ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής της Περιοχής Κάτω Μυραμβέλλου Λασιθίου Κρήτης

<u>Χαραλαμπάκης Χαρίδημος</u>

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)
Νικολαΐδης Νικόλαος
Γιδαράκος Ευάγγελλος

Χανιά

Ιούλιος 2010

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Καρατζά Π. Γεώργιο για την κατανόηση και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους καθηγητές κ. Νικολαΐδη Νικόλαο και Γιδαράκο Ευάγγελο, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Τριχάκη Ιωάννη.

We knew thee of old, Oh, divinely restored

By the lights of thine eyes And the light of thy Sword

From the graves of our slain Shall thy valour prevail

As we greet thee again- Hail, Liberty! Hail!

(D. Solomos)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή εξετάζει τον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής Κάτω Μυραμβέλλου Λασιθίου Κρήτης και την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής σε αυτόν.

Στο θεωρητικό υπόβαθρο αρχικά γίνεται μία γενική αναφορά στους υπόγειους υδροφορείς και στις παραμέτρους αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία για τα μοντέλα υπόγειας ροής, τις εξισώσεις και τις μεθόδους που χρησιμοποιούν, με μεγαλύτερη ανάλυση στις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Κατόπιν γίνεται μία ανάλυση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

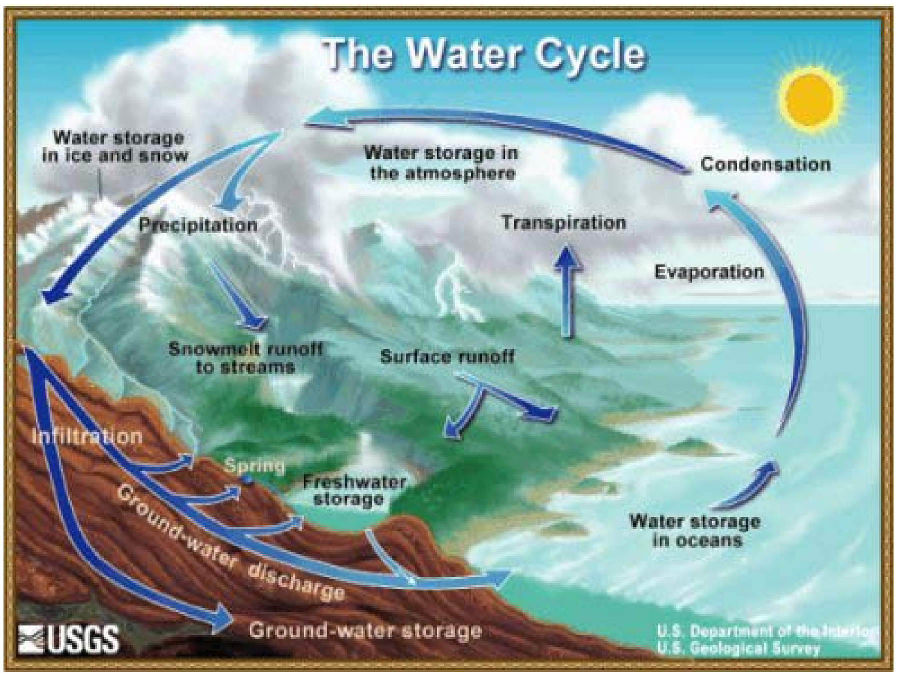
Μετά από μία σύντομη περιγραφή της υπό μελέτη περιοχής, με στοιχεία τόσο για το κλίμα (βροχοπτώσεις, θερμοκρασία) όσο και για τη γεωλογία της περιοχής, δημιουργείται ένα μοντέλο της περιοχής και γίνεται βαθμονόμησή του με βάση στοιχεία που υπάρχουν για την περιοχή. Αφού βαθμονομηθεί το μοντέλο παράγει ως αποτελέσματα την προσομοίωση της κατάστασης που επικρατεί στον υπόγειο υδροφορέα, με απεικόνιση των υδραυλικών υψών του και των ταχυτήτων του υπογείου νερού σε αυτόν.

Στη συνέχεια εξετάζονται σεναριακά δύο καταστάσεις με μοναδική διαφοροποίηση από την αρχική κατάσταση στους ρυθμούς αντλήσεων στις γεωτρήσεις της περιοχής. Το $1^{ο}$ σενάριο πραγματεύεται μία αύξηση της τάξεως του 25% ενώ το $2^{ο}$ σενάριο μία μείωση της τάξεως του 50%. Μετά την προσομοίωση και για τα δύο αυτά σενάρια εξάγονται συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά της αρχικής προσομοίωσης και αναλύεται η ευαισθησία του υδροφορέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις διακρίνεται σε επιφανειακό και υπόγειο. Επιφανειακό νερό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ υπόγειο είναι οι υδάτινες ποσότητες που υπάρχουν μέσα στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για την μελέτη των υπόγειων υδάτων είναι αναγκαίο να εξεταστεί το θέμα σφαιρικά και σε άμεσο συσχετισμό με τον Υδρολογικό Κύκλο καθώς η ανανέωση ενός σημαντικού μέρους του συνολικού όγκου των εκμεταλλεύσιμων υπόγειων νερών γίνεται με τη διήθηση των νερών των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ μεγάλο τμήμα τους χάνεται καθώς εκφορτίζεται στις θάλασσες και τους ωκεανούς.



Σχήμα 1.1: Ο Υδρολογικός κύκλος

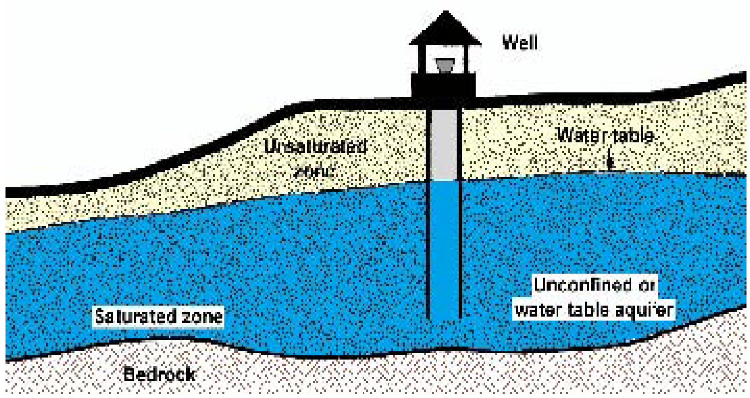
Το υπόγειο νερό κινείται μέσα στα διάκενα εδαφών ή πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται ως διαπερατά ή υδροπερατά. Οι όγκοι των γεωλογικών σχηματισμών στα οποία μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό λέγονται υδροφόρα στρώματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υδροφορέων αποτελούν αλλουβιακές αποθέσεις άμμων και χαλίκων. Αντίθετα τα λεγόμενα αδιαπέραστα στρώματα, ενώ έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύσουν έστω και μικρές ποσότητες νερό πρακτικά δεν έχουν καμία δυνατότητα μεταφοράς του. Κλασσικό παράδειγμα της κατηγορίας αυτής αποτελούν τα αργιλικά εδάφη. Ενδιάμεση κατηγορία των δυο παραπάνω αποτελούν εδάφη που έχουν σημαντικά μικρότερη των διαπερατών ικανότητα μεταφοράς νερού. Τα εδαφικά αυτά στρώματα χαρακτηρίζονται ως ημιπερατά και τυπικό παράδειγμα τους είναι οι φακοί αργίλου σε εναλλαγές με αμμώδη εδάφη.

Η ροή του νερού στους υδροφορείς αναφέρεται συνήθως ως ροή σε πορώδη μέσα, αφού έτσι ονομάζονται όλα τα πετρώματα και τα εδάφη που αποτελούνται από ένα στερεό σκελετό με τη μορφή συνάθροισης στερεών κόκκων που διαχωρίζονται και περιβάλλονται από διάκενα δηλαδή πόρους (Τσακίρης, 1995).

1.2 ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

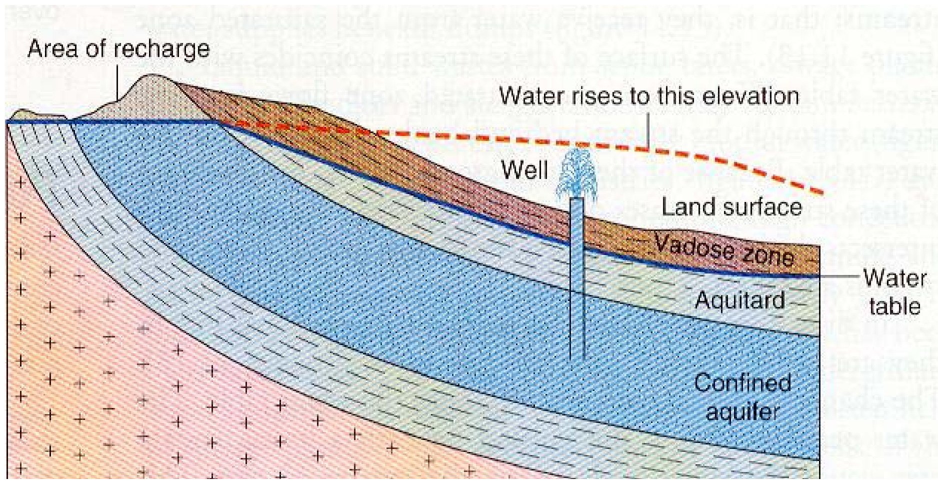
Το βασικό κριτήριο για μια γενική ταξινόμηση των υδροφορέων αποτελεί η θέση της ανώτατης στάθμης του νερού στο έδαφος. Έτσι διακρίνονται σε :

1) Ελεύθερος Υδροφορέας (unconfined aquifer) : η ανώτερη επιφάνειά του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας.



Σχήμα 1.2: Ελεύθερος Υδροφορέας

2) Περιορισμένος Υδροφορέας (confined aquifer): περιέχει νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέραστα στρώματα (Καρατζάς, 2002).



Σχήμα 1.3: Περιορισμένος Υδροφορέας

1.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Οι υδροφορείς μπορεί να χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να συγκρατούν και να μετακινούν ύδωρ. Οι ιδιότητες που τους χαρακτηρίζουν είναι:

- Το πορώδες (porosity) [n,ε]

Πορώδες είναι το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά και ορίζεται ως:

Πορώδες: $n = {}^{Vv}/_{Vo}$

όπου V_v : ο όγκος των κενών

V_o : ο συνολικός όγκος του δείγματος

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι :

1. Η κοκκομετρική σύνθεση.
2. Η διάταξη των κόκκων.
3. Το σχήμα των κόκκων.

Χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους και της ειδικής απόδοσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

***Πίνακας 1.1**: Χαρακτηριστικές τιμές πορώδους και ειδικής απόδοσης*

Υλικά	**Πορώδες (%)**	**Ειδική απόδοση (%)**
Μη διαστρωματοποιημένα υλικά		
Χαλίκια	25-35	15-30
Άμμος	25-45	10-30
Ιλύς	35-50	5-10
Πηλός	45-55	1-5
Άμμος και Χαλίκια	20-30	10-20
Διαστρωματοποιημένα υλικά		
Αμμόλιθος	5-30	3-15
Δομολιτικοί Ασβεστόλιθοι	1-20	0.5-10
Καρστικοί Ασβεστόλιθοι	5-30	2-15
Σχιστόλιθος	1-10	0.5-5
Κυστοειδής βασάλτης	10-40	5-15
Αποσαθρωμένος βασάλτης	5-30	2-10
Πορώδης βράχος	10-60	5-20
Φρέσκος γρανίτης και γνευσίτης	0.01-2	< 0.1
Αποσαθρωμένος γρανίτης και γνευσίτης	1-15	0.5-5

Πηγή: Freeze and Cherry, 1979; Todd, 1980; Driscoll, 1986

- Το ενεργό πορώδες (effective porosity, ne), ή ειδική απόδοση (specific yield)

Ενεργό πορώδες είναι το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό των πόρων i δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

$$n_e = \frac{V_Y}{V_o}$$

Όπου V_Y : ο όγκος του νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από της επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων.

V_o : ο συνολικός όγκος του εδάφους

Παρατήρηση: Τα ιζηματογενή πετρώματα δεν έχουν διακυμάνσεις στις τιμές του πορώδους n και του ενεργού πορώδους ne , σε αντίθεση με τα αργιλώδη εδάφη που παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις.

- Η ειδική συγκράτηση

Ο όρος ειδική συγκράτηση αναφέρεται στο Sr όπου:

$$Sr = \eta - ne$$

- Τη μηχανική Ταξινόμηση εδαφών σύμφωνα με το American Society of Testing Materials.

Η American Society of Testing Materials (ASTM) είναι μια διεθνής μη κερδοσκοπική οργάνωση που ασχολείται με τα υλικά, τα προϊόντα, τα συστήματα και τις υπηρεσίες. Τα πρότυπα που παρέχει η ASTM γίνονται αποδεκτά και χρησιμοποιούνται στην έρευνα και την ανάπτυξη, τη δοκιμή προϊόντων, τα ποιοτικά συστήματα και τις εμπορικές συναλλαγές σε όλη την υδρόγειο.

1.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ - ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY

Ο Henry Darcy, μελέτησε τη ροή του νερού διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής (Q/A) διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή Κ που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή είναι ο νόμος του Darcy και η μαθηματική έκφραση είναι :

$$\frac{Q}{A} = -K\frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K\frac{\Delta h}{L}$$

Όπου: Q : είναι η παροχή (L^3/ T)

A : είναι η επιφάνεια (L^2)

K : είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

Δh : είναι η απώλεια φορτίου (L)

L : είναι το μήκος της στήλης (L)

q : είναι η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (L/T)Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Η έκφραση Δh/L συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως dh/dL και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς Reynolds < 1, έχει παρατηρηθεί όμως ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για Re =10. Στην περίπτωση των υπόγειων νερών η ροή συμβαίνει με Re< 1, πράγμα το οποίο εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου Darcy χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που υπάρχει μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε φρέαρ άντλησης ή σε περιπτώσεις που υπάρχει τυρβώδης ροής όπως κοντά σε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα (Καρατζάς, 2002).

Η ταχύτητα του Darcy, εξ' ορισμού θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα διαμέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως εξής (Καρατζάς, 2002).

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n}\frac{dh}{dl}$$

όπου : q_p : είναι η ταχύτητα διήθησης (L/T)

Q : είναι ο ρυθμός παροχής (L^3/ T)

A : είναι η επιφάνεια (L^2)

n : είναι το πορώδες

q : είναι η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (L/T)

K : είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

dh : είναι η απώλεια φορτίου (L)

dl : είναι το μήκος της στήλης (L)

1.5 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Σε μια σειρά πειραμάτων που έγιναν σε ένα ομοιόμορφο, ιδεώδες, πορώδες μέσο το οποίο αποτελείται από υάλινες σφαίρες διαμέτρου d, ομοιόμορφα κατανεμημένες μελετήθηκε η ροή διάφορων ρευστών πυκνότητας ρ, ιξώδους μ και σταθερής υδραυλικής κλίσης dh/dl. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για την υδραυλική αγωγιμότητα ισχύει :

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

όπου : $k = Cd^2$ και ορίζεται ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου.

C συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ταξινόμηση μεγέθους των κόκκων.

Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας παρατίθενται παρακάτω.

***Πίνακας 1.2**: Υδραυλικές Αγωγιμότητες Εδαφών*

Τύπος εδάφους	**Υδραυλική Αγωγιμότητα, K (cm / s)**
Άργιλος	10^{-9} - 10^{-6}
Ιλύς	10^{-7} - 10^{-3}
Άμμος	10^{-5} - 10^{-1}
Χαλίκι	10^{-1} - 10^{2}

Πηγή: Freeze and Cherry, 1979

1.5.1 Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας (Τ) χρησιμοποιείται ευρύτατα στην υπόγεια υδραυλική. Ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο το νερό με μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση και εκφράζεται μαθηματικά ως :

$$T = Kb$$

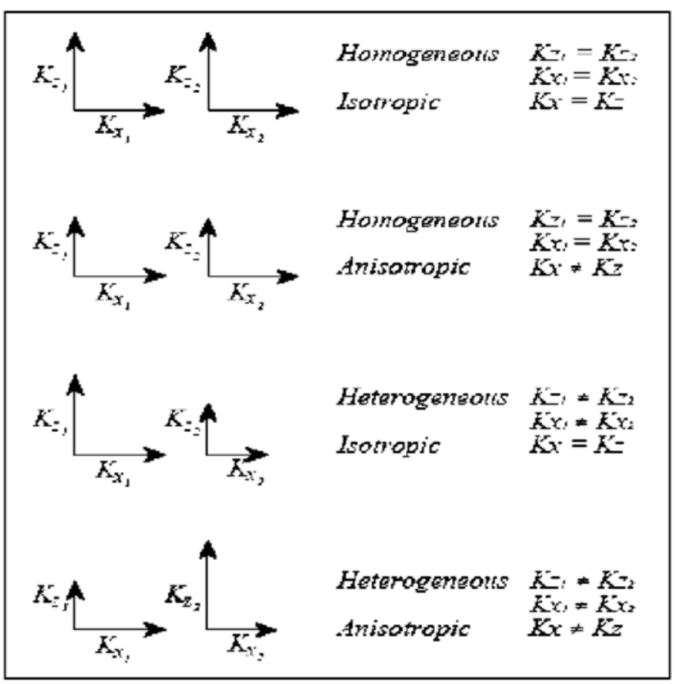
όπου K : είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

b : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα (L)

1.5.2 Ομοιογένεια και Ισοτροπία

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Επίσης σε ένα δεδομένο σημείο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται και ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση είναι η ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας και στην δεύτερη της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας (Καρατζάς, 2002).

- Ομοιογενής (homogeneous) : χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.
- Ετερογενής (heterogeneous) : χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά.
- Ισότροπος (Isotropic) : χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Ανισότροπος (Anisotropic): χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση.



Πηγή : Freeze and Cherry, 1979

1.6 ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ DARCY

Λόγω του φαινομένου της ανισοτροπίας, στην περίπτωση εφαρμογής του νόμου του Darcy η ταχύτητα της υπόγειας ροής είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες στις τρεις κατευθύνσεις x, y και z. Εάν ο άξονας των συντεταγμένων είναι κάθετος στη διεύθυνση των στρωμάτων και οι άλλοι παράλληλοι τότε (Καρατζάς, 2002).

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις ο νόμος του Darcy εμφανίζεται στη γενική του μορφή:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$q_y = -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$q_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

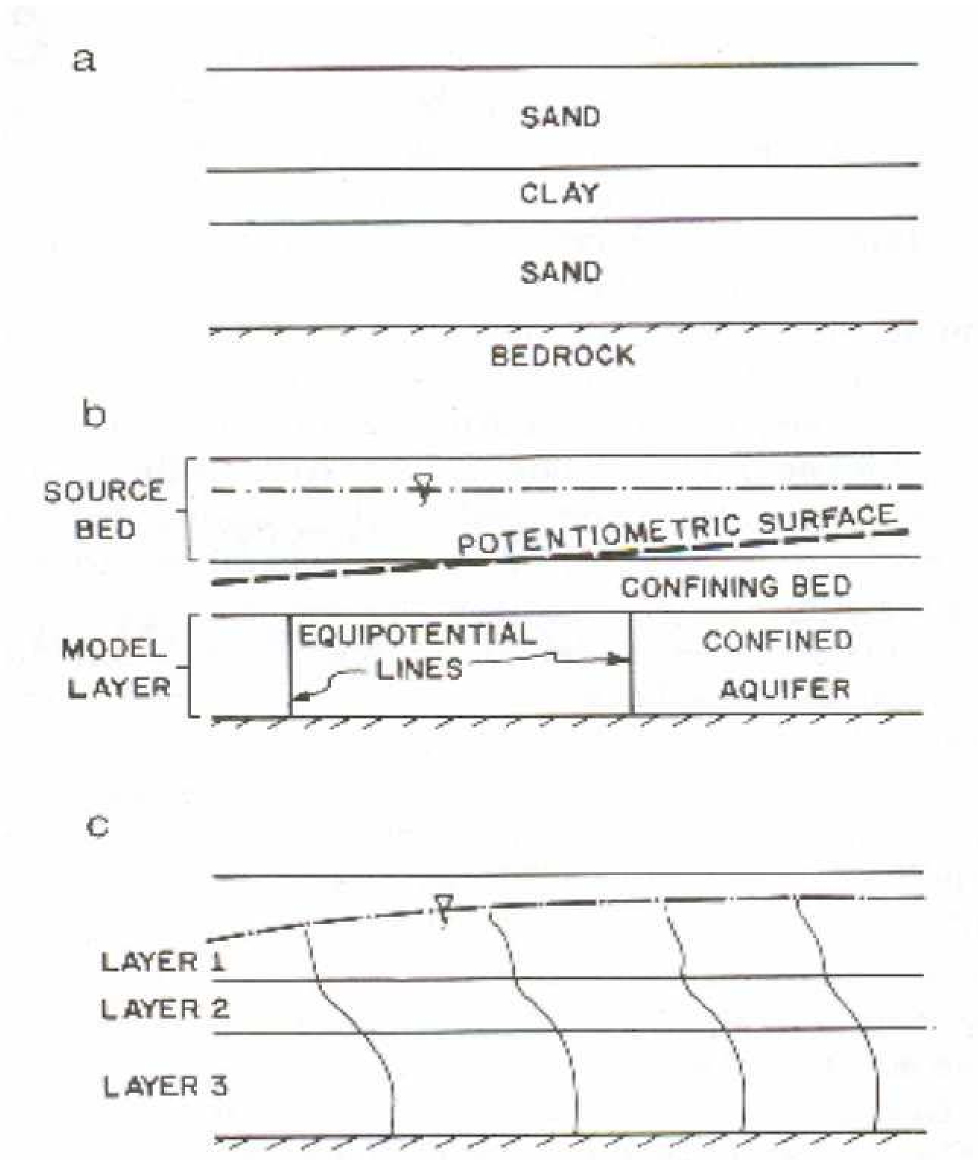
2.1 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

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

2.1.1 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 2.1: Θεωρήσεις συστημάτων υπογείων υδάτων

a. Γεωλογικό σύστημα

b. Θεώρηση υδροφορέα

c. Θεώρηση συστήματος ροής

Πηγή: Anderson and 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:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)=S\frac{\partial h}{\partial t}-R+L \qquad (2.1)$$

Όπου

$$L=-K_z'\frac{h_{source}-h}{b'}$$

Οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (2.1) αντιπροσωπεύουν οριζόντια ροή μέσω του υδροφορέα όπου h είναι το υδραυλικό ύψος και Tx και Ty είναι οι συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας. Η τοποθέτηση των όρων Tx και Ty 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 ≠TxTy. 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 Kz' είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητά του, b' το πάχος του και hsource το υδραυλικό ύψος στο στρώμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος.

Κατά την εφαρμογή της (2.1) 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 Tx = Kxh και Ty = Kyh, 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 ή προς κάποιο στρώμα κάτω από τον ελεύθερο υδροφορέα.

Από την εξίσωση (2.1) λείπει η συνιστώσα της μεταβιβασιμότητας στη διεύθυνση z. Αυτό οφείλεται στο ότι η μεταβιβασιμότητα στογγυλοποιείται 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 τρείς διευθύνσεις.

Στην περίπτωση της θεώρησης συστήματος ροής δε χρειάζεται η ταυτοποίηση καθαυτών 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:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s \frac{\partial h}{\partial t}-R^* \qquad (2.2)$$

Όπου

K_x, K_y και K_z είναι οι συνιστώσες της υδραυλικής διαπερατότητας

Ss 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 and Woessner, 1992).

2.1.1.1 Εξίσωση Boussinesq

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν η εξίσωση (2.1) 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 (2.1) προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y}\right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \qquad (2.3)$$

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

Επειδή όμως ισχύει και ότι:

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

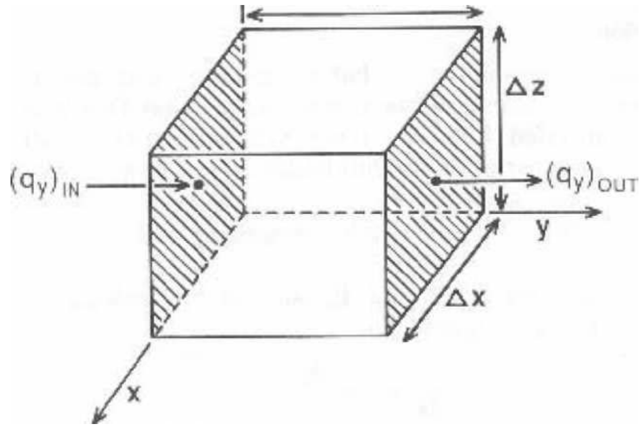
Η εξίσωση (2.3) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y}\right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \qquad (2.4)$$

Η εξίσωση (2.4) 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 and Woessner, 1992).

2.1.1.2 Παραγώγιση των Εξισώσεων του Συστήματος

Η Εξίσωση 2.2 παραγωγίζεται από τη μαθηματική σύνδεση ενός υδατικού ισοζυγίου με το νόμο του Darcy. Η παραγώγιση 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 2.2. Ο μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται στην παραγώγιση των εξισώσεων του συστήματος. (Πηγή: Anderson and 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 Δ_x Δ_y Δ_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:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \qquad (2.6)$$

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:

Έξοδος - Είσοδος = Αλλαγή στην Αποθήκευση (2.7)

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

$$\left[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}\right] \cdot \Delta x \cdot \Delta z \qquad (2.8)$$

Ή αλλιώς

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y}(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \qquad (2.9)$$

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

$$\frac{\partial q_y}{\partial y}(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \qquad (2.10)$$

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:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right)\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση} \qquad (2.11)$$

για να επιτραπεί επίσης η ύπαρξη μιας καταβόθρας (πηγάδι εμπλουτισμού) ή μιας πηγής (πηγάδι εμπλουτισμού) μέσα στον όγκο ελέγχου προστίθεται και ένας όρος $R^*\Delta_x\Delta_y\Delta_z$ ο οποίος θεωρείται θετικός όταν πρόκειται για πηγή.

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R^*\right)\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση} \qquad (2.12)$$

Από το δεξί μέλος της (2.7) η αλλαγή στην αποθήκευση ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα Ss, η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_S = -\frac{\Delta V}{\Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \qquad (2.13)$$

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:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_S \frac{\Delta h}{\Delta t}\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \qquad (2.14)$$

Από το συνδυασμό των (2.12) και (2.14) και διαίρεσή τους δια ΔxΔyΔz προκύπτει η τελική μορφή του ισοζυγίου μάζας του νερού:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}+\frac{\partial q_z}{\partial z}=-S_S\frac{\partial h}{\partial t}+R^* \qquad (2.15)$$

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:

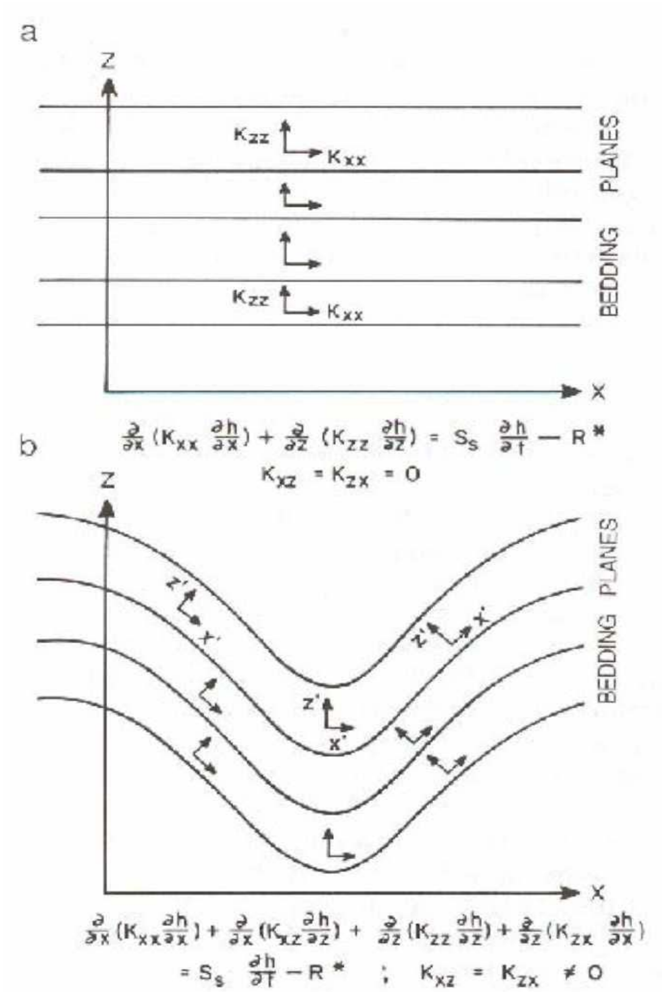
$$\begin{aligned} q_x &= -K_x\frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y\frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z\frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \qquad (2.16)$$

Όταν οι εξισώσεις (2.16) αντικατασταθούν στην (2.15) προκύπτει η (2.2). Η εξίσωση (2.1) παράγεται από την (2.2) θέτοντας θh / θx = 0, πολλαπλασιάζοντας με το b, προσθέτοντας τον όρο της διαρροής και θέτοντας b·Ss = S και b·R* = R.

Στις εξισώσεις (2.1) και (2.2) θεωρείται ότι τα Kx, Ky και Kz (ή Tx, Ty) 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 ($\overline{K}$) που γράφεται ως εξής:

$$\overline{K}=\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \qquad (2.17)$$

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 and Woessner, 1992).



Σχήμα 2.3. Προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων. a. Οι άξονες z και χ είναι ευθυγραμμισμένοι με τις κύριες διευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας. b. Ορίζεται ένα καθολικό σύστημα χ-z και τα τοπικά συστήματα χ'-z' ευθυγραμμίζονται με τις κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας. (Πηγή: Anderson and 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 (2.2). Οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) 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 υφαλμύρινσης. Εάν τα φαινόμενα της πυκνότητας είναι σημαντικά χρειάζεται μια διαφορετική εξίσωση του συστήματος και ένας αριθμητικός κώδικας ειδικός για την περίπτωση.

2.1.1.3 Αριθμητικές Μέθοδοι

Αν απλοποιηθούν οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) 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 υδραυλικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω βασικών συναρτήσεων.

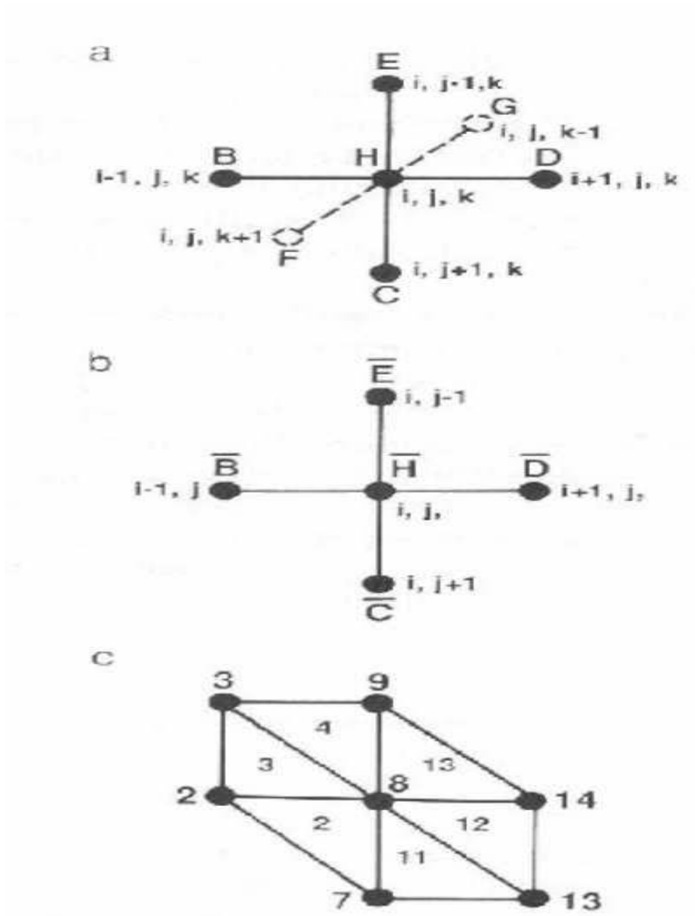
Η γενική μορφή της έκφρασης των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση (2.2) γράφεται για το υπολογιστικό μόριο του σχήματος 2.4.α ως εξής:

$$\mathrm{B}h_{i-1,j,k} + \mathrm{C}h_{i,j+1,k} + \mathrm{D}h_{i+1,j,k} + \mathrm{E}h_{i,j-1,k} + \mathrm{F}h_{i,j,k+1} + \mathrm{G}h_{i,j,k-1} + \mathrm{H}h_{i,j,k} = \mathrm{RHS}_{i,j,k} \tag{2.18}$$

Η εξίσωση για το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i, j, k (hi,j,k) εμπεριέχει το υδραυλικό ύψος στον ίδιο τον κόμβο καθώς και τα υδραυλικά 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 RHSi, j, k περιλαμβάνει την αποθήκευση και τους όρους εμπλουτισμού στο δεξί μέλος της εξίσωσης. Μια εξίσωση δισδιάστατης ροής για το σχήμα 2.4. β γράφεται:

$$\overline{B}h_{i-1,j} + \overline{C}h_{i,j+1} + \overline{D}h_{i+1,j} + \overline{E}h_{i,j-1} + \overline{H}h_{i,j} = RHS_{i,j} \qquad (2.19)$$

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 and Woessner, 1992)



Σχήμα 2.4. Υπολογιστικά στοιχεία

a. Τρισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών

b. Αισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών

c. Κομμάτι με έξι πεπερασμένα στοιχεία γύρω από τον κόμβο 8.

(Πηγή: Anderson and Woessner, 1992)

2.1.2 Οριακές Συνθήκες

2.1.2.1 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 and Woessner, 1992)

2.1.3 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 υδροφορέα. 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.

2.1.3.1 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.

2.1.3.2 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 and Woessner, 1992)

2.1.4 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, hsource 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', hsource, 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 w4 να είναι ίσος με το όγκο που εφαρμόζεται στο κελί ή στοιχείο (Δx ·Δy). 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:

$$\left(\frac{K_z^{'}}{b^{'}}\right)_m = \frac{K_z^{'}}{b^{'}} \cdot \frac{w \cdot 1}{\Delta x \cdot \Delta y}$$

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 and Woessner, 1992)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code) είναι να εισάγει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή και τη μεταφορά ρύπων. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί κυρίως για τους πρακτικούς υδρολόγους παρά για τους θεωρητικούς με αποτέλεσμα να επικεντρώνεται κυρίως στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης και στη βιβλιογραφία για τις πηγές του νερού και όχι στις λεπτομέρειες για την ανάπτυξη των εξισώσεων και στην ανάλυση του λάθους. Παρακάτω δίνονται οι θεμελιώδες εξισώσεις του μοντέλου καθώς και η επίλυση του αλγορίθμου (Badu et al., 1997).

3.1.1 Θεμελιώδες Εξισώσεις

Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα χωρικών διαφορικών εξισώσεων για αναπαραστήσει την υπόγεια ροή σε σχέση με το υδραυλικό ύψος h :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-S\frac{\partial h}{\partial t}+Q=0 \tag{3.1}$$

όπου η υπόγεια ταχύτητα Darcy για κάθε κατεύθυνση είναι :

$$V_x=-K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x} \qquad V_y=-K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y} \qquad V_z=-K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z} \tag{3.2}$$

και η μεταφορά ρύπων περιγράφεται από τη συγκέντρωση c :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}\left[D_{xx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{xz}\frac{\partial c}{\partial z}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[D_{yx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{yz}\frac{\partial c}{\partial z}\right]+\\+\frac{\partial}{\partial z}\left[D_{zx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{zy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{zz}\frac{\partial c}{\partial z}\right]-\left[V_x\frac{\partial c}{\partial x}+V_y\frac{\partial c}{\partial y}+V_z\frac{\partial c}{\partial z}\right]+\\+Q\left(c^w-c\right)-\theta\left[1+E\left(c\right)\right]\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)=0\end{aligned} \tag{3.3}$$

Και οι τρεις εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και από το νόμο του Darcy ενώ η διαδικασία που ακολουθείται για την επίλυση αυτών είναι: υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος h από την εξίσωση (3.1), υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy Vx, Vy, Vz από την (3.2) και στη συνέχεια υπολογίζεται η συγκέντρωση του ρυπαντή c από την (3.3) (Badu et al., 1997).

3.1.2 Επίλυση του Αλγορίθμου

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων σε σύνθετα φυσικά συστήματα απαιτούνται αριθμητικές μέθοδοι, και ειδικά για συστήματα πεδίου όπου για το υπολογιστικό μέρος χρησιμοποιούνται τρισδιάστατες εξισώσεις ο φόρτος εργασίας είναι πολύ μεγάλος. Το μοντέλο PTC εμπεριέχει ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για την επίλυση τέτοιων τρισδιάστατων εξισώσεων, ο οποίος μειώνει το υπολογιστικό μέρος σημαντικά. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει με μια διακριτική ευχέρεια το πεδίο ορισμού σε οριζόντια και παράλληλα στρώματα μέσα στα οποία χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία για την εύστοχη αναπαράσταση του ακανόνιστου πεδίου ορισμού (Pinder and Gray, 1977). Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με πεπερασμένες διαφορές ενώ η μέθοδος της υδρόβιας ένωσης των πεπερασμένων στοιχείων με τις πεπερασμένες διαφορές εξασφαλίζει τη δυνατότητα για να ισχύσει η διαχωριστική διαδικασία. Κατά τη διάρκεια της επανάληψης μιας χρονικής περιόδου όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο μέρη, στο πρώτο όπου όλα τα οριζόντια πεπερασμένα στοιχεία επιλύονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και στο δεύτερο όπου επιλύονται όλες οι κάθετες εξισώσεις σε κάθε δεσμό του στρώματος (Badu et al., 1997). ΥΠΟΓΕΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

3.1.3 Θεμελιώδες εξισώσεις

Το μοντέλο PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής του συστήματος επιλύνοντας για το υδραυλικό ύψος χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών μεσώ των ακόλουθων χωρικών διαφορικών εξισώσεων (Badu et al., 1997).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial}{\partial z}\right)-S\frac{\partial}{\partial t}+ \\ +\sum_{i=0}^{r}Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right)=0 \qquad (3.4)$$

όπου χρησιμοποιούνται σαν βασικές μονάδες το μήκος [L], ο χρόνος [T] και η μάζα[M].

H είναι το υδραυλικό ύψος [L],

K_{XX} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην x οριζόντια κατεύθυνση $[LT^{-1}]$,

K_{YY} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια κατεύθυνση $[LT^{-1}]$,

K_{ZZ} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην z (κάθετη) κατεύθυνση $[LT^{-1}]$,

S ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας $[L^{-1}]$,

Q_i ο όρος της πηγής/ καταβύθισης στη θέση i $[L^3T^{-1}]$ (π.χ. πηγάδια, θετικές τιμές δηλώνουν άντληση)

δ είναι η Δέλτα συνάρτηση και

r ο αριθμός των σημείων πηγών/ καταβύθισης.

3.1.4 Απαιτήσεις για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Το διαχωριστικό σχέδιο που χρησιμοποιεί το μοντέλο PTC για να λύσει την εξίσωση (3.4) εμπεριέχει στρογγυλοποιήσεις στους όρους που περιέχουν τις παραγώγους των x και y χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία στα οριζόντια επίπεδα είναι ευρύτατα διαδεδομένη. Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι υπάρχει ένα απεριόριστο άθροισμα συναρτήσεων που αναπαριστούν ακριβώς την λύση των χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή. Μία πεπερασμένη προσέγγιση σε μορφή σειράς είναι :

$$h(x,y,z,t) \sim \hat{h}(x,y,z,t) = \sum_{i=0}^{N} h_i(z,t) w_i(x,y) \tag{3.5}$$

όπου

h το υδραυλικό ύψος [L],

$\hat{h}$ η σειρά προσέγγισης του h [L],

h_i ένας εκκρεμής συντελεστής [L],

W_i μία συνάρτηση (αδιάστατη) βάσης (παρεμβολής) και

N ο αριθμός των κόμβων στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων

Η σειρά προσέγγισης (3.5) προωθεί μια ακριβή αναπαράσταση καθώς το N πλησιάζει στο άπειρο (το $\hat{h}$ πλησιάζει το h). Με μια προσεκτική επιλογή της συνάρτησης βάσης W_i , ο εκκρεμής συντελεστής h_i μετατρέπεται σε τιμή υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες (x,y,z). Ένας τρόπος για τον υπολογισμό του συντελεστή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση συνεχόμενων ξεχωριστών βημάτων στη συνάρτηση βάσης η οποία είναι μη μηδενική πέρα από μια μικρή υποπεριοχή του συνολικού πεδίου ορισμού. Καθώς αρκετά διαφορετικά είδη συναρτήσεων βάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν (Lapidus and Pinder, 1982), το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί ξεχωριστές γραμμικές συναρτήσεις ανάμεσα στους παρακείμενους κόμβους των σημείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προέρχεται διαπιστώνοντας ότι ο διαφορικός συντελεστής L (στην εξίσωση 3.4) όταν συντελεί στο h που είναι ίσο με μηδέν, τότε στο συντελεστής L της προσεγγιστικής συνάρτησης παρουσιάζεται ένα λάθος. Με μαθηματικούς όρους η εξίσωση (10) μπορεί να γραφτεί ως:

$$L(h)=0 \qquad (3.6)$$

Ενώ

$$L(\hat{h})=R \qquad (3.7)$$

Όπου R το παραμένων λάθος.

Για την επίλυση της εξίσωσης (3.5) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το παραμένων λάθος R. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη ένα ολοκληρωμένο σύστημα συναρτήσεων w_i και εξαναγκάζοντας το παραμένων λάθος R να είναι εφικτό για όλες τις τιμές του w_i οπότε στην πραγματικότητα το R πλησιάζει στο μηδέν γεγονός που σημαίνει ότι αποκομίζεται η λύση της εξίσωσης (3.5). Με μαθηματικούς όρους αυτό σημαίνει (Badu et al., 1997).

$$L(\hat{h}) = L(h) \text{ όταν το } R=0$$

3.1.5 Απαιτήσεις για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών είναι:

$$Ah + B\frac{\partial}{\partial t} - v + f = 0 \qquad (3.8)$$

όπου τα A και B είναι μαθηματικοί πίνακες με διαστάσεις N x N και οι όροι h, θh / θt ,v και f είναι διανύσματα στήλης με μήκος N. Τα στοιχεία A, B, v και f είναι :

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[\mathrm{K}_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + \mathrm{K}_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dxdy \qquad (3.9)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dxdy \qquad (3.10)$$

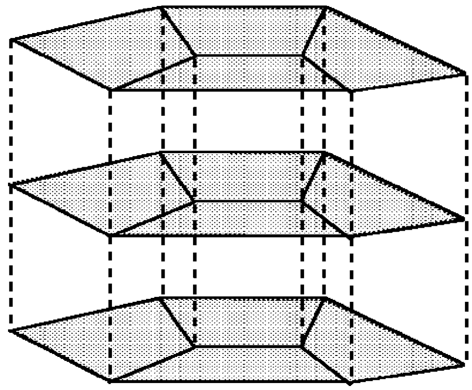
$$f_i = -\iint_{\Omega} Q w_i dxdy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \qquad (3.11)$$

$$\mathrm{v}_i = \sum_{i=1}^{N} \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dxdy \right] \qquad (3.12)$$

όπου στην f περιέχονται οι γνώστες οριακές συνθήκες.

3.1.6 Η κάθετη παράγωγος

Το κεντρικό γνώρισμα στον κώδικα του μοντέλου PTC είναι η χρήση κεντρικής διαφοροποίησης για τα διάφορα διαστήματα στην z κατεύθυνση στην εξίσωση (3.12). Αυτή η κάθετη διαφοροποίηση ολοκληρώνεται με τη βοήθεια οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αντικαθιστούνται από στρώματα με κόμβους τον έναν πάνω στον άλλο όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αντικαθιστούνται από στρώματα με κόμβους τον έναν πάνω στον άλλο και παίρνουν τρισδιάστατη μορφή

Αυτό σημαίνει ότι η κάθετη κατεύθυνση σε μια δυσδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια προσέγγιση της εξίσωσης (3.12). Χρησιμοποιώντας το k ως κάθετο δείκτη και με k=1 το στρώμα του πυθμένα, η προσέγγιση μπορεί να γραφτεί ως :

$$v \cong C_k^{+}\left(h_{k+1}-h_k\right)-C_k^{-}\left(h_k-h_{k-1}\right) \tag{3.13}$$

όπου η αρμονία υποδηλώνει ότι οι ιδιότητες του γειτονικού στρώματος χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν τα στοιχεία C^{+}_{k} ,ο κάθετος όρος μεταξύ του στρώματος k και k+1, και C^{-}_{k} ο κάθετος όρος μεταξύ του στρώματος k και k-1

$$C_{ij;k}^{\pm}=\iint_{\Omega}\frac{2}{\Delta z_k\left[\Delta z_{k\pm1}/\left(Kzz\right)_k+\Delta z_k/\left(Kzz\right)_{k\pm1}\right]}w_i w_j dxdy \tag{3.14}$$

όπου (Δz_k) είναι το πάχος του στρώματος k στο σημείο της προσέγγισης. Η αρμονία υποδηλώνει ότι δίδεται περισσότερη ρεαλιστική ποσότητα όταν αντιμετωπίζονται καταστάσεις με φυσική ετερογένεια. Με αντικατάσταση της εξίσωσης (3.13) στην (3.14) προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τυπικά στρώματα k :

$$A_k h_k + B_k\frac{\partial h_k}{\partial t}-\left[C_k^{+}\left(h_{k+1}-h_k\right)-C_k^{-}\left(h_k-h_{k-1}\right)\right]+f_k=0 \tag{3.15}$$

όπου το h_k αντικαθιστά τον παράγοντα h του υδραυλικού ύψους στο στρώμα k, k=1,2,.. ..M, και M ο αριθμός των στρωμάτων στην z κατεύθυνση. (Badu et al., 1997).

Η παράγωγος του χρόνου

Από εμπειρικούς λόγους έχει αποδειχθεί ότι μία ενδεχόμενη προσέγγιση διαφοράς κατευθυνόμενη προς τα πίσω με την παραγωγό του χρόνου εξασφαλίζει την πιο ακριβή λύση για προβλήματα υπόγειας ροής. Σύμφωνα μ' αυτή την προσέγγιση, ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται είναι για να προσεγγίσει την παράγωγο του χρόνου και τις χωρικές παραγώγους που δίνονται σε καινούργια επίπεδα χρόνου. Οπότε εφαρμόζοντας την παράγωγο του χρόνου στην (3.15) για κάθε στρώμα προκύπτει η παρακάτω εξίσωση όπου εξασφαλίζεται με ένα σύστημα M x N εξισώσεων με N αγνώστους από την (3.5) για κάθε M στρώματα.

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t}\left[h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t\right] - \\ -\left[C_k^+\left(h_{k+1} - h_k\right) - C_k^-\left(h_k - h_{k+1}\right)\right]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \qquad (3.16)$$

3.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το μοντέλο PTC προσαρμόζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Αυτοί οι τρεις τύποι είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένου υδραυλικού ύψους), του Neumann (καθορισμένης ροής) και οι συνθήκες τρίτου τύπου (της διαρροής). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να προσαρμοστούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και η προεπιλεγμένη συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδέν. Αυτό συνεπάγεται περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέραστο πυθμένα καθώς και αδιαπέραστα στρώματα γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

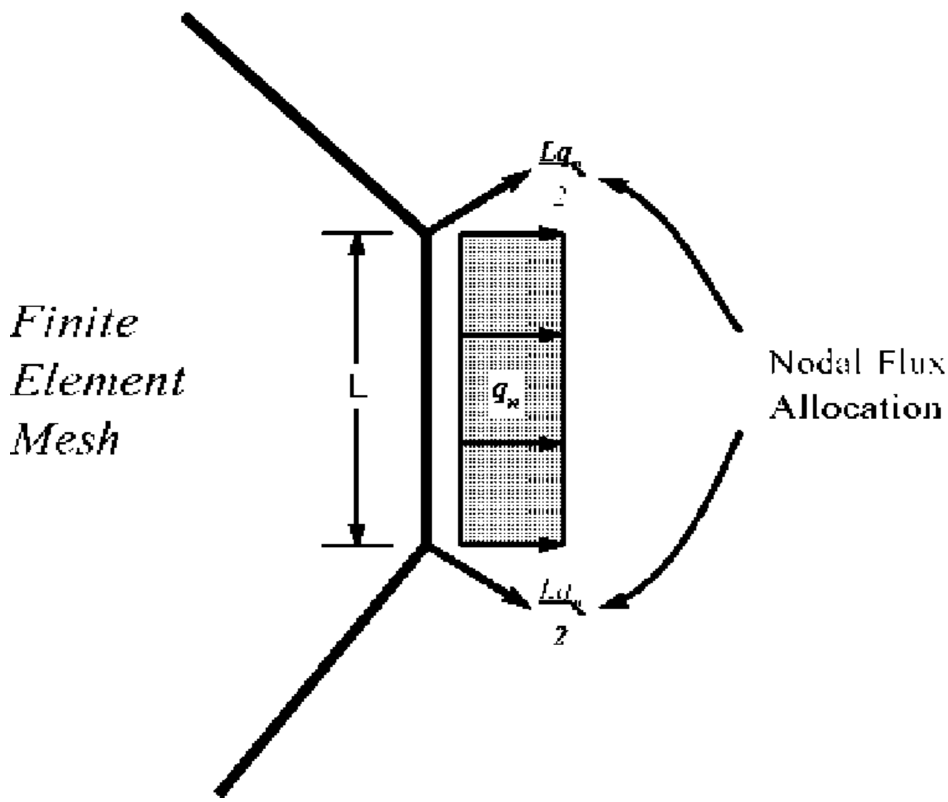
3.2.1 Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος

Τα όρια καθορισμένου ύψους καθορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους, ως σταθερούς όρους. Αφού οι κόμβοι που έχουν σταθερό υδραυλικό ύψος παραλείπονται από την μαθηματική εξίσωση του πίνακα, τότε απομένουν (N x M

- N_C) εξισώσεις με (N x M - N_C) αγνώστους, με N_C τον ολικό αριθμό των κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.

3.2.2 Καθορισμένη Ροή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένα οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου με μήκος L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Κομβική κατανομή της ροής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους Σ.Για γραμμικά στοιχεία, κάθε κόμβος έχει ισοδύναμη βαρύτητα. (Πηγή: D.K.Badu, G.F.Pinder, A.Niemi, D.P.Ahlfeld, S.A.Stothoff, 1997)

Έτσι ο χρήστης χρειάζεται μόνο να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται επίσης μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο. Για την διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης και αυτόματα κάνει ολοκλήρωση της περιοχής για να καθοριστεί η ογκομετρική ροή.

3.2.3 Τρίτου Τύπου

Στις οριακές συνθήκες τρίτου τύπου εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (leakage conductance) ο οποίος είναι η υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση και ολοκληρώνεται στην περιοχή για να αναπαραστήσει την κάθετη διαρροή. Με κατάλληλο ορισμό της παραμέτρου που δηλώνεται από το χρήστη, μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή.

3.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

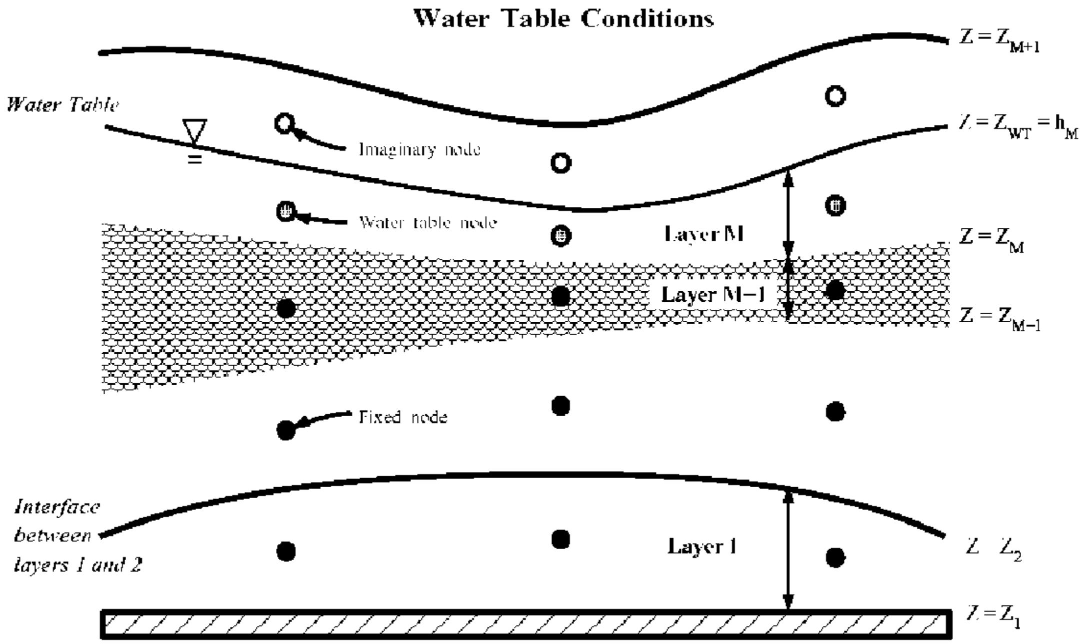
Οι οριακές συνθήκες που απαιτούνται σε έναν ελεύθερο υδροφορέα είναι δύο και εφαρμόζονται στο πάνω στρώμα του υδροφόρου ορίζοντα. Μια σχηματική αναπαράσταση που περιλαμβάνει την κίνηση αυτού και το μέγεθος της διείσδυσης R(x,y,t) παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.Το σταθερό υψόμετρο του πάνω ορίου στο πεδίο ορισμού της ροής δίδεται από $z = z_{M+1}(x, y, t)$ και το πραγματικό υψόμετρο της στάθμης του νερού από $z = z_{WT}(x, y, t)$.

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα στο ανώτερο στρώμα (h_M) καθορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος ($z_{WT} - z_M$). Σύμφωνα μ' αυτό για κάθε κόμβο απαιτείται :

$$(Z_{WT})_i=(h_M)_I \quad (3.17)$$

Επίσης υποτίθεται ότι το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται πάντα στην κορυφή του ανώτερου στρώματος (κ=Μ). Έτσι όταν το μοντέλο υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, κάνει έλεγχο και για το εάν οι τιμές του hM στους κόμβους βρίσκονται ανάμεσα από τις τιμές

$$z_M \le h_M \le z_{M+1} \quad (3.18)$$



Σχήμα 3.3: Ο υδροφόρος ορίζοντας και οι συνθήκες που επικρατούν στο πάνω όριο. Η επιφάνεια δηλώνεται με $z=z_1$, $z=z_2$ είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα. ***Προσοχή****: ο κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας $z = z_{WT}$ πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη $z_M \leq z_{WT} \leq z_{M+1}$*

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την προσωρινή ανταπόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διείσδυση. Ορίζοντας ως S_y το ενεργό πορώδες στη στάθμη του νερού, οι εξισώσεις ορίζονται ως:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \qquad (3.19)$$

3.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ

Η εξίσωση μεταφοράς είναι :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[D_{xx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{xz}\frac{\partial c}{\partial z}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[D_{yx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{yz}\frac{\partial c}{\partial z}\right]+$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[D_{zx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{zy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{zz}\frac{\partial c}{\partial z}\right]+Q\left(c^w-c\right)-$$
$$-\left(V_x\frac{\partial c}{\partial x}+V_y\frac{\partial c}{\partial y}+V_z\frac{\partial c}{\partial z}\right)-\theta\left[1+E(c)\right]\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)=0 \qquad (3.20)$$

οι όροι τις (3.20) ξεχωριστά καθορίζονται ως εξής (Burnett and Frind, 1987) :

$$D_{xx} = \left(a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2\right) / V + D_M$$

$$D_{yy} = \left(a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2\right) / V + D_M$$

$$D_{zz} = \left(a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2\right) / V + D_M$$

$$D_{yx} = D_{xy} = \left(a_L - a_T\right) V_x V_Y / V$$

$$D_{yz} = D_{zy} = \left(a_L - a_V\right) V_y V_z / V$$

$$D_{zx} = D_{xz} = \left(a_L - a_V\right) V_z V_x / V$$

και οι υπόλοιποι όροι:

D_M συντελεστής μοριακής διάχυσης, γενικά μικρός [L^2/T],

A_L, η κατά μήκος διασπορά [L],

a_T η οριζόντια εγκάρσια διασπορά [L],

a_v η κάθετη εγκάρσια διασπορά [L],

V το μέγεθος του συντελεστή της ταχύτητας [L/T] (v = $\sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2}$).

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

θ το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο),

E(c) η συνάρτηση που αναπαριστά τη χημική προσρόφηση,

Q η ισχύς της άντλησης [1/T] ($Q = Q_i\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)\delta(z - z_i)$),

Q_i ο ογκομετρικός ρυθμός φόρτωσης/ εκφόρτωσης [L^3/T] στο σημείο (x_i, y_i, z_i),

c^w η συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού στο σημείο (x_i, y_i, z_i),

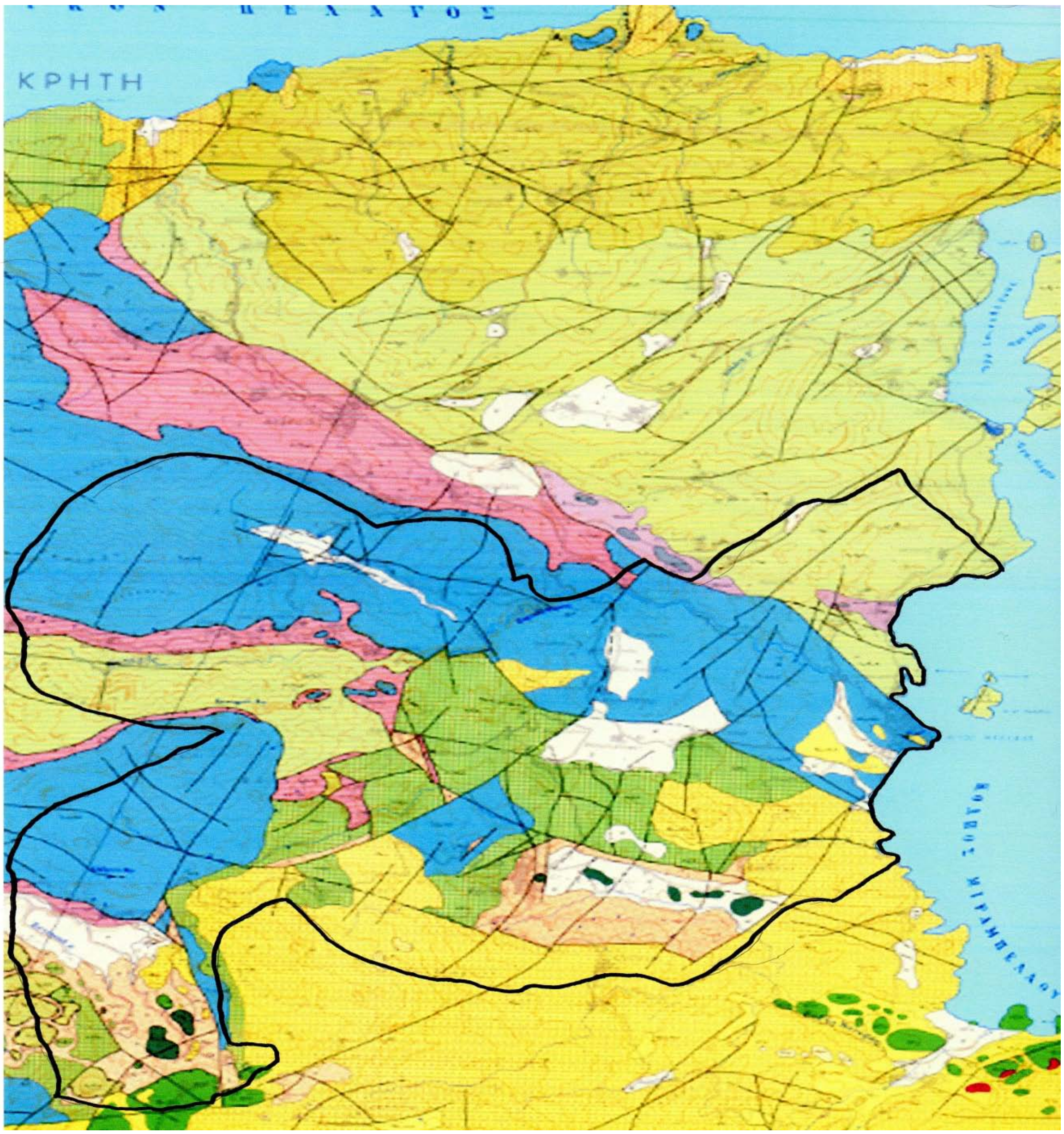
δ( ) η συνάρτηση Δέλτα

Για όλες τις περιπτώσεις άντλησης ($Q_i \leq 0$) γίνεται η υπόθεση ότι η συγκέντρωση του νερού c^w στο πηγάδι ισοδυναμεί με τη συγκέντρωση c του περιβάλλοντα χώρου. Έτσι σε όλα τα πηγάδια ο συντελεστής $Q(c^w - c)$ ισοδυναμεί με μηδέν και επομένως εξασφαλίζεται ο όρος Q στην εξίσωση (3.20) μόνο όταν το πηγάδι αντλεί ($Q_i>0$) τη διαλυμένη ύλη με συγκέντρωση cw που αναπαριστά τη συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού (D.K.Badu, G.F.Pinder, A.Niemi, D.P.Ahlfeld, S.A.Stothoff, 1997).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή μελέτης οριοθετείται από τη λεκάνη Κάτω Μυραμβέλλου Λασιθίου, μία λεκάνη η οποία καλύπτει τις ανάγκες σε νερό σχεδόν όλης της επαρχίας Μυραμβέλλου. Συγκεκριμένα η περιοχή φαίνεται στον χάρτη 4.1 :



Χάρτης 4.1: Περιοχή Κάτω Μυραμβέλλου Λασιθίου

4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

4.2.1 Η γεωλογική δομή της Κρήτης

Η Κρήτη είναι το μεγαλύτερο ελληνικό νησί. Έχει μήκος 250 km, εύρος 20 έως 50 km και έκταση πάνω από 8500 km^2. Τα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι και δολομίτες) καλύπτουν επιφάνεια 3500 km^2. Μέσα στα πετρώματα αυτά, που συχνά είναι καρστικοποιημένα, βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος των αποθεμάτων υπογείου νερού του νησιού.

Η γεωλογική δομή της Κρήτης χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη των επωθήσεων και την παρουσία ενός μεγάλου αριθμού ρηγμάτων και μπορεί να περιγραφεί σαν μια διάταξη τεσσάρων διαδοχικά επωθημένων τεκτονικών καλυμμάτων. Όλη αυτή η αλληλουχία είναι επωθημένη πάνω σε μια παρα-αυτόχθονη ενότητα. Η διάταξη αυτή είναι συνολικού πάχους περίπου 6,5 km και έχει ακολούθως τοπικά καλυφθεί από νεωγενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. (Ι.Γ.Μ.Ε., 2001a)

Η παρα-αυτόχθονη ενότητα της βάσης ονομάζεται Ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων ενώ η τεκτονικά υπερκείμενη αυτής αλληλουχία, αποτελείται από κάτω προς τα πάνω από την Φυλλιτική-Χαλαζιτική Σειρά, την Ενότητα της Τρίπολης , την Ενότητα της Πίνδου και την ενότητα των Οφιολίθων-Οφιολιθικού Melange.

Κάθε μια από τις ενότητες αυτές έχει διακεκριμένη λιθολογική δομή και τεκτονική σημασία που αντανακλά το συγκεκριμένο τεκτονικό περιβάλλον γένεσης της καθώς και τη μετέπειτα εξελικτική της πορεία.(Ο.ΑΝ.Α.Κ. – Ε.Μ.Π., 1994)

4.2.2 Η γεωλογική δομή της λεκάνης

Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης δομείται κύρια από μεγάλες ενότητες ανθρακικών πετρωμάτων όπως επίσης και από μάργες . κροκαλοπαγή, σχιστόλιθους, φλύσχη και λίγα ηφαιστειακά πετρώματα. Μεταξύ όλων αυτών των πετρωμάτων . τα ανθρακικά πετρώματα συνιστούν τον κύριο αποθηκευτικό χώρο των υπόγειων νερών της περιοχής αυτής και ανήκουν σε διαφορετικές ενότητες , η ηλικία των οποίων μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τη δομή των ταμιευτήρων και τις πιθανές σχέσεις τους. (Ι.Γ.Μ.Ε., 2001a)

Στην ευρύτερη περιοχή του Αγ. Νικολάου, λόγω της αλληλοεπικάλυψης αυτών των ενοτήτων, απαντώνται οι παρακάτω ενότητες από τα κάτω προς τα άνω:

1) ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ ΣΕΙΡΑ ΚΡΗΤΗΣ:

Α. Σχιστόλιθοι ανθρακικοί-χαλαζιτικοί. εμφανίζονται στην περιοχή Κατσίκια και αποτελούν τα στρώματα μετάβασης των «πλακωδών ασβεστόλιθων» στα υποκείμενα λευκά, μεσο-αδροκρυσταλικά μάρμαρα που αποτελούν το υπόβαθρο της περιοχής.

Β. Οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Στα κατώτερα μέλη τους εμφανίζονται παχυστρωματώδη, ενώ προς τα πάνω εξελίσσονται σε μέσο και στη συνέχεια σε λεπτοστρωματώδη. Κατά θέσεις τα ανώτερα μέλη των πλακωδών ασβεστόλιθων απουσιάζουν λόγω διάβρωσης ή τεκτονικών αιτιών και οι επικείμενες σειρές έρχονται απ'ευθείας σε επαφή με τα κατώτερα μέλη της σειράς.

2) ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗΣ-ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ:

Πάνω στους πλακώδεις ασβεστόλιθους επικάθονται οι σχηματισμοί της φυλλιτικής - χαλαζιτικής σειράς. Η σειρά των φυλλιτών-χαλαζιτών πολύ εκτεταμένη και έχει μεγάλο πάχος.

3) ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ:

Το κάλυμμα των εξωτερικών ζωνών χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός οφιολιθικού συμπλέγματος, που συνδέεται με πετρώματα διαφορετικού βαθμού μεταμόρφωσης και με γρανίτες, γρανοδιορίτες και ασβεστόλιθους. Το κάλυμμα αυτό περιορίζεται στις περιοχές Καθαρού και Κριτσάς.

Α. ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

Το κάλυμμα της Τρίπολης είναι επωθημένο πάνω στη σειρά των φυλλιτών-χαλαζιτών. Το σύνολο της ζώνης Τριπόλεως συνίσταται από ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες (Ανώτερο Τριαδικό - Ανώτερο Ιουρασικό), ασβεστόλιθοι (Κρητιδικό-Μέσο Ανώτερο Ηώκαινο) και φλύσχη (Ανώτερο Ηώκαινο-Ολιγόκαινο). Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν την πιο σημαντική δομική ενότητα της περιοχής. Γενικά, είτε είναι άστρωτοι, είτε παρουσιάζονται σε έντονα ρωγματωμένες στρώσεις μεγάλου πάχους. Το γεγονός ότι οι .σχηματισμοί της ζώνης Τριπόλεως είναι επωθημένοι στους φυλλίτες-χαλαζίτες αποτελεί σημαντικό σημείο για τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά αυτής της ενότητας, λόγω της αδιαπέρατης ασυνέχειας που δημιουργούν οι υποκείμενοι αυτοί σχηματισμοί.

Β. ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ - ΕΘΙΑΣ

Το κάλυμμα της ζώνης της Πίνδου εμφανίζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης. Συνίσταται από ασβεστόλιθους (Ανώτερο Κρητιδικό - Κατώτερο Ηώκαινο). Στην περιοχή της πηγής αλμυρού το κάλυμμα της ζώνης της Πίνδου, συνίσταται από ανθρακικά πετρώματα και σχετικά μικρή έκταση. Εμφανίζεται κυρίως στην νότια πλευρά του ορεινού όγκου της Δίκτης που συνιστά τεκτονικό ράκος.

4) ΑΛΛΟΧΘΟΝΕΣ ΣΕΙΡΕΣ - ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ

Με τον όρο «τεκτονικό κάλυμμα εσωτερικών ζωνών» εννοούμε την ανώτερη τεκτονική ενότητα αλπικών σχηματισμών, που συμμετέχει στη γεωλογική δομή της νήσου Κρήτης. Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης το τεκτονικό κάλυμμα εσωτερικών ζωνών εμφανίζεται με τη μορφή ασβεστόλιθων και οφιολίθων.

5) ΤΡΙΤΟΓΕΝΕΣ

(Ανώτερο Σερραβάλλιο - Κατώτερο Τορτόνιο) Σχηματισμός κλαστικών πετρωμάτων : καταλαμβάνει πολύ μεγάλη έκταση στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης.

6) ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

(Ολόκαινο) Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί συνίστανται από Κώνους κριμάτων, πλευρικά κορίματα και υλικά αναβαθμίδων χειμάρρων και από Αλουβιακές αποθέσεις. Η έκταση τους είναι περιορισμένη στα χαμηλά μέρη και στις πλευρές των κοιλάδων.

4.3 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Στην περιοχή της λεκάνης, παρατηρούνται διάφορα τεκτονικά φαινόμενα, πολλά από τα οποία, συμβάλλουν στα σημερινά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Τα φαινόμενα αυτά δημιούργησαν το έντονο ανάγλυφο που χαρακτηρίζει την ευρύτερη περιοχή (Ι.Γ.Μ.Ε., 2001a).

4.3.1 Τα τεκτονικά καλύμματα

Ο ορεινός όγκος της Δίκτης παρουσιάζει την βασική γεωλογική δομή της Κρήτης, δηλαδή την κάλυψη του υποβάθρου από τις διάφορες επωθημένες αλλόχθονες ενότητες που είναι γνωστές στην Κρήτη. Στην βάση των επωθημένων ενοτήτων, ιδιαίτερα στο κάλυμμα της Τρίπολης, αναπτύχθηκε μια ζώνη έντονου κατακερματισμού. Δυτικά του Αγίου Νικολάου δεν απαντώνται όλες οι ενότητες, επομένως το κάλυμμα των ασβεστόλιθων και δολομιτών της Τρίπολης δεν έχει καλυφθεί και έχει χωρισθεί πλήρως από το αυτόχθονο. Αντίθετα, προς τα ανατολικά, κοντά στον Άγιο Νικόλαο, βρίσκεται σε άμεση ρηγματική επαφή με τους πλακώδεις ασβεστόλιθους.

4.3.2 Οι πτυχές

Ολόκληρη η περιοχή χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη μεγάλων συγκλίνων και αντικλίνων με άξονες ΔΒΔ-ΑΝΑ (Καθαρό Τσίβι, οροπέδιο).

4.3.3 Τα ρήγματα

Υπάρχουν πολλά ρήγματα διαφορετικού μεγέθους και ηλικίας. Πρέπει να υπογραμμίσουμε την παρουσία μεγάλων ρηγμάτων, όπως αυτά που υπάρχουν στην περιοχή του όρους Δίκτη (δυτικά και νότια).

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε την ύπαρξη μιας πρόσφατης τεκτονικής που εκδηλώνεται με τεταρτογενή ρήγματα. Σε αυτά οφείλονται οι νέες συνθήκες υπόγειας ροής στους ασβεστόλιθους των παράκτιων περιοχών.

4.4 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η παρουσίαση της λιθολογίας της περιοχής έδειξε ότι οι ανθρακικοί σχηματισμοί αποτελούν τους πλέον σημαντικούς εν δυνάμει υδροφορείς. Πρέπει να προσθέσουμε σε αυτούς, τους επίσης υδροφόρους, κροκαλολατυποπαγείς σχηματισμούς του Μειόκαινου, νότια του Αγ. Νικολάου που καλύπτουν όλες τις άλλες ενότητες , ιδιαίτερα τον φλύσχη και τους ασβεστόλιθους της Τρίπολης.

Η γεωλογική δομή της περιοχής δείχνει ότι οι ανθρακικοί σχηματισμοί συνιστούν μια μεγάλη ενότητα που μπορούμε να θεωρούμε εκ των προτέρων ότι αποτελεί το κύριο περιφερειακό υδροφόρο σύστημα της. Η ενότητα αυτή είναι οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες του καλύμματος Τριπόλεως στο κέντρο, που συνιστά την υδρογεωλογική ενότητα του Αλμυρού Αγ. Νικολάου , ή ενότητα Δίκτης-Αλμυρού.

Επίσης, υπάρχουν στα νοτιο-δυτικά, μικρά υδροφόρα συστήματα μέσα στους ασβεστόλιθους της Πίνδου, που δημιουργούνται από την τεκτονική πολυπλοκότητα της περιοχής του ορεινού όγκου της Δίκτης. Στην πραγματικότητα είναι συνδεδεμένα με το ευρύτερο υδροφόρο σύστημα της πηγής Αλμυρού το οποίο τα αποστραγγίζει είτε μέσω επιφανειακών απορροών, είτε μέσω των μειοκαινικών κροκαλοπαγών. (Ι.Γ.Μ.Ε., 2001a)

4.4.1 Το πρόβλημα της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους υδροφορείς

Σε μια μελέτη του χημισμού των νερών των πηγών της Κρήτης, οι ΚΟΥΡΜΟΥΛΗΣ, ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΥ και TRIPPLER (1984) δείχνουν ότι:

- Όλες οι παράκτιες πηγές που αναβλύζουν σε υψόμετρο μικρότερο των 20 μέτρων , έχουν λίγο ή πολύ μολυνθεί από το νερό της θάλασσας.
- Η μόλυνση αυτή αποδεικνύεται καθαρά από τις σχέσεις μεταξύ της συνολικής περιεκτικότητας σε άλατα και των περιεκτικοτήτων σε Na, Cl και SO_4
- Όλες οι πηγές αυτές αποστραγγίζουν ανθρακικούς υδροφορείς.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την περιεκτικότητα σε Cl η μόλυνση αυτή εκτείνεται από 1 μέχρι 38% θαλασσινού νερού , ανάλογα με τις πηγές. Για τον Αλμυρό του Αγ. Νικολάου, το ποσοστό ανάμειξης βρίσκεται γύρω στο 12% .

4.4.2 Τα καρστικά φαινόμενα

Λόγω του όγκου των ασβεστολιθικών μαζών και της έκτασης τους, από τα μεγάλα υψόμετρα μέχρι τη θάλασσα, σημειώνονται πολυάριθμες εκδηλώσεις καρστικοποίησης. Σύμφωνα με τη γενική μορφολογία η καρστικοποίηση εκδηλώνεται με έντονο τρόπο και χαρακτηρίζεται από την παρουσία δολινών, πολγών και καρστικών έγκοιλων μεγάλων, μερικές φορές, διαστάσεων. Παρόλα αυτά, ενώ στους ασβεστόλιθους και δολομίτες της Τρίπολης , συνήθως παρατηρούνται επιφανειακές ποτάμιες ή χειμάρριες μορφές, στους πλακώδεις ασβεστόλιθους κυριαρχεί η επιφανειακή καρστική μορφολογία, με πολυάριθμα κλειστά βυθίσματα (δολίνες, πόλγες). Παρατηρείται καθαρή σχέση μεταξύ των γραμμικών διατάξεων των ρηγμάτων και των πολγών.

Από παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο της λεκάνης απορροής, συνάγεται ότι η ιστορία της καρστικής εξέλιξης αυτής της περιοχής είναι πολύ σύνθετη. Ξεκίνησε σε παλαιότερες εποχές και συνεχίζεται ακόμη και σήμερα. Η ύπαρξη κλειστών μορφών (δολίνες, πόλγες κ.α.) αποδεικνύει αυτή τη μακρά ιστορία. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί μια σημαντική διακοπή αυτής της καρστικής εξέλιξης με την εμφάνιση μιας ποτάμιας φάσης. Αυτή εκδηλώθηκε με απόθεση χαλικιών σημαντικού μεγέθους, που παρατηρείται στην περιοχή των Λακωνίων, σε ένα κώνο κορημάτων, περίπου ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου και πάχους μεγαλύτερου των δέκα μέτρων ο οποίος συνδέεται με την πόλγη. Είναι πιθανόν αυτή η φάση να συνδέεται με σημαντικές τεκτονικές κινήσεις.

Στην ενότητα της Δίκτης-Αλμυρού η κατάσταση έχει ως εξής: Στην περιοχή των Λακκωνίων, οι γεωτρήσεις επιβεβαιώνουν γενικά τα αποτελέσματα μιας καρστικοποίησης σε βάθος. Αντίθετα, στην περιοχή του Δράσι, από τις γεωτρήσεις διατρήθηκαν μόνο επιφανειακές καρστικές μορφές. Σε μεγαλύτερα βάθη, παρατηρήθηκαν πολυάριθμες κατακρημνίσεις τοιχωμάτων πριν από την σωλήνωση, μέσα στους κατακερματισμένους δολομίτες, χωρίς να συνδέεται το φαινόμενο με κάποια καρστικοποίηση. Τέλος τα λατυποκροκαλοπαγή του Μειόκαινου παρουσιάζουν μια επιφανειακή καρστικοποίηση.

4.4.3 Η πηγή Αλμυρού

Η πηγή του Αλμυρού παρουσιάζει χαρακτηριστικά καρστικής ανάβλυσης. Βρίσκεται στο νότιο-ανατολικό άκρο της ασβεστολιθικής σειράς της ενότητας Τρίπολης, πάνω σε ρήγμα στην επαφή του λατυποκροκαλοπαγούς Μειόκαινου και των ασβεστόλιθων. Ο Αλμυρός συνίσταται σε ένα μέτωπο εμφανίσεων που αναπτύσσεται σε μήκος 200 μέτρων παράλληλα προς την ακτή, 50 μέτρα από τη θάλασσα και σε υψόμετρο από 0,5 μέχρι 1 μέτρο. Η παροχή ποικίλλει από 1,5 m^3/s μέχρι 3 m^3/s. Η συγκέντρωση χλωριούχων κυμαίνεται από 600 mg/L έως 1300 mg/L.

Κατά τη διάρκεια του υδρολογικού κύκλου, δεν παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής και του χημισμού των νερών. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι το καρστικό σύστημα του Αλμυρού είναι σχετικά σταθερό.

Ανάλογα με την συγκέντρωση χλωριούχων, διακρίνονται τρεις τύποι νερών:

1) C_{Cl}<300 mg/L, - γλυκό νερό

2) 300 mg/L < C_{Cl} <10.000 mg/L - εφάλμυρο νερό

3) 10.000 mg/L < C_{Cl} - αλμυρό νερό

Το όριο χλωριόντων σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση για πόσιμο νερό είναι 150 mg/L, ενώ σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, είναι 200 mg/L.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η πηγή του Αλμυρού έχει υφάλμυρο νερό, το οποίο δεν είναι πόσιμο (Essink, 2001).

4.4.4 Το καρστ

Όσο αφορά το κάρστ, υπάρχουν πόλγες και μεγάλα βυθίσματα στην περιοχή Λακωνίων. Οι πόλγες αυτές συνδέονται αναμφισβήτητα με τη μείζονα τεκτονική δραστηριότητα στην περιοχή. Λόγω της πλήρωσης τους, δημιουργούν καθυστέρηση στη κατείσδυση. Εξάλλου, τουλάχιστον στο κεντρικό τμήμα των πολγών, οι πληρώσεις φτάνουν σε σημαντικά πάχη και βρίσκονται κάτω από τη στάθμη της κορεσμένης ζώνης. Προκύπτει ως εκ τούτου ότι οι πόλγες παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της υπόγειας ροής.

Οι πληρώσεις όλων των καρστικών βυθισμάτων συνίστανται από λεπτόκοκκα υλικά που καθιζάνουν. Η θέση των πολγών κατά μήκος των ρηγμάτων και το γεγονός ότι τα τελευταία έχουν επαναδραστηριοποιηθεί, είναι οι παράγοντες που ευθύνονται για την σημαντική συσσώρευση αυτών των ιζημάτων. Συνεπώς, οι αποθέσεις αυτές καθιστούν τα ρήγματα προστατευτικά της κορεσμένης ζώνης, ευνοώντας μια διάχυτη κατείσδυση που διατηρεί την ποιότητα του νερού. Στην περιοχή μεταξύ πολγών και πηγής, η συμπεριφορά της υπόγειας ροής είναι ριζικά διαφορετική από αυτήν που βρίσκεται ανάντη, στον τομέα του Δράσι.

Τα ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ, μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στις σχέσεις μεταξύ του υδροφορέα και της θάλασσας, δεδομένου ότι γενικά στις ζώνες που βρίσκονται στην επαφή τους, στις γεωτρήσεις παρατηρείται υψηλότερη αλατότητα. Αντίθετα, τα εγκάρσια, σε σχέση με τις υπόγειες ροές προς τη θάλασσα, ρήγματα θα μπορούσαν να εμποδίσουν τις σχέσεις μεταξύ του υδροφορέα και της θάλασσας. Αυτό δείχνει η διαχρονική απουσία μεταβολών της αλατότητας από το ένα τμήμα στο άλλο.

Τέλος, τα έντονα καρστικοποιημένα λατυποκροκαλοπαγή του Μειόκαινου κατέχουν, στα χαμηλότερα τμήματα τους , μια κορεσμένη ζώνη της οποίας το επίπεδο βάσης είναι ίδιο με το επίπεδο της θάλασσας. Έτσι σε ολόκληρο αυτό το τμήμα του συστήματος του Αλμυρού (νότιο-ανατολικά της πηγής), τα νερά του υδροφορέα επηρεάζονται από την διείσδυση της θάλασσας (Ι.Γ.Μ.Ε., 2001a)

4.5 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται οι κλιματολογικές συνθήκες, είναι:

1) Οι άνεμοι: δεν διαθέτουμε στοιχεία για την περιοχή μελέτης, γνωρίζουμε όμως ότι στην συγκεκριμένη περιοχή, αλλά και γενικότερα στην Κρήτη πνέουν ισχυροί άνεμοι όλων των κατευθύνσεων.

2) Η εξάτμιση: Στην περιοχή μελέτης, δεν υπάρχει εξατμισίμετρο. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται εξάτμιση μετρικά στοιχεία από το εξατμισίμετρο του Καλού Χωριού, το οποίο βρίσκεται κοντά στην λεκάνη απορροής.

Πίνακας 4.1: *Τιμές μηνιαίας εξάτμισης για τα έτη 1993-1997 στον σταθμό Καλού Χωριού*

ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΕΞΑΤΜΙΣΕΙΣ (mm)				
ΜΗΝΑΣ \ ΕΤΟΣ	*1993-1994*	*1994-1995*	*1995-1996*	*1996-1997*
ΣΕΠ	*136,9*	*188*	*163,3*	*148,2*
ΟΚΤ	*84*	*86,9*	*118,5*	*80,6*
ΝΟΕ	*65,7*	*66,8*	*58,7*	*49*
ΔΕΚ	*32,5*	*36,5*	*48,3*	*57*
ΙΑΝ	*36,7*	*47,1*	*34,2*	*40,2*
ΦΕΒ	*52*	*58,9*	*48,4*	*35,7*
ΜΑΡ	*67,6*	*76,4*	*46,7*	*68,2*
ΑΠΡ	*135,6*	*101*	*96,7*	*97,4*
ΜΑΙ	*190,5*	*186,2*	*150,3*	*165,7*
ΙΟΥΝ	*226,2*	*209,1*	*217,8*	*188,2*
ΙΟΥΛ	*257,2*	*259,4*	*266,3*	*245,3*
ΑΥΓ	*259,9*	*220,3*	*244,51*	*230,1*
ΣΥΝΟΛΟ	*1544,8*	*1536,6*	*1493,7*	*1405,6*

Πηγή: Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων, 1998

Από τον Πίνακα 4.1 παρατηρούμε ότι η μέγιστη εξάτμιση εμφανίζεται τους μήνες Ιούνιο έως Αύγουστο, ενώ η μικρότερη τους μήνες Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο.

3) Η ηλιοφάνεια: Γενικά στην Κρήτη, η ηλιοφάνεια είναι από τις μεγαλύτερες στην Ελλάδα. Από τον ηλιογράφο στο Καλό Χωριό, που βρίσκεται πολύ κοντά στην λεκάνη μελέτης., προκύπτουν τα ακόλουθα στοιχεία ηλιοφάνειας.

Πίνακας 4.2*: Τιμές μηνιαίας ηλιοφάνειας για τα έτη 1995-1997 στον σταθμό Καλού Χωριού*

ΜΗΝΙΑΙΑ ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ		
ΜΗΝΑΣ \ΕΤΟΣ	*1995-1996*	*1996-1997*
ΣΕΠ	*203,2*	*225,1*
ΟΚΤ	*217,2*	*188,5*
ΝΟΕ	*133*	*187,2*
ΔΕΚ	*90,4*	*125,35*
ΙΑΝ	*58*	*155,45*
ΦΕΒ	*117,5*	*145,2*
ΜΑΡ	*9235*	*170*
ΑΠΡ	*221,5*	*201,5*
ΜΑΙ	*318,25*	*335*
ΙΟΥΝ	*349,35*	*317,2*
ΙΟΥΛ	*385,4*	*343,45*
ΑΥΓ	*211,45*	*329,05*
ΣΥΝΟΛΟ	*2397,6*	*2723*

Πηγή: Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων, 1998

Από τον Πίνακα 4.2 παρατηρούμε ότι η μέγιστη ηλιοφάνεια εμφανίζεται τον Ιούλιο, ενώ η μικρότερη τον Δεκέμβριο.

4) Η θερμοκρασία : Από τον θερμομετρικό σταθμό στο Καλό Χωριό, που βρίσκεται πολύ κοντά στην λεκάνη μελέτης, προκύπτουν τα στοιχεία που δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Υ.Ε.Β.).

Πίνακας 4.3: *Τιμές μηνιαίας θερμοκρασίας για τα έτη 1993-1997 στον σταθμό Καλού Χωριού*

ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ °C				
ΜΗΝΑΣ \ ΕΤΟΣ	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
ΣΕΠ	24,2	25	23	23,3
ΟΚΤ	21,5	21,6	18,5	17,7
ΝΟΕ	17,4	16,1	13,6	15,3
ΔΕΚ	14,5	12	13,1	14,6
ΙΑΝ	13,3	12,3	10,6	13,2
ΦΕΒ	12,8	13,3	11,3	11,4
ΜΑΡ	14	14,8	11,1	12,8
ΑΠΡ	18,2	15,4	13,8	13
ΜΑΙ	21,1	20	19,7	19,8
ΙΟΥΝ	23,9	25	23,4	24,2
ΙΟΥΛ	26,9	26,7	26,2	26,5
ΑΥΓ	27,9	25,9	25,9	25,7

Πηγή: Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων, 1998

Από τον Πίνακα 4.3 παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται τους μήνες Ιούλιο- Αύγουστο, ενώ η μικρότερη τους μήνες Δεκέμβριο-Ιανουάριο.

5) Η υγρασία : Γενικά στην Κρήτη, η υγρασία γενικά υπερβαίνει το 50%.

6) Η βροχή : Τα στοιχεία της βροχόπτωσης που επεξεργάστηκαν, ελήφθησαν από τους βροχομετρικούς σταθμούς του Ι.Γ.Μ.Ε. σης περιοχές Τάπες, Καθαρό, Αγ.Κωνσταντίνος, Κριτσά, Αγ .Νικόλαος, Λακκώνια και Ποταμοί. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4.4: *Βροχομετρικοί σταθμοί εντός της λεκάνης, υψόμετρα σταθμών (m) και ετήσια ύψη βροχής*

	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	Μ.Ο.
ΤΑΠΕΣ	540	922	780	601	809	398	562	**678,67**
ΚΑΘΑΡΟ	1.200	724	1.048	770	909	626	613	**781,67**
ΑΓ.ΚΩΝ/ΝΟΣ	350	918	671	696	820	557	547	**701,50**
ΚΡΙΤΣΑ	580	884	852	650	710	446	563	**684,17**
ΠΟΤΑΜΟΙ	880	1.309	997	1.559	982	823	839	**1.084,83**
ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	50	611	502	455	444	368	309	**447,83**
ΛΑΚΚΩΝΙΑ	100	627	543	660	625	485	417	**559,50**
ΣΥΝΟΛΟ		**5.995**	**5.393**	**5.391**	**5.299**	**3.701**	**3.850**	**4.938**

Πηγή: Ι.Γ.Μ.Ε., 2001b; Ι.Γ.Μ.Ε., 2001c

Από τον Πίνακα 4.4 παρατηρούμε ότι η μέγιστη βροχόπτωση εμφανίζεται στους σταθμούς των Ποταμών και του Καθαρού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΕΝΑΡΙΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μοντέλο PTC χρειάζεται γεωλογικά και υδρολογικά 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 ενώ έχει επίσης την δυνατότητα να υπολογίσει και τη συγκέντρωση μιας συντηρητικής ουσίας η οποία διακινείται μέσα στο υπόγειο νερό.

5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Αρχικά ψηφιοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης Κάτω Μυραμβέλλου Λασιθίου και σχεδιάστηκαν οι θέσεις των γεωτρήσεων που βρίσκονταν μέσα στη μελετούμενη λεκάνη και για τις οποίες είχαμε στοιχεία. Για λόγους καλύτερης μοντελοποίησης όσα πηγάδια βρίσκονταν συγκεντρωμένα σε πολύ κοντινές αποστάσεις ομαδοποιήθηκαν, προς αποφυγήν υπερβολικής πύκνωσης του κανάβου, και εισήχθησαν στο μοντέλο αθροιστικά οι ρυθμοί άντλησης. Συγκεκριμένα, τα πηγάδια με τα υψόμετρα στα οποία βρίσκονται και τα μέσα υδραυλικά τους ύψη κατά την περίοδο ’96-’99 για την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1*: Μέσα υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων*

Γεώτρηση	Υψόμετρο(m)	Μέσα Υδραυλικά Ύψη (m)	
		Χειμερινή περίοδος	Καλοκαιρινή Περίοδος
DF3	400	216	216
F7	550	290	290
F72	340	197	193
F16	570	410	392
DF36	510	384	348
D45	20	17	16
T67	50	21	20

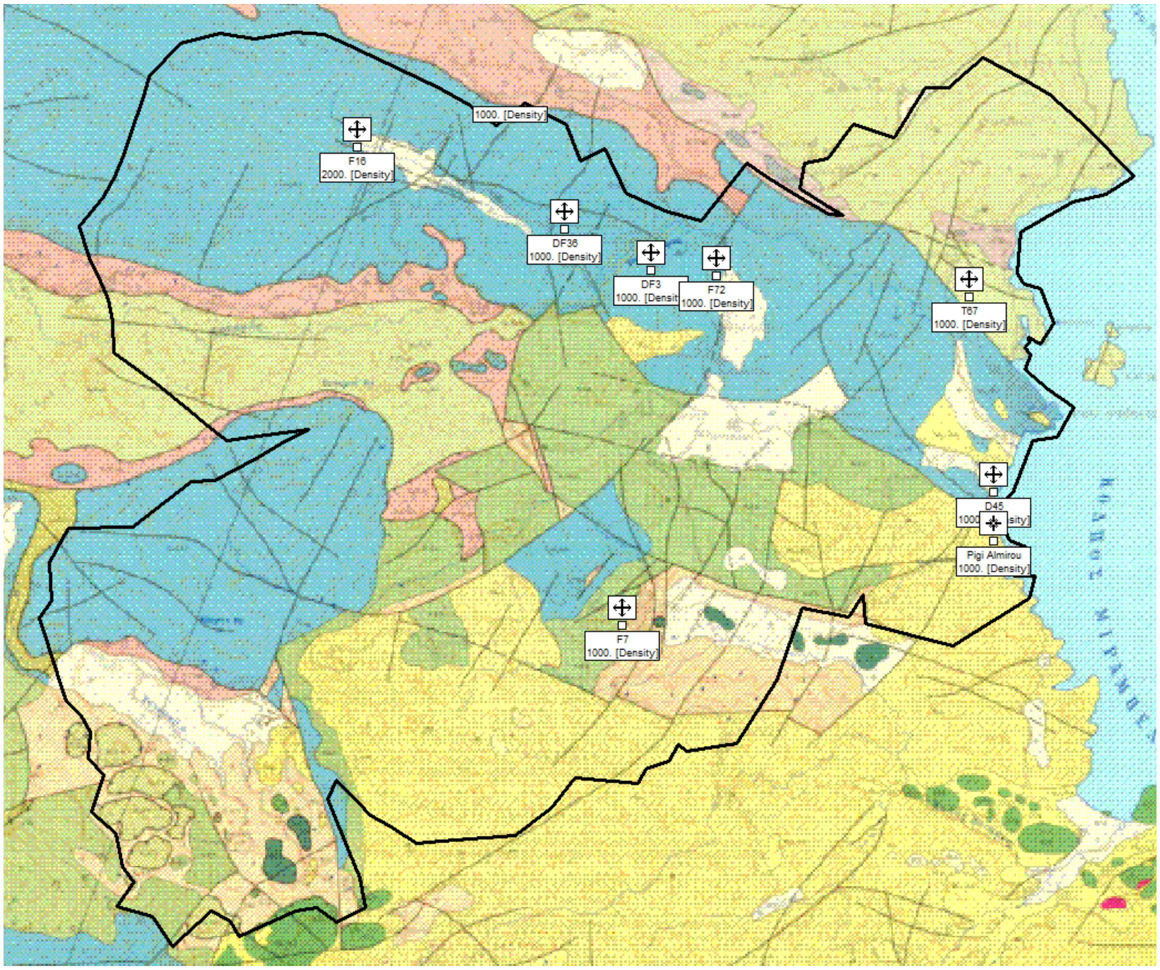
Επίσης ο υπόγειος υδροφορέας επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό και από την πηγή Αλμυρού, η οποία βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης και για την οποία εισήχθησαν στο μοντέλο τα στοιχεία για κάθε περίοδο προσομοίωσης που φαίνονται στον Πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2*: Παροχή στην πηγή Αλμυρού για κάθε περιόδο προσομοίωσης*

Πηγή Αλμυρού		
‘96-‘99	Παροχή (m^3/sec)	Παροχή (m^3/d)
Απρίλιος	2,75	237.600
Μάιος	3,03	261.792
Ιούνιος	2,5	216.000
Ιούλιος	2,23	192.672
Αύγουστος	1,96	169.344
Σεπτέμβριος	2,02	174.528
Οκτώβριος	2,08	179.712
Νοέμβριος	2,18	188.352
Δεκέμβρης	2,23	192.672
Ιανουάριος	2,21	190.944
Φεβρουάριος	1,88	162.432

Πηγή Αλμυρού		
'96-'99	**Παροχή (m^3/sec)**	**Παροχή (m^3/d)**
Μάρτιος	2,63	227.232
Απρίλιος	2,82	243.648
Μάιος	3,28	283.392
Ιούνιος	2,69	232.416
Ιούλιος	2,47	213.408
Αύγουστος	2,27	196.128
Σεπτέμβριος	2,17	187.488
Οκτώβριος	2,16	186.624
Νοέμβριος	2,08	179.712
Δεκέμβρης	1,99	171.936
Ιανουάριος	2,13	184.032
Φεβρουάριος	2,18	188.352
Μάρτιος	2,31	199.584
Απρίλιος	3,37	291.168
Μάιος	3,19	275.616
Ιούνιος	2,83	244.512
Ιούλιος	2,68	231.552
Αύγουστος	2,42	209088
Σεπτέμβριος	2,42	209088
Οκτώβριος	2,39	206496
Νοέμβριος	2,08	179712
Δεκέμβρης	2,21	190944
Ιανουάριος	2,55	220320
Φεβρουάριος	2,78	240192
Μάρτιος	2,73	235872

Η εισαγωγή των στοιχείων των γεωτρήσεων και της πηγής Αλμυρού στον υδρολογικό χάρτη της περιοχής παρουσιάζονται στον Χάρτη 5.1:



Χάρτης 5.1: Οι γεωτρήσεις στην περιοχή μελέτης

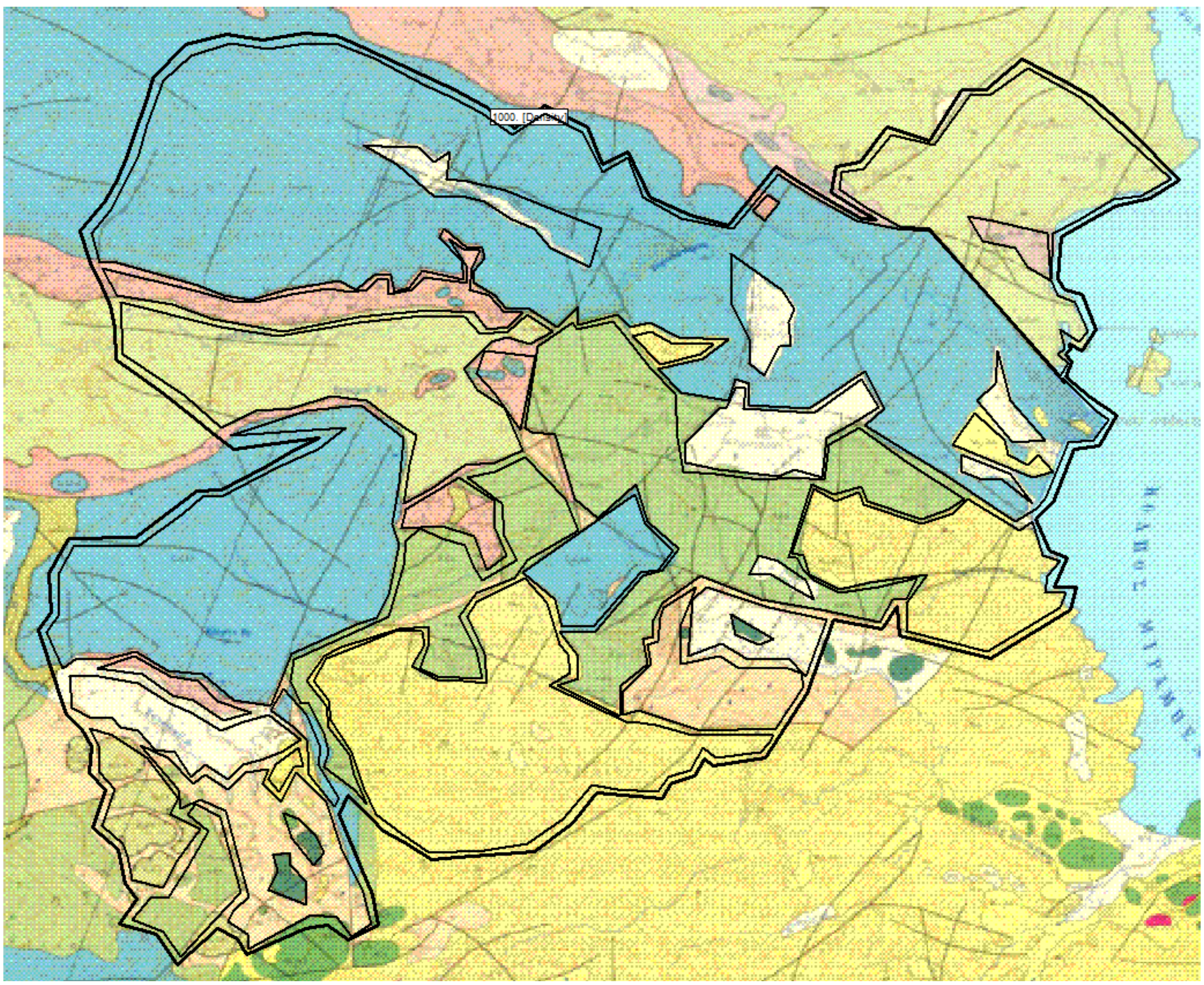
5.2.1 Υδραυλική Αγωγιμότητα

Τα πετρώματα που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης είναι κυρίως δολομίτες, οι οποίοι χρωματίζονται με μπλε στον γεωλογικό χάρτη, λατύπες ανθρακικής σύνθεσης, οι οποίοι χρωματίζονται με κίτρινο και λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, οι οποίοι χρωματίζονται με πράσινο ανοιχτό. Στην περιοχή παρατηρούμε ότι τα πετρώματα εναλλάσονται και υπάρχουν ακόμα φακοί από σχιστόλιθους, οι οποίοι χρωματίζονται με καφέ και ροζ, μάργες-οφιόλιθοι, οι οποίοι χρωματίζονται με πράσινο σκούρο και αργίλου, ο οποίος χρωματίζεται με άσπρο. Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τα πετρώματα αυτά, όπως βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία, φαίνονται στον Πίνακα 5.3:

Πίνακας 5.3*: Υδραυλικές αγωγιμότητες πετρωμάτων*

Τύποι Πετρωμάτων	**Υδραυλική Αγωγιμότητα (m / d)**
Ασβεστόλιθοι-Δολομίτες	0,5184
Σχιχτόλιθοι	0,0001728
Λατύπες ανθρακικής Σύνθεσης	173,2
Μάργες-Οφιόλιθοι	0,15
Άργιλος	0,6048
Λατυποπαγείς Ασβεστόλιθοι	5,2

Οι φακοί για τις υδραυλικές αγωγιμότητες παρουσιάζονται στον χάρτη 5.2 :



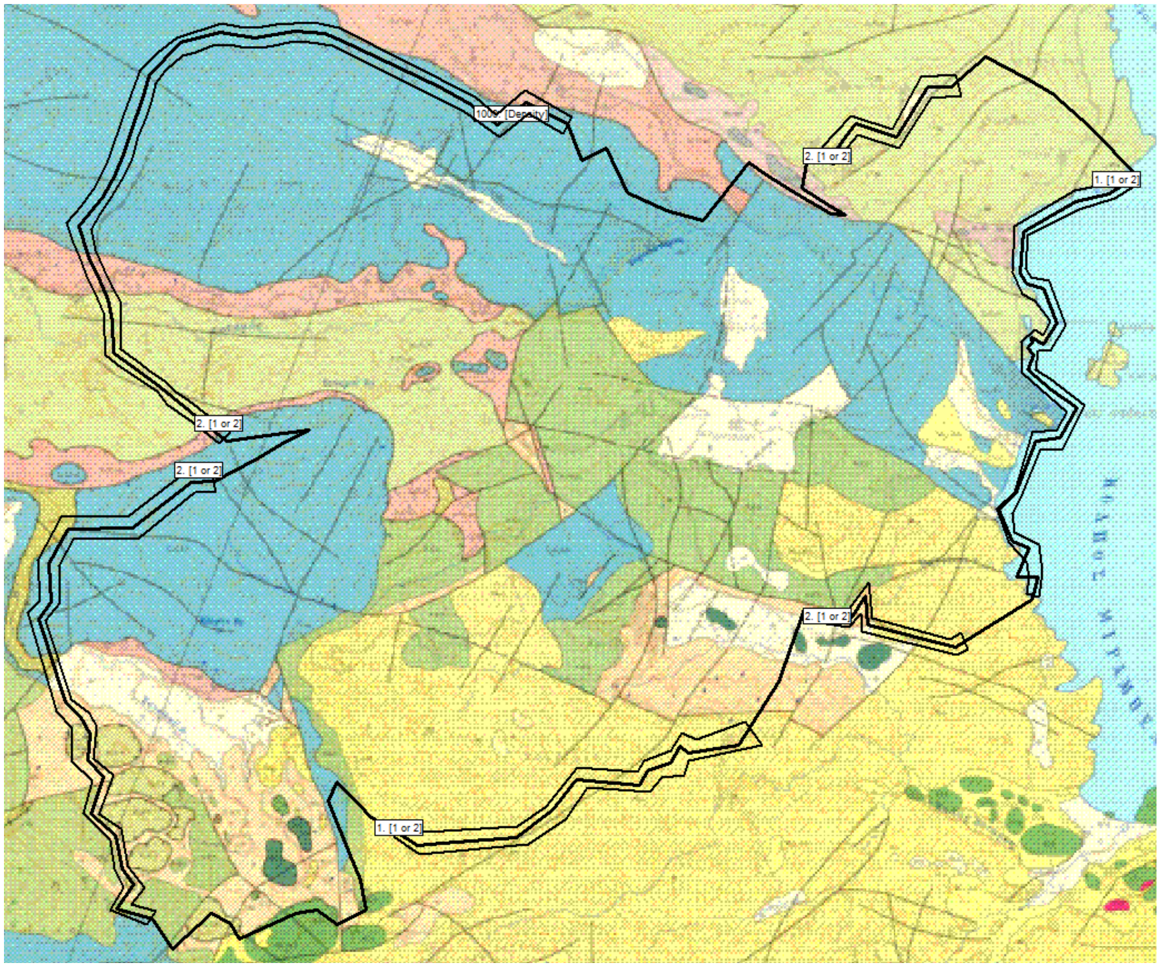
Χάρτης 5.2: Φακοί υδραυλικής αγωγιμότητας

5.2.2 Οριακές συνθήκες

Στον υδρογεωλογικό χάρτη 5.3 παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο. Οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους έχουμε κατά μήκος της ακτής όπου το υδραυλικό ύψος είναι ίσο με 100 όσο δηλαδή είναι και το ύψος της θάλασσας σε εκείνο το σημείο. Επίσης, λαμβάνει χώρα εισροή νερού από τον υπόγειο υδροφορέα προς την περιοχή μελέτης, γι' αυτό στα πετρώματα αυτά έχουν εισαχθεί οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους με σταθερές τιμές ανά μονάδα χρόνου. Στα δυτικά της περιοχής μελέτης,λόγω του μεγάλου υψομέτρου, οι τιμές της εισροής ύδατος είναι σαφώς αυξημένες. Οι τιμές αυτές έχουν προσαρμοστεί ανάλογα τη χρονική περίοδο καθώς το χειμώνα αναμένεται μεγαλύτερη εισροή νερού (λιώσιμο των χιονιών από τα βουνά, μεγαλύτερη βροχόπτωση, μικρότερες τιμές άντλησης), ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες έχουν μειωθεί αυτές οι τιμές κατά 20 - 50 %.

Οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους αποτελούν και τα πηγάδια άντλησης της περιοχής, μόνο που οι παροχές άντλησης έχουν προσαρμοστεί ανάλογα με την περίοδο προσομοίωσης. Ο χρόνος προσομοίωσης έχει χωριστεί σε δυο περιόδους, την χειμερινή και την καλοκαιρινή, για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η περιοχή είναι αποκλειστικά τουριστική με αποτέλεσμα οι κάτοικοι το καλοκαίρι να υπερδιπλασιάζονται όποτε και οι ανάγκες για νερό είναι πολύ μεγαλύτερες. Το χειμώνα όμως οι ανάγκες σε νερό είναι πολύ λιγότερες γι' αυτό και οι παροχές άντλησης έχουν μειωθεί στο 20% από αυτή που είναι την καλοκαιρινή περίοδο, πράγμα που αντιπροσωπεύει την πραγματική κατάσταση.

Η εισαγωγή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο παρουσιάζεται στο χάρτη 5.3:



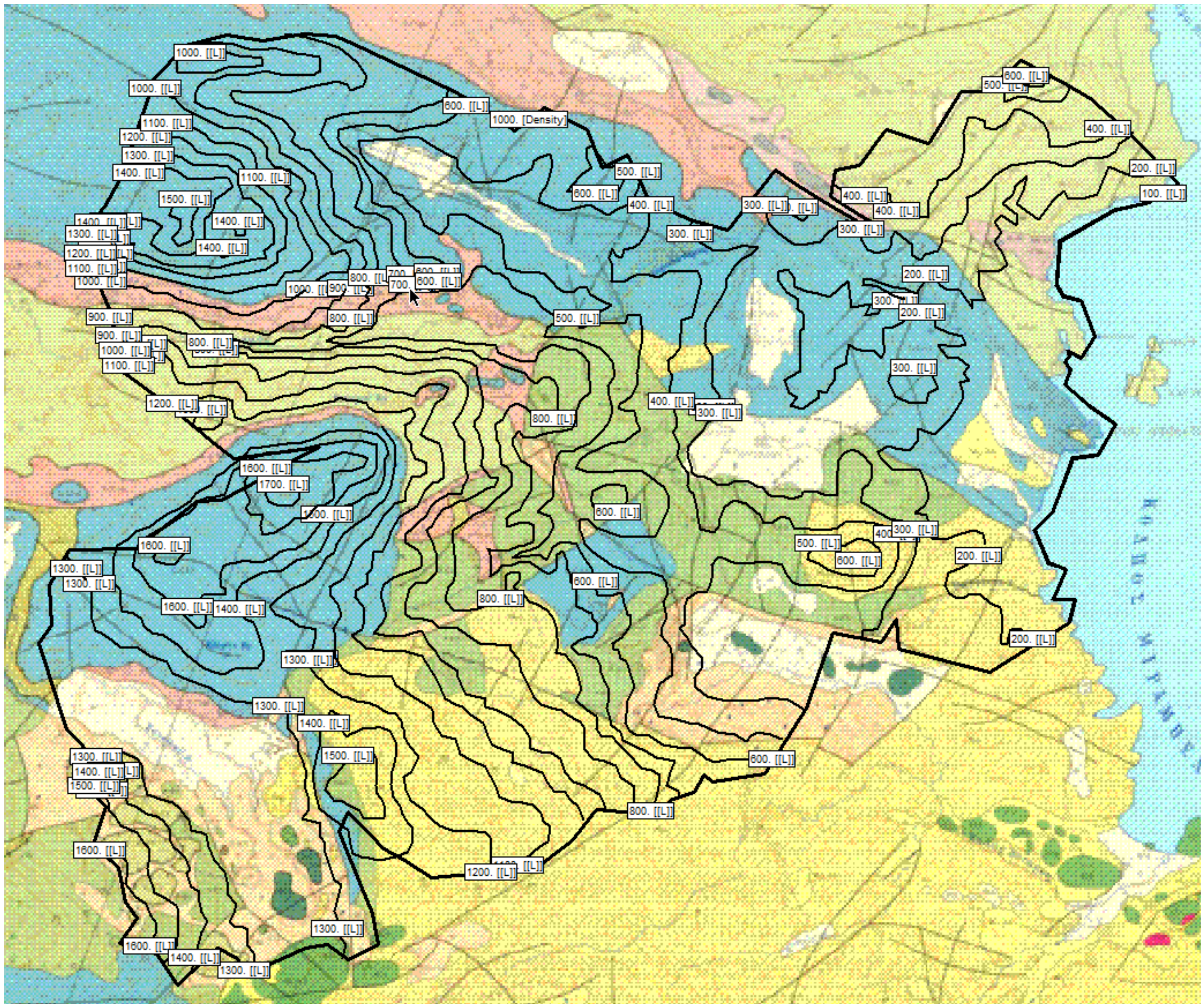
Χάρτης 5.3: Οριακές συνθήκες 1ου και 2ου είδους

5.2.3 Υψόμετρο

Από τον υδρολογικό χάρτη σχεδιάστηκαν και εισήχθησαν στο μοντέλο οι ισοϋψείς της περιοχής και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της παρεμβολής, (interpolation method) για να μπορέσει το μοντέλο να κάνει μια όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση του ανάγλυφου της περιοχής. Στα απόλυτα υψόμετρα της περιοχής προστέθηκαν 100 μέτρα επειδή το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Το μοντέλο για να προσομοιώσει τη περιοχή και να δώσει μια κατάσταση του υδροφορέα χρειάζεται και κάποιες αρχικές συνθήκες όπως το αρχικό υδραυλικό ύψος. Η τιμή αυτή δόθηκε στα 100 μέτρα.

Η εισαγωγή των ισοϋψών στο μοντέλο παρουσιάζονται στο χάρτη 5.4:



Χάρτης 5.4: Οι ισοϋψείς στην περιοχή μελέτης

5.2.4 Βροχόπτωση

Τα στοιχεία για τη βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης προέρχονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται στις Τάπες (υψόμετρο: 540 m), στο Καθαρό (υψόμετρο: 1200 m), στον Άγιο Κωνσταντίνο (υψόμετρο: 350 m),στην Κριτσά (υψόμετρο: 580 m), στα Λακώνια (υψόμετρο: 100 m) και στον Άγιο Νικόλαο (υψόμετρο: 50 m).

Αναλυτικά οι τιμές για τους μετεωρολογικούς σταθμούς φαίνονται στον πίνακα 5.4 που ακολουθεί:

Πίνακας 5.4: *Βροχόπτωση στον μετεωρολογικό σταθμό Ταπών*

Σταθμός Ταπών	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
Απρίλιος	0	148,8	0
Μάιος	0	0	0
Ιούνιος	0	0	0
Ιούλιος	0	0	0
Αύγουστος	0	0	0
Σεπτέμβριος	0	0	0
Μ.Ο.	**0**	**24,8**	**0**
Οκτώβριος	26,5	64,8	0
Νοέμβριος	60	192	0
Δεκέμβρης	118,8	141,6	120
Ιανουάριος	97	79,2	0
Φεβρουάριος	64,8	48	165,6
Μάρτιος	182,4	283,5	0
Μ.Ο.	**91,58**	**134,85**	**47,60**

Πίνακας 5.5: *Βροχόπτωση στον μετεωρολογικό σταθμό Καθαρού*

Σταθμός Καθαρού	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
Απρίλιος	0	88,8	0
Μάιος	0	0	0
Ιούνιος	0	12	0
Ιούλιος	0	0	0
Αύγουστος	0	0	0
Σεπτέμβριος	0	0	0
Μ.Ο.	**0**	**16,8**	**0**
Οκτώβριος	27,5	103,2	0
Νοέμβριος	84	146,4	0
Δεκέμβρης	165,6	187,2	76,7

Σταθμός Καθαρού	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
Ιανουάριος	88,8	52,8	0
Φεβρουάριος	111,6	52,8	254,4
Μάρτιος	204	367,2	50,4
Μ.Ο.	**113,58**	**151,60**	**63,58**

Πίνακας 5.6: *Βροχόπτωση στον μετεωρολογικό σταθμό Αγ.Κωνσταντίνου*

Σταθμός Αγ.Κων/νου	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
Απρίλιος	0	117,6	0
Μάιος	0	62,4	0
Ιούνιος	0	0	0
Ιούλιος	0	0	0
Αύγουστος	0	0	0
Σεπτέμβριος	0	0	0
Μ.Ο.	**0**	**30**	**0**
Οκτώβριος	38,5	120,9	0
Νοέμβριος	54	170,4	0
Δεκέμβρης	1032	132	283,2
Ιανουάριος	38,4	109,2	129,6
Φεβρουάριος	138	36	0
Μάρτιος	144	252	112,8
Μ.Ο.	**240,82**	**136,75**	**87,60**

Πίνακας 5.7: *Βροχόπτωση στον μετεωρολογικό σταθμό Κριτσάς*

Σταθμός Κριτσάς	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
Απρίλιος	0	69,6	0
Μάιος	0	7,2	0
Ιούνιος	0	0	0

Σταθμός Κριτσάς	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
Ιούλιος	0	0	0
Αύγουστος	0	0	0
Σεπτέμβριος	0	0	0
Μ.Ο.	**0**	**12,8**	**0**
Οκτώβριος	55	103	0
Νοέμβριος	65	141,6	0
Δεκέμβρης	115,2	127,2	201
Ιανουάριος	57,6	43,2	0
Φεβρουάριος	144	38,4	160,8
Μάρτιος	136,8	254,8	24
Μ.Ο.	**95,60**	**118,03**	**64,30**

Πίνακας 5.8: *Βροχόπτωση στον μετεωρολογικό σταθμό Αγ.Νικολάου*

Σταθμός Αγ.Νικολάου	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
	455	444	366
Μ.Ο. Καλοκαίρι	**0**	**7,4**	**0**
Μ.Ο. Χειμώνας	**75,83**	**66,60**	**61,00**

Πίνακας 5.9: *Βροχόπτωση στον μετεωρολογικό σταθμό Λακκωνίων*

Σταθμός Λακκωνίων	**mm Βροχής**		
	1996-1997	**1997-1998**	**1998-1999**
	660	625	485
Μ.Ο. Καλοκαίρι	**0**	**10,41**	**0**
Μ.Ο.Χειμώνας	**110,00**	**93,75**	**80,83**

Για τη σωστή προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης στην περιοχή μελέτης, οι τιμές των παραπάνω στοιχείων που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν οι μέσοι όροι ανά περίοδο και μειώθηκαν στο 20%, το οποίο αντιπροσωπεύει το ποσοστό του μέσου όγκου της βροχόπτωσης που διηθείται στο έδαφος. Επίσης, η αλλαγή μονάδων σε m είναι απαραίτητη για εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Έτσι, προκύπτουν οι πίνακες 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 και 5.15 :

Πίνακας 5.10*: Ποσοστό διηθούμενου όγκου βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Ταπών*

Σταθμός Ταπών	**20% διήθηση (mm)**	**20% διήθηση (m)**
0	0	0
91,58	18,316	0,018316
24,8	4,96	0,00496
134,85	26,97	0,02697
0	0	0
47,6	9,52	0,00952

Πίνακας 5.11*: Ποσοστό διηθούμενου όγκου βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Καθαρού*

Σταθμός Καθαρού	**20% διήθηση (mm)**	**20% διήθηση (m)**
0	0	0
113,58	22,716	0,022716
16,8	3,36	0,00336
151,6	30,32	0,03032
0	0	0
63,58	12,716	0,012716

Πίνακας 5.12*: Ποσοστό διηθούμενου όγκου βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Αγ.Κωνσταντίνου*

Σταθμός Αγ.Κων/νου	**20% διήθηση (mm)**	**20% διήθηση (m)**
0	0	0
240,81	48,162	0,048162
30	6	0,006
136,75	27,35	0,02735
0	0	0
87,6	17,52	0,01752

Πίνακας 5.13*: Ποσοστό διηθούμενου όγκου βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Κριτσάς*

Σταθμός Κριτσάς	20% διήθηση (mm)	20% διήθηση (m)
0	0	0
95,6	19,12	0,01912
12,8	2,56	0,00256
118	23,6	0,0236
0	0	0
64,3	12,86	0,01286

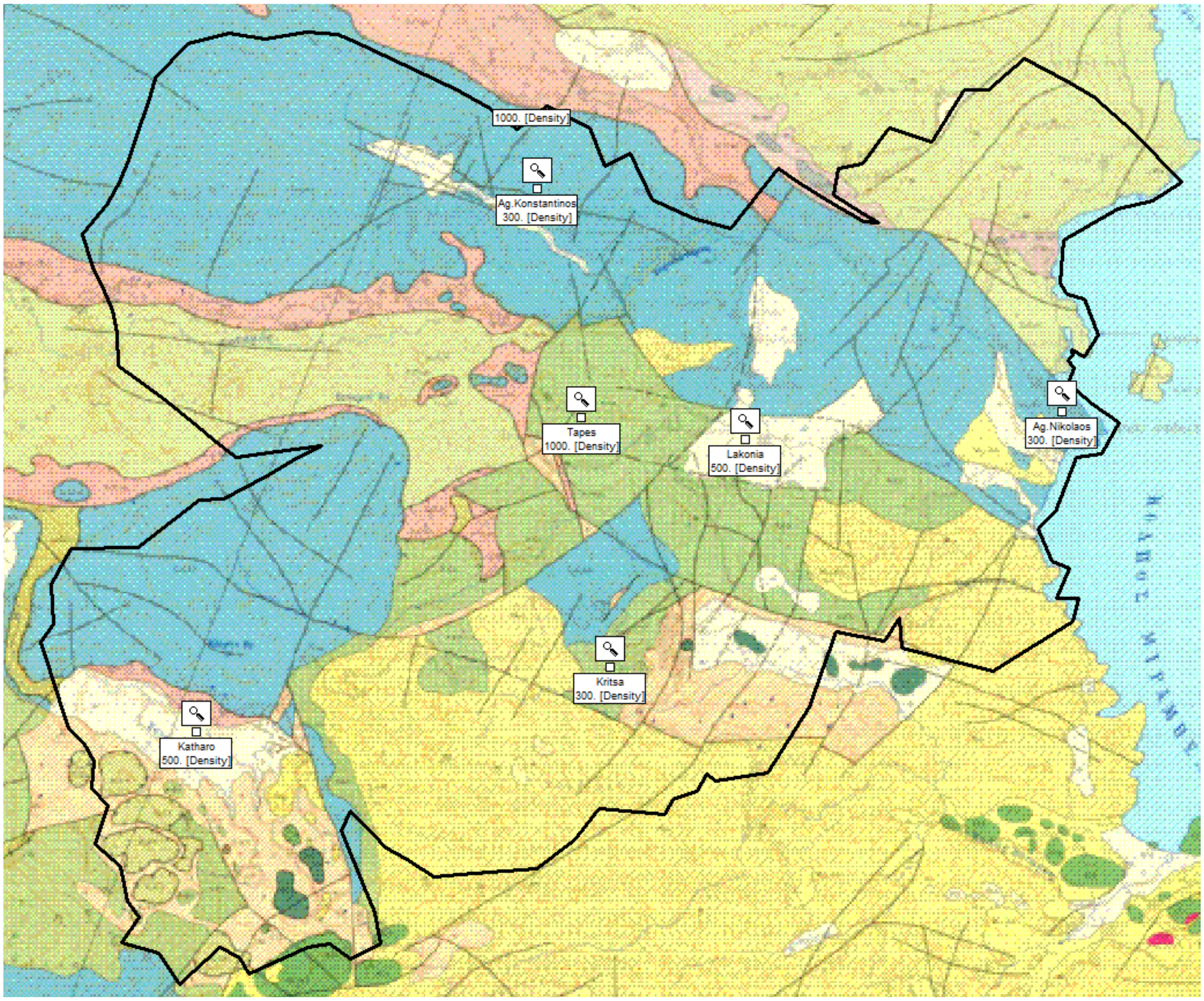
Πίνακας 5.14*: Ποσοστό διηθούμενου όγκου βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Αγ.Νικολάου*

Σταθμός Αγ.Νικολάου	20% διήθηση (mm)	20% διήθηση (m)
0	0	0
75,833	15,1666	0,0151666
7,4	1,48	0,00148
66,6	13,32	0,01332
0	0	0
61	12,2	0,0122

Πίνακας 5.15*: Ποσοστό διηθούμενου όγκου βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Λακκωνίων*

Σταθμός Λακκωνίων	20% διήθηση (mm)	20% διήθηση (m)
0	0	0
110	22	0,022
10,41	2,082	0,002082
93,75	18,75	0,01875
0	0	0
80	16	0,016

Η ακριβής θέση του κάθε μετεωρολογικού σταθμού στην περιοχή φαίνεται στο χάρτη 5.5 :



Χάρτης 5.5: Οι μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή μελέτης

5.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των στοιχείων στο μοντέλο, είναι απαραίτητη να γίνει η βαθμονόμηση του, πριν γίνει οποιοδήποτε σενάριο και προκύψουν λανθασμένα συμπεράσματα. Η βαθμονόμηση ήταν μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία καθώς οι επιθυμητές στάθμες των πηγαδιών ήταν δύσκολο να επιτευχθούν. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο πραγματικός αριθμός των πηγαδιών στην περιοχή μελέτης είναι πολύ μεγαλύτερος και γενικότερα οφείλεται στην έλλειψη στοιχείων με μεγάλη ακρίβεια.

Ο χρόνος προσομοίωσης έχει χωριστεί σε δυο περιόδους(την χειμερινή και την καλοκαιρινή). Ο υδροφορέας της περιοχής χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα ,με τις δεδομένες συνθήκες που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο, για να φτάσει σε σταθερές συνθήκες (steady states). Αυτός ο χρόνος έχει υπολογιστεί ότι είναι 3 χρόνια. Γι' αυτό και τα σενάρια που ακολουθούν έχουν ως βάση τους τα 3 χρόνια, δηλαδή τον ίδιο χρόνο προσομοίωσης με την αρχικήκαι τα αξιολογήσιμα αποτελέσματα είναι αυτά των δύο τελευταίων περιόδων σε κάθε περίπτωση.

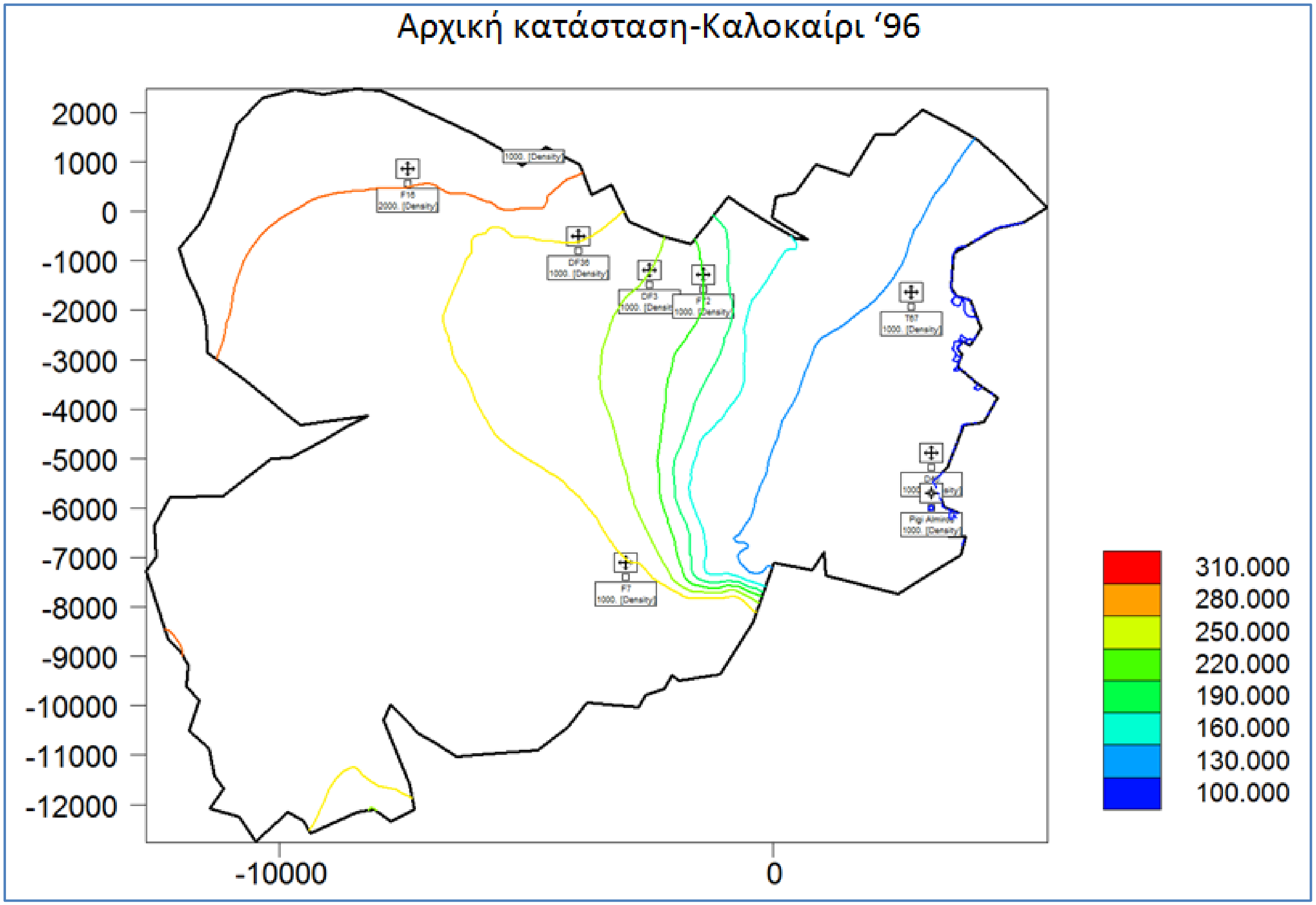
Στα διαγράμματα της αρχικής κατάστασης καθώς και των μελλοντικών σεναρίων, οι ισοδυναμικές γραμμές του υδραυλικού ύψους παρουσιάζονται με κλίμακα που αρχίζει από τα 100 μέτρα και με σταθερό βήμα τα 30 μέτρα καταλήγει στα 430 μέτρα. Αντίθετα, στα διαγράμματα της ταχύτητας δεν υπάρχει σταθερό βήμα και σε κάθε περίπτωση οι ταχύτητες είναι διαφορετικές και παρουσιάζονται στα υπομνήματα του εκάστοτε διαγράμματος.

5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

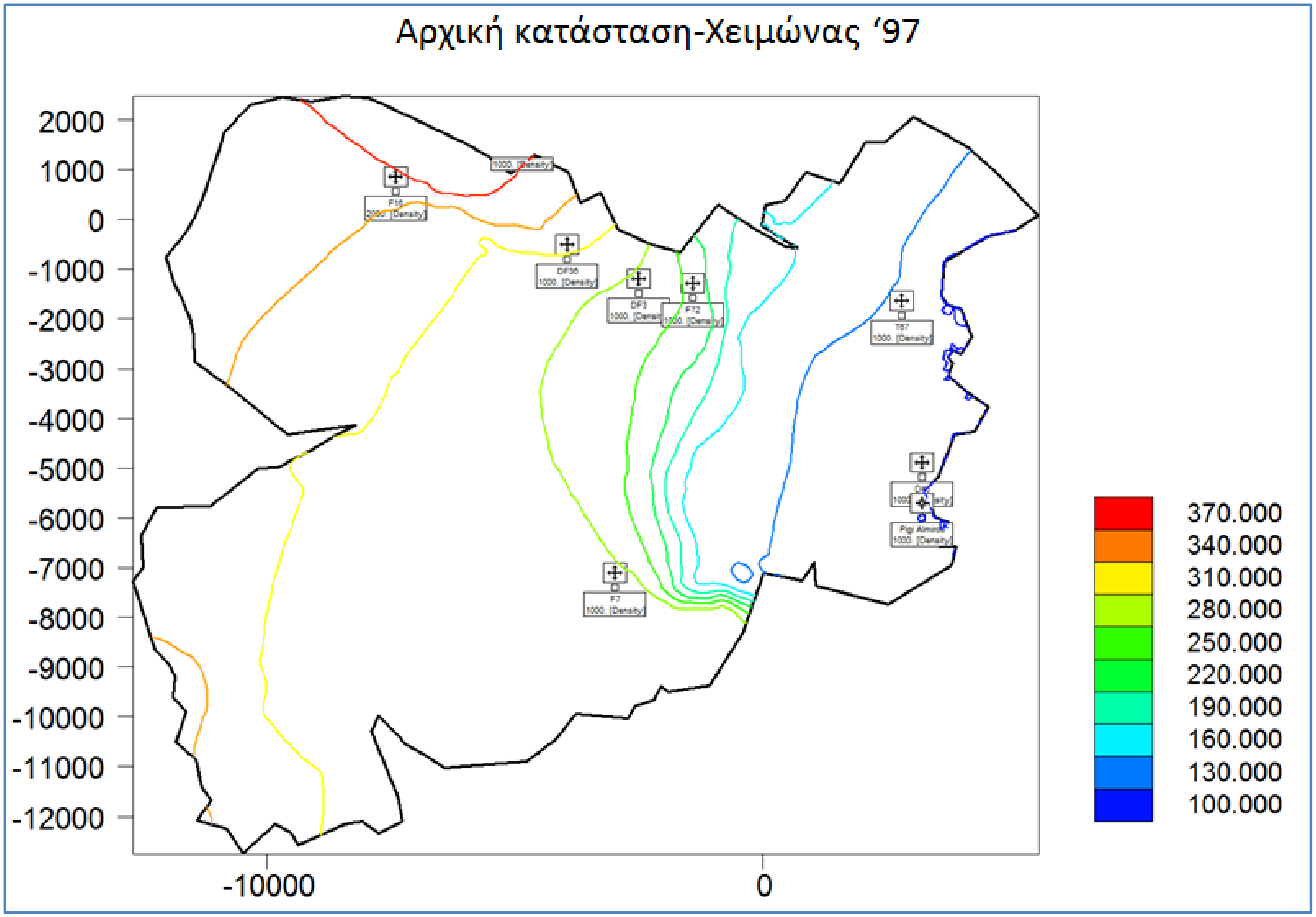
5.4.1 Αρχική κατάσταση - Προσδιορισμός του υδροφορέα

Με την εισαγωγή όλων των παραπάνω στοιχείων στο μοντέλο PTC, για χρονική διάρκεια 3 ετών, έγινε μία προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής.Η τελευταία καλοκαιρινή και η τελευταία χειμερινή περίοδος στα αποτελέσματα αποτελούν και την ουσία των αποτελεσμάτων αφού σε αυτές ο υπόγειος υδροφορέας έχει φτάσει σε σταθερές συνθήκες (steady states).

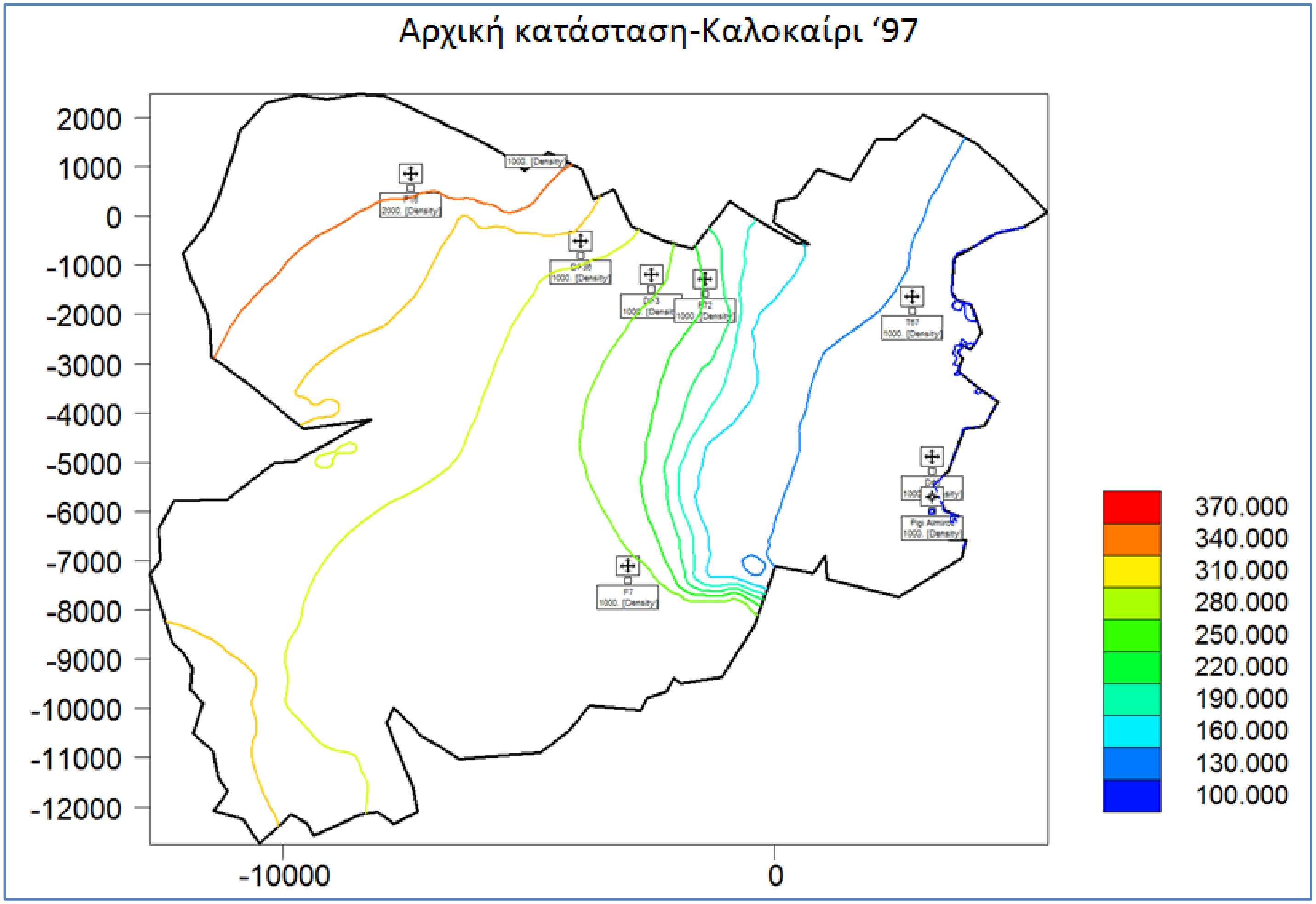
Αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και για τις 6 περιόδους (καλοκαίρι ’96 – χειμώνας ’99) φαίνονται στα διαγράμματα 5.1 έως 5.6 :



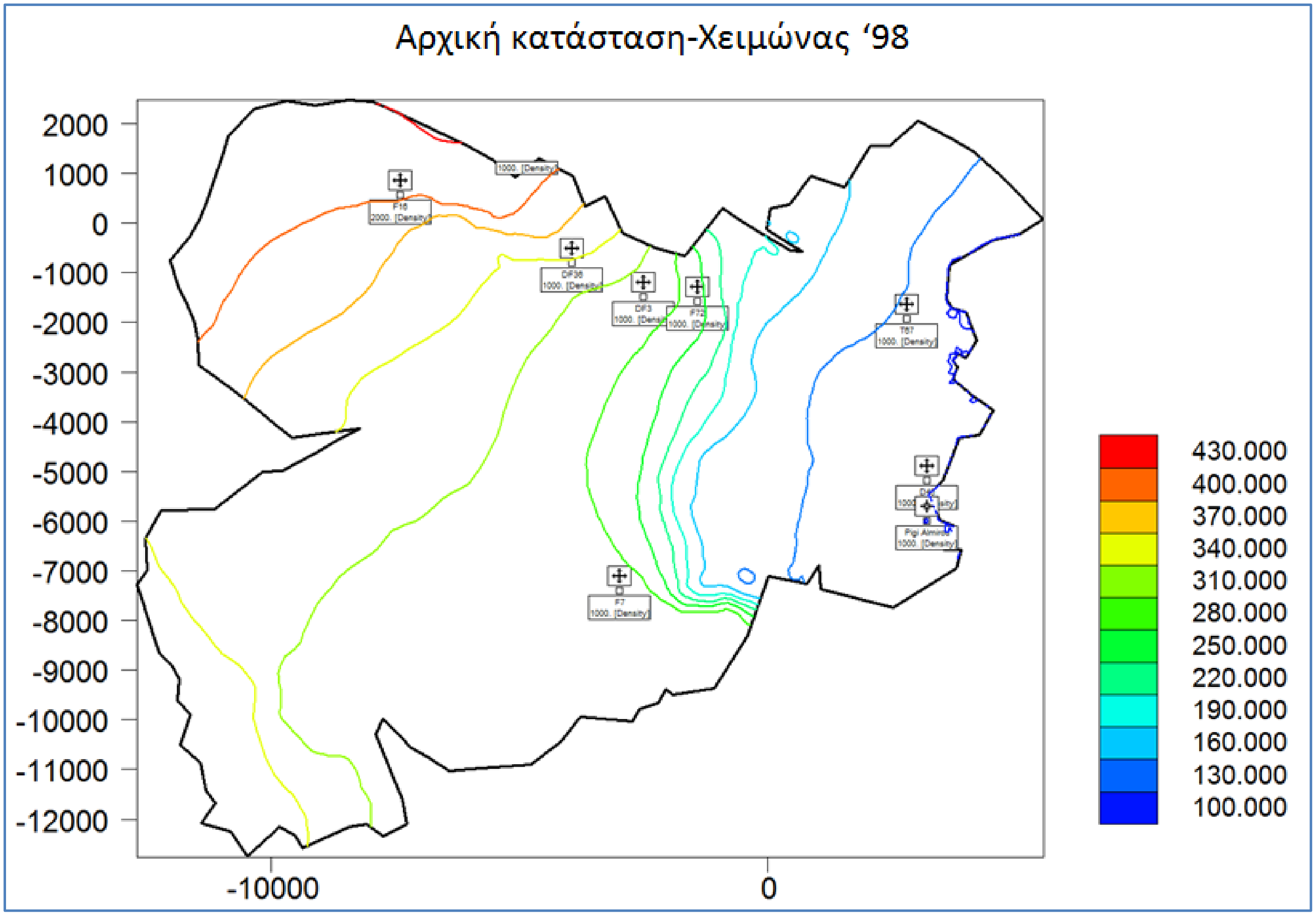
Διάγραμμα 5.1: Προσομοίωση αρχικής κατάστασης – Καλοκαίρι ‘96



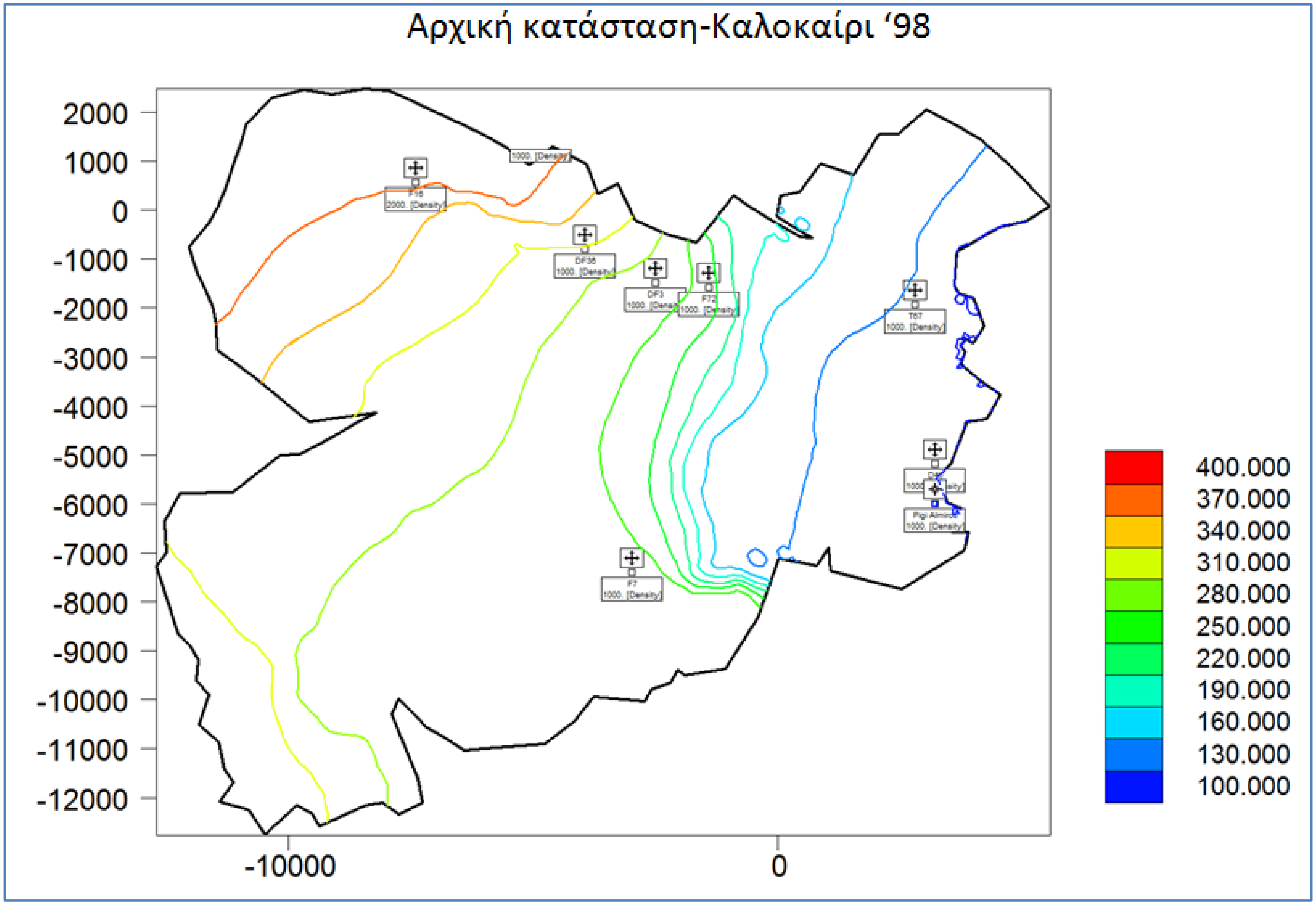
Διάγραμμα 5.2: Προσομοίωση αρχικής κατάστασης – Χειμώνας '97



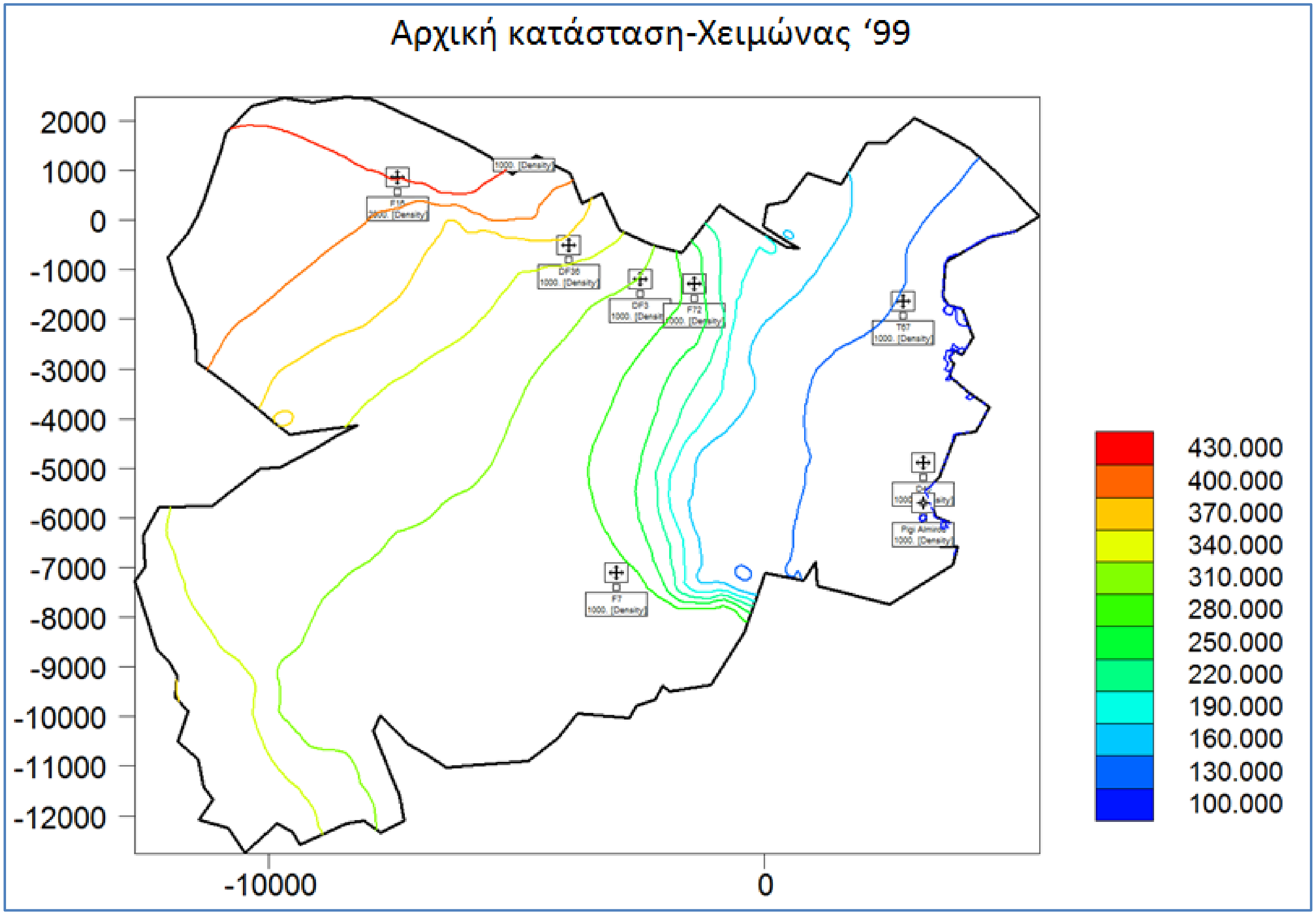
Διάγραμμα 5.3: Προσομοίωση αρχικής κατάστασης – Καλοκαίρι '97



Διάγραμμα 5.4: Προσομοίωση αρχικής κατάστασης – Χειμώνας '98



Διάγραμμα 5.5: Προσομοίωση αρχικής κατάστασης – Καλοκαίρι '98



Διάγραμμα 5.6: Προσομοίωση αρχικής κατάστασης – Χειμώνας '99

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα διαγράμματα υδραυλικών υψών που έχουν αξία σαν αποτελέσματα είναι τα 5.5 και 5.6, αφού αυτά αντιπροσωπεύουν την κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα σε σταθερές πλέον συνθήκες (steady states).

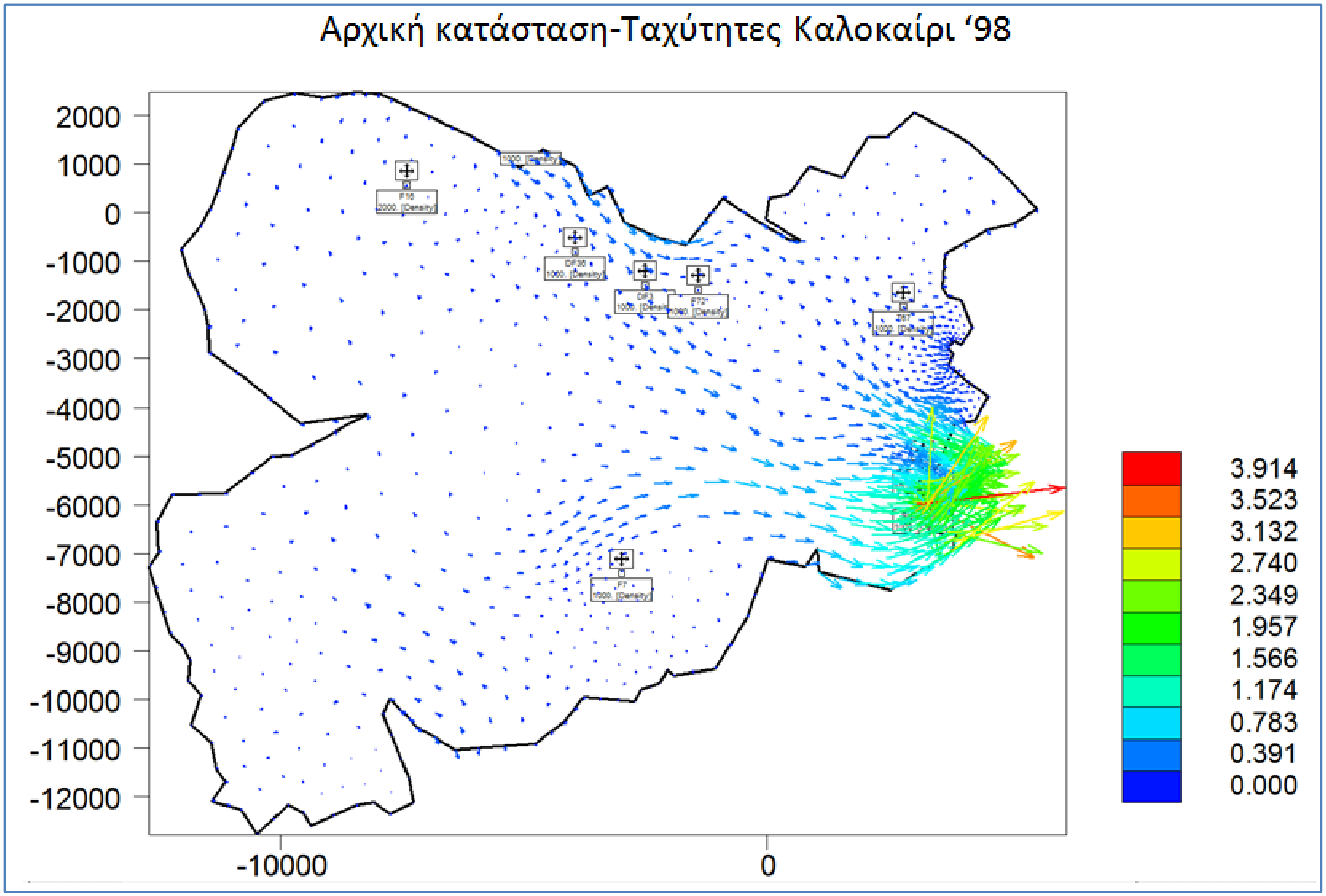
Παρατηρώντας τα συγκεκριμένα διαγράμματα ο υπόγειος υδροφορέας φαίνεται σε καλή κατάσταση, δεν παρουσιάζονται δηλαδή έντονα φαινόμενα υφαλμύρινσης.

Η ύπαρξη των διαφόρων γεωλογικών στρωμάτων και οι μεγάλες διαφορές στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητάς τους (1,7 x 10^{-4} m/d εώς 173,2 m/d) έχουν άμεση συνέπεια στα αποτελέσματα και ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για τη δημιουργία αυτού του ανομοιόμορφου προφίλ του μετώπου του υπόγειου υδροφορέα.

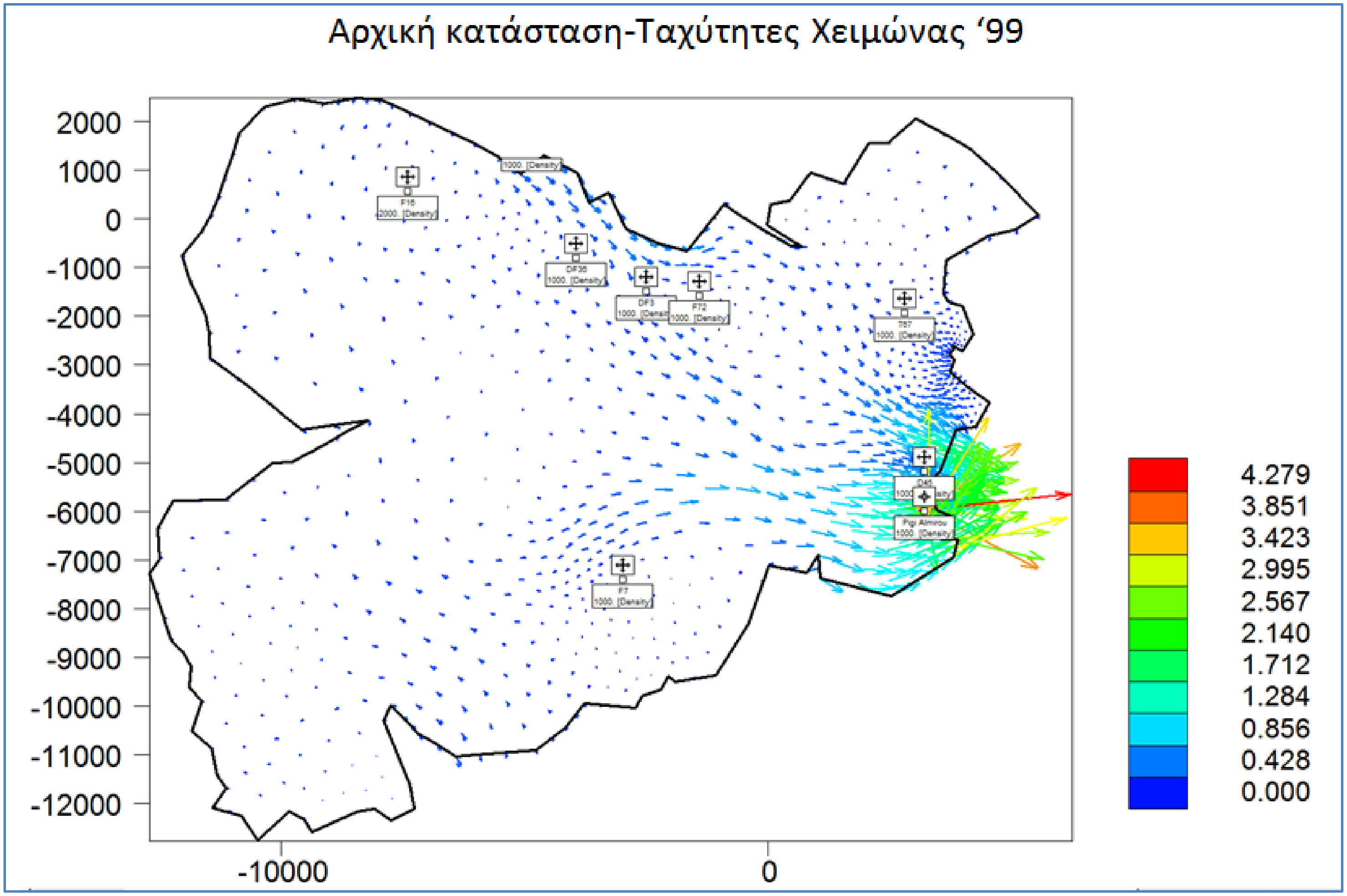
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα επιβεβαιώνονται και από τα στοιχεία που έχουμε για τα πηγάδια T67 και D45 τα οποία παρά το μικρό τους υψόμετρο (50 m και 20 m αντίστοιχα) και την μικρή απόστασή τους από την ακτή δεν φαίνεται να αντλούν υφάλμυρο νερό. Τέτοια φαινόμενα αλλά σε σχετικά σε μικρή κλίμακα παρουσιάζονται σε κάποια σημεία κατά το μήκος της ακτής (ανατολικό άκρο της περιοχής μελέτης), τα οποία οφείλονται στο πέτρωμα της παράκτιας περιοχής (Λατύπες ανθρακικής σύνθεσης), το οποίο έχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και είναι καρστικό οπότε έχει αυξημένη ευκολία διείσδυσης αλμυρού νερού σε σχέση με πορώδη πετρώματα αντίστοιχης υδραυλικής αγωγιμότητας. Επίσης, παρατηρείται και μία ανωμαλία και στην περιοχή που βρίσκεται η πηγή Αλμυρού (νοτιο – ανατολικό άκρο της περιοχής μελέτης). Συγκεκριμένα, παρατηρείται ένας φακός υδραυλικού ύψους 100m εντός της περιοχής μελέτης γύρω από την πηγή Αλμυρού. Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώνεται επίσης από τα στοιχεία που υπάρχουν για την πηγή και σύμφωνα με τα οποία η πηγή έχει μη πόσιμο, υφάλμυρο νερό με περιεκτικότητα σε χλώριο της τάξης των 600 mg/l – 1300 mg/l. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το πέτρωμα της περιοχής (Λατύπες ανθρακικής σύνθεσης), το οποίο όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, και από την μεγάλη παροχή της πηγής που κυμαίνεται από 1,5 m^3/s εώς 3 m^3/s.

Συγκριτικά για τις δύο περιόδους η κατάσταση διαφοροποιείται από περίοδο σε περίοδο όπως ήταν αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, κατά τη χειμερινή περίοδο οι τιμές του υδραυλικού ύψους έχουν αυξηθεί λόγω περισσότερων εισροών, μικρότερων τιμών ρυθμού αντλήσεως στα πηγάδια αλλά και της σημαντικής ποσότητας όγκου βροχοπτώσεων, σε σχέση με την καλοκαιρινή περίοδο, το οποίο φαίνεται καθαρά στα δύο διαγράμματα.

Το φαινόμενο που παρατηρείται γύρω από την πηγή Αλμυρού φαίνεται καλύτερα στα διαγράμματα ταχυτήτων 5,7 και 5.8 που ακολουθούν :



Διάγραμμα 5.7: Ταχύτητες νερού σε m/d της αρχικής κατάστασης – Καλοκαίρι '98



Διάγραμμα 5.8: Ταχύτητες νερού σε m/d της αρχικής κατάστασης – Χειμώνας '99

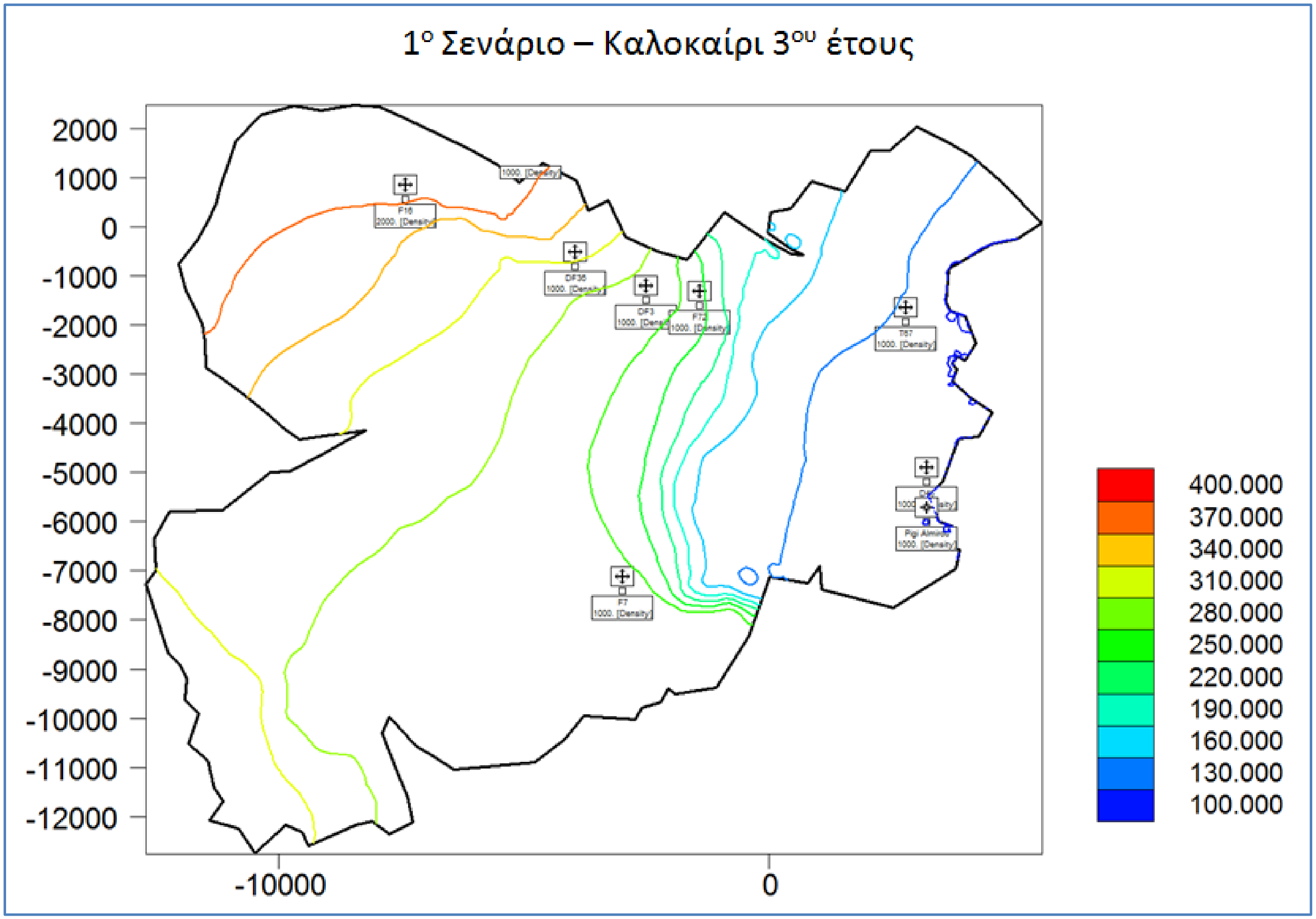
Παρατηρώντας τα διαγράμματα 5.8 και 5.9 για τις δύο περιόδους, καλοκαίρι – χειμώνας, φαίνονται καθαρά οι διαφοροποιήσεις των ταχυτήτων ανά περίοδο (για τους λόγους που προαναφέρθηκαν). Επίσης, φαίνεται καθαρά πλέον η διαταραχή που δημιουργεί η πηγή Αλμυρού με τη μεγάλη της παροχή.

5.4.2 Σενάρια αλλαγής ρυθμού αντλήσεως

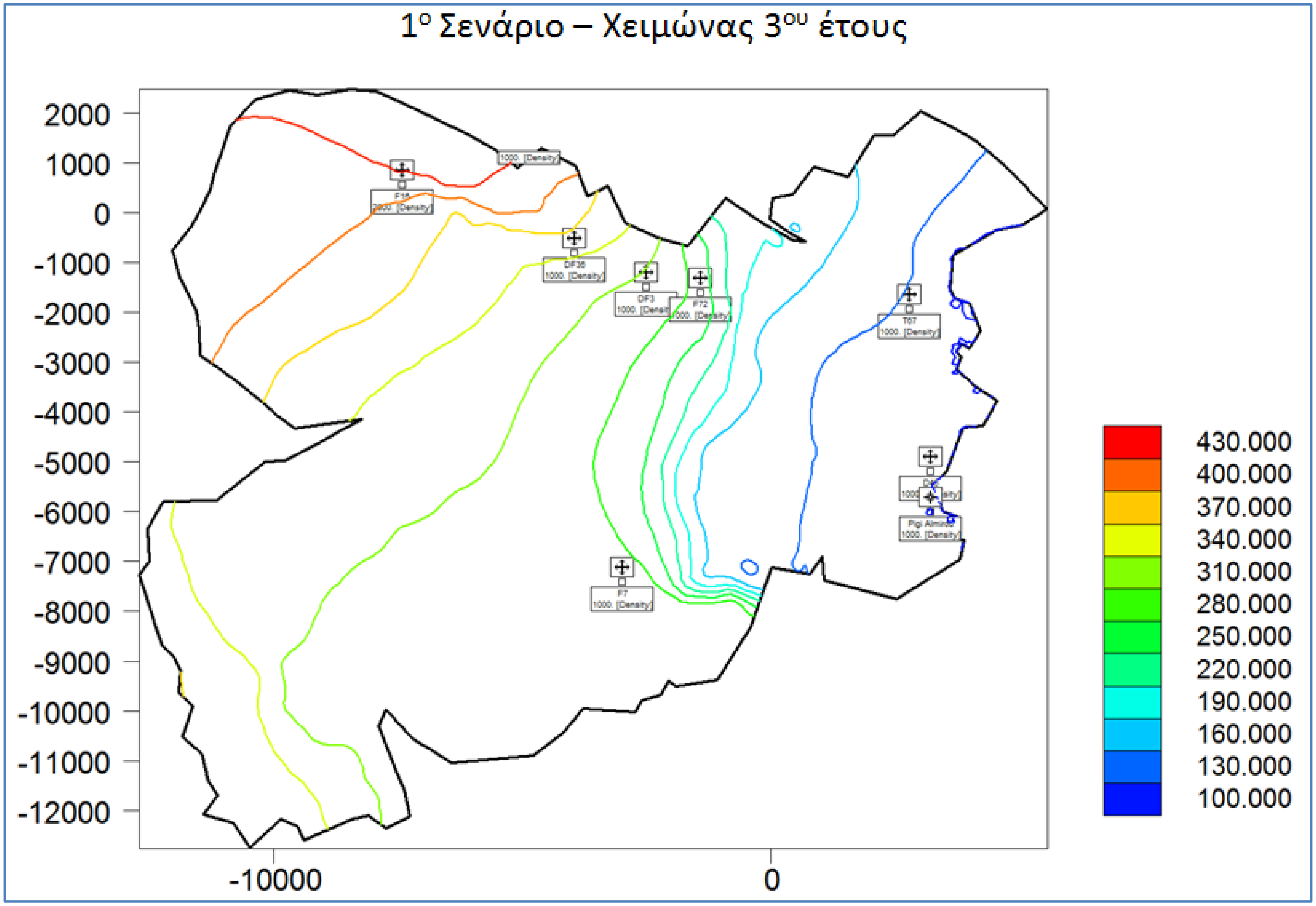
Μετά τον αρχικό προσδιορισμό του υπόγειου υδροφορέα έγιναν σεναριακά δύο αλλαγές στους ρυθμούς άντλησης των πηγαδιών. Το 1^{ο} σενάριο πραγματεύεται ίδιες ακριβώς συνθήκες με την αρχική προσομοίωση με μόνη διαφοροποίηση μία αύξηση της τάξης του 25% στους ρυθμούς άντλησης ενώ το 2^{ο} σενάριο με μία μείωση της τάξης του 50%. Ο χρόνος προσομοίωσης παραμένει ο ίδιος με την αρχική και στα δύο σενάρια, δηλαδή 3 χρόνια ή 6 περίοδοι.

5.4.2.1 1^{ο} σενάριο – Αύξηση του ρυθμού αντλήσεως κατά 25%

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις δύο τελευταίες περιόδους, καλοκαίρι 3^{ου} έτους – χειμώνας 3^{ου} έτους, όπου ο υπόγειος υδροφορέας έχει καταλήξει σε σταθερές συνθήκες (steady states):



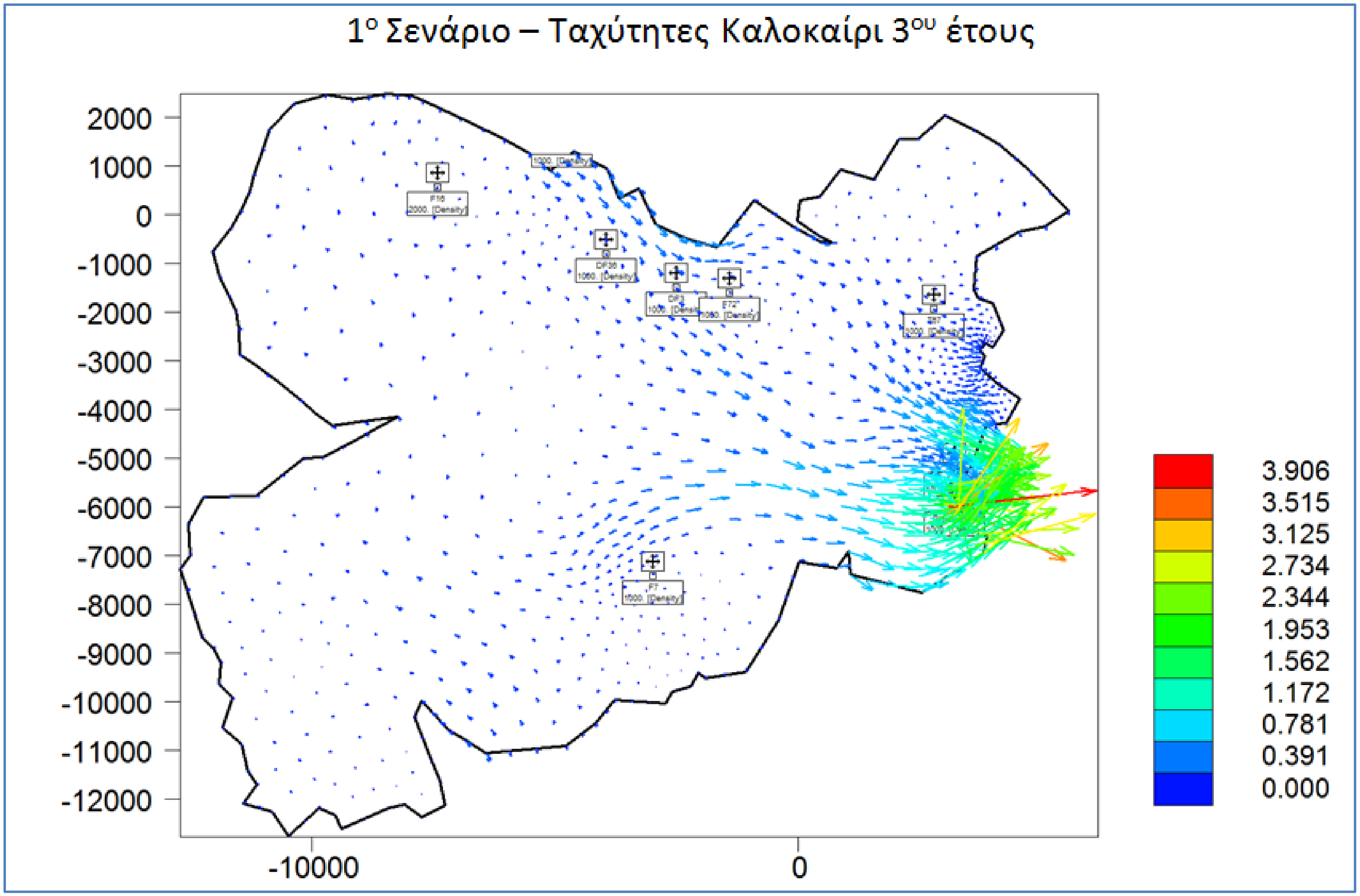
Διάγραμμα 5.9: Προσομοίωση 1ου σεναρίου – Καλοκαίρι 3ου έτους



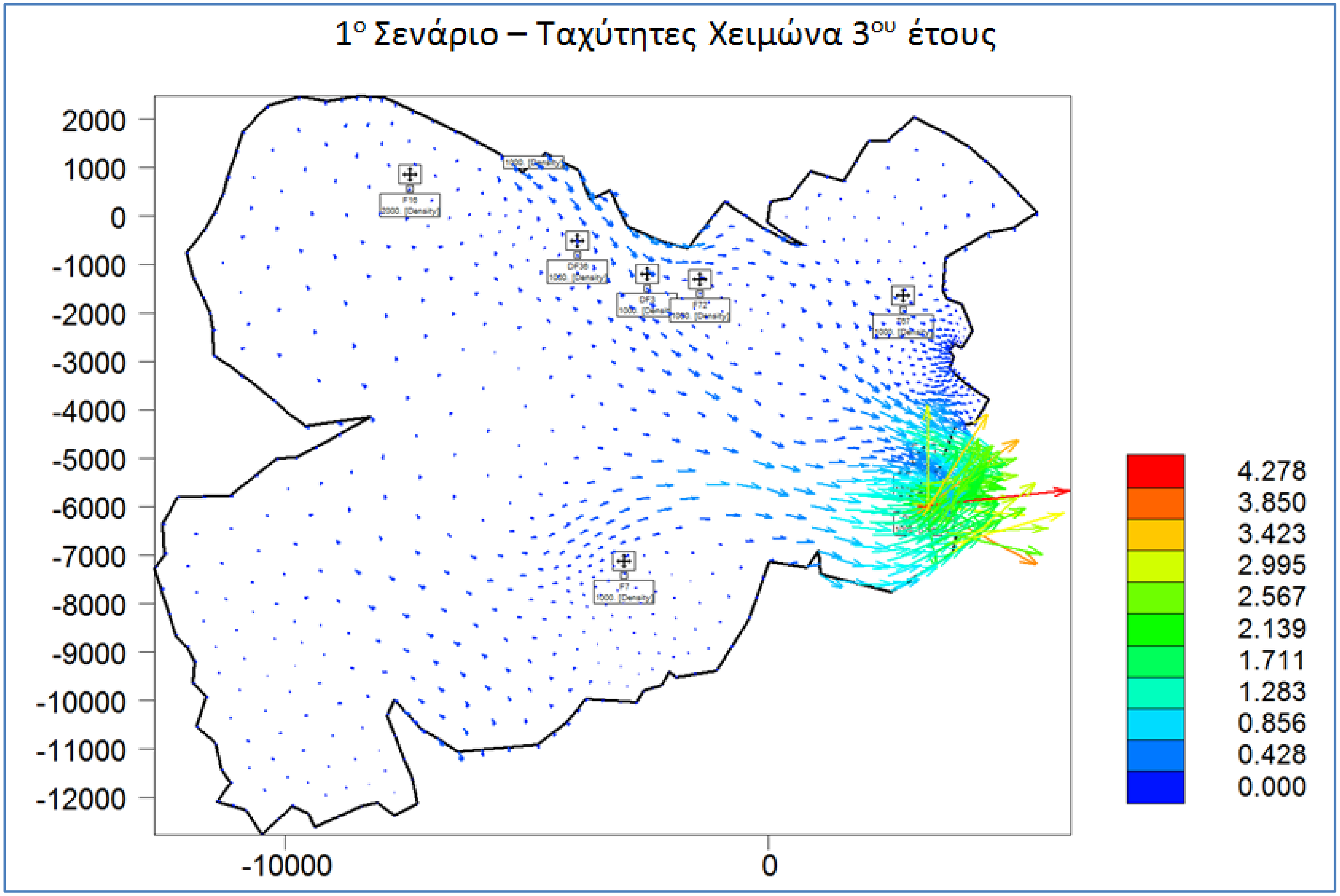
Διάγραμμα 5.10: Προσομοίωση 1ου σεναρίου – Χειμώνας 3ου έτους

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα υδραυλικών υψών παρατηρούμε ότι υπάρχει η αναμενόμενη διαφοροποίηση από περίοδο σε περίοδο. Συγκεκριμένα, κατά τη χειμερινή περίοδο οι τιμές του υδραυλικού ύψους έχουν αυξηθεί λόγω περισσότερων εισροών, μικρότερων τιμών ρυθμού αντλήσεως στα πηγάδια αλλά και της σημαντικής ποσότητας όγκου βροχοπτώσεων, σε σχέση με την καλοκαιρινή περίοδο, το οποίο φαίνεται καθαρά στα δύο διαγράμματα.

Σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της αρχικής προσομοίωσης παρατηρούμε μία ελάχιστη μετατόπιση των υδραυλικών ισοϋψών προς τα δυτικά, δηλαδή προς μεγάλα υψόμετρα. Η ελάχιστη αυτή μετατόπιση στο χάρτη, η οποία φτάνει το 1 mm στις μέγιστες μετατοπίσεις, αντιπροσωπεύει μία απόσταση των 50 m (κλίμακα 1:50000). Κατά τα άλλα βέβαια δεν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Συμπερασματικά, μία αύξηση της τάξεως του 25% δεν θα επέφερε σημαντικές αλλαγές στην κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα πέρα από μία μικρή μείωση του υδραυλικού ύψους, κυρίως στις περιοχές γύρω από τα πηγάδια, κάτι το οποίο φαίνεται καθαρά και από τα διαγράμματα ταχυτήτων 5.11 και 5.12 για τις δύο τελευταίες περιόδους που ακολουθούν :



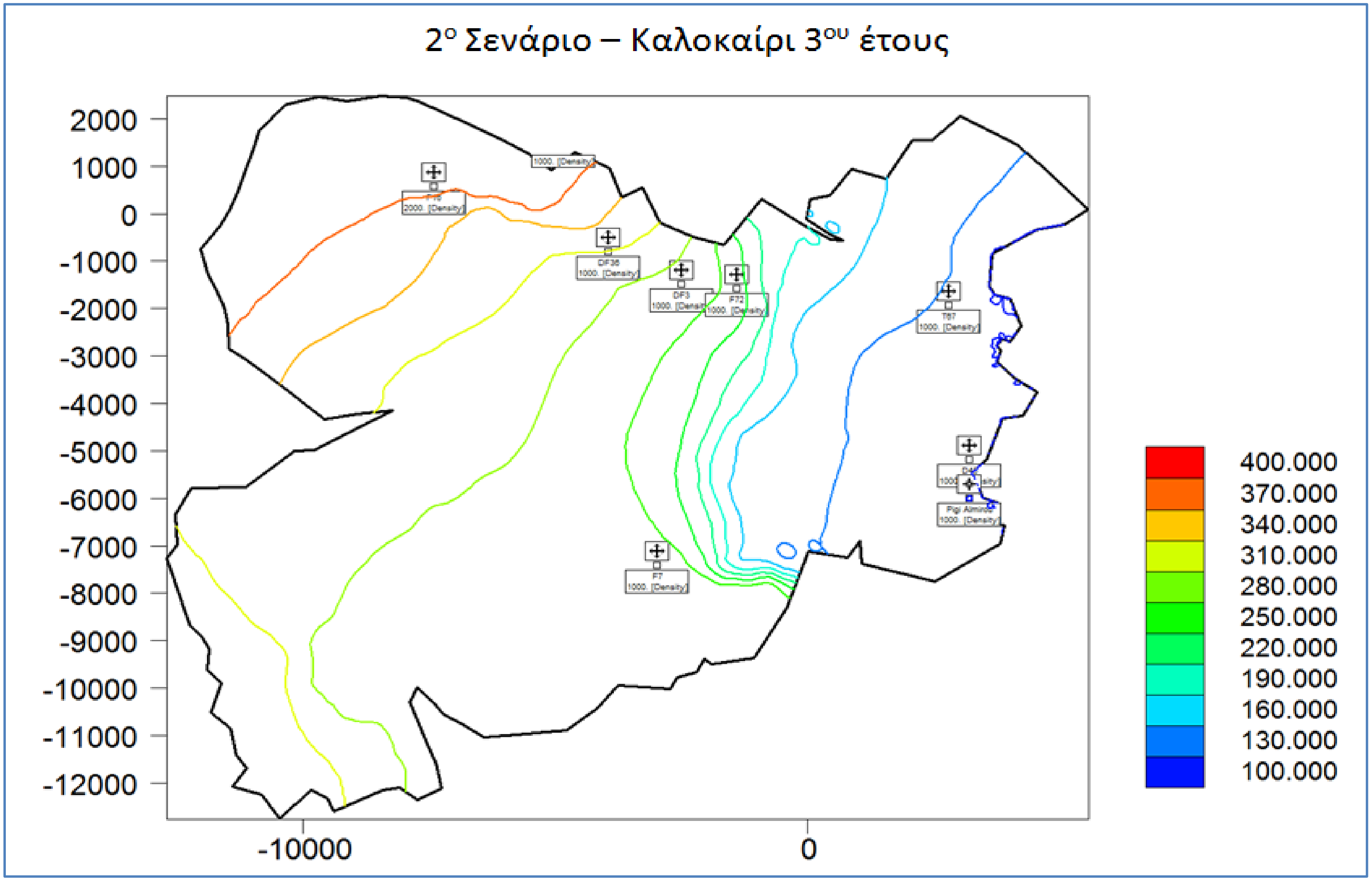
Διάγραμμα 5.11: Ταχύτητες νερού σε m/d του 1ου σεναρίου – Καλοκαίρι 3ου έτους



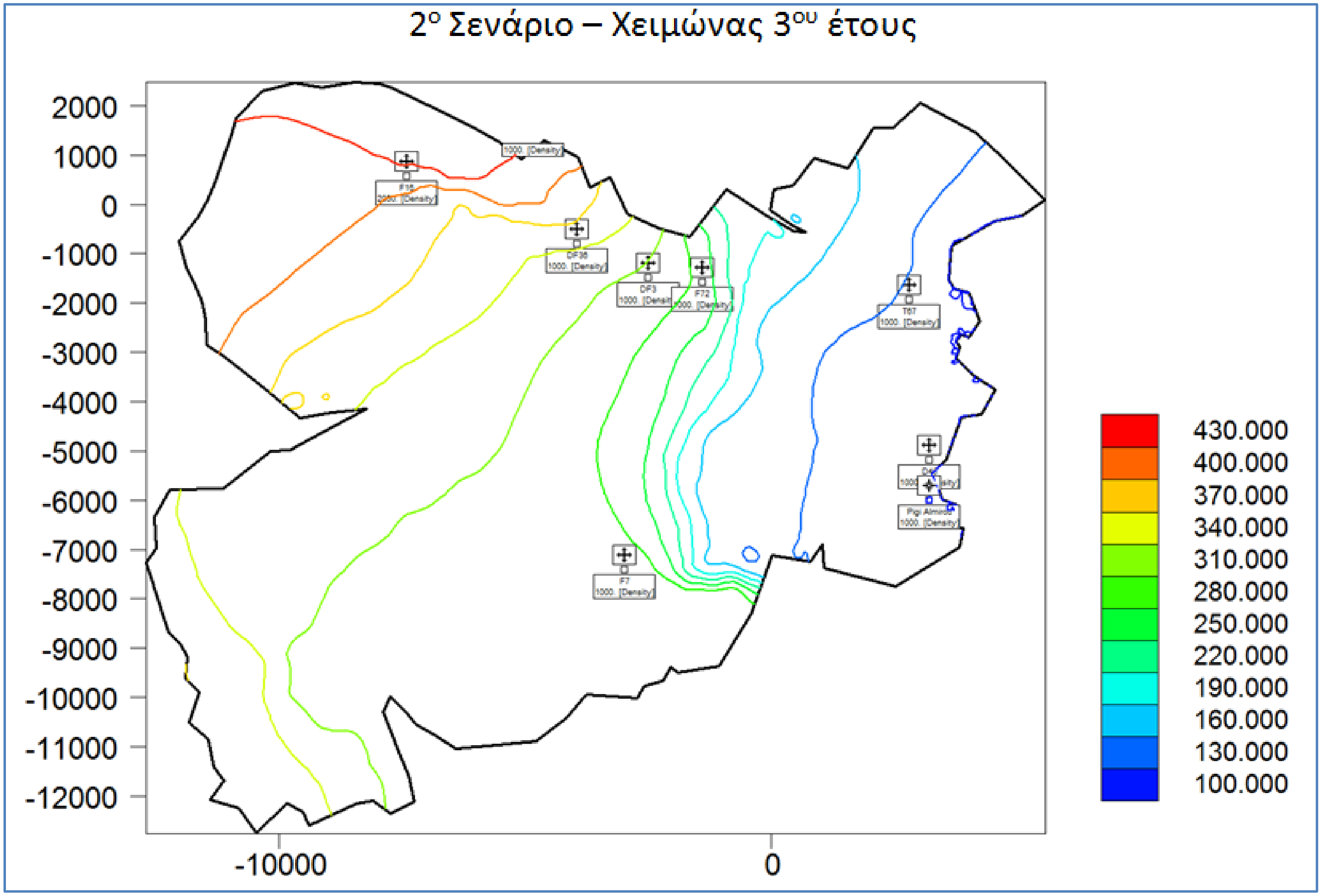
Διάγραμμα 5.12: Ταχύτητες νερού σε m/d του 1ου σεναρίου – Χειμώνας 3ου έτους

5.4.2.2 2ο σενάριο – Μείωση του ρυθμού αντλήσεως κατά 50%

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις δύο τελευταίες περιόδους, καλοκαίρι 3ου έτους – χειμώνας 3ου έτους, όπου ο υπόγειος υδροφορέας έχει καταλήξει σε σταθερές συνθήκες (steady states) :



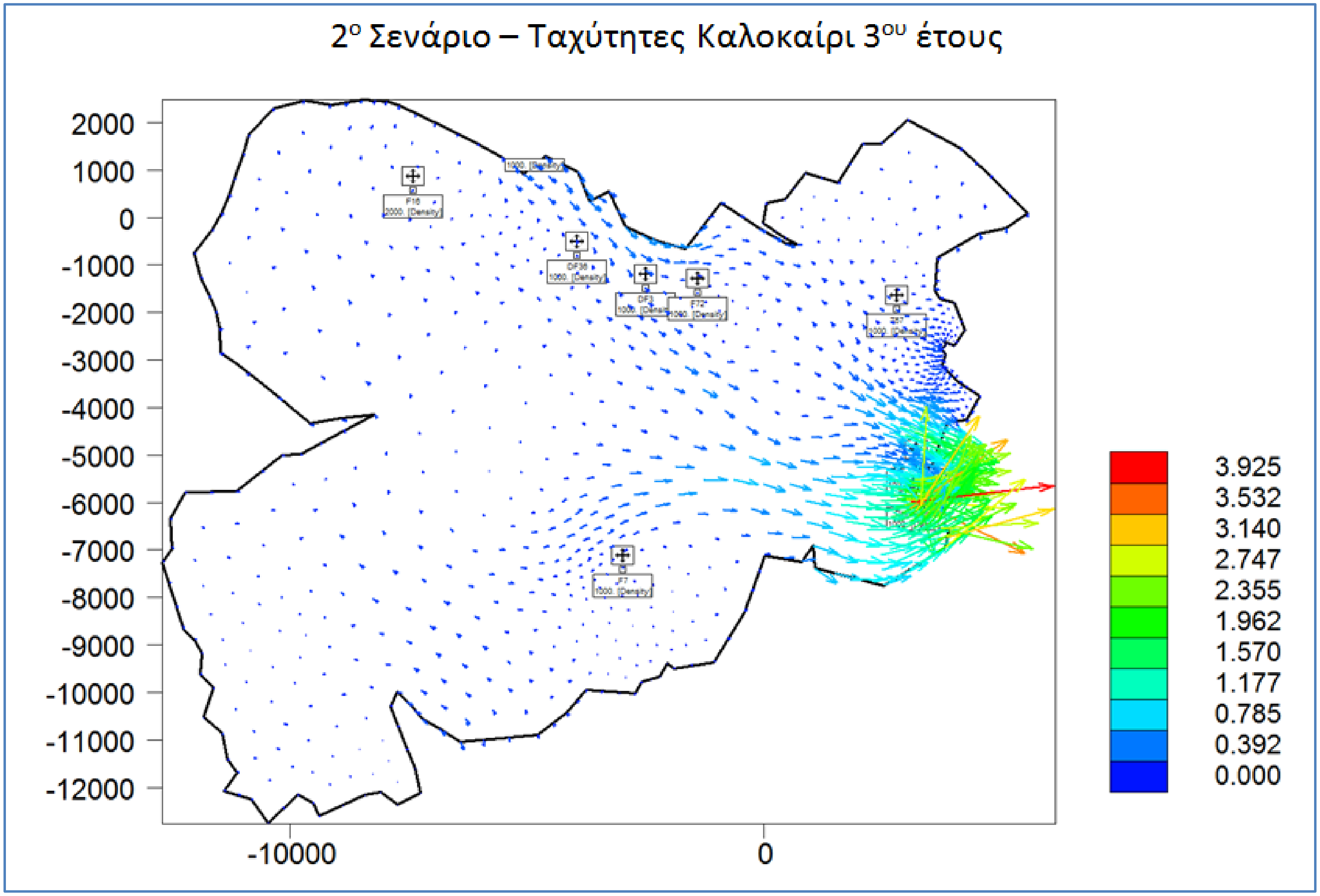
Διάγραμμα 5.13: Προσομοίωση 2ου σεναρίου – Καλοκαίρι 3ου έτους



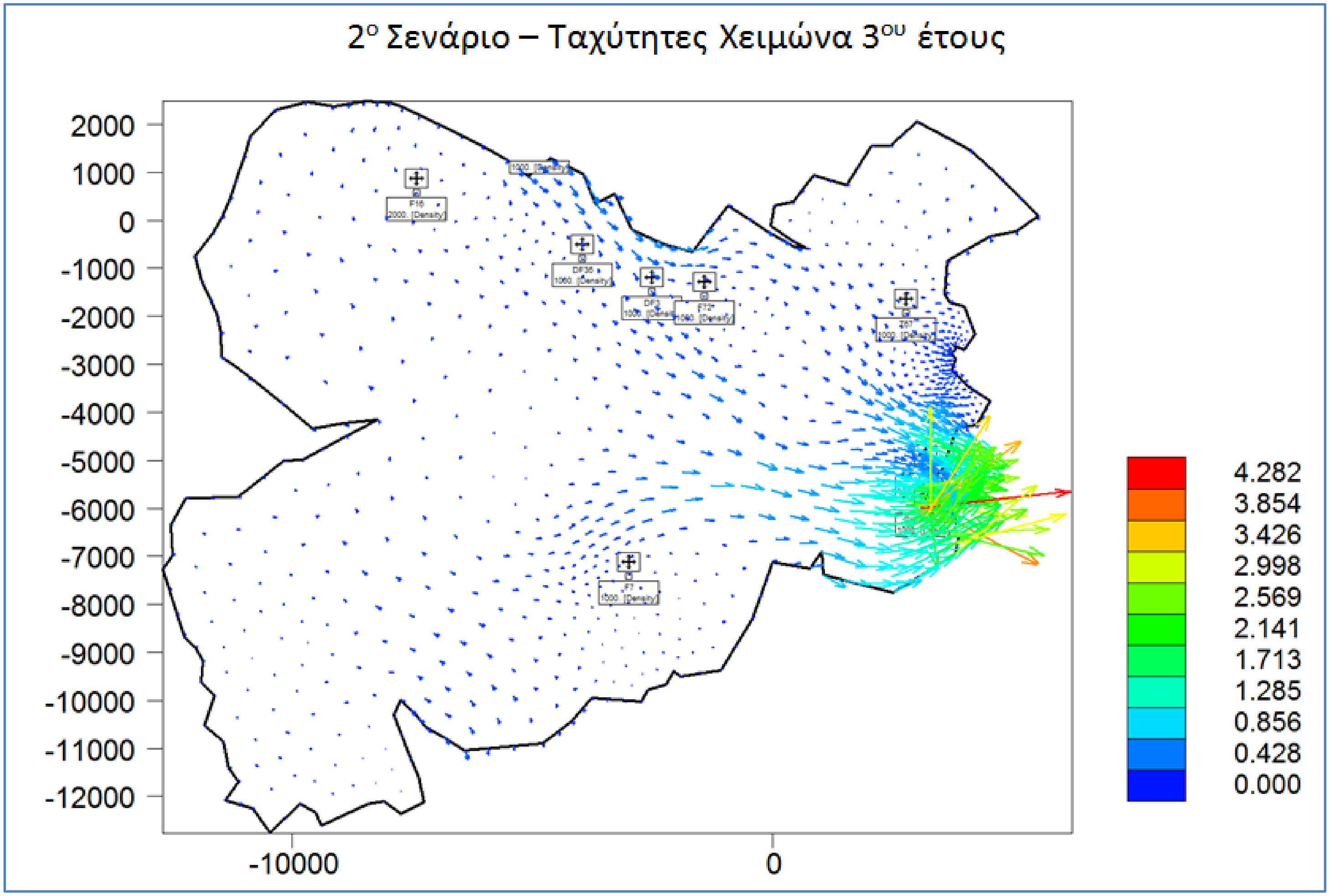
Διάγραμμα 5.14: Προσομοίωση 2ου σεναρίου – Χειμώνας 3ου έτους

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα υδραυλικών υψών παρατηρούμε ότι υπάρχει η αναμενόμενη διαφοροποίηση από περίοδο σε περίοδο. Συγκεκριμένα, κατά τη χειμερινή περίοδο οι τιμές του υδραυλικού ύψους έχουν αυξηθεί λόγω περισσότερων εισροών, μικρότερων τιμών ρυθμού αντλήσεως στα πηγάδια αλλά και της σημαντικής ποσότητας όγκου βροχοπτώσεων, σε σχέση με την καλοκαιρινή περίοδο, το οποίο φαίνεται καθαρά στα δύο διαγράμματα.

Σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της αρχικής προσομοίωσης παρατηρούμε μία μικρή μετατόπιση,σχεδόν διπλάσια από αυτή του 1ου σεναρίου, των υδραυλικών ισοϋψών προς τα ανατολικά, δηλαδή προς την ακτή. Η μικρή αυτή μετατόπιση στο χάρτη, η οποία κυμαίνεται από το 1 mm εώς τα 2 mm στις μέγιστες μετατοπίσεις, αντιπροσωπεύει μία απόσταση που φτάνει τα 100 m (κλίμακα 1:50000). Κατά τα άλλα βέβαια δεν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη μορφή του υδροφορέα. Συμπερασματικά, μία μείωση της τάξεως του 50% θα επέφερε αλλαγές στην κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα,όχι όμως και στη μορφή του, οι οποίες θα γίνονταν αισθητές στα πηγάδια αφού θα υπήρχε μία αύξηση του υδραυλικού τους ύψους της τάξεως των κάποιων μέτρων, κάτι το οποίο φαίνεται καθαρά και από τα διαγράμματα ταχυτήτων 5.15 και 5.16 για τις δύο τελευταίες περιόδους που ακολουθούν :



Διάγραμμα 5.15: Ταχύτητες νερού σε m/d του 2ου σεναρίου – Καλοκαίρι 3ου έτους



Διάγραμμα 5.16: Ταχύτητες νερού σε m/d του 2ου σεναρίου – Χειμώνας 3ου έτους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τη διαδικασία εισαγωγής των στοιχείων στο μοντέλο παρουσιάστηκαν διάφορα προβλήματα. Συγκεκριμένα, για την καλύτερη μοντελοποίηση της περιοχής για τη συμπεριφορά του υδροφορέα είναι απαραίτητα στοιχεία που να αφορούν την υδρογεωλογία της περιοχής καθώς και τομές στα σημεία των πηγαδιών για την όσο το δυνατόν καλύτερη βαθμονόμηση των μοντέλων. Τα στοιχεία που εισήχθησαν στο μοντέλο είναι μόνο για τα επιφανειακά στρώματα. Από τομές στην περιοχή που πρέπει να γίνουν ίσως διαπιστωθεί ότι η γεωλογία της δεν αποτελείται από ένα μόνο στρώμα αλλά για παράδειγμα ότι κάτω από τις μάργες είναι δυνατόν να υπάρχουν ασβεστόλιθοι. Επίσης, η μεγάλη δυσκολία στη βαθμονόμηση του μοντέλου, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές στάθμες στις γεωτρήσεις της περιοχής, υποδεικνύει ότι στην περιοχή υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός μη δηλωμένων γεωτρήσεων, γεγονός πολύ φυσιολογικό αν αναλογιστούμε ότι η υπό μελέτη περιοχή είναι εκτάσεως 180 km^2.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της αρχικής κατάστασης ο υπόγειος υδροφορέας της λεκάνης φαίνεται να είναι σε καλή κατάσταση χωρίς ιδιαίτερα φαινόμενα υφαλμύρινσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό διότι η αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης είναι μία δύσκολη και επίπονη διαδικασία μιας και είναι ένα φυσικό φαινόμενο που είναι δύσκολα αναστρέψιμο. Επίσης και μετά την αντιμετώπισή του είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί το αλάτι που έχει προσροφηθεί από τους κόκκους του εδάφους. Για αυτό καλύτερη θα ήταν η πρόβλεψη του, έτσι ώστε να αποφευχθεί η εισροή της θάλασσας στο έδαφος με μία υδρολογική μελέτη για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων, παρά η αντιμετώπιση του φαινομένου. Σε παράκτιες περιοχές όπου τα αποθέματα του υδροφορέα είναι ελάχιστα, είναι απαραίτητη μία ορθολογική διαχείριση έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπερεκμετάλλευσης γιατί οι επιπτώσεις που επεισέρχονται (πτώση του υδροφόρου ορίζοντα, διείσδυση της θάλασσας και η υφαλμύρινση των παράκτιων εδαφών, καθιζήσεις εδαφών λόγω συμπίεσης των κενών των πόρων του υδροφορέα, οικονομικό κόστος για τη μεταφορά γλυκού νερού) είναι πολύ μεγάλες.

Πιθανόν μία μοντελοποίηση με περιοχή μελέτης μικρότερης εκτάσεως, εστιασμένη στην παράκτια ζώνη και κυρίως στην περιοχή γύρω από την πηγή Αλμυρού όπου έχουμε φαινόμενο υφαλμύρινσης να έδινε αισθητά μία καλύτερη εικόνα της πραγματικής καταστάσεως που επικρατεί. Η μοντελοποίηση αυτή βέβαια θα έπρεπε να στηριχθεί με ακριβείς και πλήρεις τιμές στα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο.

Αναλυτικότερα, αναφορικά με τα αποτελέσματα, συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα υδραυλικών υψών στην αρχική προσομοίωση αλλά και στα σενάρια, παρατηρούμε ότι υπάρχει η αναμενόμενη διαφοροποίηση από την καλοκαιρινή στην χειμερινή περίοδο. Συγκεκριμένα, κατά τη χειμερινή περίοδο οι τιμές του υδραυλικού ύψους έχουν αυξηθεί λόγω περισσότερων εισροών, μικρότερων τιμών ρυθμού αντλήσεως στα πηγάδια αλλά και της σημαντικής ποσότητας όγκου βροχοπτώσεων, σε σχέση με την καλοκαιρινή περίοδο, το οποίο φαίνεται καθαρά στα δύο διαγράμματα.

Επίσης, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των σεναρίων αποτελούν ένα δείκτη ευαισθησίας του υπόγειου υδροφορέα, αφού πραγματεύονται αύξηση αλλά και μείωση του ρυθμού αντλήσεως των γεωτρήσεων και μάλιστα σε διαφορετικά ποσοστά. Με τον τρόπο αυτό διαφαίνεται η αντίδραση του υπόγειου υδροφορέα στις ενδεχόμενες αλλαγές.

Συγκεκριμένα, στο 1^{ο} σενάριο (αύξηση του ρυθμού αντλήσεως κατά 25%) σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της αρχικής προσομοίωσης παρατηρούμε μία ελάχιστη μετατόπιση των υδραυλικών ισοϋψών προς τα δυτικά, δηλαδή προς μεγάλα υψόμετρα. Η ελάχιστη αυτή μετατόπιση στο χάρτη, η οποία φτάνει το 1 mm στις μέγιστες μετατοπίσεις, αντιπροσωπεύει μία απόσταση των 50 m (κλίμακα 1:50000). Κατά τα άλλα δεν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Συμπερασματικά, μία αύξηση της τάξεως του 25% δεν θα επέφερε σημαντικές αλλαγές στην κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα πέρα από μία μικρή μείωση του υδραυλικού ύψους, κυρίως στις περιοχές γύρω από τα πηγάδια.

Αντίστοιχα στο 2^{ο} σενάριο(μείωση του ρυθμού αντλήσεως κατά 50%) σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της αρχικής προσομοίωσης παρατηρούμε μία μικρή μετατόπιση, σχεδόν διπλάσια από αυτή του 1^{ου} σεναρίου, των υδραυλικών ισοϋψών προς τα ανατολικά, δηλαδή προς την ακτή. Η μικρή αυτή μετατόπιση στο χάρτη, η οποία κυμαίνεται από το 1 mm έως τα 2 mm στις μέγιστες μετατοπίσεις, αντιπροσωπεύει μία απόσταση που φτάνει τα 100 m (κλίμακα 1:50000). Κατά τα άλλα βέβαια δεν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη μορφή του υδροφορέα. Συμπερασματικά, μία μείωση της τάξεως του 50% θα επέφερε αλλαγές στην κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα, όχι όμως και στη μορφή του, οι οποίες θα γίνονταν αισθητές στα πηγάδια αφού θα υπήρχε μία αύξηση του υδραυλικού τους ύψους της τάξεως των κάποιων μέτρων.

Η διαφοροποίηση αυτή ανάμεσα στα σενάρια διαφαίνεται με καλύτερο τρόπο στα διαγράμματα ταχυτήτων ανά περίοδο. Συγκεκριμένα, η αρχική προσομοίωση έδωσε μέγιστες ταχύτητες 3,914 m/d το καλοκαίρι και 4,279 m/d το χειμώνα ενώ στο 1^{ο} σενάριο οι αντίστοιχες τιμές ήταν 3,906 m/d και 4,276 m/d και στο 2^{ο} σενάριο ήταν 3,925 m/d και 4,282 m/d.

Εν κατακλείδι, ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι έχει καταστεί πλέον απαραίτητη η εκπόνηση μελετών και έργων για την αξιοποίηση και εξοικονόμηση επιφανειακών υδάτων καθώς και υδρογεωλογικών ερευνών και μελετών που να καθορίζουν το υδατικό ισοζύγιο και το υδατικό δυναμικό του υπόγειου υδροφορέα και ότι απαιτείται συνολικός σχεδιασμός, προγραμματισμός και ιεράρχηση όλων των έργων και ειδικά των υδατικών πόρων, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περιοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ι.Γ.Μ.Ε., 2001a, 'Υδρογεωλογία των ανθρακικών υδροφόρων της περιοχής Αγίου Νικολάου,Ρέθυμνο

Ι.Γ.Μ.Ε., 2001b, ΤΕΥΧΟΣ ΙΙ Μετρήσεων – Παρατηρήσεων και Ερευνητικών Γεωτρήσεων Νομού Λασιθίου, Ρέθυμνο

Ι.Γ.Μ.Ε., 2001c, ΤΕΥΧΟΣ ΙΙ Μελέτη – Αξιοποίηση Υδατικού Δυναμικού Κρήτης, Καρστικές – Προσχωματικές Υδροφορίες, Ρέθυμνο

Γεώργιος Π. Καρατζάς, 2002. Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά.

Ο.ΑΝ.Α.Κ. – Ε.Μ.Π., 1994, Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρησης Υδατικών Πόρων Ανατολικής Κρήτης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Τμήμα Εγγείων βελτιώσεων, 1998, Υδρολογικά στοιχεία νήσου Κρήτης -Βροχομετρικά -Εξατμισιμετρικά-Θερμομετρικά- Ηλιοφάνειας και Υδρομετρικά των υδρολογικών ετών 1970-97, Ηράκλειο

Γ. Τσακίρης, 1995. Υδατικοί Πόροι : Ι Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992, Applied Groundwater Modeling, Academic Press ,San Diego

D. K. Badu, G. F. Pinder, A. Niemi, D. P.Ahlfeld, S. A. Stothoff, 1997, Chemical Transport By Three- Dimensional Groundwater Flows, PTC Manual

Essink, G.H.P.O., 2001, 'Improving frest groundwater supply – problems and solutions', Ocean and Coastal Management

Ιστοσελίδες

www.water.usgs.gov

www.mqtinfo.org/planningeduc0019.asp

www.astm.org

www.aquifertest.com/forum/properties.htm

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΟΔΗΓΙΑ 2000/60/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ

της 23ης Οκτωβρίου 2000

για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων

Η Οδηγία 2000/60 αποτελείται από 22 Άρθρα και 10 Παραρτήματα και αυτά που αναφέρονται στα υπόγεια ύδατα είναι τα εξής:

Άρθρο 1

Σκοπός

Σκοπός της οδηγίας 2000/60 είναι η θέσπιση πλαισίου για την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπογείων υδάτων, το οποίο:

α) να αποτρέπει την περαιτέρω επιδείνωση, να προστατεύει και να βελτιώνει την κατάσταση των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και των αμέσως εξαρτώμενων από αυτά χερσαίων οικοσυστημάτων και υγροτόπων σε ό,τι αφορά τις ανάγκες τους σε νερό·

β) να προωθεί τη βιώσιμη χρήση του νερού βάσει μακροπρόθεσμης προστασίας των διαθέσιμων υδατικών πόρων

γ) να αποσκοπεί στην ενίσχυση της προστασίας και τη βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος, μεταξύ άλλων με ειδικά μέτρα για την προοδευτική μείωση των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών ουσιών προτεραιότητας και με την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών των επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας

δ) να διασφαλίζει την προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων και να αποτρέπει την περαιτέρω μόλυνση τους

ε) να συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες, και να συμβάλλει με αυτόν τον τρόπο:

- στην εξασφάλιση επαρκούς παροχής επιφανειακού και υπόγειου νερού καλής ποιότητας που απαιτείται για τη βιώσιμη, ισόρροπη και δίκαιη χρήση ύδατος,
- σε σημαντική μείωση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων,

- στην προστασία των χωρικών και θαλάσσιων υδάτων και
- στην επίτευξη των στόχων των σχετικών διεθνών συμφωνιών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αποσκοπούν στην πρόληψη και την εξάλειψη της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, με κοινοτική δράση δυνάμει του άρθρου 16 παράγραφος 3 για την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας, με απώτατο στόχο να επιτευχθούν συγκεντρώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον οι οποίες, για μεν τις φυσικώς απαντώμενες ουσίες να πλησιάζουν το φυσικό βασικό επίπεδο, για δε τις τεχνητές συνθετικές ουσίες να είναι σχεδόν μηδενικές.

Άρθρο 2

Ορισμοί

Για τους σκοπούς της παρούσας οδηγίας, εφαρμόζονται οι ακόλουθοι ορισμοί:

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.

7. "Παράκτια ύδατα": τα επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται στην πλευρά της ξηράς μιας γραμμής, κάθε σημείο της οποίας βρίσκεται σε απόσταση ενός ναυτικού μιλίου προς τη θάλασσα από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων και τα οποία, κατά περίπτωση, εκτείνονται μέχρι του απώτερου ορίου των μεταβατικών 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 τους κατάστασης.

20. "Καλή κατάσταση υπόγειων υδάτων": η κατάσταση υπόγειου 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.

29 "Επικίνδυνες ουσίες": ουσίες ή ομάδες ουσιών που είναι τοξικές, σταθερές και επιρρεπείς σε βιοσυσσώρευση, καθώς και άλλες ουσίες ή ομάδες ουσιών που δημιουργούν ανάλογο βαθμό ανησυχίας.

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.

Άρθρο 4

Περιβαλλοντικοί στόχοι

1. Προκειμένου να καταστούν λειτουργικά τα προγράμματα για τη λήψη μέτρων που καθορίζονται στα σχέδια διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού:

(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 υπογείων 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 ι)·

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 15 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 ι)

iii) τα κράτη μέλη εφαρμόζουν τα αναγκαία μέτρα για την αναστροφή κάθε σημαντικής και έμμονης ανοδικής τάσης συγκέντρωσης οιουδήποτε 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.

Άρθρο 8

Παρακολούθηση της κατάστασης των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων και των προστατευόμενων περιοχών

1. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν την κατάρτιση προγραμμάτων για την παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτων, ώστε να υπάρχει συνεκτική και συνολική εικόνα της κατάστασης των υδάτων σε κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού:

- για τα υπόγεια ύδατα, τα προγράμματα καλύπτουν την παρακολούθηση της χημικής και της ποσοτικής τους κατάστασης.

Άρθρο 17

Στρατηγικές για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων

1. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο θεσπίζουν ειδικά μέτρα για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Τα μέτρα αυτά αποσκοπούν στην επίτευξη του στόχου της καλής χημικής κατάστασης των υπογείων υδάτων σύμφωνα με το άρθρο 4 παράγραφος 1 στοιχείο β) και θεσπίζονται βάσει προτάσεως, την οποία υποβάλλει η Επιτροπή εντός δύο ετών από τη θέση σε ισχύ της παρούσας οδηγίας, σύμφωνα με τις διαδικασίες που προβλέπονται στη Συνθήκη.

2. Κατά την υποβολή προτάσεως μέτρων, η Επιτροπή λαμβάνει υπόψη την ανάλυση που διεξήχθη σύμφωνα με το άρθρο 5 και το Παράρτημα II. Τα μέτρα αυτά προτείνονται νωρίτερα αν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα και περιλαμβάνουν:

α) κριτήρια αξιολόγησης της καλής χημικής κατάστασης των υπογείων υδάτων, σύμφωνα με το παράρτημα II σημείο 2.2 και το Παράρτημα V σημεία 2.3.2 και 2.4.5

β) κριτήρια για τον προσδιορισμό σημαντικής και βιώσιμης ανοδικής τάσης και για τον καθορισμό εναρκτήριων σημείων αναστροφής της τάσης που θα χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το Παράρτημα V σημείο 2.4.4.

3. Τα μέτρα που προκύπτουν από την εφαρμογή της παραγράφου 1 περιλαμβάνονται στα προγράμματα των μέτρων που απαιτούνται βάσει του άρθρου 11.

4. Ελλείψει θεσπίσεως κριτηρίων δυνάμει της παραγράφου 2 σε κοινοτικό επίπεδο, τα κράτη μέλη θεσπίζουν τα κατάλληλα κριτήρια το αργότερο πέντε έτη μετά την ημερομηνία έναρξης ισχύος της παρούσας οδηγίας.

5. Ελλείψει θεσπίσεως κριτηρίων δυνάμει της παραγράφου 4 σε εθνικό επίπεδο, η αναστροφή της τάσης λαμβάνει ως εναρκτήριο σημείο της το 75%, κατ' ανώτατο όριο, του επιπέδου των ποιοτικών προδιαγραφών που προβλέπονται στην υφιστάμενη κοινοτική νομοθεσία η οποία εφαρμόζεται στα υπόγεια ύδατα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

2.1. Αρχικός χαρακτηρισμός

Τα κράτη μέλη προβαίνουν σε αρχικό χαρακτηρισμό όλων των συστημάτων υπογείων 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 κλπ., 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 συνδεόμενων 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 συνδεόμενων 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 m^3 ημερησίως κατά μέσον όρο, ή
- των σημείων άντλησης ύδατος προοριζομένου για ανθρώπινη κατανάλωση, τα οποία παρέχουν λιγότερα από 10 m^3 ημερησίως κατά μέσον 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.

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	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. Κατά συνέπεια, η στάθμη των υπόγειων υδάτων δεν υπόκειται σε ανθρωπογενείς μεταβολές που θα οδηγούσαν: - 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 υπογείων υδάτων. 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.

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	Η χημική σύνθεση του συστήματος υπόγειων υδάτων είναι τέτοια ώστε οι συγκεντρώσεις των ρύπων: - 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 υπογείων 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 ανθρώπινες 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 περισσοτέρων 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 υπόγειων 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.