο 4 και της εφαρμογής των παραγράφων 5, 6 και 7 και με την επιφύλαξη της παραγράφου 8 του παρόντος άρθρου, καθώς και με την επιφύλαξη της εφαρμογής του άρθρου 11 παράγραφος 3 στοιχείο i).

iii) τα κράτη μέλη εφαρμόζουν τα αναγκαία μέτρα για την αναστροφή κάθε σημαντικής και έμμεσης ανοδικής τάσης συγκέντρωσης οιοδήποτε ρύπου, η οποία οφείλεται σε ανθρώπινη δραστηριότητα προκειμένου να μειωθεί προοδευτικά η ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Τα μέτρα για την επίτευξη της αναστροφής της τάσης εφαρμόζονται σύμφωνα με τις παραγράφους 2, 4 και 5 του άρθρου 17, λαμβάνοντας υπόψη τα εφαρμοστέα πρότυπα που εκτίθενται στη σχετική κοινοτική νομοθεσία, με την επιφύλαξη της εφαρμογής των παραγράφων 6 και 7 και την επιφύλαξη της παραγράφου 8.

Σχόλιο

Οι περιβαλλοντικοί στόχοι για τα υπόγεια νερά που θέτει η ευρωπαϊκή νομοθεσία είναι ιδιαίτερα αυστηροί. Η περίοδος προσαρμογής των δεκαπέντε ετών δεν είναι πολύ μεγάλη δεδομένης της εξαιρετικά επιβαρυνμένης κατάστασης των ελληνικών παράκτιων υδροφορέων. Για να επιτευχθούν οι όροι αυτοί χρειάζεται ένας γενικός σχεδιασμός που θα έχει ως στόχους:

- τη ρύθμιση των παροχών άντλησης στα ήδη υπάρχοντα πηγάδια αλλά και σε αυτά που θα ανοιχθούν στο μέλλον.
- τη μελέτη τρόπων εξυγίανσης και εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων των οποίων η κατάσταση δεν είναι η επιθυμητή.

Σημαντικά προβλήματα υφαλμύρινσης έχουν εμφανιστεί σε παράκτιους υδροφορείς κυρίως στις νησιωτικές περιοχές της χώρας, αφού τα επιφανειακά αποθέματα νερού είναι πάρα πολύ λίγα για να καλυφθούν οι ανάγκες ειδικά κατά τη θερινή (τουριστική) περίοδο οπότε και είναι πολύ αυξημένες. Η συνήθης πρακτική είναι η άντληση (υπεράντληση πολλές φορές) από τον υπόγειο υδροφόρα. Είναι γνωστό όμως ότι οι βροχοπτώσεις ειδικά τη θερινή περίοδο στα νησιά είναι σχεδόν μηδενικές άρα ακόμα και μικρές παροχές άντλησης έχουν δυνητικά μεγάλο αντίκτυπο στο υδραυλικό ύψος του υδροφορέα.

2.1.3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

2.1. Αρχικός χαρακτηρισμός

Τα κράτη μέλη προβαίνουν σε αρχικό χαρακτηρισμό όλων των συστημάτων υπόγειων υδάτων προκειμένου να αξιολογηθούν οι χρήσεις τους και οι κίνδυνοι που διατρέχουν να μην πληρούν τους στόχους για κάθε σύστημα υπόγειων υδάτων σύμφωνα με το άρθρο 4. Για τον αρχικό αυτό χαρακτηρισμό, τα κράτη μέλη μπορούν να συνενώνουν διάφορα συστήματα υπόγειων υδάτων. Κατά την ανάλυση αυτή, είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται υφιστάμενα στοιχεία υδρολογίας, γεωλογίας, εδαφολογίας, χρήσεων γης, απορροών, υδροληψιών κ.λπ., προκειμένου να προσδιορίζονται:

- η θέση και τα όρια του ή των συστημάτων υπόγειων υδάτων,
- οι πιέσεις τις οποίες αναμένεται να υποστούν το ή τα συστήματα υπόγειων υδάτων, δηλαδή μεταξύ άλλων:
 - διάχυτες πηγές ρύπανσης,
 - σημειακές πηγές ρύπανσης,
 - υδροληψία,
 - τεχνητή ανατροφοδότηση,
 - ο γενικός χαρακτήρας των υπερκείμενων στρωμάτων στην υδρολογική λεκάνη από την οποία τροφοδοτείται το σύστημα υπόγειων υδάτων,

- τα συστήματα υπόγειων υδάτων για τα οποία υπάρχουν άμεσα εξαρτημένα οικοσυστήματα επιφανειακών υδάτων ή χερσαία οικοσυστήματα.

2.2. Περαιτέρω χαρακτηρισμός

Έπειτα από τον αρχικό αυτό χαρακτηρισμό, τα κράτη μέλη προβαίνουν σε περαιτέρω χαρακτηρισμό των συστημάτων ή των ομάδων συστημάτων υπόγειων υδάτων τα οποία έχουν θεωρηθεί ότι απειλούνται προκειμένου να επιτευχθεί ακριβέστερη αξιολόγηση της σοβαρότητας του κινδύνου και να προσδιοριστούν τα τυχόν μέτρα που θα απαιτηθούν δυνάμει του άρθρου 11. Συνεπώς, ο χαρακτηρισμός αυτός περιλαμβάνει σχετικές πληροφορίες για τις επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και, κατά περίπτωση, πληροφορίες για:

- τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του συστήματος υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων της έκτασης και του τύπου των γεωλογικών ενοτήτων,
- τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του συστήματος υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων της υδροαγωγιμότητας, του πορώδους και της στεγανότητας,
- τα χαρακτηριστικά των επιφανειακών εναποθέσεων και εδαφών στην υδρολογική λεκάνη από την οποία τροφοδοτείται το σύστημα υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων του πάχους, του πορώδους, της υδροαγωγιμότητας και των απορροφητικών ιδιοτήτων των εναποθεμάτων και εδαφών,
- τα χαρακτηριστικά διαστρωμάτωσης του ύδατος εντός του συστήματος υπόγειων υδάτων,
- απογραφή των συνδεδεμένων επιφανειακών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των χερσαίων οικοσυστημάτων και των συστημάτων επιφανειακών υδάτων, με τα οποία συνδέεται δυναμικά το σύστημα υπόγειων υδάτων,
- εκτιμήσεις των κατευθύνσεων και των ρυθμών ανταλλαγής υδάτων μεταξύ του συστήματος υπόγειων υδάτων και των συνδεδεμένων επιφανειακών συστημάτων και
- επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό του μακροπρόθεσμου μέσου ετήσιου ρυθμού συνολικής ανατροφοδότησης,
- το χαρακτηρισμό της χημικής σύνθεσης των υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένου του καθορισμού των συμβολών από ανθρώπινη δραστηριότητα. Όταν καθορίζουν φυσικά βασικά επίπεδα για τα συστήματα αυτά υπόγειων υδάτων, τα κράτη μέλη μπορούν να χρησιμοποιούν τυπολογίες χαρακτηρισμού υπόγειων υδάτων.

2.3. Επισκόπηση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων επί των υπόγειων υδάτων

Για τα συστήματα υπόγειων υδάτων που διασχίζουν τα σύνορα μεταξύ δύο ή περισσότερων κρατών μελών ή θεωρούνται στον αρχικό χαρακτηρισμό που

διενεργείται σύμφωνα με το σημείο 2.1, ως διατρέχοντα τον κίνδυνο να μην πληρούν τους στόχους που καθορίζονται για κάθε σύστημα δυνάμει του άρθρου 4, συλλέγονται και διατηρούνται, κατά περίπτωση, οι ακόλουθες πληροφορίες για κάθε σύστημα υπόγειων υδάτων:

α) η θέση των σημείων υδροληψίας του συστήματος υπόγειων υδάτων πλην:

- των σημείων υδροληψίας που παρέχουν λιγότερα από 10 m³ ημερησίως κατά μέσον όρο ή
- των σημείων άντλησης ύδατος προοριζομένου για ανθρώπινη κατανάλωση, τα οποία παρέχουν λιγότερα από 10 m³ ημερησίως κατά μέσο όρο ή που εξυπηρετούν λιγότερα από 50 άτομα.

β) οι μέσοι ετήσιοι ρυθμοί υδροληψίας από τα σημεία αυτά.

γ) η χημική σύνθεση του ύδατος που αντλείται από το σύστημα υπόγειων υδάτων.

δ) η θέση των σημείων του συστήματος υπόγειων υδάτων στα οποία γίνεται άμεση εισαγωγή ύδατος.

ε) οι ρυθμοί απόρριψης στα σημεία αυτά.

στ) η χημική σύνθεση του ύδατος που εισάγεται στο σύστημα υπόγειων υδάτων και

ζ) η χρήση γης στην υδρολογική λεκάνη ή λεκάνες από τις οποίες το σύστημα υπόγειων υδάτων δέχεται τις ανατροφοδοτήσεις του, συμπεριλαμβανομένων των εισροών ρύπων και των ανθρωπογενών μεταβολών στα χαρακτηριστικά των ανατροφοδοτήσεων, όπως π.χ. η εκτροπή και η διαρροή ομβρίων λόγω στεγανοποίησης εδαφών, τεχνητής ανατροφοδότησης, κατασκευής φραγμάτων ή αποστράγγισης.

2.4. Επισκόπηση των επιπτώσεων των μεταβολών της στάθμης των υπόγειων υδάτων

Τα κράτη μέλη εντοπίζουν επίσης τα συστήματα υπόγειων υδάτων για τα οποία καθορίζονται χαμηλότεροι στόχοι δυνάμει του άρθρου 4, μεταξύ άλλων λόγω των επιπτώσεων της κατάστασης του συστήματος:

i) στα επιφανειακά ύδατα και τα συνδεδεμένα χερσαία οικοσυστήματα.

ii) στη ρύθμιση του ύδατος, την προστασία από τις πλημμύρες και την αποστράγγιση των γαιών.

iii) στην ανθρώπινη ανάπτυξη.

2.5. Επισκόπηση των επιπτώσεων της ρύπανσης στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων

Τα κράτη μέλη προσδιορίζουν επίσης τα συστήματα υπόγειων υδάτων για τα οποία καθορίζονται λιγότερο αυστηροί στόχοι δυνάμει του άρθρου 4 παράγραφος 5 όταν, λόγω των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας που ορίζεται στο άρθρο 5

παράγραφος 1, το σύστημα υπόγειων υδάτων είναι τόσο ρυπασμένο ώστε να είναι ανέφικτο ή δυσανάλογα δαπανηρό να επιτευχθεί καλή χημική κατάσταση υπόγειων υδάτων.

2.1.4. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V

2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

2.1. Ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων

2.1.1. Παράμετρος για την ταξινόμηση της ποσοτικής κατάστασης

Καθεστώς στάθμης των υπόγειων υδάτων

2.1.2. Ορισμός της ποσοτικής κατάστασης

Στοιχεία	Καλή κατάσταση
Στάθμη υπόγειων υδάτων	<p>Η στάθμη των υπόγειων υδάτων στο υπόγειο υδατικό σύστημα εξασφαλίζει ότι ο διαθέσιμος πόρος υπόγειων υδάτων δεν εξαντλείται από το μακροπρόθεσμο ετήσιο μέσο όρο άντλησης.</p> <p>Κατά συνέπεια, η στάθμη των υπόγειων υδάτων δεν υπόκειται σε ανθρωπογενείς μεταβολές που θα οδηγούσαν:</p> <ul style="list-style-type: none">- σε μη τήρηση των περιβαλλοντικών στόχων που ορίζονται στο άρθρο 4 για τα συνδεδεμένα επιφανειακά ύδατα,- σε σημαντική μείωση της κατάστασης των υδάτων αυτών,- σε σημαντική βλάβη των χερσαίων οικοσυστημάτων τα οποία εξαρτώνται άμεσα από το σύστημα υπόγειων υδάτων, <p>και μπορεί να εμφανίζονται προσωρινά, ή συνεχώς σε χωρικώς περιορισμένη περιοχή, μεταβολές της κατεύθυνσης της ροής λόγω μεταβολών της στάθμης, αλλά οι αντιστροφές αυτές δεν οδηγούν σε εισροή αλμυρού νερού ή άλλων υλών και δεν αποτελούν μόνιμη και σαφώς διαπιστωμένη ένδειξη τάσεων, οφειλόμενων σε ανθρωπογενή αίτια, αλλαγής της κατεύθυνσης της ροής ικανών να οδηγήσουν σε τέτοιες εισροές.</p>

2.2. Παρακολούθηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

2.2.1. Δίκτυο παρακολούθησης της στάθμης των υπόγειων υδάτων

Το δίκτυο παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων συγκροτείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις των άρθρων 7 και 8. Το δίκτυο παρακολούθησης σχεδιάζεται έτσι ώστε να παρέχει αξιόπιστη εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης όλων των υπόγειων υδατικών συστημάτων ή ομάδων συστημάτων, συμπεριλαμβανόμενης της εκτίμησης του διαθέσιμου πόρου υπόγειων υδάτων. Τα κράτη μέλη παρέχουν έναν ή περισσότερους χάρτες στο σχέδιο διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού στους οποίους φαίνεται το δίκτυο παρακολούθησης υπόγειων υδάτων.

2.2.2. Πυκνότητα των τόπων παρακολούθησης

Το δίκτυο περιλαμβάνει επαρκή αντιπροσωπευτικά σημεία παρακολούθησης με σκοπό την εκτίμηση της στάθμης των υπογείων υδάτων σε κάθε υπόγειο υδατικό σύστημα ή ομάδα συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις στην ανατροφοδότηση, και συγκεκριμένα:

- όσον αφορά τα συστήματα υπογείων υδάτων που διαπιστώνεται ότι κινδυνεύουν να μην επιτύχουν τους περιβαλλοντικούς στόχους του άρθρου 4, εξασφαλίζεται επαρκής πυκνότητα των σημείων παρακολούθησης προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωση των αντλήσεων και απορρίψεων στη στάθμη των υπογείων υδάτων,
- για τα συστήματα υπογείων υδάτων τα οποία ρέουν πέραν των ορίων ενός κράτους μέλους, εξασφαλίζεται ότι υπάρχουν επαρκή σημεία παρακολούθησης ώστε να εκτιμηθεί η κατεύθυνση και ο ρυθμός της ροής των υπογείων υδάτων δια των ορίων του κράτους μέλους.

2.2.3. Συχνότητα της παρακολούθησης

Η συχνότητα των παρατηρήσεων είναι επαρκής προκειμένου να εκτιμηθεί η ποσοτική κατάσταση κάθε υπόγειου υδατικού συστήματος ή ομάδας συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις στην ανατροφοδότηση, και συγκεκριμένα:

- όσον αφορά τα συστήματα υπόγειων υδάτων που διαπιστώνεται ότι κινδυνεύουν να μην επιτύχουν τους περιβαλλοντικούς στόχους του άρθρου 4, εξασφαλίζεται επαρκής συχνότητα των μετρήσεων προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωση των αντλήσεων και απορρίψεων στη στάθμη των υπόγειων υδάτων,
- για τα συστήματα υπόγειων υδάτων στα οποία υπόγεια ύδατα ρέουν πέραν των ορίων ενός κράτους μέλους, εξασφαλίζεται επαρκής συχνότητα μετρήσεων ώστε να εκτιμηθεί η κατεύθυνση και ο ρυθμός της ροής των υπόγειων υδάτων διά των ορίων του κράτους μέλους.

2.2.4. Ερμηνεία και παρουσίαση της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδάτων
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το δίκτυο παρακολούθησης ενός συστήματος υπόγειων υδάτων ή ομάδας συστημάτων χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης του εν λόγω συστήματος ή συστημάτων. Με την επιφύλαξη του σημείου 2.5, τα κράτη μέλη καταρτίζουν χάρτη με βάση αυτή την εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους χρωματικούς κώδικες:

Καλή: πράσινο

Κακή: κόκκινο

2.3. Ερμηνεία και παρουσίαση της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδάτων

2.3.1. Παράμετροι για τον προσδιορισμό της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

Αγωγιμότητα

Συγκεντρώσεις ρύπων

2.3.2. Ορισμός της καλής χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

Στοιχεία	Καλή κατάσταση
Γενικά	<p>Η χημική σύνθεση του συστήματος υπογείων υδάτων είναι τέτοια ώστε οι συγκεντρώσεις των ρύπων:</p> <ul style="list-style-type: none"> - όπως καθορίζεται παρακάτω, δεν εμφανίζουν επιπτώσεις εισροής αλμυρού νερού ή άλλων υλών, - δεν υπερβαίνουν τα πρότυπα ποιότητας που εφαρμόζονται βάσει άλλης σχετικής κοινοτικής νομοθεσίας σύμφωνα με το άρθρο 17, - δεν είναι τέτοιες ώστε να οδηγήσουν σε μη επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων του άρθρου 4 για τα συνδεδεμένα επιφανειακά ύδατα, ούτε σε σημαντική επιδείνωση της οικολογικής ή χημικής ποιότητας των συστημάτων αυτών, ούτε σε σημαντική βλάβη των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από το σύστημα των υπόγειων υδάτων.
Αγωγιμότητα	Οι μεταβολές της αγωγιμότητας δεν υποδηλώνουν εισροή αλμυρού νερού ή άλλων υλών στο υπόγειο υδατικό σύστημα.

2.4. Παρακολούθηση της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

2.4.1. Δίκτυο παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων

Το δίκτυο παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων συγκροτείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις των άρθρων 7 και 8. Το δίκτυο παρακολούθησης σχεδιάζεται έτσι ώστε να παρέχεται συνεκτική και συνολική εποπτεία της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων σε κάθε λεκάνη απορροής ποταμού και να ανιχνεύεται η παρουσία μακροπρόθεσμων ανθρωπογενούς αιτίας ανοδικών τάσεων των ρύπων.

Με βάση το χαρακτηρισμό και την εκτίμηση των επιπτώσεων που διενεργούνται σύμφωνα με το άρθρο 5 και το παράρτημα II, τα κράτη μέλη, για κάθε περίοδο εφαρμογής ενός σχεδίου διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού, καταρτίζουν πρόγραμμα εποπτικής παρακολούθησης. Τα αποτελέσματα του προγράμματος αυτού χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση προγράμματος επιχειρησιακής παρακολούθησης, το οποίο εφαρμόζεται κατά το υπόλοιπο τμήμα της περιόδου του σχεδίου.

Στο σχέδιο παρέχονται εκτιμήσεις για το βαθμό πιστότητας και ακρίβειας των παρεχόμενων από τα προγράμματα παρακολούθησης αποτελεσμάτων.

2.4.2. Εποπτική παρακολούθηση

Στόχος

Η εποπτική παρακολούθηση διενεργείται για:

- τη συμπλήρωση και την επικύρωση της διαδικασίας εκτίμησης,
- την παροχή πληροφοριών που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση μακροπρόθεσμων τάσεων που οφείλονται σε μεταβολές των φυσικών συνθηκών αλλά και σε ανθρωπινες δραστηριότητες.

Επιλογή των τόπων παρακολούθησης

Επιλέγονται επαρκείς τόποι παρακολούθησης όσον αφορά:

- συστήματα που διαπιστώνεται ότι κινδυνεύουν μετά την εφαρμογή του χαρακτηρισμού που γίνεται σύμφωνα με το παράρτημα II,
- συστήματα που διασχίζουν όρια κράτους μέλους.

Επιλογή παραμέτρων

Η ακόλουθη σειρά βασικών παραμέτρων παρακολουθείται σε όλα τα επιλεγμένα συστήματα υπογείων υδάτων:

- περιεκτικότητα σε οξυγόνο,
- τιμή pH,
- αγωγιμότητα,
- νιτρικές ενώσεις,
- αμμώνιο.

Τα συστήματα, τα οποία διαπιστώνεται, σύμφωνα με το παράρτημα II, ότι διατρέχουν σημαντικό κίνδυνο να μην επιτύχουν την καλή κατάσταση, παρακολουθούνται επίσης ως προς τις παραμέτρους που είναι ενδεικτικές των επιπτώσεων των πιέσεων αυτών.

Τα διασυνοριακά υδατικά συστήματα παρακολουθούνται επίσης ως προς τις παραμέτρους που χρειάζεται για την προστασία όλων των χρήσεων που υποστηρίζονται από τη ροή των υπογείων υδάτων.

2.4.3. Επιχειρησιακή παρακολούθηση

Στόχος

Κατά τις ενδιάμεσες περιόδους μεταξύ των προγραμμάτων εποπτικής παρακολούθησης πραγματοποιείται επιχειρησιακή παρακολούθηση, προκειμένου:

- να διαπιστωθεί η χημική κατάσταση όλων των συστημάτων υπόγειων υδάτων ή ομάδων συστημάτων που έχουν χαρακτηριστεί ότι κινδυνεύουν,
- να διαπιστωθεί η παρουσία μακροπρόθεσμων ανθρωπογενούς αιτίας ανοδικών τάσεων στη συγκέντρωση των ρύπων.

Επιλογή των τόπων παρακολούθησης

Επιχειρησιακή παρακολούθηση διενεργείται σε όλα τα συστήματα υπόγειων υδάτων ή ομάδες συστημάτων, τα οποία, με βάση τόσο την εκτίμηση των επιπτώσεων που πραγματοποιείται σύμφωνα με το παράρτημα II όσο και την εποπτική παρακολούθηση, χαρακτηρίζονται ότι κινδυνεύουν να μην επιτύχουν τους στόχους του άρθρου 4. Η επιλογή των τόπων παρακολούθησης αντικατοπτρίζει επίσης μια εκτίμηση για την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων παρακολούθησης του συγκεκριμένου τόπου ως προς την ποιότητα του σχετικού ενός ή περισσότερων συστημάτων υπόγειων υδάτων.

Συχνότητα της παρακολούθησης

Κατά τις ενδιάμεσες περιόδους μεταξύ των προγραμμάτων εποπτικής παρακολούθησης πραγματοποιείται επιχειρησιακή παρακολούθηση σε επαρκή συχνότητα προκειμένου να ανιχνευθούν οι επιπτώσεις των σχετικών πιέσεων και, πάντως, τουλάχιστον μία φορά το χρόνο.

2.4.4. Διαπίστωση των τάσεων των ρύπων

Τα κράτη μέλη χρησιμοποιούν τα δεδομένα τόσο της εποπτικής όσο και της επιχειρησιακής παρακολούθησης για τη διαπίστωση μακροπρόθεσμων ανθρωπογενούς αιτίας ανοδικών τάσεων στις συγκεντρώσεις ρύπων και την αντιστροφή των τάσεων αυτών. Προσδιορίζεται το βασικό έτος ή βασική περίοδος από την οποία υπολογίζονται οι τάσεις αυτές. Ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται σε ένα σύστημα ή, κατά περίπτωση, σε ομάδα συστημάτων υπόγειων υδάτων. Η αντιστροφή των τάσεων αποδεικνύεται στατιστικά και δηλώνεται ο βαθμός αξιοπιστίας της σχετικής διαπίστωσης.

2.4.5. Ερμηνεία και παρουσίαση της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

Κατά την εκτίμηση της κατάστασης, τα αποτελέσματα των μεμονωμένων σημείων παρακολούθησης ενός συστήματος υπογείων υδάτων ενσωματώνονται στα αποτελέσματα για το όλο υδατικό σύστημα. Με την επιφύλαξη των σχετικών οδηγιών, για να θεωρηθεί καλή η κατάσταση ενός συστήματος υπογείων υδάτων, ως προς τις χημικές παραμέτρους για τις οποίες ορίζονται στην κοινοτική νομοθεσία ποιοτικά περιβαλλοντικά πρότυπα:

- υπολογίζεται η μέση τιμή των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης σε κάθε σημείο του συστήματος ή της ομάδας συστημάτων υπόγειων υδάτων και
- σύμφωνα με το άρθρο 17, οι μέσες αυτές τιμές χρησιμοποιούνται για να αποδεικνύεται η τήρηση της καλής χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων.

Με την επιφύλαξη του σημείου 2.5, τα κράτη μέλη καταρτίζουν χάρτη της χημικής κατάστασης των υπογείων υδάτων, χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους χρωματικούς κώδικες:

Καλή: πράσινο

Κακή: κόκκινο

Τα κράτη μέλη σημειώνουν επίσης στο χάρτη με μαύρη κουκκίδα τα συστήματα υπόγειων υδάτων που υπόκεινται σε μόνιμη και σημαντική ανοδική τάση των συγκεντρώσεων οποιουδήποτε ρύπου οφειλόμενη στις επιπτώσεις ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η αντιστροφή μιας τάσης σημειώνεται στο χάρτη με γαλάζια κουκκίδα.

Οι χάρτες αυτοί συμπεριλαμβάνονται στο σχέδιο διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού.

2.5. Παρουσίαση της κατάστασης των υπόγειων υδάτων

Τα κράτη μέλη παρέχουν στο σχέδιο διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού χάρτη, στον οποίο φαίνεται, για κάθε σύστημα υπογείων υδάτων ή ομάδα συστημάτων, τόσο η ποσοτική όσο και η χημική κατάσταση του εν λόγω συστήματος ή ομάδας συστημάτων, χρησιμοποιώντας χρωματικούς κώδικες σύμφωνα με τις απαιτήσεις των σημείων 2.2.4 και 2.4.5. Τα κράτη μέλη έχουν την επιλογή να μην καταρτίσουν χωριστούς χάρτες για τα σημεία 2.2.4 και 2.4.5, αλλά, στην περίπτωση αυτή, θα δηλώνουν επίσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σημείου 2.4.5, στον απαιτούμενο από το τμήμα αυτό χάρτη τα συστήματα που υπόκεινται σε σημαντική και μόνιμη ανοδική τάση της συγκέντρωσης οποιουδήποτε ρύπου ή τυχόν αντιστροφή της τάσης αυτής. (Οδηγία 2000/60, www.europa.eu.int)

Κεφάλαιο 3

Σύντομη περιγραφή της περιοχής

3.1. Φυσικό Περιβάλλον

3.1.1. Μετεωρολογικά και κλιματικά στοιχεία

3.1.1.1. Γενικά για το κλίμα της Κρήτης

Το κλίμα της Κρήτης είναι Μεσογειακό (Mediterranean) προς το Θαλάσσιο (Marine) {Marine Mediterranean}. Στα Ορεινά όμως τείνει προς τον Ηπειρωτικό (Continental) τύπο κλίματος {Continental Mediterranean}. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος κυμαίνεται μεταξύ 14 και 15 °C.

Από την άποψη της ηπιότητας του κλίματος και των μεταβολών, το κλίμα της Κρήτης θεωρείται προνομιούχο και οφείλεται στην κεντρική θέση που κατέχει η νήσος στην Ανατολική Μεσόγειο. Ο Χειμώνας αρχίζει συνήθως τα μέσα Δεκεμβρίου και είναι ήπιος. Ο ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Ιανουάριος, που θερμομετρικά

ελάχιστα διαφέρει από το Φεβρουάριο. Η διαφορά τους όμως τόσο από το Δεκέμβριο όσο και από το Μάρτιο είναι αισθητή.

Γενικώς τα πεδινά της Κρήτης και ιδιαίτερα της Ανατολικής είναι μια από τις θερμότερες περιοχές της Ελλάδος και με μακρά ηλιοφάνεια κατά τους μήνες Οκτώβριο μέχρι Απρίλιο. Το θέρος, λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων, είναι σχετικά δροσερό και διαρκεί από τον Ιούνιο μέχρι το Σεπτέμβριο. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Η νέφωση είναι γενικά μικρή και μειώνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα παράλια προς την ηπειρωτική χώρα.

3.1.1.2. Ειδικά για την περιοχή μελέτης

Στοιχεία για το κλίμα της περιοχής μελέτης δίνονται από τον μετεωρολογικό σταθμό: STATION ΗΡΑΚΛΕΙΟ 754 LATITUDE 35° 20' N LONGITUDE 25° 11' E ALTITUDE OF BAROMETER 39.3 METERS. Τα στοιχεία είναι της περιόδου 1955-1998.

Κατακρημνίσεις

Το ετήσιο ύψος βροχής είναι 485,5 mm. Η πορεία των βροχοπτώσεων παρουσιάζει ελάχιστο στους μήνες Ιούνιο ως Αύγουστο (0,7 mm), μέγιστο τον Ιανουάριο (91,7 mm) και ένα δευτερεύον μέγιστο τον Οκτώβριο (64,8). Οι χιονοπτώσεις στην περιοχή είναι σπάνιο φαινόμενο.

Άνεμοι

Επικρατούντες άνεμοι στην περιοχή είναι του βορείου τομέα (51%), αξιόλογη είναι η παρουσία και των νοτίων ανέμων, ενώ η συχνότητα των νηνεμιών είναι πολύ μικρή (17,5%).

Οι μέγιστες εντάσεις στην περιοχή φτάνουν μέχρι και τα 10 Beauforts, (N, ΝΔ, αλλά και Β διευθύνσεων).

Αρκετά ισχυροί άνεμοι (3 και 4 Beauforts) πνέουν σε σχετικά. μεγάλη συχνότητα (43%) από τους οποίους τη μεγαλύτερη συχνότητα έχουν οι βορειοδυτικοί άνεμοι (20%).

Κατά τους χειμερινούς μήνες υπερέχουν οι νότιοι άνεμοι ενώ από τον Απρίλιο και μετά επικρατούν οι ΒΔ.

STATION ΗΡΑΚΛΕΙΟ 754										
LATITUDE 35° 20' N LONGITUDE 25° 11' E ALTITUDE OF BAROMETER 39.3 METERS										
PERIOD 1955-1998										
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALM	SUM
0									17,527	17,527
1	0,855	0,537	0,372	0,613	1,468	0,603	0,307	0,646		5,401
2	4,360	2,279	0,953	2,312	5,149	1,884	1,183	3,725		21,845
3	4,941	1,435	0,603	1,183	2,695	0,865	1,490	9,082		22,294
4	4,229	0,438	0,142	0,657	2,421	0,679	1,326	10,649		20,541
5	1,665	0,142	0,033	0,351	1,589	0,449	0,362	3,571		8,162
6	0,690	0,033	0,011	0,208	0,898	0,208	0,088	1,019		3,155
7	0,164	0,011	0,011	0,066	0,274	0,055	0,022	0,142		0,745
8	0,055	0,000	0,000	0,033	0,110	0,011	0,011	0,044		0,264
9	0,011	0,000	0,000	0,011	0,011	0,000	0,000	0,011		0,044
10	0,000	0,000	0,000	0,011	0,011	0,000	0,000	0,000		0,022
>=11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
SUM	16,970	4,875	2,125	5,445	14,626	4,754	4,789	28,889	17,527	100,000

Πίνακας 3.1. Ανεμολογικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης για την περίοδο 1955-1998 (Πηγή: Ε.Μ.Υ.)

3.1.2. Γεωλογικά χαρακτηριστικά - Έδαφος

3.1.2.1. Υδρογεωλογία της περιοχής

Στην λεκάνη του Ηρακλείου επικρατούν νεογενείς αποθέσεις (κυρίως μάργες, άργιλοι και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι). Νότια του Δήμου Νέας Αλικαρνασσού – μέσα στην περιοχή μελέτης – εμφανίζονται επίσης και ανθρακικοί σχηματισμοί του προνεογενούς.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί με υδρογεωλογικό ενδιαφέρον είναι κυρίως οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι οι οποίοι λόγω του καρστ και των ρωγμών τους θεωρούνται υδροπερατοί. Αυτοί μόνο θεωρείται ότι μπορούν να έχουν υδροφορείς μιας και οι λοιποί γεωλογικοί σχηματισμοί (μάργες και άργιλοι) είναι αδιαπέρατοι λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους και δεν επιτρέπουν στο νερό της βροχής να κατεισδύσει σε βάθος.

Στην ευρύτερη περιοχή της Καλλιθέας τα πετρώματα είναι νεογενείς αποθέσεις από φυλλώδεις μάργες, αργίλους, γύψους και μαργαϊκούς ασβεστολίθους.

Υδροφορείς βρίσκονται στις περιοχές που επικρατούν γύψοι και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι ενώ σε περιοχές με φυλλώδεις μάργες οι γεωτρήσεις έδειξαν μόνο πολύ μικρές παροχές.

Επειδή οι παραπάνω υδροφορείς είναι τοπικής κλίμακας δεν αναμένονται σημαντικά αποθέματα νερού. (Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων νέας εθνικής οδού Ηρακλείου – Λασιθίου)

Γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης				
A/A	Αρ. Πρ.	Δήμος – Κοινότητα	Βάθος (m)	Παροχή (m ³ /h)
1	Γ431	Καλλιθέας	93	16
2	Γ453	»	120	80
3	Γ454	»	120	80
4	Γ434	Κνωσσού	75	60

Πίνακας 3.2. Στοιχεία για τις γεωτρήσεις της περιοχής (Πηγή: Υδρογεωλογική Μελέτη Βορείου Νομού Ηρακλείου, 2000)

3.1.2.2. Σεισμικότητα της περιοχής

Η Κρήτη από τη θέση που κατέχει γεωγραφικά, κατατάσσεται από απόψεως σεισμικής επικινδυνότητας στην κατηγορία ΙΙΙ, σε σύνολο τεσσάρων για όλη την χώρα. (Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων νέας εθνικής οδού Ηρακλείου – Λασιθίου)

3.1.2.3. Εδάφη

Τα εδάφη στην περιοχή μελέτης είναι στο μεγαλύτερο τμήμα τους αποτέλεσμα δράσης -των διεργασιών διάβρωσης. Το μητρικό πέτρωμα των εδαφών είναι κυρίως ο ασβεστόλιθος που είναι και το κυρίαρχο πέτρωμα στην περιοχή. (Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων νέας εθνικής οδού Ηρακλείου – Λασιθίου)

3.1.3. Οικοσυστήματα - Χλωρίδα - Πανίδα - Φυτοκάλυψη

Η δασική βλάστηση της παράκτιας περιοχής κατατάσσεται στην «Θερμομεσογειακή διάπλαση (Oleo-Ceratonion) Ανατολικής Μεσογείου» και ένα μέρος της έκτασης προς τα ορεινά της ευρύτερης περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως «Μεσο-μεσογειακή διάπλαση της Αριάς (Quercion ilicis) τύπος Βαλκανικός και Ανατολικής Μεσογείου.

Οι διαφορετικοί τύποι χρήσης γης φιλοξενούν αντίστοιχα την χαρακτηριστική τους βλάστηση.

Στη περιοχή εκτός από τις μικρής έκτασης πεδινές περιοχές, υπάρχουν ακόμα ορεινές και λοφώδεις κυρίως δασικές περιοχές και παραθαλάσσιες αμμώδεις και βραχώδεις περιοχές. (ΒΟΑΚ, Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων νέας εθνικής οδού Ηρακλείου – Λασιθίου)

3.1.4. Φυσικό τοπίο

3.1.4.1. Γεωμορφολογία της περιοχής.

Η περιοχή έχει έντονο ανάγλυφο που είναι υποβαθμισμένο σε χαρακτηριστικά σημεία. Είναι πλούσιο σε χώνους (δολίνες) που οφείλονται στην ασβεστολιθική σύσταση των πετρωμάτων και την τεκτονική τους. Έτσι η κατανομή των ορεινών όγκων με τη δαντελωτή μορφή των ακτών δημιουργούν συνθήκες μεγάλης ποικιλίας μικροτοπίων. (Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων νέας εθνικής οδού Ηρακλείου – Λασιθίου)

3.1.4.2. Βλάστηση της περιοχής

Το λιγοστό πεδινό έδαφος χαρακτηρίζεται από καλλιέργεια ελιάς και από μικρές άγονες ή χέρσες εκτάσεις και μικρή περιοχή γης υψηλής παραγωγικότητας (θερμοκήπια κλπ.). Οι ορεινές και λοφώδεις περιοχές αποτελούμενες από ημιβραχώδη ή ασβεστολιθικά εδάφη χαρακτηρίζονται ως γυμνές εκτάσεις σε συνθήκες έντονης υποβάθμισης, ή το πολύ ως κατάλοιπα παλαιότερων δασικών εκτάσεων.

Η βλάστηση έχει όλη την ποικιλία των ειδών της Κρήτης αλλά η παρουσία της στο φυσικό αυτό χώρο χαρακτηρίζεται με μικρή οπτική ποιότητα. (ΒΟΑΚ, Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων νέας εθνικής οδού Ηρακλείου – Λασιθίου)

Κεφάλαιο 4

Εισαγωγή και Επεξεργασία των Δεδομένων

4.1. Διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων της περιοχής στο μοντέλο

Το μοντέλο PTC χρειάζεται κάποια αρχικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης για να μπορέσει να προσομοιώσει τον υπόγειο υδροφορέα. Αρχικά εισάγονται σε αυτό πληροφορίες για τον τύπο του υδροφορέα, στοιχεία υδραυλικής αγωγιμότητας και υψομετρικά στοιχεία και δημιουργείται ένα ομοίωμα της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια προστίθενται και στοιχεία βροχόπτωσης, οι οριακές και αρχικές συνθήκες και ο χρόνος της προσομοίωσης και προσομοιώνεται το φυσικό σύστημα. Το μοντέλο υπολογίζει το υδραυλικό ύψος, την ταχύτητα του νερού στη x και την y κατεύθυνση καθώς και τη συγκέντρωση μιας ουσίας η οποία διακινείται μέσα στο υπόγειο νερό.

Για τη δημιουργία του ομοιώματος της περιοχής μελέτης εισήχθησαν στο μοντέλο τρεις χάρτες της περιοχής μελέτης οι οποίοι προσαρμόστηκαν ώστε να αλληλοεπικαλύπτονται. Οι χάρτες αυτοί περιέχουν στοιχεία για το ανάγλυφο της περιοχής, για τη γεωλογία και για τα πηγάδια που υπάρχουν στην περιοχή.

Από το χάρτη με τις ισοϋψείς δόθηκαν στο μοντέλο τα στοιχεία των υψομέτρων στην περιοχή και δημιουργήθηκε με παρεμβολή το ανάγλυφο της περιοχής. Στα

απόλυτα υψόμετρα που δίνονται από το χάρτη προστέθηκαν 100 μέτρα μιας και το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται στα 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Ο γεωλογικός χάρτης όπου φαίνονται τα διάφορα πετρώματα και τα ρήγματα της περιοχής χρησιμοποιήθηκε για να οριστεί η περιοχή μελέτης και να γίνουν – λόγω έλλειψης στοιχείων – υποθέσεις για την υδραυλική αγωγιμότητα.

Η περιοχή μελέτης είναι η ευρύτερη περιοχή στα ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου. Περιλαμβάνει την ΒΙ.ΠΕ. και τις ανατολικές συνοικίες της πόλης ενώ εκτείνεται στα νότια μέχρι τις συνοικίες Άνω Φορτέτσα – Νέα Αλάτσατα – Καλλιθέα – Πρασάς. Ανατολικά φτάνει μέχρι τον Καρτερό ποταμό και κοντά στην ακτή το όριο μεταφέρεται λίγο πιο ανατολικά περιλαμβάνοντας και τον οικισμό του Καρτερού.

Τα πετρώματα μέσα στην περιοχή μελέτης και τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας αυτών όπως βρέθηκαν στη βιβλιογραφία φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Είδος πετρώματος	Υδραυλική αγωγιμότητα
Άμμος	430 m/d
Χαλαρά αργιλοαμμώδη	260 m/d
Ασβεστόλιθοι – Δολομίτες	8,64 m/d
Βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι	5,2 m/d
Μάργες – μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	0,15 m/d

Πίνακας 4.1. Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τα πετρώματα της περιοχής μελέτης. (Πηγές: A. Lerman, 1979, E. M. Shaw 1988, www.geo.unmwi.ethz.ch)

Στο ομοίωμα της περιοχής που δημιουργήθηκε ήδη από το μοντέλο, προστέθηκαν τα στοιχεία βροχόπτωσης, οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες και το μοντέλο προσομοίωσε την κίνηση του νερού μέσα στους υπόγειους υδροφορείς παρέχοντας στοιχεία για το υδραυλικό ύψος και την ταχύτητα του νερού.

4.1.1. Βαθμονόμηση του μοντέλου

Η βαθμονόμηση του μοντέλου ήταν ένα πολύπλοκο πρόβλημα αφού δεν υπήρχαν αρκετά στοιχεία από πηγάδια στην περιοχή που να δείχνουν ακριβώς το όριο το μετώπου της υφαλμύρινσης. Το μόνο δεδομένο ήταν ότι τα πηγάδια Γ453 και Γ454 στην ΒΙ.ΠΕ. βρίσκονταν μέσα στη ζώνη υφαλμύρινσης και το όριο αυτής είναι μεταξύ των πηγαδιών αυτών και των Γ431 και Γ434. Με κατάλληλες οριακές

συνθήκες έγινε προσπάθεια βαθμονόμησης του μοντέλου ώστε το όριο της ζώνης να βρίσκεται στην επιθυμητή θέση.

4.1.2. Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι 1^{ου} και 2^{ου} είδους. Οριακή συνθήκη πρώτου είδους υπάρχει στην παραλιακή ζώνη όπου το υδραυλικό ύψος είναι 100 μέτρα όση δηλαδή και η στάθμη της θάλασσας στη ζώνη αυτή. Οριακή συνθήκη δευτέρου είδους υπάρχει στα σημεία που υπάρχουν διαπερατά πετρώματα στα όρια της περιοχής μελέτης. Από τα σημεία αυτά γίνεται η παραδοχή ότι εισρέει στην περιοχή σταθερός όγκος νερού ανά μονάδα χρόνου. Για να είναι η παραδοχή πιο ακριβής το έτος χωρίστηκε σε δύο περιόδους και η παροχή της θερινής περιόδου λήφθηκε μειωμένη κατά 10 – 50 % σε σχέση με εκείνη της χειμερινής όπως άλλωστε και αναμενόταν.

Οριακή συνθήκη δευτέρου είδους αποτελούν επίσης και τα πηγάδια που βρίσκονται μέσα στην περιοχή μελέτης. Επειδή τα πηγάδια αυτά αντλούν για βιομηχανική χρήση, δεν αναμένεται να σταματήσει η άντληση κατά τη χειμερινή περίοδο αλλά μια μείωση κατά 20% πιθανότατα αντιπροσωπεύει την πραγματική κατάσταση.

4.1.3. Βροχόπτωση

Το μοντέλο ζητάει ως βροχόπτωση την διήθηση μέσω του εδάφους προς τον υπόγειο υδροφορέα. Σύμφωνα με στοιχεία από την υδρογεωλογική μελέτη του βόρειου νομού Ηρακλείου το ποσοστό του όγκου της βροχόπτωσης που διηθείται είναι το 11% σε αδιαπέρατους σχηματισμούς και το 23% σε υδροπερατούς. Στην περιοχή μελέτης έκτασης 22.306.600 m² οι υδροπερατοί σχηματισμοί αποτελούν το 49,9% (11.128.700 m²) και οι αδιαπέρατοι το 50,1% (11.177.900 m²). Αν από τους υδροπερατούς σχηματισμούς αφαιρεθεί το κομμάτι που είναι κτισμένο και η διήθηση σε αυτό θα είναι πολύ μικρή (αμελητέα) μένει 27,1% (654.100 m²) Η βροχόπτωση που δίνεται για την περιοχή από 4 γειτονικά σε αυτή βροχόμετρα φαίνεται στον πίνακα 4.2. Η διήθηση υπολογίζεται από το γενικό μέσο όρο της περιοχής.

- Υδροπερατοί σχηματισμοί

$$27,1\% \cdot 23\% \cdot 553,6 \text{ mm/y} = 29,3 \text{ mm/y}$$

- Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

$$49,9\% \cdot 11\% \cdot 553,6 \text{ mm/y} = 30,5 \text{ mm/y}$$

Αρα η συνολική διήθηση είναι 59,9 mm/y. Επειδή η θερινή περίοδος είναι κατά βάση ξηρή, γίνεται η παραδοχή ότι η βροχόπτωση αυτή συμβαίνει στις 180 ημέρες της χειμερινής περιόδου. Έτσι στο μοντέλο μέσα εισήχθη τιμή βροχόπτωσης 0,00033 m/d.

Έτος	Φοινικιάς	Αγ. Σύλα	Σκαλάνι	Βόνη
1987/88	462,0	426,86	496,45	648,0
1988/89	475,5	412,56	508,83	603,0
1989/90	474,5	334,37	435,35	438,5
1990/91	724,0	548,88	593,91	674,0
1991/92	826,5	634,46	573,48	719,0
1992/93	523,0	379,95	418,68	452,0
1993/94	750,1	542,36	519,26	724,4
M.O.	628.9	475.4	508.2	601.8
M.O. βροχής των 4 βροχόμετρων 553,6 mm				

Πίνακας 4.2. Τιμές βροχόπτωσης από σημεία κοντά στην περιοχή μελέτης. (Πηγή: Υδρογεωλογική Μελέτη Βορείου Νομού Ηρακλείου, 2000)

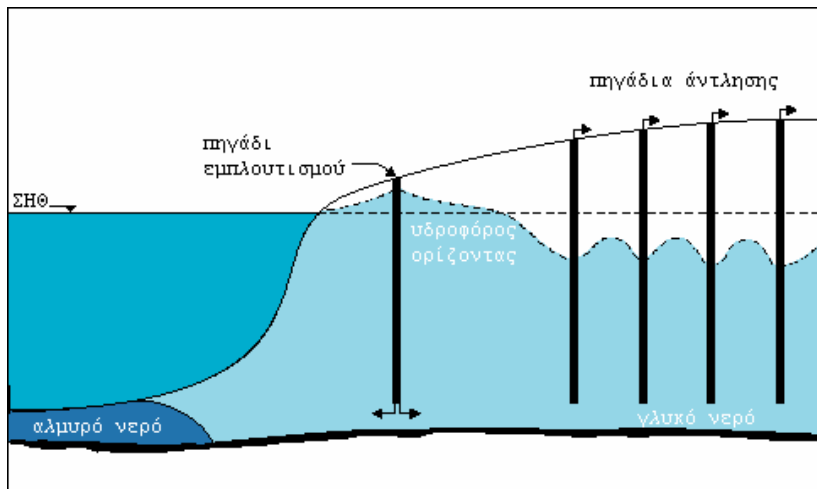
Μετά την προσομοίωση για διάστημα 3 ετών στα διαγράμματα που προκύπτουν στο τέλος της τρίτης θερινής και της τρίτης χειμερινής περιόδου φαίνονται οι γραμμές ίσου υδραυλικού ύψους. Σύμφωνα με τον τύπο των Ghyben – Herzberg η μέγιστη εισχώρηση αλμυρού ύδατος (άκρο της ζώνης υφαλμύρισης) θα βρίσκεται στο σημείο που το ύψος του νερού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας θα είναι το 40πλάσιο του πάχους του υδροφορέα από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι το αδιαπέρατο στρώμα. Επειδή το πάχος του υδροφορέα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 100 m, το άκρο θα εμφανίζεται στα σημεία με υδραυλικό ύψος 102,5 m. Τα σημεία με μικρότερο υδραυλικό ύψος θα βρίσκονται μέσα στη ζώνη υφαλμύρισης.

4.2. Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης – Περιγραφή Σεναρίων και Αποτελέσματα

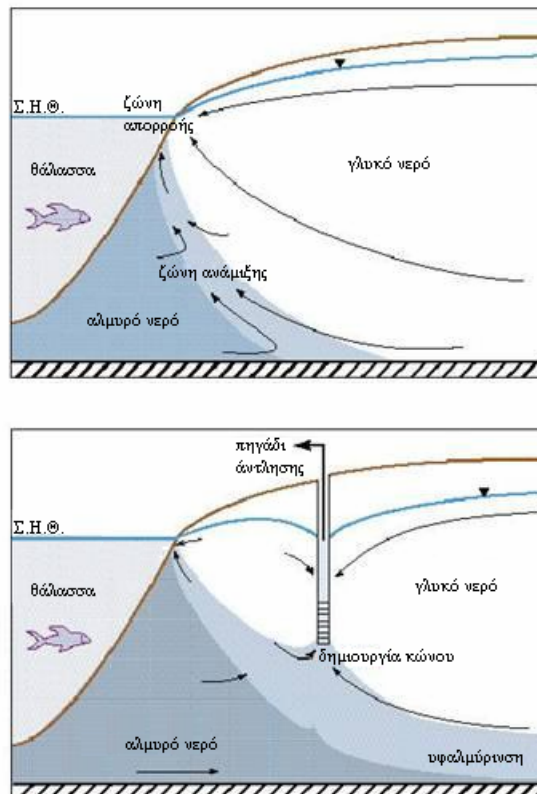
Επειδή η υπάρχουσα κατάσταση είναι αρκετά δυσμενής, κρίνεται απαραίτητη η λήψη κάποιου μέτρου για τον περιορισμό της περαιτέρω υποβάθμισης του υδροφορέα. Η τεχνική που θεωρήθηκε ως πιο κατάλληλη είναι εκείνη της αναπλήρωσης του υδροφορέα με φυσικά επιφανειακά νερά ή με επεξεργασμένα απόβλητα. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η διάνοιξη φρεάτων παράλληλα στην ακτή που θα αναπληρώνουν το υπόγειο νερό και θα δημιουργούν ένα αυξημένο υδραυλικό ύψος προς την ακτή το οποίο λειτουργεί ως φράγμα για το μέτωπο της υφαλμύρισης.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1 το πηγάδι εμπλουτισμού αυξάνει το υδραυλικό ύψος και σπρώχνει το μέτωπο της υφαλμύρισης προς τη θάλασσα αν και τα πηγάδια

που βρίσκονται στην ενδοχώρα έχουν προκαλέσει τον καταβιβασμό του υδροφορέα κάτω από τη στάθμη ηρεμότητας θαλάσσης (ΣΗΘ).



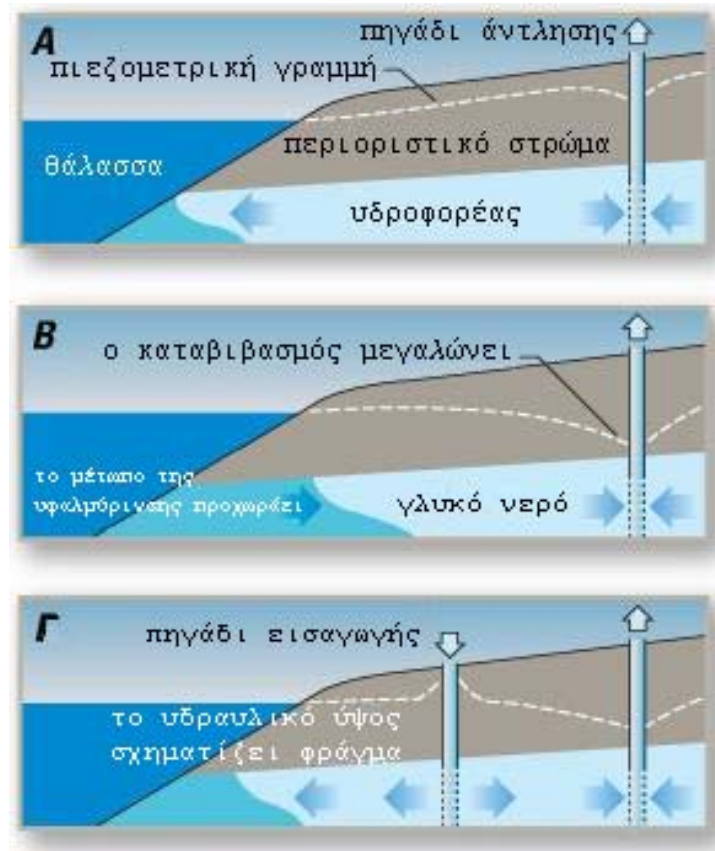
Σχήμα 4.1. Τεχνική καταπολέμησης της υφαλμύρισης σε ελεύθερο υδροφορέα χρησιμοποιώντας ένα πηγάδι εμπλουτισμού.



Σχήμα 4.2. Φαινόμενο υφαλμύρισης χωρίς την παραδοχή απότομης διεπιφάνειας.
(Πηγή: <http://pangea.stanford.edu>)

Η ίδια τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί και σε περίπτωση που ο υδροφορέας είναι περιορισμένος. Και σε αυτή την περίπτωση όταν η άντληση αυξάνεται (Σχήμα 4.2.Β), το μέτωπο της υφαλμύρινσης προχωράει προς την ενδοχώρα μέσα στον περιορισμένο υδροφορέα. Ένα πηγάδι εισαγωγής που ανεβάζει τοπικά το υδραυλικό ύψος σε ένα σημείο πιο κοντά στη θάλασσα από ότι το πηγάδι άντλησης, απωθεί προς τα πίσω το μέτωπο της υφαλμύρινσης (Σχήμα 4.2.Γ).

Η απόφραξη των σωλήνων των πηγαδιών εισαγωγής νερού καθώς και η μείωση της διαπερατότητας της γύρω περιοχής λόγω απόφραξης των πόρων του εδάφους (το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως clogging) είναι ένα εν δυνάμει εμπόδιο στη χρήση πηγαδιών για εξυγίανση και εμπλουτισμό ενός υδροφορέα. Η διήθηση αιωρούμενων στερεών είναι η πιο συχνά εμφανιζόμενη αιτία απόφραξης. Το νερό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι είτε βρόχινο είτε επαναχρησιμοποιούμενο (συνήθως από μονάδα επεξεργασίας λυμάτων). Υπάρχουν τρόποι υπολογισμού της μέγιστης συγκέντρωσης που μπορεί να περάσει χωρίς να δημιουργήσει απόφραξη, αλλά εκτός από μια απλή διήθηση μέσα από μια άμμο περαιτέρω επεξεργασία είναι συνήθως απαγορευτική. Τότε για να αντιμετωπιστεί η απόφραξη γίνεται κατά διαστήματα διακοπή του εμπλουτισμού και εν συνεχεία μικρής διάρκειας άντληση με σκοπό να απομακρυνθούν τα στερεά που έχουν φράξει τους πόρους. Μια άλλη μέθοδος αποφυγής του φαινομένου είναι ο εμπλουτισμός υπό πίεση του υδροφορέα. (Dillon et al., 2001)



Σχήμα 4.3. Τεχνική καταπολέμησης της υφαλμύρινης σε περιορισμένο υδροφορέα χρησιμοποιώντας ένα πηγάδι εμπλουτισμού. (Πηγή: <http://geopubs.wr.usgs.gov>)

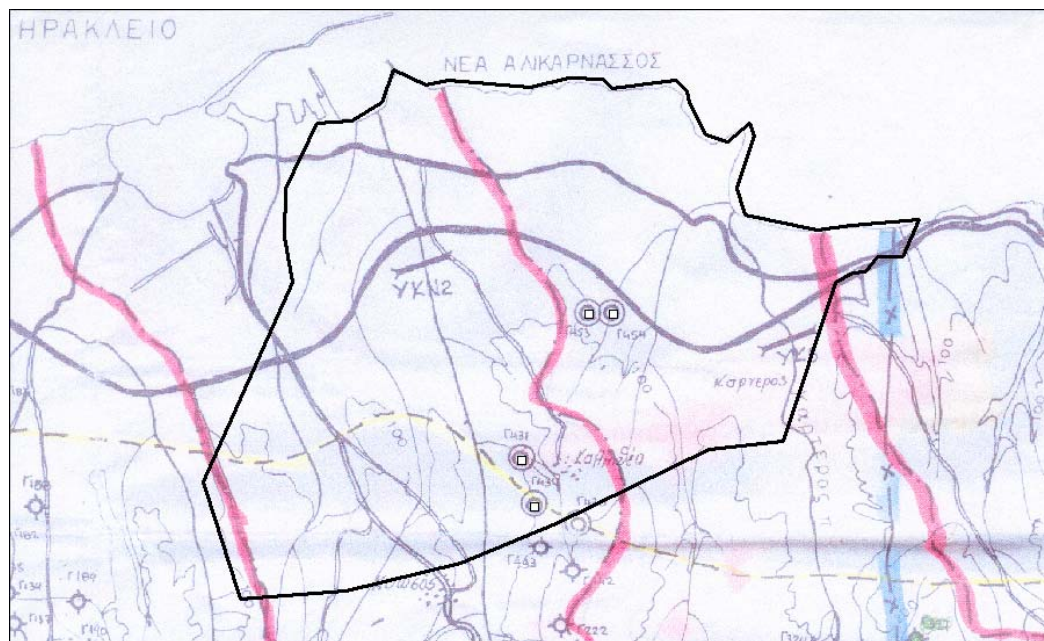
Τα εννέα σενάρια που εξετάστηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που έδωσε το καθένα από αυτά φαίνονται αναλυτικά παρακάτω. Στα διαγράμματα του υδραυλικού ύψους φαίνονται οι γραμμές ίσου υδραυλικού ύψους με κλίμακα που ξεκινάει από 102,5 μέτρα και με βήμα 17,5 μέτρα φτάνει μέχρι τα 225 μέτρα. Αντίθετα στα διαγράμματα της ταχύτητας οι κλίμακα είναι ξεχωριστή για κάθε σενάριο και δίνεται στο υπόμνημα. Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν είναι για το υδραυλικό ύψος το μέτρο (m) και για την ταχύτητα το μέτρο ανά ημέρα (m/d).

Για να είναι πιο ευανάγνωστα τα διαγράμματα δεν έχουν στο φόντο το χάρτη της περιοχής παρά μόνο τα όρια της περιοχής μελέτης. Για να γίνουν όμως πιο κατανοητά τα αποτελέσματα παρατίθενται και οι χάρτες της περιοχής (υδρογεωλογικός, υδρολογικός και τοπογραφικός) με σημειωμένη πάνω σε αυτούς την περιοχή μελέτης.

Στον υδρολογικό φαίνονται και τα τέσσερα πηγάδια της περιοχής μελέτης (Γ431, Γ434, Γ453 και Γ454). Τα δύο πηγάδια που βρίσκονται βορειότερα (Γ453 και Γ454) είναι τα πηγάδια της βιομηχανικής περιοχής, τα οποία και αντιμετωπίζουν πρόβλημα λόγω της υφαλμύρινης.

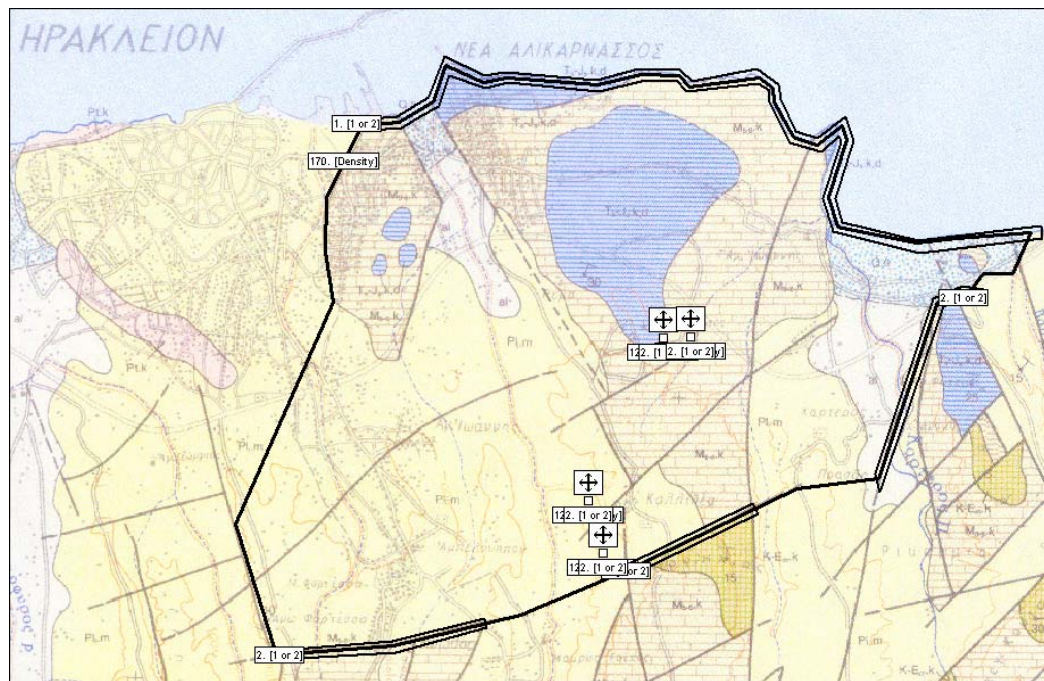
Στον υδρογεωλογικό φαίνονται τα διάφορα γεωλογικά στρώματα. Οι μεγάλες διαφορές στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας επηρεάζουν και το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δημιουργώντας το μη γραμμικό προφίλ του μετώπου της υφαλμύρισης. Στο χάρτη αυτό επίσης διακρίνονται και οι οριακές συνθήκες του μοντέλου. Στη βόρεια πλευρά φαίνεται η οριακή συνθήκη πρώτου είδους (σταθερό υδραυλικό ύψος). Στη νότια και νοτιοανατολική πλευρά υπάρχουν τρεις περιοχές από τις οποίες αναμένεται να υπάρξει εισροή νερού. Θεωρήθηκε ότι οι συνθήκες είναι δευτέρου είδους (σταθερή παροχή). Από τη βαθμονόμηση του μοντέλου προέκυψαν οι τιμές των παροχών για χειμώνα και καλοκαίρι. Δευτέρου είδους συνθήκες είναι και τα τέσσερα πηγάδια τα οποία εμφανίζονται στο χάρτη.

Ο τοπογραφικός χάρτης τέλος δείχνει το οικιστικό συγκρότημα του Ηρακλείου, την Βιομηχανική Περιοχή, τους γειτονικούς στην περιοχή οικισμούς, το οδικό δίκτυο και τις ισοϋψείς της περιοχής.

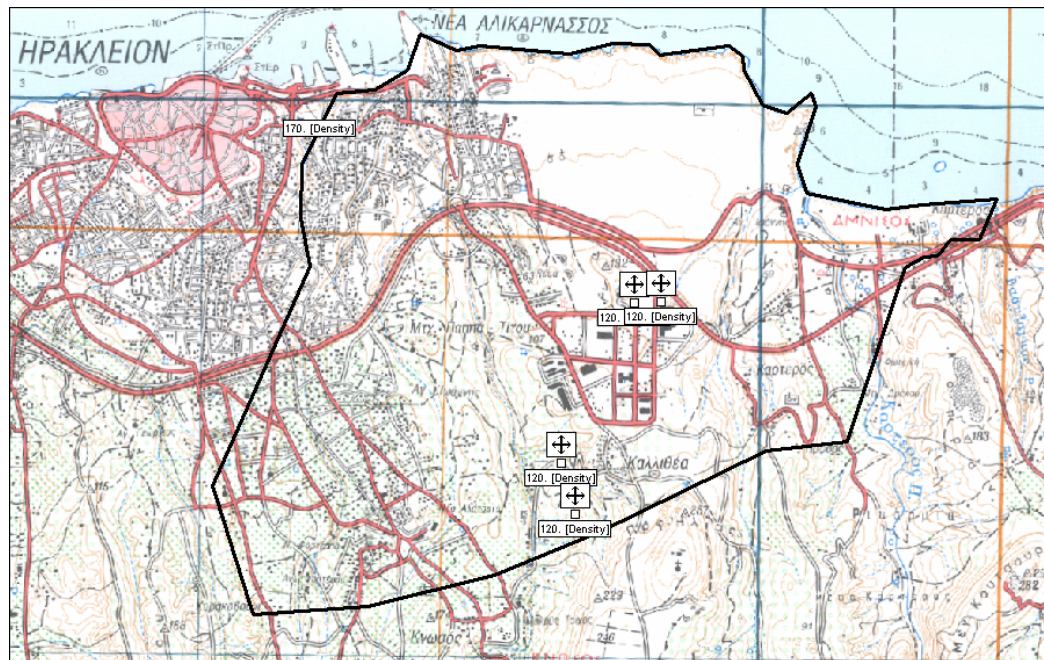


Σχήμα 4.4. Υδρολογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης

Τα πετρώματα που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης είναι κυρίως μάργες και ασβεστόλιθοι ενώ υπάρχουν σε μικρότερο βαθμό αργιλοαμμώδη πετρώματα. Μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι κυριαρχούν στα νότια της περιοχής και σημειώνονται με κίτρινο χρώμα στο χάρτη. Με πορτοκαλί τετράγωνα σημειώνονται βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι που κυριαρχούν στα κεντρικά και βόρεια ενώ στα κεντρικά και σε κάποια σημεία κοντά στην ακτή φαίνονται με μπλε ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Στις παράκτιες περιοχές φαίνονται με ανοιχτό χρώμα σημειωμένες περιοχές με άμμο (γαλάζιο) και χαλαρά αργιλοαμμώδη (λευκό).



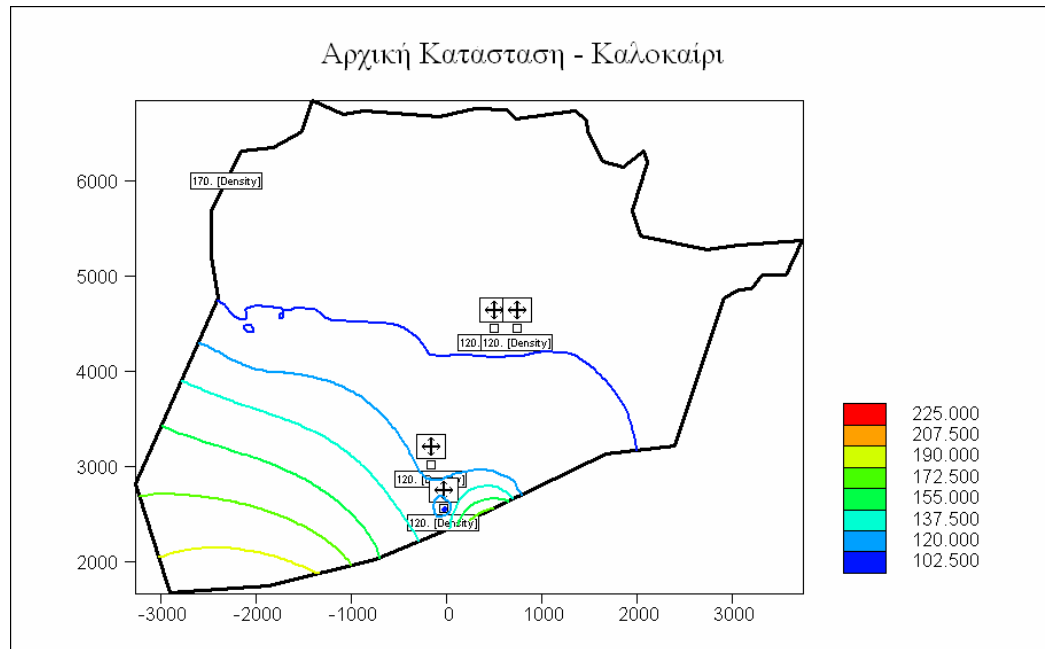
Σχήμα 4.5. Υδρογεωλογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης



Σχήμα 4.6. Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης

Αρχική Κατάσταση – Προσομοίωση της Υπόγειας Ροής

Μετά την προσομοίωση τριών ετών στο τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

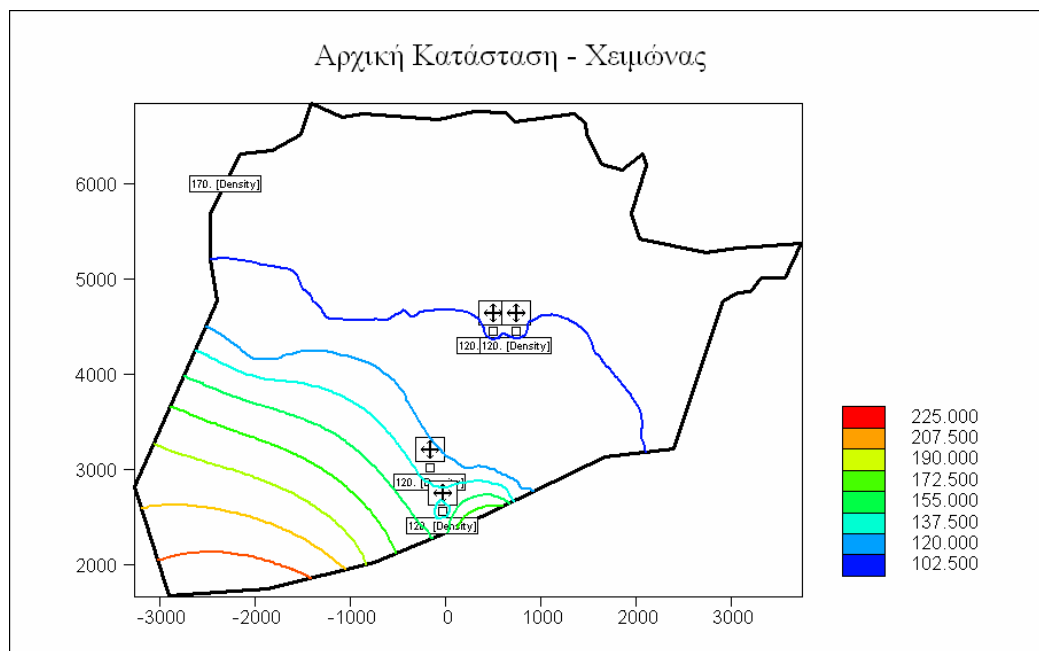


Σχήμα 4.7. Υδραυλικό ύψος (m). Προσομοίωση αρχικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης

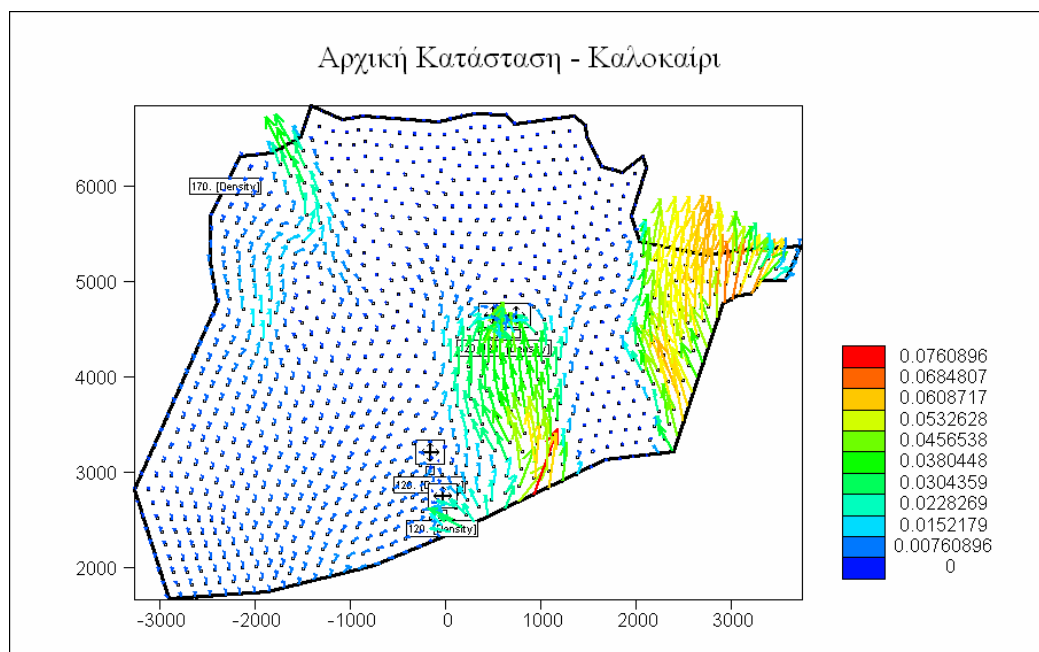
Όπως φαίνεται και στο σχήμα η υφαλμύριση είναι στην ενδοχώρα και τα πηγάδια της ΒΙ.ΠΕ. βρίσκονται ήδη μέσα στη ζώνη υφάλμυρου νερού. Το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι σχετικά χαμηλό όπως αναμένεται σε μια περιοχή με μικρή βροχόπτωση.

Η ίδια περίπου κατάσταση και το χειμώνα με ελαφρά υψηλότερα υδραυλικά ύψη λόγω της βροχόπτωσης και των υψηλότερων εισροών που αναμένονται. Επειδή η βαθμονόμηση έγινε με βάση παρατηρήσεις που έδειξαν ότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τα πηγάδια της ΒΙ.ΠΕ. βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρισης, ακόμα και στο τέλος της χειμερινής περιόδου το μέτωπο βρίσκεται προς την ενδοχώρα σε σχέση με τα πηγάδια αυτά.

Τα υδραυλικά ύψη που προέκυψαν από την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες για τα σενάρια που εξετάστηκαν.



Σχήμα 4.8. Υδραυλικό ύψος (m). Προσομοίωση αρχικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης



Σχήμα 4.9. Ταχύτητα (m/d). Προσομοίωση αρχικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης

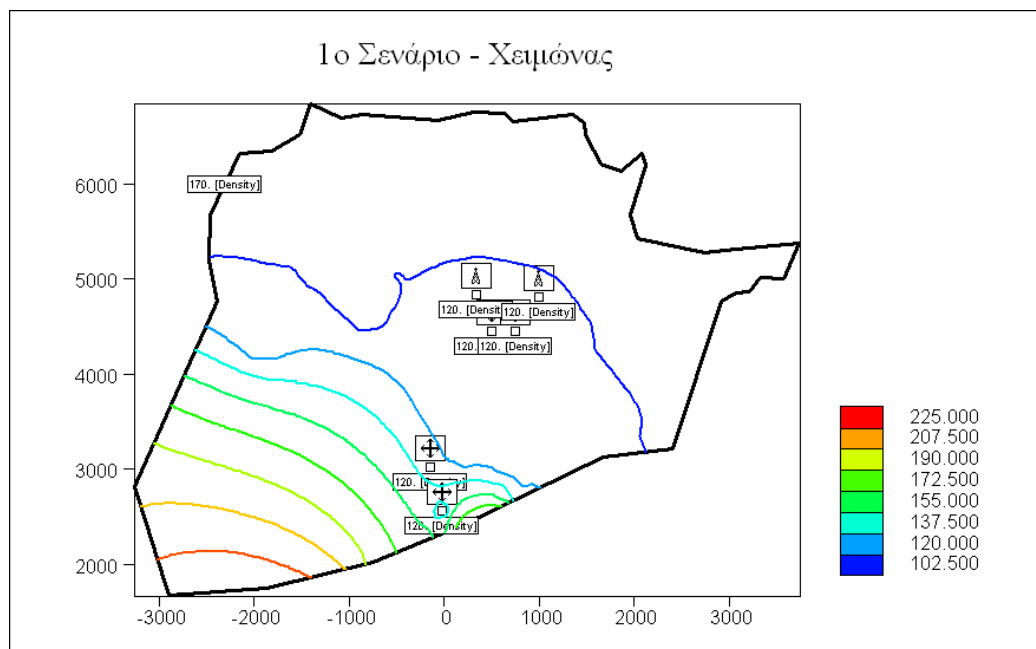
Σενάριο 1ο

Στο σενάριο αυτό προτείνεται η εισαγωγή δύο φρεάτων στη βιομηχανική περιοχή εκατέρωθεν των πηγαδιών άντλησης που ήδη υπάρχουν και προς την πλευρά της θάλασσας. Η προτεινόμενη παροχή των πηγαδιών είναι $40 \text{ m}^3 / \text{h}$. Η προσομοίωση γίνεται για τρία χρόνια και τα αποτελέσματα του μοντέλου για το σενάριο αυτό και για το τέλος της τρίτης χειμερινής και της τρίτης θερινής περιόδου εμφανίζονται στο Σχήμα 4.3. και 4.4. αντίστοιχα.

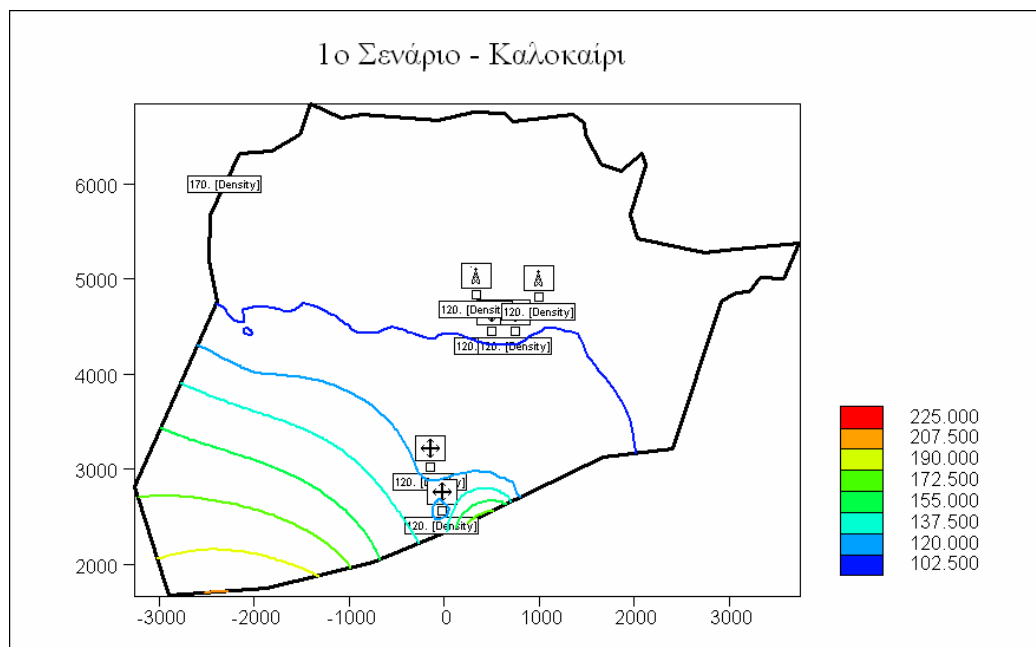
Στο τέλος της τρίτης χειμερινής περιόδου το μέτωπο της υφαλμύρινσης έχει μετατοπιστεί προς την ακτή και τα πηγάδια της βιομηχανικής περιοχής βρίσκονται σε περιοχή εκτός της ζώνης υφαλμύρινσης. Αντίθετα όμως, μετά το τέλος της θερινής περιόδου συνεχίζει να εμφανίζεται το πρόβλημα της υφαλμύρινσης και μέσα στη βιομηχανική περιοχή, ενώ τα πηγάδια μέσα στην περιοχή βρίσκονται ακόμα μέσα στην υφάλμυρη ζώνη.

Το σενάριο αυτό κρίνεται ανεπαρκές αφού κατά τη διάρκεια του έτους δεν επιτυγχάνει πλήρη και συνεχή απομάκρυνση του υφάλμυρου ύδατος εκτός της επιθυμητής ζώνης. Με την εφαρμογή του σεναρίου αυτού δε λύνεται το πρόβλημα που έχουν τα δύο πηγάδια της βιομηχανικής περιοχής και γι αυτό εξετάζονται και άλλα σενάρια.

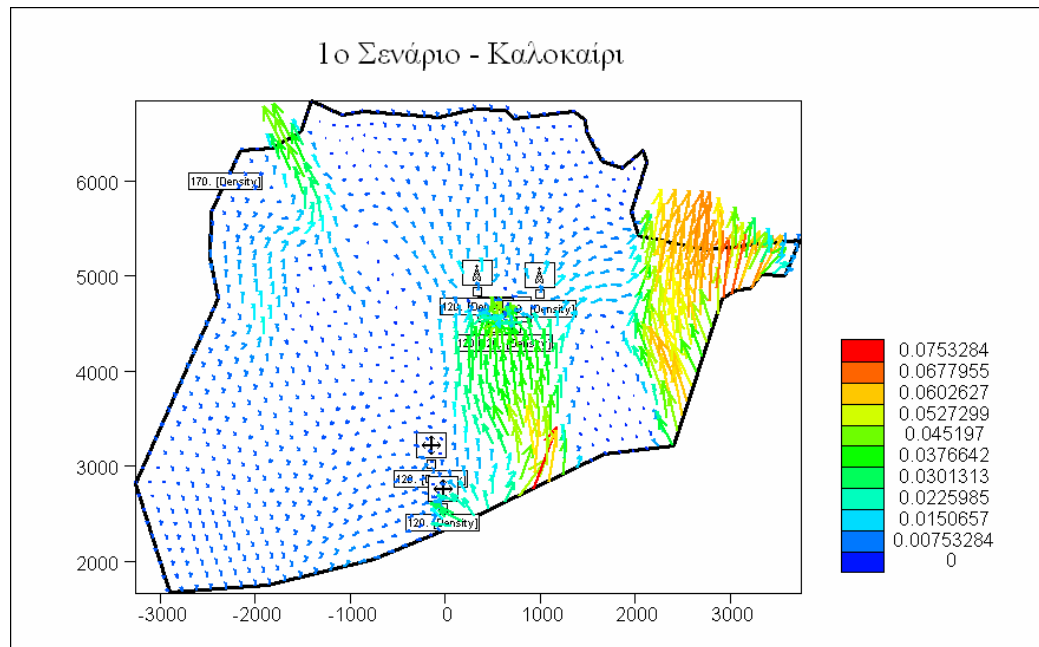
Από το γράφημα των ταχυτήτων φαίνεται η επιρροή των πηγαδιών άντλησης και σε μικρότερο βαθμό και εκείνη των πηγαδιών εμπλουτισμού. Για το μικρό διάστημα μεταξύ αυτών και των πηγαδιών άντλησης της ΒΙ.ΠΕ. αντιστρέφεται η φορά κίνησης του νερού. Επίσης διακρίνονται οι περιοχές υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας στα δύο άκρα της περιοχής μελέτης και φαίνεται αλλαγή της πορείας του νερού προς αυτά τα πετρώματα.



Σχήμα 4.10. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το πρώτο σενάριο



Σχήμα 4.11. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το πρώτο σενάριο



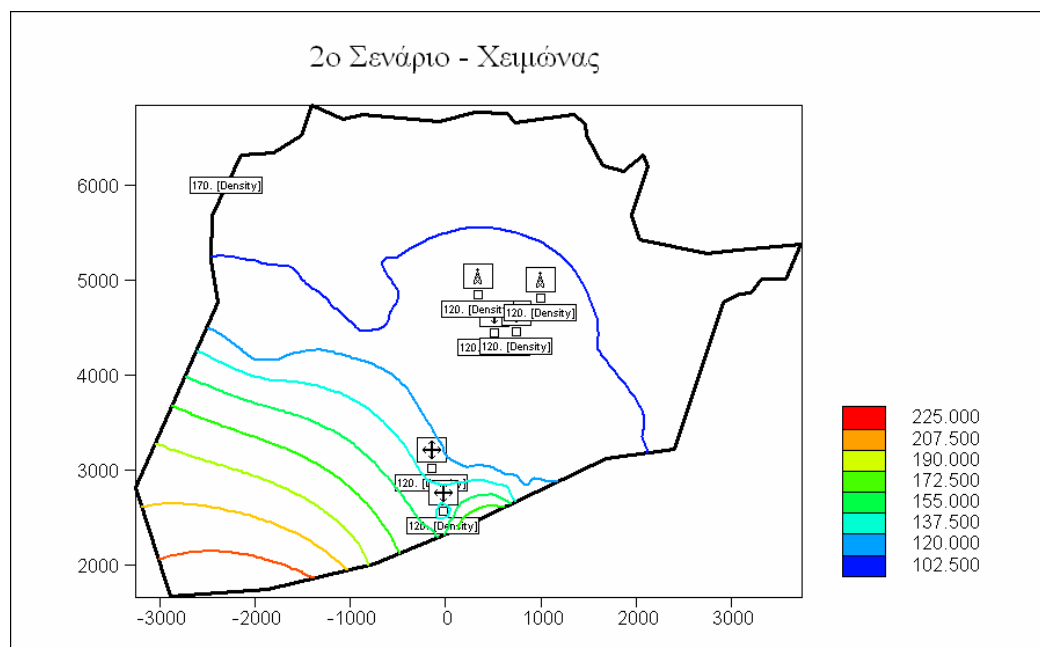
Σχήμα 4.12. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το πρώτο σενάριο

Σενάριο 2ο

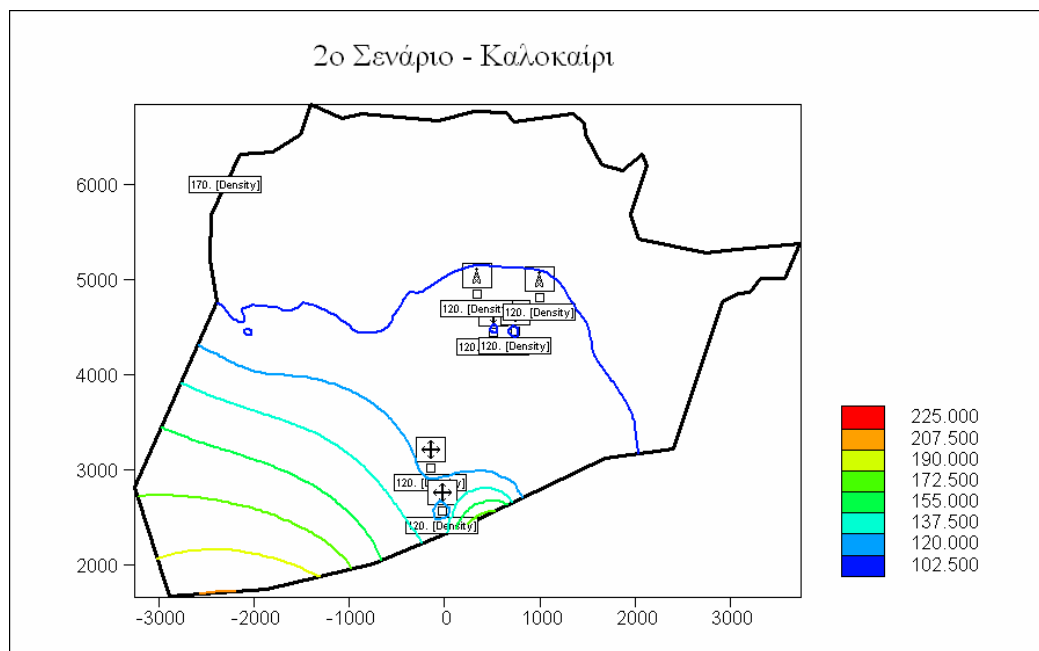
Για να βελτιωθεί περισσότερο η κατάσταση εξετάζεται διπλασιασμός της παροχής των πηγαδιών στα $80 \text{ m}^3 / \text{h}$. Με τον τρόπο αυτό αναμένεται η περαιτέρω απομάκρυνση του μετώπου της υφαλμύρισης από τη βιομηχανική περιοχή προς την ακτή.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού είναι αρκετά βελτιωμένα σε σχέση με εκείνα του προηγούμενου αλλά ακόμα παρουσιάζεται μεγάλη μεταβολή κατά τη διάρκεια του έτους. Μετά το τέλος της θερινής περιόδου το υδραυλικό ύψος των πηγαδιών της ΒΙ.ΠΕ. είναι μικρότερο από 102,5 m αλλά το φράγμα που σχηματίζουν τα πηγάδια εμπλουτισμού βορειότερα, συγκρατεί το μέτωπο της υφαλμύρισης μακριά από τη ζώνη επιρροής των πηγαδιών άντλησης. Με την υφαλμύριση, μέχρι ένα σημείο, του υδροφορέα ως δεδομένη είναι ένα σενάριο αρκετά ικανοποιητικό αφού απομακρύνει το πρόβλημα από τα πηγάδια άντλησης χωρίς πολύ μεγάλη απαίτηση σε όγκο νερού. Βέβαια δεν είναι πολύ ικανοποιητικό από περιβαλλοντική σκοπιά αφού η άκρη του μετώπου της υφαλμύρισης παρουσιάζεται αρκετά χιλιόμετρα (σε σημεία μέχρι και 2,5 km) από την ακτή.

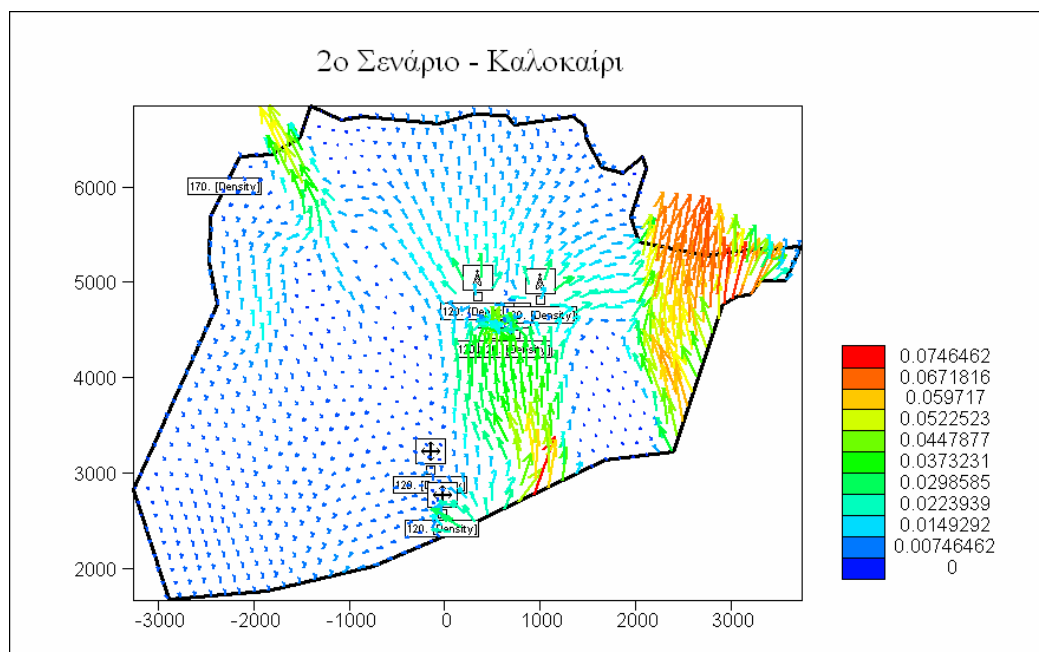
Στο διάγραμμα των ταχυτήτων δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές παρά μόνο στις περιοχές με υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα όπου εμφανίζονται ταχύτητες λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του πρώτου σεναρίου.



Σχήμα 4.13. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το δεύτερο σενάριο



Σχήμα 4.14. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το δεύτερο σενάριο



Σχήμα 4.15. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το δεύτερο σενάριο

Σενάριο 3ο

Για τη μέγιστη βελτίωση του υδροφορέα εξετάζεται το ενδεχόμενο τα δύο πηγάδια των προηγούμενων σεναρίων να εμπλουτίζουν τον υδροφορέα με $200 \text{ m}^3 / \text{h}$ το καθένα.

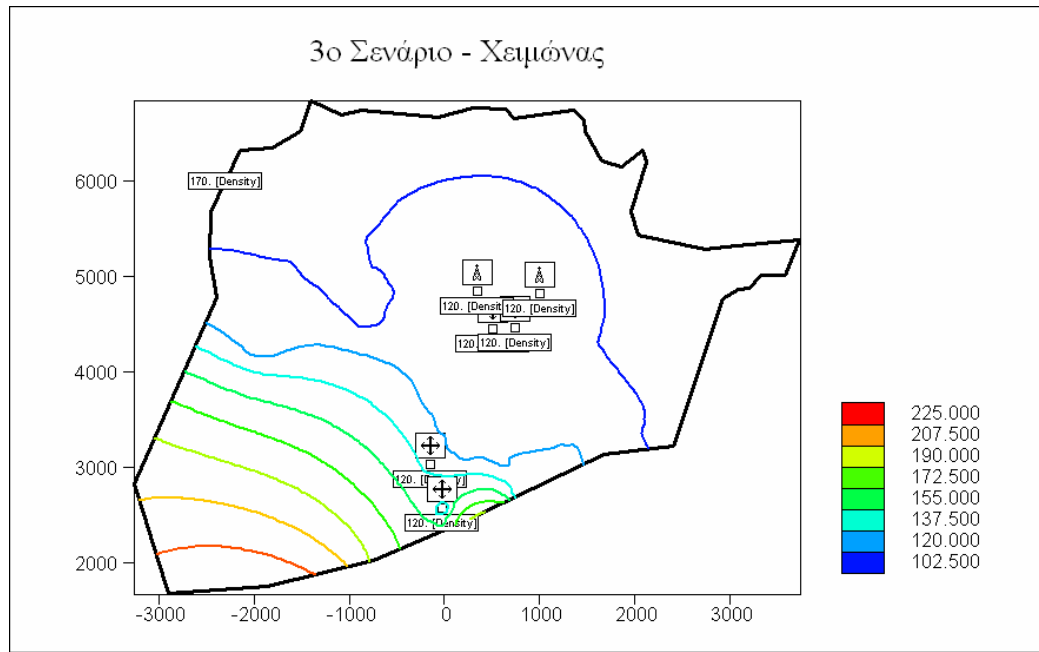
Φυσικά η απαίτηση σε νερό είναι υπερδιπλάσια από την αντίστοιχη του δευτέρου σεναρίου και όπως ήταν αναμενόμενο μετά την τριετή προσομοίωση η κατάσταση του υδροφορέα έχει βελτιωθεί αισθητά περισσότερο.

Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τα πηγάδια βρίσκονται εκτός και αρκετά μακριά από τη ζώνη υφάλμυρου νερού ενώ το γλυκό νερό έχει προχωρήσει πολύ κοντά στην ακτή. Εξάιρεση είναι οι περιοχές στα άκρα της περιοχής μελέτης οι οποίες λόγω και των εξαιρετικά υδροπερατών πετρωμάτων δε βελτιώνουν την κατάστασή τους.

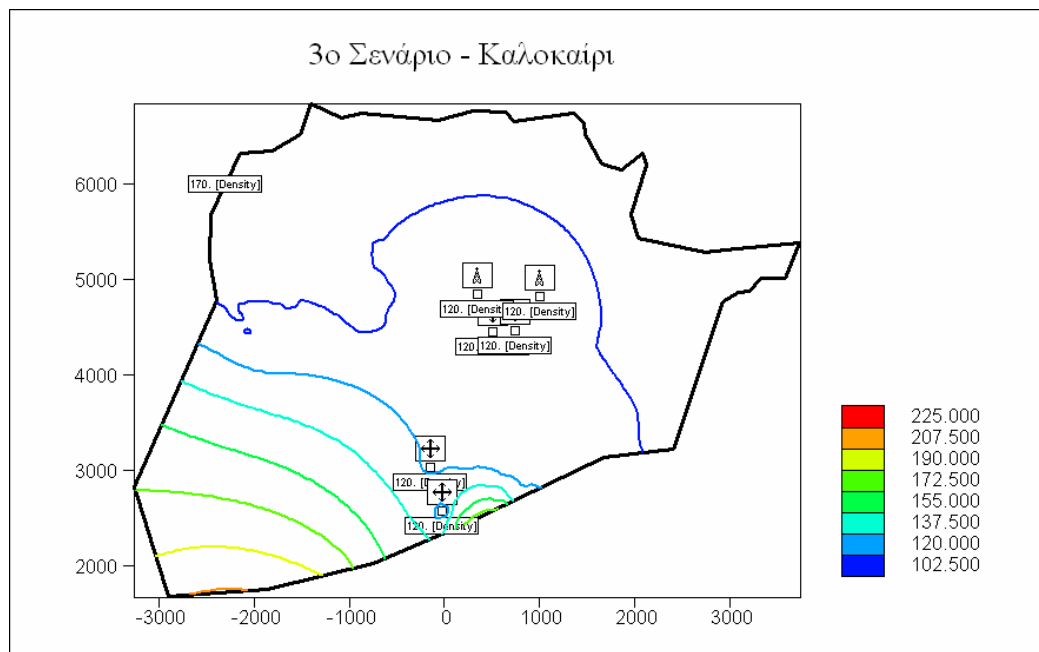
Ειδικότερα το δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης παρουσιάζει σημαντική μεταβολή κατά τη διάρκεια του έτους με το καλοκαίρι να εισχωρεί η υφαλμύρινη περίπου πεντακόσια μέτρα προς την ενδοχώρα.

Παρά τη μεγάλη όμως βελτίωση της περιβαλλοντικής κατάστασης στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης, το σενάριο αυτό έχει μεγάλη απαίτηση σε νερό η οποία μπορεί να κριθεί υπερβολική αφού δε βελτιώνεται η κατάσταση και στην ευρύτερη περιοχή.

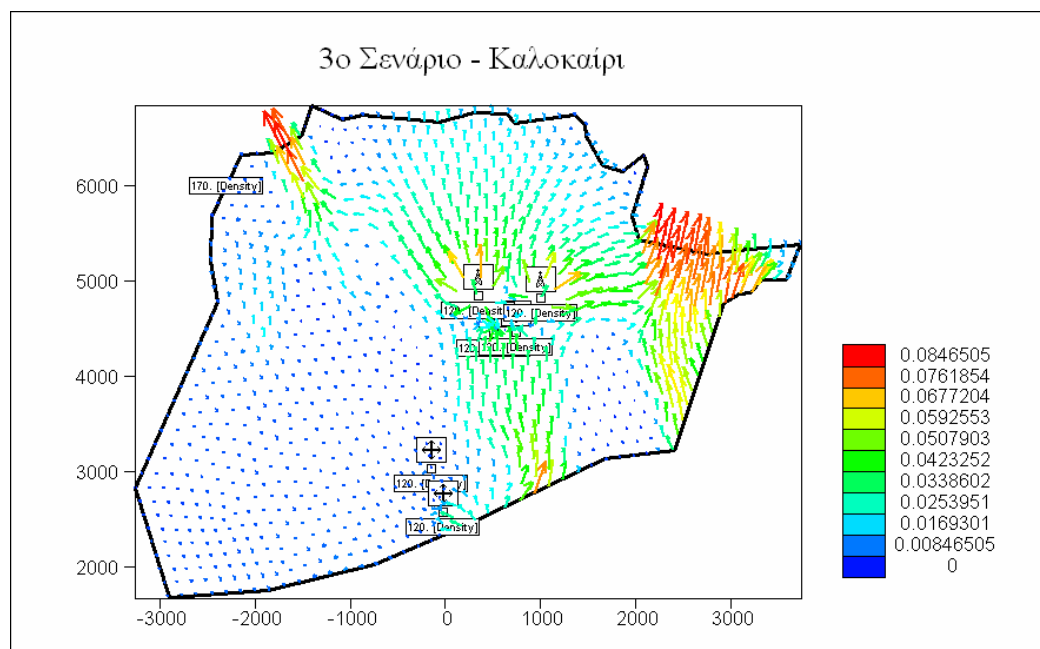
Το σενάριο αυτό παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη αύξηση στις ταχύτητες σε σχέση με το πρώτο σενάριο από ότι το δεύτερο. Στο διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η αύξηση της επιρροής των πηγαδιών εμπλουτισμού ενώ και με τον αυξημένο όγκο νερού αυξάνονται και οι ταχύτητες στο σύνολο της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4.16. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το τρίτο σενάριο



Σχήμα 4.17. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το τρίτο σενάριο



Σχήμα 4.18. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το τρίτο σενάριο

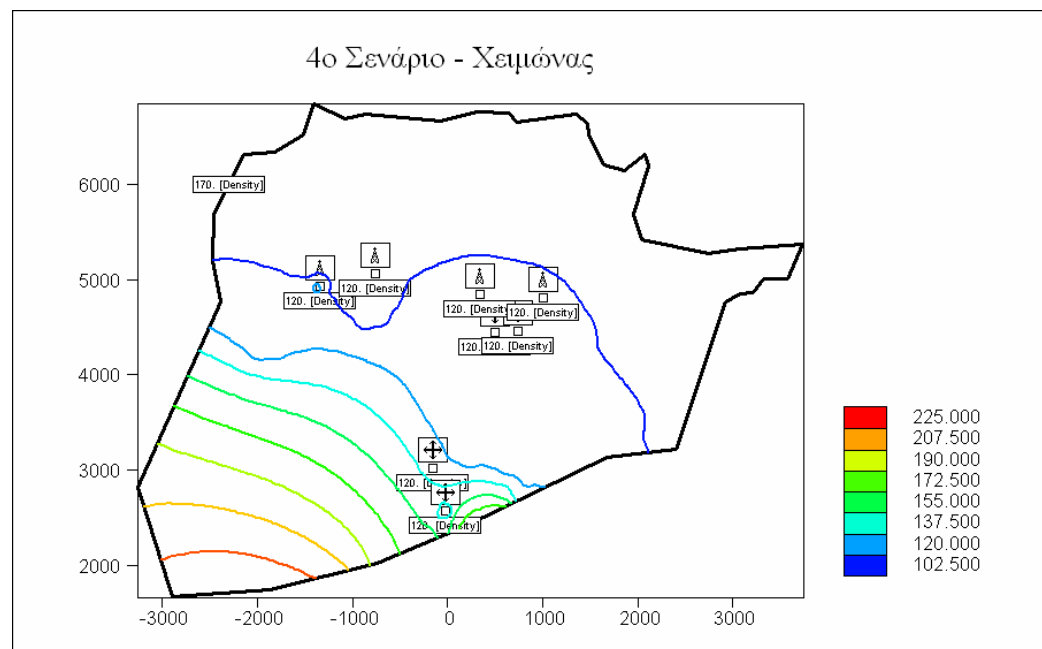
Σενάριο 4ο

Για τη βελτίωση της κατάστασης του δυτικού τμήματος της περιοχής μελέτης εξετάζεται η διάνοιξη άλλων δύο πηγαδιών στο τμήμα αυτό. Συνολικά λοιπόν θα υπάρχουν τέσσερα πηγάδια τα οποία αρχικά θεωρείται ότι εμπλουτίζουν τον υδροφορέα με $40 \text{ m}^3 / \text{h}$ έκαστο.

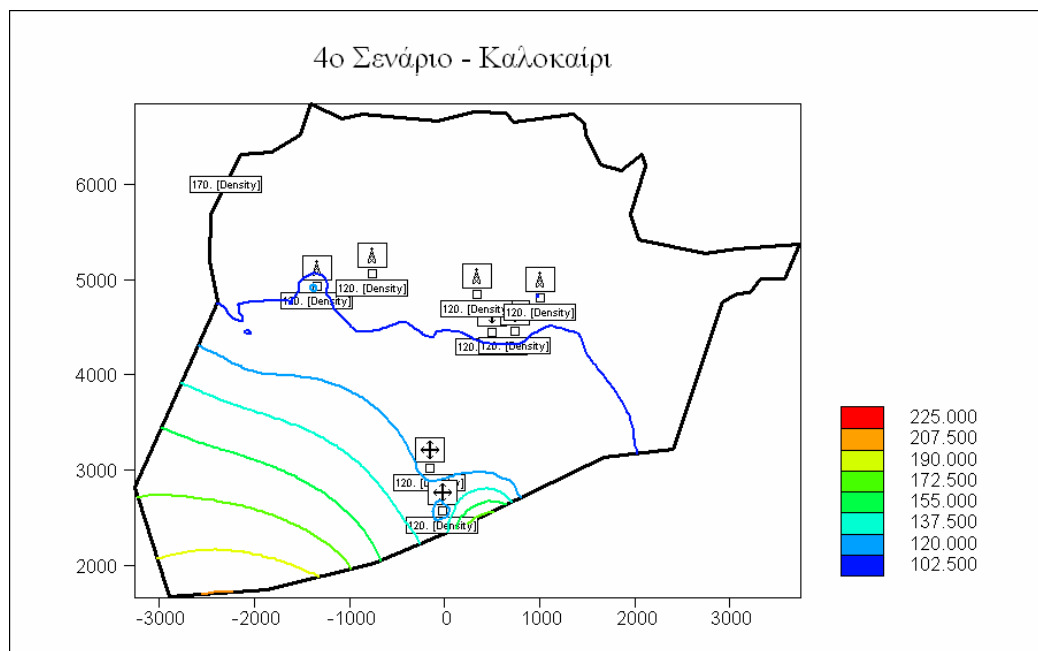
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα υπάρχει μια σαφής αντιστοιχία με το πρώτο σενάριο και το πρόβλημα που εμφανίζεται και σε εκείνο κατά τη θερινή περίοδο. Τα επιπλέον πηγάδια έχουν αρκετά διαφορετική συμπεριφορά. Το πρώτο από αριστερά (όπως εμφανίζεται στο σχήμα) πηγάδι επειδή βρίσκεται σε χαμηλής διαπερατότητας έδαφος αυξάνει αρκετά το υδραυλικό ύψος της περιοχής κοντά σε αυτό ενώ λίγο μετά από αυτό όταν αρχίζει πέτρωμα υψηλής διαπερατότητας το υδραυλικό ύψος πέφτει κατακόρυφα. Το δεύτερο από αριστερά πηγάδι το οποίο βρίσκεται σε πιο υδροπερατό περιβάλλον δε φαίνεται να επηρεάζει το φαινόμενο.

Η αύξηση των ταχυτήτων στα περισσότερα υδροπερατά τμήματα και ειδικότερα σε εκείνο που βρίσκεται δυτικά και επηρεάζεται άμεσα από τα δύο νέα πηγάδια είναι το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του σεναρίου. Στην υπόλοιπη περιοχή οι ταχύτητες είναι περίπου στα ίδια επίπεδα με εκείνες του πρώτου σεναρίου.

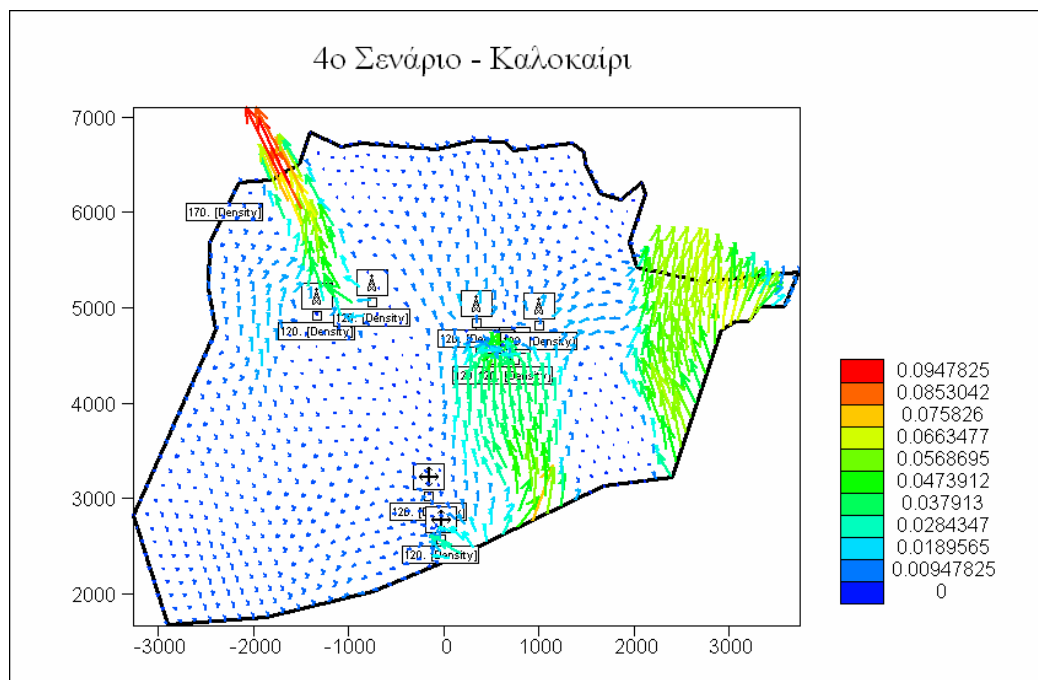
Με δεδομένο ότι η κατάσταση του υδροφορέα σε αυτή την περίπτωση δεν είναι η επιθυμητή, το σενάριο αυτό μπορεί με ασφάλεια να απορριφθεί.



Σχήμα 4.19. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το τέταρτο σενάριο



Σχήμα 4.20. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το τέταρτο σενάριο



Σχήμα 4.21. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το τέταρτο σενάριο

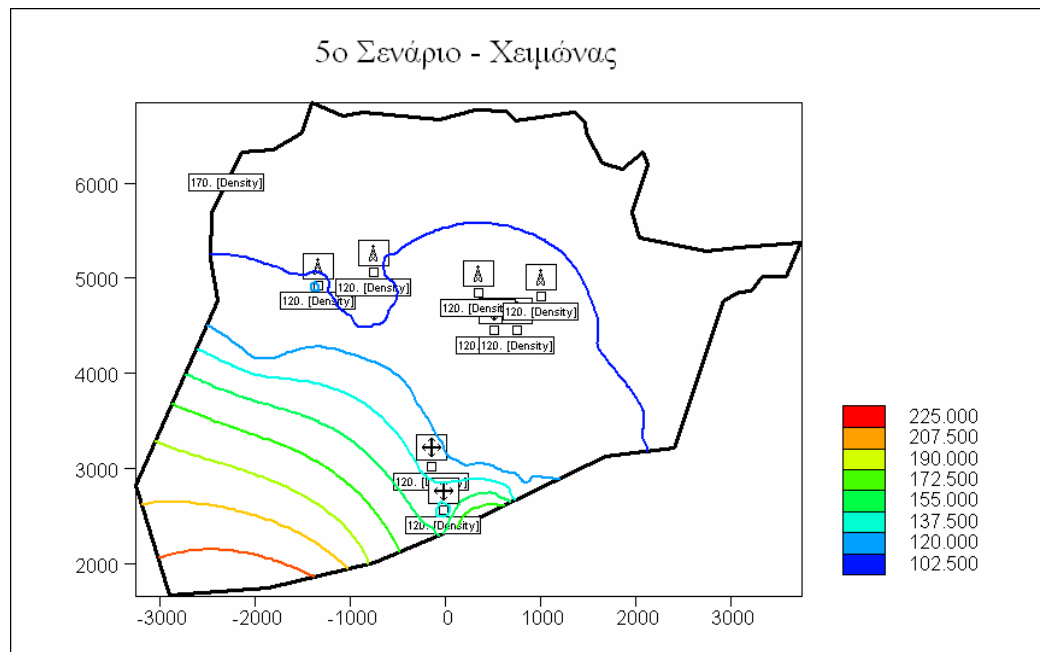
Σενάριο 5ο

Για να βελτιωθεί η κατάσταση του υδροφορέα εξετάζεται η περίπτωση διπλασιασμού της παροχής των πηγαδιών εμπλουτισμού στα $80 \text{ m}^3 / \text{h}$. Το μόνο πηγάδι του οποίου η παροχή παραμένει αμετάβλητη είναι το πρώτο από τα αριστερά πηγάδι το οποίο ούτως ή άλλως αυξάνει κατά πολύ το υδραυλικό ύψος τοπικά χωρίς να επιτυγχάνει βελτίωση της κατάστασης στην ευρύτερη περιοχή.

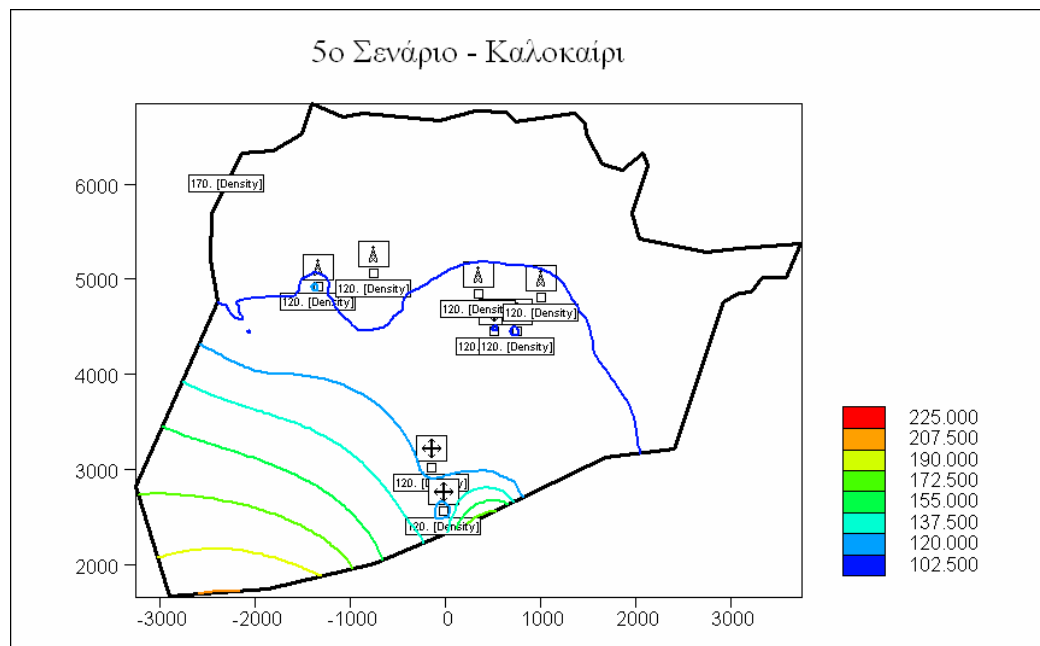
Η κατάσταση εμφανίζεται σαφώς βελτιωμένη από τόσο από το προηγούμενο όσο και από το δεύτερο σενάριο. Σε αυτή είναι εμφανής και η επίδραση του δευτέρου από αριστερά πηγαδιού ειδικά μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου. Το πρώτο από τα αριστερά πηγάδι το οποίο αυξάνει μόνο τοπικά το υδραυλικό ύψος και δε φαίνεται να βοηθά ουσιαστικά το πρόβλημα. Το μόνο προβληματικό σημείο στα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού είναι όπως και στο δεύτερο σενάριο η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από τα 102,5 μέτρα. Πάντως αυτό δεν είναι πολύ ανησυχητικό αφού το φράγμα γλυκού νερού δεν επιτρέπει την είσοδο υφάλμυρου στην ενδοχώρα.

Στον τομέα των ταχυτήτων τα πράγματα είναι περίπου όπως και στο προηγούμενο σενάριο με μοναδική διαφορά τη μεγάλη αύξηση στα δυτικά στο τμήμα με την υψηλή διαπερατότητα.

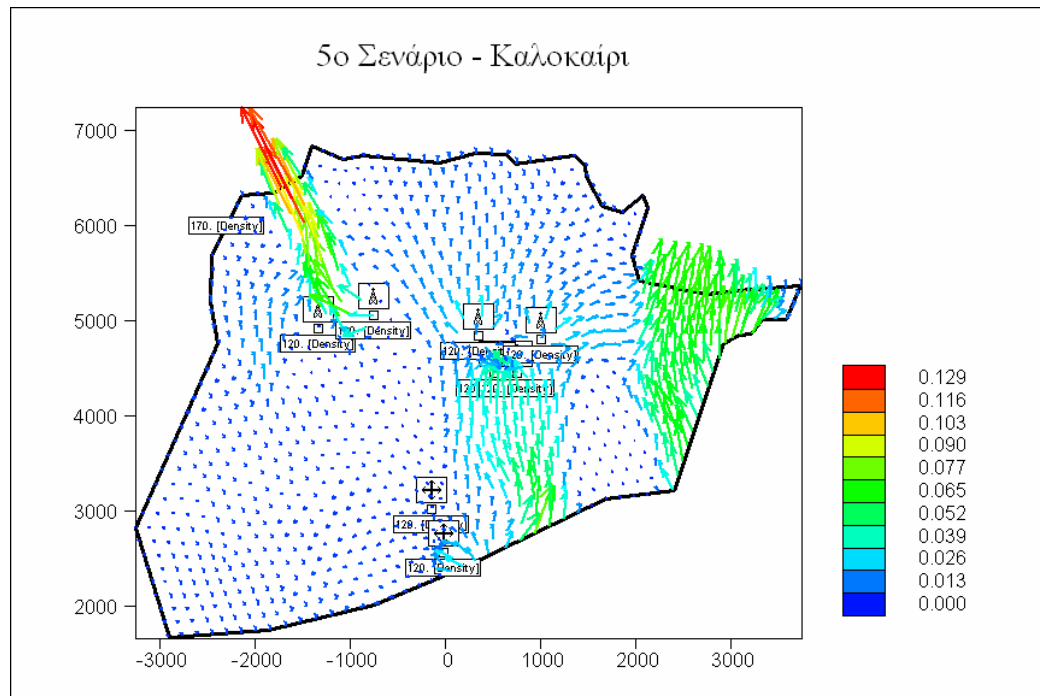
Παρά την παρατήρηση που σημειώθηκε παραπάνω το σενάριο αυτό ίσως να είναι η οικονομικότερη λύση που να δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό που πρέπει να διευκρινιστεί είναι η μέγιστη ανεκτή εισχώρηση δεδομένης της οποίας θα μπορέσει να επιλεγεί το βέλτιστο σενάριο.



Σχήμα 4.22. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το πέμπτο σενάριο



Σχήμα 4.23. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το πέμπτο σενάριο



Σχήμα 4.24. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το πέμπτο σενάριο

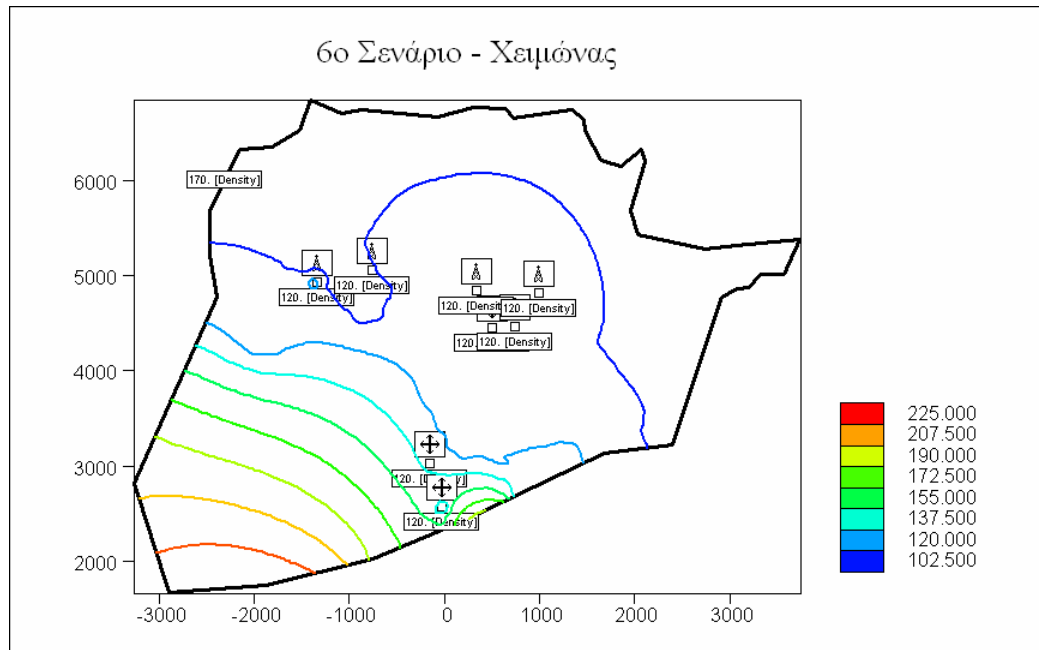
Σενάριο 6ο

Το σενάριο αυτό εξετάζει την απόκριση του συστήματος σε περίπτωση εμπλουτισμού του υδροφορέα από τέσσερα πηγάδια. Τα πηγάδια έχουν παροχή $200 \text{ m}^3 / \text{h}$ το καθένα, εκτός από το πρώτο από τα αριστερά πηγάδι το οποίο εμπλουτίζει με $40 \text{ m}^3 / \text{h}$. Το πιο φιλικό προς το περιβάλλον αλλά και αυτό με τη μεγαλύτερη απαίτηση σε νερό σενάριο από αυτά που ήδη εξετάσθηκαν έχει μια αρκετά αναμενόμενη απόκριση.

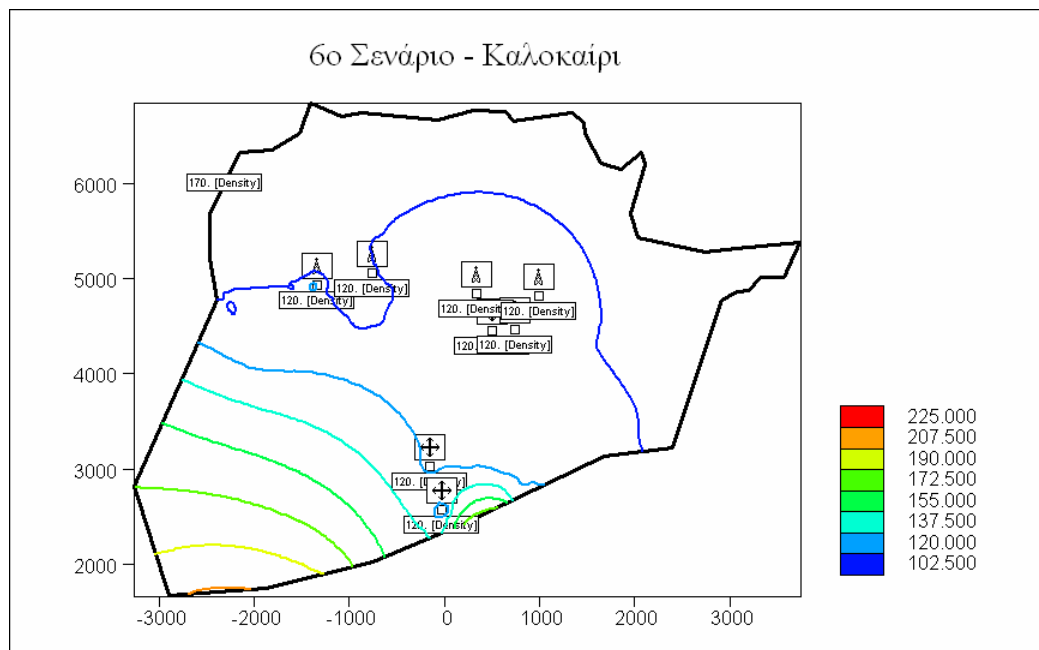
Μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου το μέτωπο της υφαλμύρινσης είναι στην πιο κοντινή απόσταση από την ακτή από ότι σε κάθε άλλο σενάριο. Μόνη εξαίρεση είναι οι περιοχές υψηλής διαπερατότητας τόσο στο ανατολικό όσο και στο δυτικό τμήμα της περιοχής στις οποίες δεν καταφέρνει να αυξηθεί η τιμή του υδραυλικού ύψους παρά τον πολύ υψηλό εμπλουτισμό.

Μετά το τέλος της θερινής περιόδου, οπότε και το υδραυλικό ύψος βρίσκεται στο ελάχιστο ετήσιο, τα αποτελέσματα δε διαφέρουν δραματικά. Τα υδραυλικά ύψη προς την ενδοχώρα παρουσιάζονται μειωμένα ενώ υπάρχει μια εμφανής διαφορά στο δυτικό κομμάτι της περιοχής όπου το μέτωπο εισχωρεί βαθύτερα από ότι μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου.

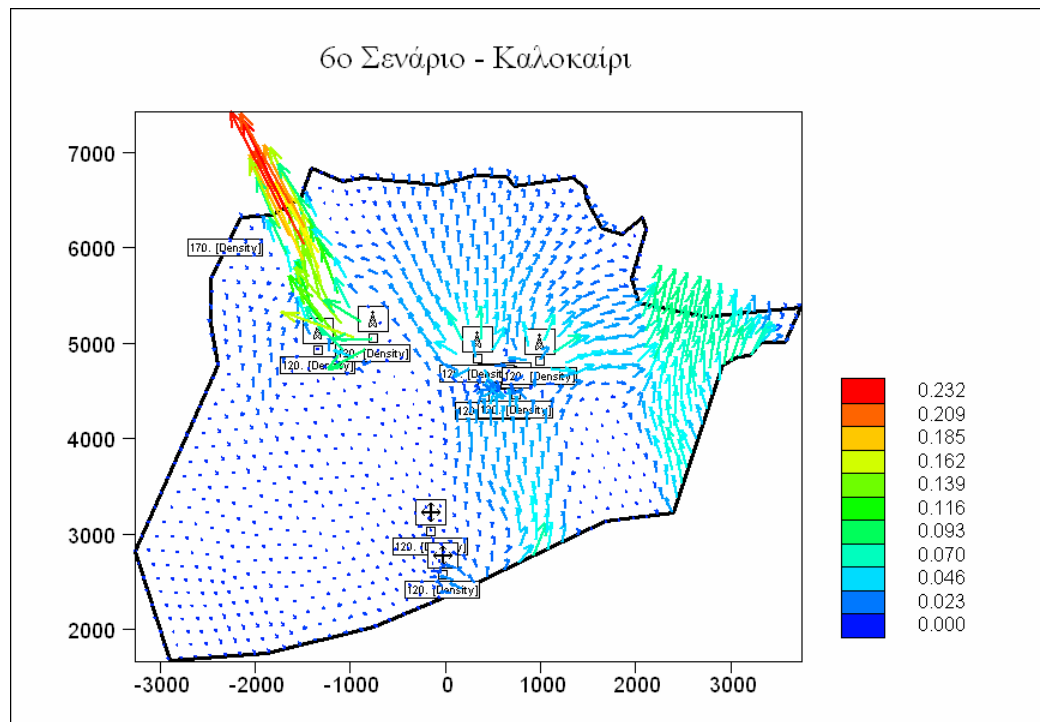
Οι ταχύτητες που υπολογίζει το μοντέλο για αυτό το σενάριο όπως φαίνεται και στο σχήμα είναι σχεδόν διπλάσιες από εκείνες του πέμπτου σεναρίου στα σημεία που βρίσκονται στα δυτικά και κοντά στην ακτή, ενώ για την υπόλοιπη περιοχή οι διαφορές είναι σχετικά μικρές. Και πάλι όμως παρατηρείται μια αύξηση της ακτίνας επιρροής των πηγαιδιών εμπλουτισμού αντίστοιχη με εκείνη που είχε παρατηρηθεί στο τρίτο σενάριο.



Σχήμα 4.25. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το έκτο σενάριο



Σχήμα 4.26. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το έκτο σενάριο



Σχήμα 4.27. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το έκτο σενάριο

Σενάριο 7ο

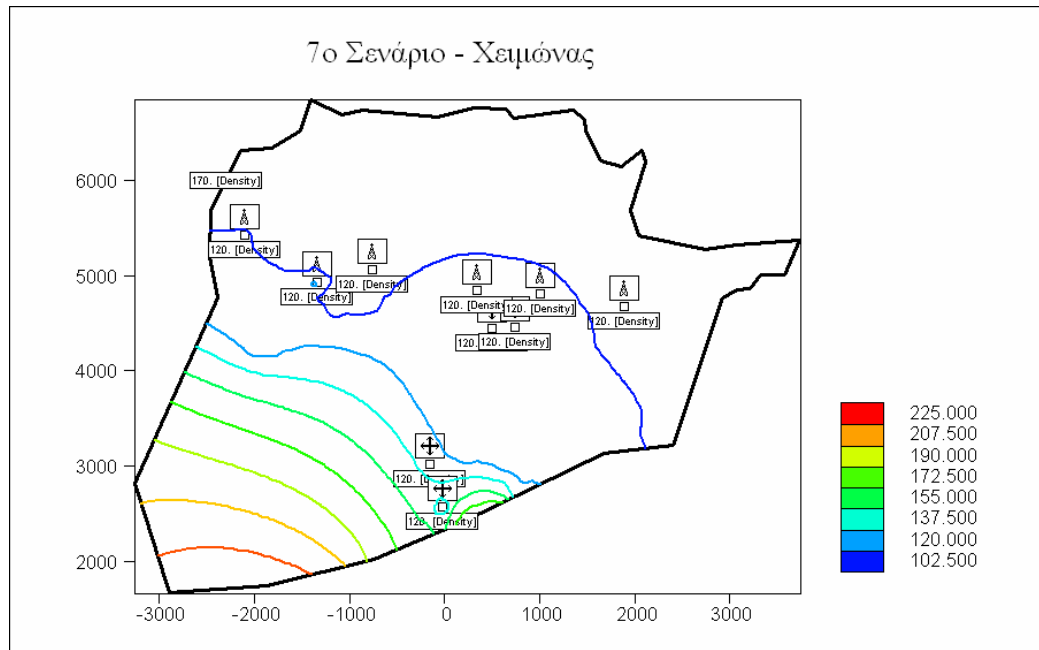
Αυτό όπως και τα δύο επόμενα σενάρια εξετάζουν την περίπτωση διάνοιξης έξι πηγαδιών σε μια σειρά σχεδόν παράλληλα προς την ακτή. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκεται ομαλοποίηση της κατάστασης σε όλη την περιοχή και όχι μόνο στο τμήμα κοντά στα πηγάδια άντλησης.

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση κάθε πηγάδι να εμπλουτίζει με $40 \text{ m}^3 / \text{h}$. Τα αποτελέσματα για τριετή προσομοίωση ειδικά μετά το τέλος της θερινής περιόδου δεν είναι καθόλου ικανοποιητικά. Ενώ στο τέλος της χειμερινής περιόδου το μέτωπο έχει απωθηθεί σχεδόν ομοιόμορφα προς την ακτή, στο τέλος της θερινής περιόδου τα πηγάδια άντλησης είναι μέσα στη ζώνη υφαλμύρινσης και το μέτωπο έχει προχωρήσει προς την ενδοχώρα.

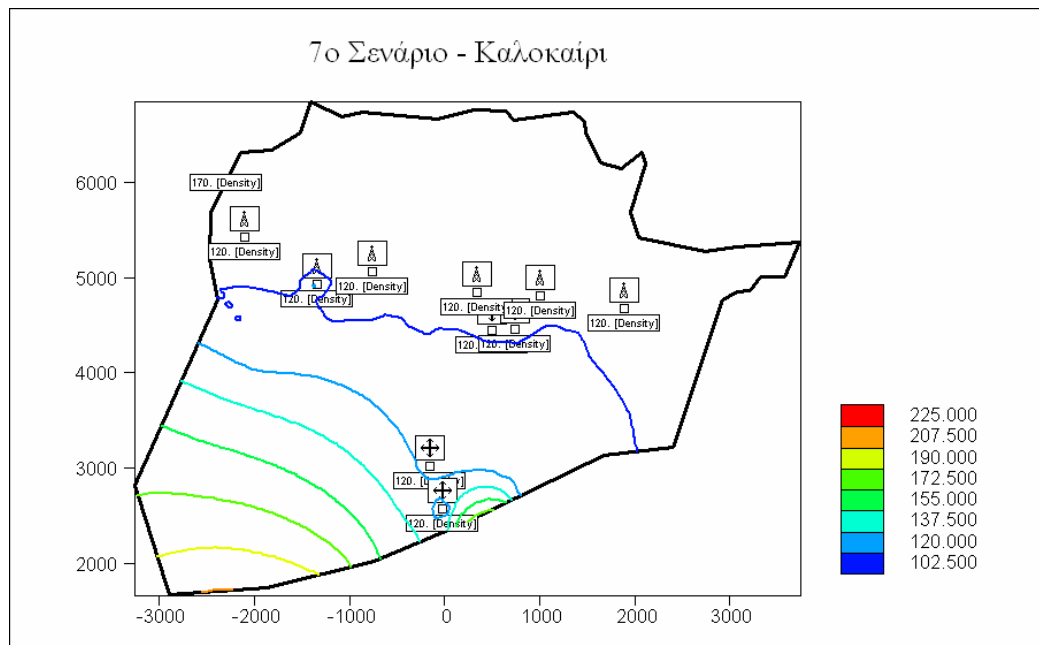
Το δεύτερο από τα αριστερά πηγάδι παρουσιάζει το ίδιο πρόβλημα που παρουσίαζε και στα προηγούμενα σενάρια (πρώτο από τα αριστερά αντίστοιχα για τα σενάρια αυτά) με την τοπικά μεγάλη αύξηση του υδραυλικού ύψους.

Αυξημένες παρουσιάζονται σε αυτό το σενάριο, τέλος, και οι ταχύτητες του νερού ειδικά στις περιοχές υψηλής διαπερατότητας σε σχέση τόσο με το πρώτο όσο και με το τέταρτο σενάριο με τα οποία παρουσιάζει μια αντιστοιχία.

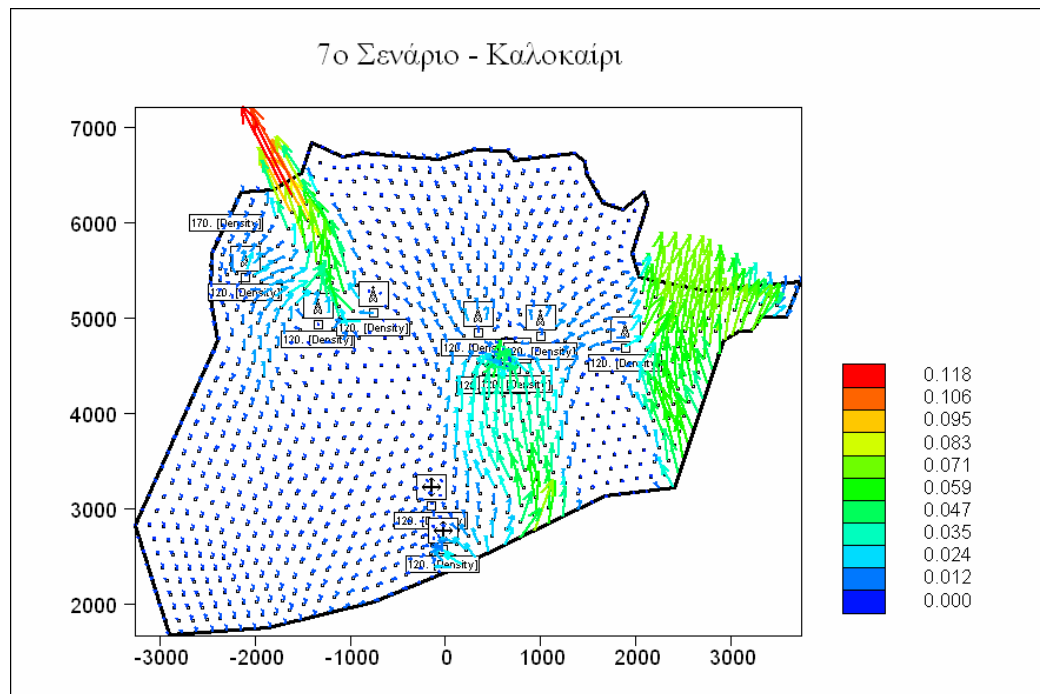
Ανεξάρτητα από το πόσο οικονομικό είναι αυτό το σενάριο, δεν είναι αποδεκτό αφού δε λύνει το πρόβλημα της περιοχής το οποίο κατά τη θερινή περίοδο ειδικά είναι πολύ έντονο.



Σχήμα 4.28. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το έβδομο σενάριο



Σχήμα 4.29. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το έβδομο σενάριο

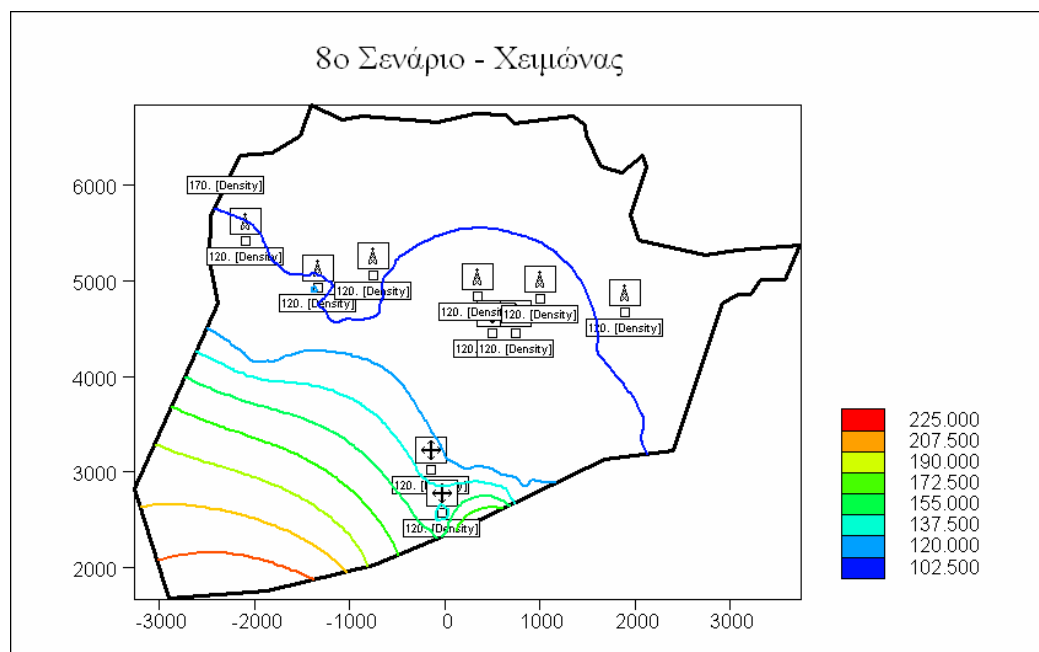


Σχήμα 4.30. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το έβδομο σενάριο

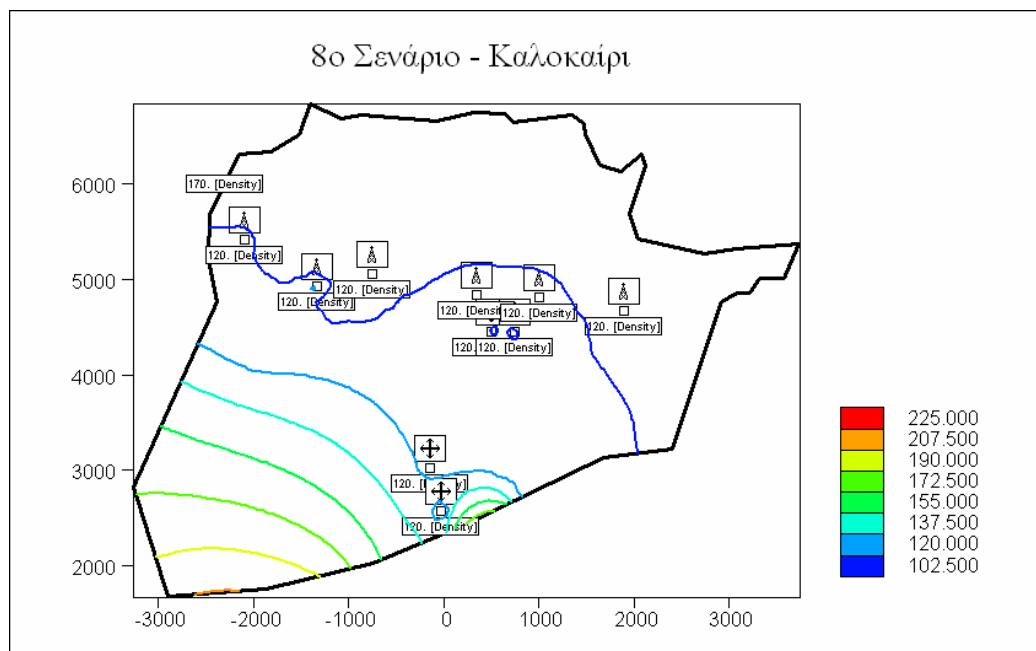
Σενάριο 8ο

Στο όγδοο σενάριο διπλασιάζεται η παροχή του κάθε πηγαδιού στα $80 \text{ m}^3/\text{h}$, εκτός πάλι από το δεύτερο από τα αριστερά πηγάδι που έχει παροχή $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Κατά το τέλος της χειμερινής περιόδου το μέτωπο εμφανίζεται μετατοπισμένο προς την ακτή εκτός από τα δύο τμήματα στα ανατολικά και δυτικά όπου υπάρχουν πολύ υψηλής διαπερατότητας πετρώματα.

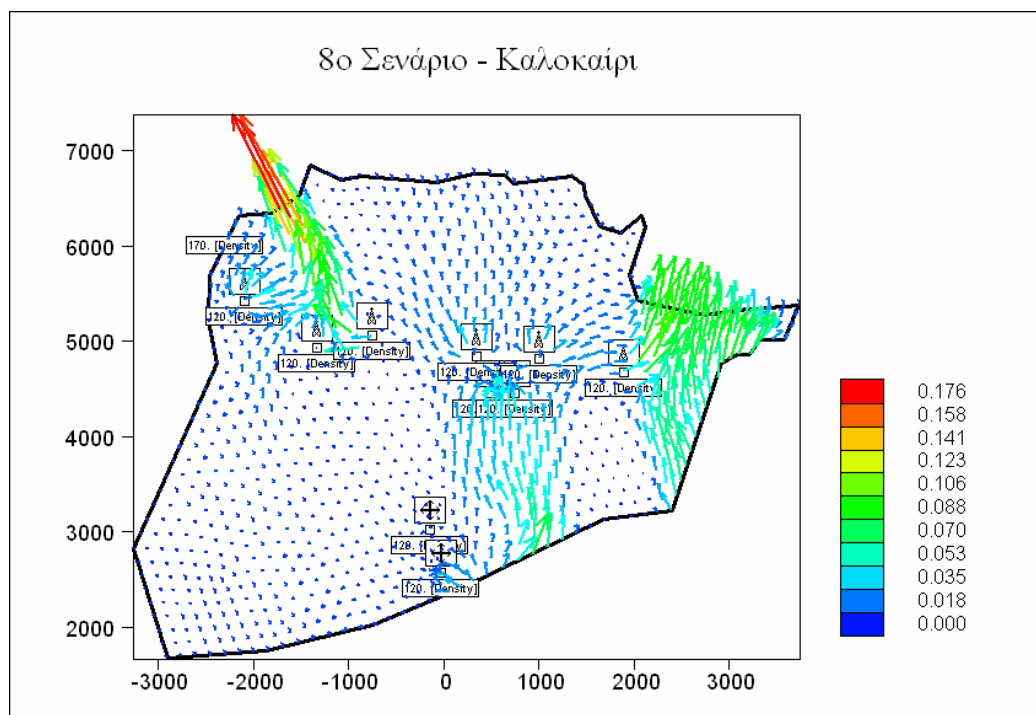
Μετά το τέλος της θερινής περιόδου τα αποτελέσματα είναι λίγο διαφορετικά. Το μέτωπο δεν είναι τόσο μετατοπισμένο και τα πηγάδια άντλησης προκαλούν και πάλι καταβίβαση του υδροφορέα κάτω από τα 102,5 μέτρα. Οι ταχύτητες είναι στα ίδια περίπου επίπεδα με τις αντίστοιχες του πέμπτου σεναρίου ενώ οι μικρές διαφορές οφείλονται στην επιρροή των δύο επιπλέον πηγαδιών στα ανατολικά και στα δυτικά της περιοχής. Πάντως είναι ένα αρκετά καλό σενάριο με εξαίρεση την απαίτηση του σε γλυκό νερό που θα μπορούσε και να είναι η προτεινόμενη λύση.



Σχήμα 4.31. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το όγδοο σενάριο



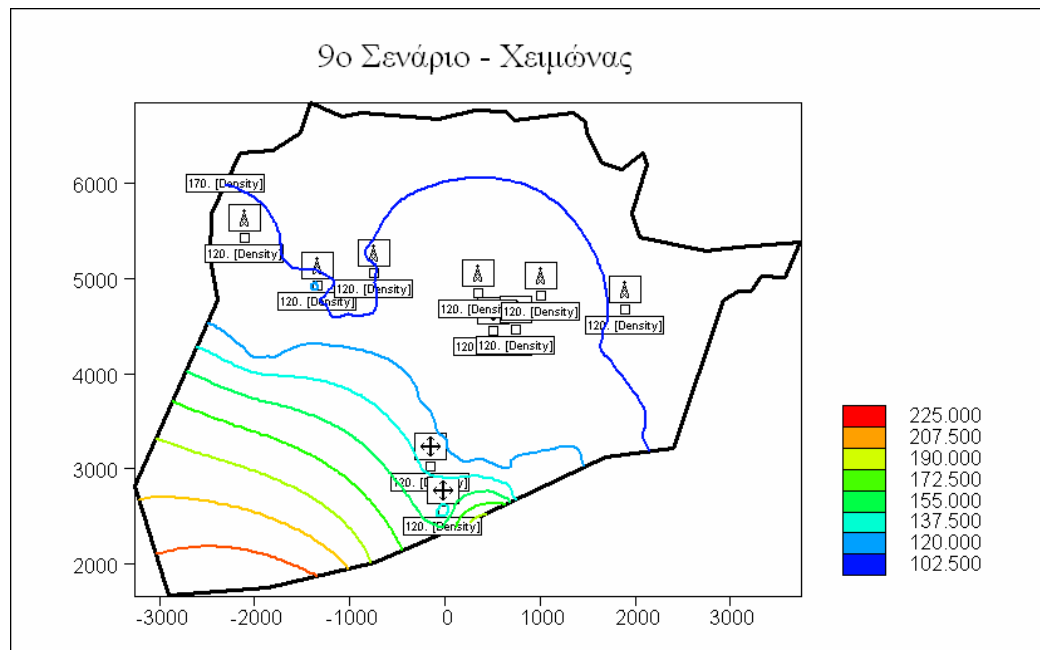
Σχήμα 4.32. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το όγδοο σενάριο



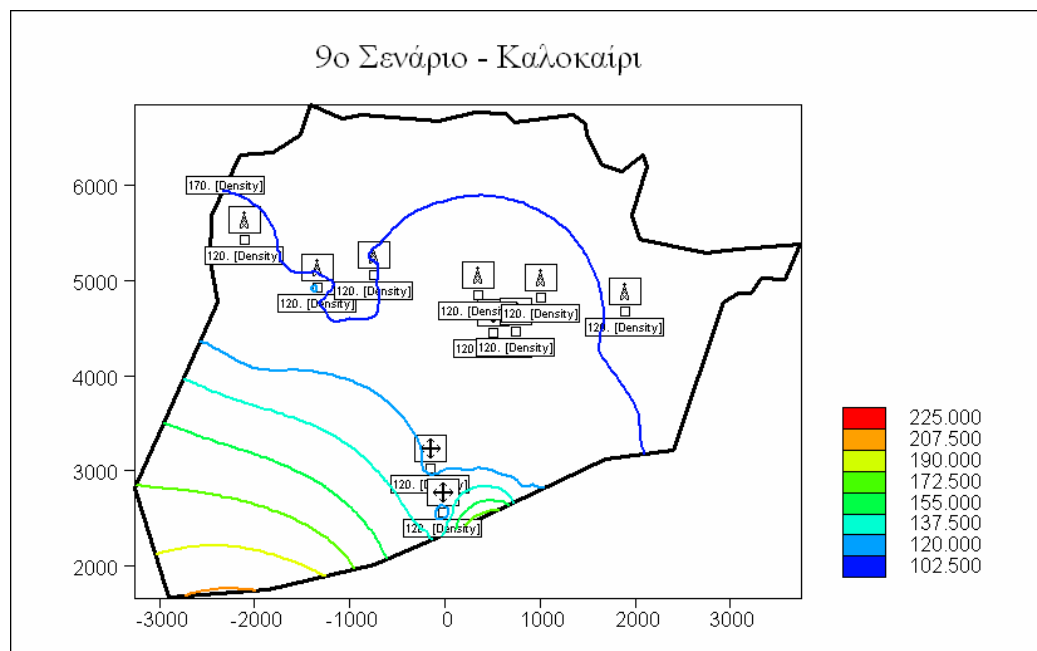
Σχήμα 4.33. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το όγδοο σενάριο

Σενάριο 9ο

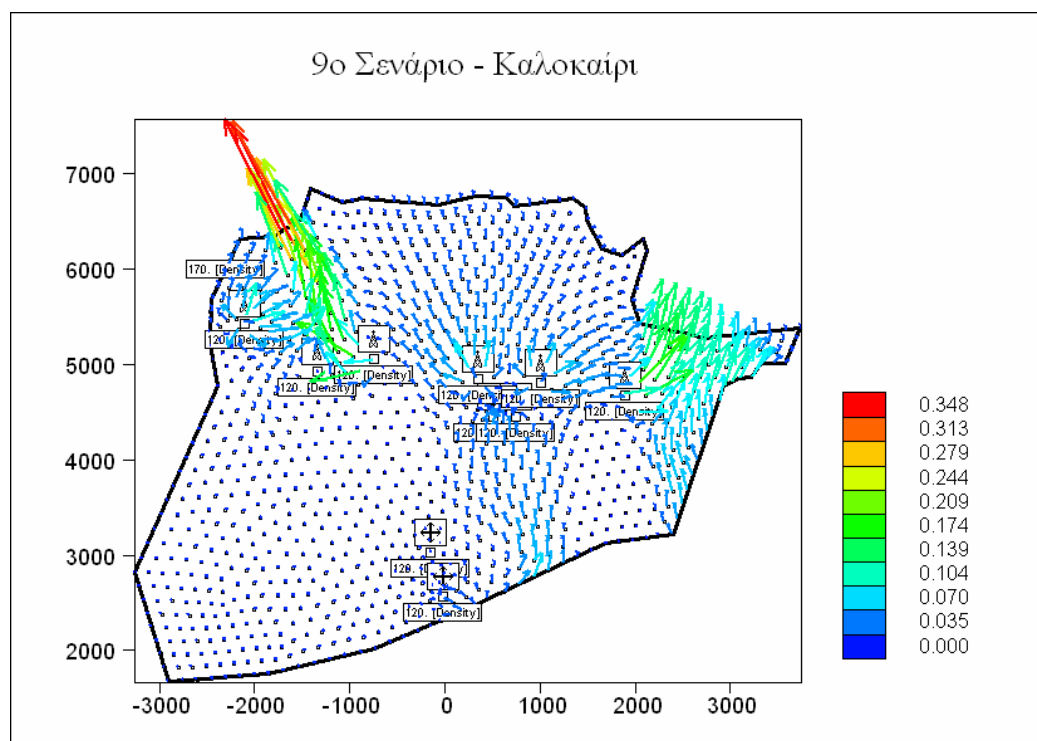
Το πιο απαιτητικό σενάριο σε νερό χρησιμοποιεί $200 \text{ m}^3 / \text{h}$ σε καθένα από τα πέντε πηγάδια και $40 \text{ m}^3 / \text{h}$. Η ολική απαίτηση φτάνει τα $1.040 \text{ m}^3 / \text{h} = 24.960 \text{ m}^3 / \text{d}$ παροχή συγκρίσιμη με εκείνη που επεξεργάζεται ο βιολογικός καθαρισμός της πόλης του Ηρακλείου ($32.000 \text{ m}^3 / \text{d}$ περίπου). Το σενάριο αυτό πετυχαίνει τα καλύτερα αποτελέσματα τόσο μετά τη θερινή όσο και μετά τη χειμερινή περίοδο του τρίτου έτους. Στο τέλος της χειμερινής περιόδου το μέτωπο έχει υποχωρήσει προς την ακτή και βρίσκεται σε απόσταση περίπου ενός χιλιομέτρου από αυτή. Εξαίρεση συνεχίζουν να αποτελούν οι δύο περιοχές με πετρώματα υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας από όπου το μέτωπο είναι μάλλον αδύνατο να απωθηθεί. Περίπου τα ίδια αποτελέσματα λαμβάνονται και μετά το τέλος της θερινής περιόδου με τα υδραυλικά ύψη ελαφρώς μειωμένα. Οι ταχύτητες όπως ήταν και αναμενόμενο είναι κατά πολύ αυξημένες ειδικά στο δυτικό τμήμα όπου βρίσκονται σε σχετικά μικρή απόσταση τρία πηγάδια τα οποία εμπλουτίζουν τον υδροφορέα με $440 \text{ m}^3 / \text{h}$. Επειδή το βήμα της κλίμακας είναι αρκετά πιο μεγάλο από πριν είναι πιο δύσκολα διακριτή η επιρροή των άλλων πηγαδιών εμπλουτισμού, αλλά οι ταχύτητες είναι περίπου οι ίδιες με εκείνες του τρίτου και του έκτου σεναρίου.



Σχήμα 4.34. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το ένατο σενάριο



Σχήμα 4.35. Υδραυλικό ύψος (m). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το ένατο σενάριο



Σχήμα 4.36. Ταχύτητα (m/d). Πρόβλεψη μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του τρίτου έτους της προσομοίωσης για το ένατο σενάριο

4.3. Συμπεράσματα – Προτάσεις

- Για να προσομοιωθεί ο υπόγειος υδροφορέας είναι απαραίτητα υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής ενώ για να γίνει η βαθμονόμηση απαιτούνται και στοιχεία για τη σημερινή κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα.

- Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης υπόγειων υδροφορέων έχει πολύ μεγάλη σημασία και σοβαρές επιπτώσεις ειδικά σε περιοχές με πολύ μικρά επιφανειακά αποθέματα γλυκού νερού. Στις περιοχές αυτές το υπόγειο νερό είναι η μοναδική πηγή γλυκού νερού για μεγάλες χρονικές περιόδους και υποβάθμιση της ποιότητάς του έχει ως συνέπεια μεγάλο οικονομικό κόστος μεταφοράς γλυκού νερού από άλλη περιοχή.

- Ένα σενάριο που θα προέβλεπε τη χρήση του τελικού προϊόντος των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων για τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων θα ήταν μια ενδιαφέρουσα πρόταση αφού θα έδινε λύση τόσο στο πρόβλημα της υφαλμύρινσης όσο και στο πρόβλημα διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων. Με δεδομένες τις προδιαγραφές που ορίζει η νομοθεσία (προδιαγραφές πόσιμου ύδατος) ίσως να απαιτείται ένας μεγαλύτερος βαθμός καθαρισμού των λυμάτων από ότι αν αυτά διατίθεντο στη θάλασσα.

- Η αναστροφή του φαινομένου είναι επίπονη και χρονοβόρα αφού ακόμα κι όταν το μέτωπο απωθηθεί πρέπει να εκροφηθεί και το προσροφημένο στους κόκκους του εδάφους άλας για να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη ποιότητα υπόγειου νερού.

- Σε κάθε περίπτωση η υφαλμύριση είναι, πέραν της ανθρωπογενούς δραστηριότητας, ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο δεν είναι εύκολο και ίσως να είναι και αδύνατο να αναστραφεί πλήρως.

- Είναι σκόπιμη η μελέτη εναλλακτικών τρόπων κάλυψης των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών ώστε να αποφευχθεί ως έσχατη λύση η άντληση με παράλληλο εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα.

- Ειδικά για βιομηχανική χρήση τα επεξεργασμένα απόβλητα ακόμα και με ένα μεγάλο βαθμό επεξεργασίας μπορεί να αποδειχθούν πιο οικονομική λύση από την άντληση ειδικά όταν αυτή γίνεται από μεγάλο βάθος.

- Η κατασκευή φραγμάτων, που είναι μια πιθανή λύση για άλλες χώρες, δεν προτείνεται λόγω του αυξημένου κόστους κατασκευής που έχουν και καθώς η αποτελεσματικότητά τους δεν θα είναι εξασφαλισμένη λόγω της υψηλής σεισμικότητας της περιοχής.

- Τα οριζόντια πηγάδια που χρησιμοποιούνται σε χώρες με ελάχιστα αποθέματα όπως το Ισραήλ μπορεί να δώσουν τη λύση σε παραθαλάσσιες περιοχές αξιοποιώντας ακόμα και λεπτά στρώματα γλυκού νερού που βρίσκονται πάνω από υφαλμυρισμένους υδροφορείς. Στην περιοχή μελέτης πάντως πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο συνιστούν μια οικονομική πρόταση.

- Η απόφραξη των σωλήνων των πηγαδιών εισαγωγής νερού καθώς και η μείωση της διαπερατότητας της γύρω περιοχής λόγω απόφραξης των πόρων του εδάφους (το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως clogging) είναι ένα εν δυνάμει εμπόδιο στη χρήση πηγαδιών για εξυγίανση και εμπλουτισμό ενός υδροφορέα. Για να αντιμετωπιστεί η απόφραξη γίνεται κατά διαστήματα διακοπή του εμπλουτισμού και μικρής διάρκειας άντληση με σκοπό να απομακρυνθούν τα στερεά που φράζει τους πόρους. Μια άλλη μέθοδος αποφυγής του φαινομένου είναι ο εμπλουτισμός υπό πίεση του υδροφορέα.

- Πρακτικά αδύνατη φάνηκε να είναι η αναχαίτιση του μετώπου της υφαλμύρινσης σε πολύ υδροπερατά όπως άμμοι και αργιλοαμμώδη εδάφη.

- Στο κατά πόσο θα επιτευχθεί η επιθυμητή περιβαλλοντική κατάσταση έχει σημασία ο αριθμός των πηγαδιών και η διασπορά τους. Όπως φάνηκε και από τα σενάρια που εξετάστηκαν, όσο περισσότερα ήταν τα πηγάδια και όσο μεγαλύτερη η διασπορά τους τόσο καλύτερο ήταν το αποτέλεσμα.

- Από τα σενάρια που εξετάστηκαν, καλύτερα αποτελέσματα έδωσαν το έκτο και το ένατο σενάριο τα οποία όμως έχουν και αυξημένες απαιτήσεις νερού.

- Αρκετά καλές επιλογές είναι και το πέμπτο ή το όγδοο σενάριο αφού όπως φαίνεται είναι σε θέση να αναχαιτίσουν το μέτωπο της υφαλμύρινσης. Βέβαια δεν έχουν τα ίδια αποτελέσματα με το έκτο και το ένατο στον τομέα του εμπλουτισμού του υδροφορέα.

- Τέλος το πρώτο τέταρτο και έβδομο σενάριο κρίνονται ανεπαρκή ενώ το δεύτερο και το τρίτο σενάριο λύνουν το πρόβλημα μόνο τοπικά και δεν είναι προτεινόμενα εκτός και αν συντρέχουν λόγοι οικονομίας.

- Σε κάθε περίπτωση, πριν την επιλογή κάποιου σεναρίου, κρίνεται απαραίτητη η εκπόνηση ενός γενικού σχεδίου για το βόρειο νομό Ηρακλείου που θα προβλέπει όλες τις περιοχές με πρόβλημα υφαλμύρινσης και θα δίνει τη βέλτιστη λύση για το σύνολο της παράκτιας ζώνης.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992
2. A. Lerman, Geochemical Processes in Water and Sediment Environments, Wiley Interscience, 1979
3. Elizabeth M. Shaw, Hydrology in practice second edition, Chapman and Hall, 1988

Σημειώσεις Μαθημάτων

4. Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Γεώργιος Καρατζάς, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2002
5. Saltwater Intrusion in Groundwater, Alexander H.-D. Cheng, University of Delaware, Newark, Delaware, U.S.A.

Δημοσιεύσεις

6. A.Naji, D. Ouazar & A. H.-D. Cheng, “Locating the saltwater – freshwater interface using nonlinear programming and h-adaptive BEM”, Engineering Analysis with Boundary Elements Vol.21 (1998) p. 253-259
7. Peter Dillon, Paul Pavelic, Gudrun Massmann, Karen Barry and Ray Correll, “Enhancement of the membrane filtration index (MFI) method for determining the clogging potential of turbid urban stormwater and reclaimed water used for aquifer storage and recovery”, Desalination, Volume 140, Issue 2, 1 November 2001, p. 153 - 165

Ιστοσελίδες

8. www.europa.eu.int
9. www.geo.umnw.ethz.ch/research/riet/overview.html
10. www.dekker.com/servlet/product/DOI/10181EEWS120010083/section/references
11. <http://geopubs.wr.usgs.gov/fact-sheet/fs030-02/>
12. www.mhhe.com/earthsci/geology/mcconell/demo/gwsystem.htm
13. http://pangea.stanford.edu/research/hydro/research/sw_itrus/sw_content.htm