

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**Συνδυασμός μοντελοποίησης και μεθόδων βελτιστοποίησης για τον  
σχεδιασμό διαχείρισης υπογείων υδάτων – Εφαρμογή πεδίου στην  
περιοχή της Χερσονήσου**

**ΜΕΧΛΕΡΗ ΒΑΡΒΑΡΑ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)**

**ΜΑΤΖΑΒΙΝΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ**

**ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**Χανιά**

**Ιούλιος 2005**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Καρατζά Π. Γεώργιο, αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθώς και την Dr. Παπαδοπούλου Μαρία για την άψογη συνεργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κύριο Ματζαβίνο Διονύσιο, επίκουρο καθηγητή και τον κύριο Νικολαΐδη Νικόλαο, αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	3
------------------	---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ.....	10
--	----

1.1 Υδρολογικός κύκλος.....	10
1.2 Ταξινόμηση των υπογείων υδάτων.....	11
1.3 Υδροφορείς.....	11
1.4 Παράμετροι των υδροφορέων.....	12
1.5 Υδραυλική αγωγιμότητα – Νόμος του Darcy.....	13
1.6 Ομοιογένεια και ισοτροπία.....	15
1.7 Γενική μορφή του νόμου του Darcy.....	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ.....	19
---	----

2.1 Εισαγωγή – Η έννοια της υφαλμύρωσης.....	19
2.2 Μεθοδολογία αντιμετώπισης.....	20
2.2.1 Μέθοδοι προσομοίωσης διεπιφάνειας.....	21
2.3 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg.....	21
2.4 Αναλυτικές σχέσεις.....	23
2.4.1 Περιορισμένος υδροφορέας.....	23
2.4.2 Ελεύθερος υδροφορέας.....	24
2.5 Δομή της διεπιφάνειας.....	25
2.6 Τρόποι ελέγχου της υφαλμύρωσης.....	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	28
--	----

3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις και αριθμητικές μέθοδοι.....	28
3.2.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις και απόψεις.....	28

3.2.2 Αριθμητικές μέθοδοι.....	33
3.3 Εννοιολογικό μοντέλο και κατασκευή πλέγματος.....	35
3.3.1 Κατασκευή εννοιολογικού μοντέλου.....	35
3.3.2 Σχεδιασμός πλέγματος.....	36
3.3.3 Προσδιορισμός και μεταφορά παραμέτρων στο πλέγμα.....	42
3.4 Οριακές συνθήκες.....	43
3.4.1 Είδη ορίων.....	43
3.4.2 Θέση ορίων.....	44
3.4.3 Προσομοίωση ορίων.....	46

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ARGUS ONE GIS ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC.....49**

4.1 Εισαγωγή.....	49
4.2 Σύνοψη αναφορά στο λογισμικό του Argus One Gis.....	49
4.3 Περιγραφή του μοντέλου PTC.....	50
4.4 Τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων.....	51
4.4.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις.....	51
4.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	52
4.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.....	54
4.4.4 Η κάθετη παράγωγος.....	55
4.4.5 Η χρονική παράγωγος.....	56
4.5 Οριακές συνθήκες.....	57
4.5.1 Οριακές συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους.....	57
4.5.2 Οριακές συνθήκες καθορισμένης ροής.....	57
4.5.3 Οριακές συνθήκες τρίτου τύπου.....	58
4.6 Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα.....	59
4.7 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων.....	60

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ.....63**

5.1 Εισαγωγικά.....	63
5.2 Κλιματολογικές συνθήκες.....	64
5.2.1 Θερμοκρασία – Ηλιοφάνεια – Σχετική υγρασία–Ηλιακή ακτινοβολία – Μέση	

νέφωση.....	64
5.2.2 Ανεμολογικά στοιχεία.....	66
5.3 Χλωρίδα – Πανίδα.....	67
5.4 Γεωλογία – Υδρογεωλογία.....	68
5.4.1 Υδροπερατοί σχηματισμοί.....	69
5.4.2 Υδατοστεγείς σχηματισμοί.....	71
5.4.3 Διαμόρφωση υπόγειων υδροφοριών και υδρογεωλογικών ενοτήτων της ευρύτερης περιοχής.....	72

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ (ΟΑ).....75**

6.1 Εισαγωγή – Συνδυασμός προσομοίωσης και βελτιστοποίησης.....	75
6.2 Γενικό σχέδιο για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπογείων υδάτων.....	76
6.3 Τα μαθηματικά των προβλημάτων διαχείρισης υπογείων υδάτων.....	83
6.4 Εισαγωγή στην μέθοδο Εξωτερικής Προσέγγισης (ΟΑ).....	88
6.5 Ανάλυση της μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης (ΟΑ).....	90
6.6 Μεθοδολογία της ΟΑ.....	90
6.6.1 Εισαγωγικά.....	90
6.6.2 Ο αλγόριθμος της μεθόδου.....	92
6.6.3 Μαθηματική μορφοποίηση του προβλήματος ελαχιστοποίησης κοίλης συνάρτησης.....	96

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC (ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ).....98**

7.1 Εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο PTC.....	98
7.1.1 Χάρτης.....	99
7.1.2 Υψόμετρα – Αρχικές συνθήκες.....	102
7.1.3 Οριακές συνθήκες.....	102
7.1.4 Βροχοπτώσεις.....	104
7.1.5 Υπόλοιπα στοιχεία.....	105
7.2 Αποτελέσματα του μοντέλου PTC- Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα..	105

7.3 Σχόλια – Παρατηρήσεις.....	109
--------------------------------	-----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ**

<b>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΑ.....</b>	<b>111</b>
--	------------

8.1 Εισαγωγή.....	111
-------------------	-----

8.2 Εισαγωγή στοιχείων στο μοντέλο ΟΑ.....	111
--	-----

8.3 Σενάρια – Αποτελέσματα.....	112
---------------------------------	-----

8.4 Σχόλια – Παρατηρήσεις.....	121
--------------------------------	-----

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>123</b>
--------------------------	------------

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται ένα σημαντικό φαινόμενο με το οποίο έρχονται αντιμέτωπες κυρίως οι παράκτιες περιοχές και είναι το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Πιο συγκεκριμένα η **υφαλμύρωση** υπογείων παράκτιων υδροφορέων είναι αποτέλεσμα της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της εισροής θαλάσσιου νερού στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων. Η περιοχή μελέτης είναι ο Δήμος Χερσονήσου του Νομού Ηρακλείου όπου το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται αρκετά έντονα.

Ο κεντρικός άξονας της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση της υπόγειας ροής στην περιοχή με την χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου ροής υπογείων υδάτων και μεταφοράς ρύπων **PTC (Princeton Transport Code)** καθώς και η εύρεση της βέλτιστης λύσης για τον περιορισμό του φαινομένου της υφαλμύρωσης (βέλτιστη μελλοντική κατάσταση) με την χρήση της μεθόδου **Εξωτερικής Προσέγγισης (Outer Approximation Method – OA)**.

Αρχικά, λοιπόν, παρατίθενται οι βασικές έννοιες της υπόγειας υδρολογίας και γίνεται μια σύντομη αναφορά στα είδη των υδροφορέων καθώς και στα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης και οι τρόποι αντιμετώπισής του καθώς και οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση αυτή. Ακολουθεί αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων με χρήση αριθμητικών μεθόδων, αναφορά στο λογισμικό Argus One Gis και περιγραφή του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code). Το θεωρητικό μέρος της εργασίας ολοκληρώνεται με την σύντομη περιγραφή της περιοχής της Χερσονήσου όσον αφορά τα μορφολογικά, γεωλογικά και κλιματολογικά στοιχεία καθώς και την ανάλυση της μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης (Outer Approximation Method – OA).

Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που εισήχθησαν στο μοντέλο PTC (οριακές συνθήκες, αρχικές συνθήκες, χάρτες, υψόμετρα, βροχόπτωση κ.λ.π.) καθώς και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με την μορφή διαγραμμάτων που δίνουν μια ακριβή εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης του υδροφορέα. Λόγω του ότι η κατάσταση αυτή κρίνεται δυσμενής, είναι απαραίτητο να βρεθεί μια λύση για την αναχαίτιση του φαινομένου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, λοιπόν, έχοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο προσομοίωσης (υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής) περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή της μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης (ΟΑ) και προκύπτουν τέσσερα πιθανά σενάρια που έχουν σαν στόχο να εμποδίσουν την εξέλιξη του φαινομένου της υφαλμύρωσης, καθώς και να το περιορίσουν στον βαθμό που αυτό είναι δυνατόν.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

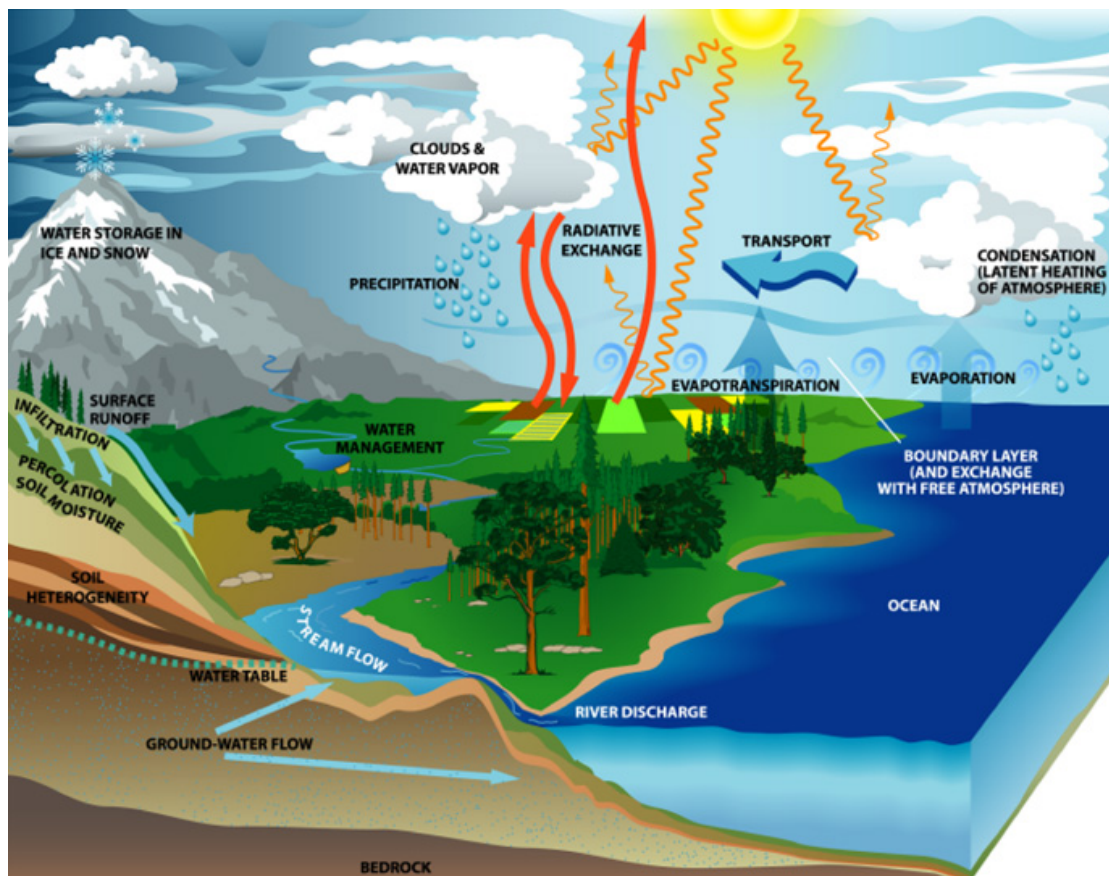
### **ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ**

## 1. Βασικές έννοιες υπόγειας υδρολογίας

### 1.1 Υδρολογικός κύκλος

Με το όρο **υπόγεια ύδατα** νοούνται οι υδάτινες ποσότητες που υπάρχουν μέσα στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για την μελέτη τους είναι αναγκαία η σφαιρική εξέταση του θέματος σε συνδυασμό με την άμεση συσχέτιση με τον ευρύτερο Υδρολογικό Κύκλο.

Σχήμα 1.1 : Ο υδρολογικός κύκλος



Το υδρολογικό ισοζύγιο δίνεται από την σχέση

$$P - R - G - E - T = \Delta S$$

όπου **P**: η βροχόπτωση

**R**: η επιφανειακή απορροή

**G**: η υπόγεια ροή

**E**: η εξάτμιση

**T**: η διαπνοή

**ΔS**: η μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης νερού

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν μόλις το 4% του όγκου των υδάτινων αποθεμάτων του πλανήτη, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ορθολογική ποσοτική και ποιοτική τους διαχείριση (Καρατζάς, 2003).

## 1.2 Ταξινόμηση των υπογείων υδάτων

Τα υπόγεια ύδατα κινούνται σε δύο ζώνες:

- **Την ακόρεστη ζώνη (unsaturated zone)**, όπου όλοι οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και νερό συγχρόνως, εκτός από περιπτώσεις που προσωρινά καταλαμβάνονται μόνο με νερό – περίπτωση πλημμύρας. Περιλαμβάνει και δύο υποζώνες, την ζώνη εδαφικού ύδατος (soil water zone) και την ζώνη τριχοειδών φαινομένων (capillary zone).
- **Την κορεσμένη ζώνη (zone of saturation)**, όπου όλοι οι πόροι είναι πλήρεις με νερό και κάτω από την υδροστατική πίεση. Έχει ως άνω επιφάνεια τον υδροφόρο ορίζοντα όπου η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

## 1.3 Υδροφορείς (Aquifers)

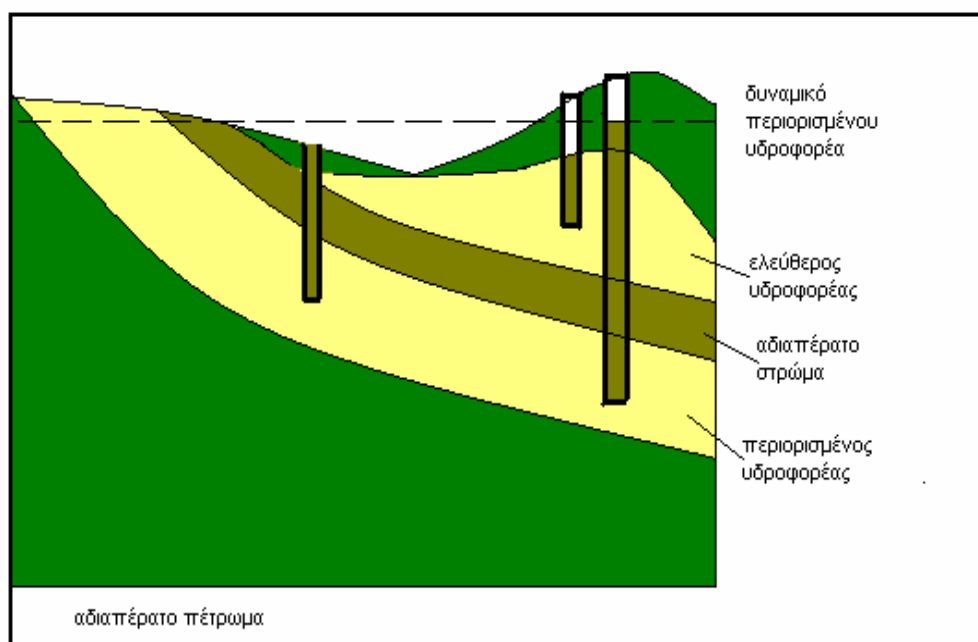
Υδροφορέας είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό, που μπορούν να προμηθεύουν με υδατικές ποσότητες γειτονικά φρέατα και πηγές.

Οι περισσότεροι υδροφορείς εκτείνονται σε μεγάλη έκταση και έτσι μπορούν να θεωρηθούν σαν υπόγειες δεξαμενές.

Οι υδροφορείς ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες με βάση την θέση του υδροφόρου ορίζοντα (Καρατζάς, 2003) :

- **Οι ελεύθεροι υδροφορείς (unconfined aquifers)**, όπου η ανώτερη επιφάνεια τους είναι ο υδροφόρος ορίζοντας.
- **Οι περιορισμένοι ή αρτεσιανοί υδροφορείς (confined aquifers)**, οι οποίοι περιέχουν νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζονται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέραστα στρώματα.

**Σχήμα 1.2 : Περιορισμένος και ελεύθερος υδροφόρας (Navy Environmental Health Center – Environmental Programs, 2003)**



#### 1.4 Παράμετροι των υδροφορέων

Οι υδροφορείς χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να συγκρατούν και να μετακινούν το νερό. Οι βασικές ιδιότητες που τους χαρακτηρίζουν είναι:

- Το πορώδες (porosity)  $[n, \epsilon]$

Πορώδες είναι το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά (κενοί πόροι) και ορίζεται ως

Πορώδες = Όγκος πόρων / Συνολικός όγκος του δείγματος

$$n = \frac{V_v}{V_o}$$

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι:

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

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

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

$$n_e = \frac{V_\gamma}{V_o}$$

όπου  $V_\gamma$ : ο όγκος του νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος του νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων.

$V_o$  : ο συνολικός όγκος του εδάφους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ιζηματογενή πετρώματα δεν έχουν διακυμάνσεις στις τιμές του πορώδους και του ενεργού πορώδους, σε αντίθεση με τα αργιλώδη εδάφη που παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις.

➤ Η ειδική συγκράτηση

Ο όρος ειδική συγκράτηση αναφέρεται στο  $S_r$  όπου:

$$S_r = n - n_e$$

## 1.5 Υδραυλική αγωγιμότητα – Νόμος του Darcy

### ✓ Νόμος του Darcy (Darcy 's Law)

Το 1985 ο Henry Darcy, μελέτησε τη ροή του νερού διαμέσου οριζοντίων 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  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή είναι γνωστή σαν νόμος του Darcy και μαθηματικά εκφράζεται ως:

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

όπου  $Q$  : η παροχή ( $L^3/T$ )

$A$  : η επιφάνεια ( $L^2$ )

$K$  : η υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

$\Delta h$  : η απώλεια φορτίου ( $L$ )

$L$  : το μήκος της στήλης

$q$  : 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  $\Delta h/L$  συνήθως εμφανίζεται στην γενική του μορφή ως  $\Delta h/dL$  και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ο νόμος αυτός ισχύει για αριθμούς Reynolds,  $Re < 1$ . Έχει παρατηρηθεί όμως ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για  $Re = 10$ . Στην περίπτωση των υπογείων υδάτων η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , πράγμα το οποίο εξασφαλίζει την χρήση του νόμου του Darcy χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που έχουμε μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως συμβαίνει κοντά σε ένα φρέαρ άντλησης καθώς και σε περιπτώσεις που έχουμε τυρβώδη ροή, όπως κοντά σε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα (Καρατζάς, 2003).

#### ✓ Ταχύτητα διήθησης (Seepage velocity)

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 ή ταχύτητα διήθησης δίνεται από την σχέση (Καρατζάς, 2003):

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

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

$Q$  : ο ρυθμός παροχής ( $L^3/T$ )

$A$  : η επιφάνεια ( $L^2$ )

$n$  : το πορώδες

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

$K$  : η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

$dh$  : η απώλεια φορτίου (L)

$dl$  : το μήκος της στήλης (L)

#### ✓ Υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity – K)

Εάν θεωρήσουμε μια σειρά πειραμάτων ενός ομοιόμορφου ιδεώδους πορώδους μέσου, το οποίο αποτελείται από υάλινες σφαίρες διαμέτρου  $d$ , ομοιόμορφα

κατανεμημένες, και δια μέσου του οποίου μελετάμε την ροή διαφόρων ρευστών που χαρακτηρίζονται από την πυκνότητά τους  $\rho$ , το ιξώδες  $\mu$ , και σταθερή υδραυλική κλίση  $dh/dl$ , παρατηρούμε ότι:

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

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

Η ειδική διαπερατότητα είναι συνάρτηση μόνο του πορώδους μέσου σε αντίθεση με την υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  και εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας ( $L^2$ ) (Freeze and Cherry, 1979).

#### ✓ Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας (Transmissivity – T)

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας ορίζεται σαν ο ρυθμός με τον οποίο το νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται διαμέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική αγωγιμότητα και εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$T = Kb$$

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

$b$  : το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα ( $L$ )

$T$  : ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας ( $L^2/T$ )

Η μεταβιβασιμότητα σε έναν περιορισμένο υδροφορέα είναι σταθερή εφόσον ο υδροφορέας είναι ομογενής και ομοιόμορφου πάχους. Ωστόσο η μεταβιβασιμότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα μεταβάλλεται χωρικά καθώς το κορεσμένο πάχος του εξαρτάται από το υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα (Καρατζάς, 2003).

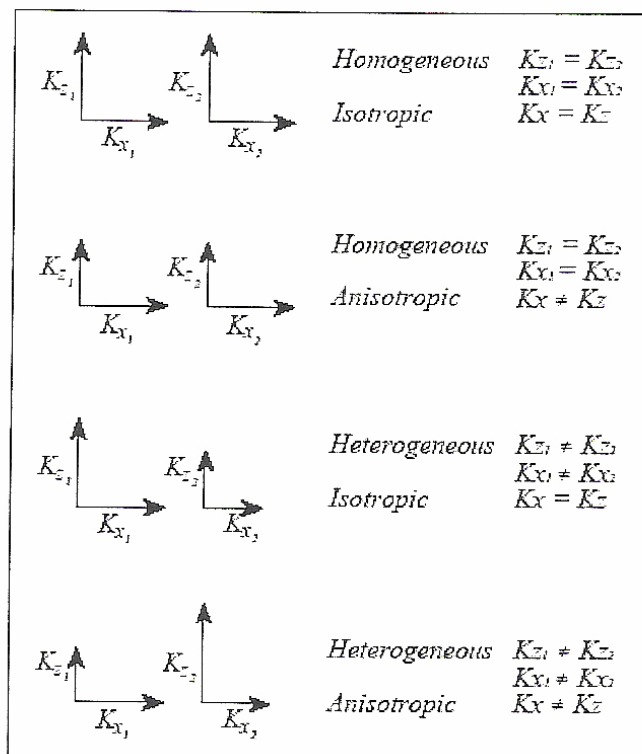
### 1.6 Ομοιογένεια και Ισοτροπία (Homogeneity and Isotropy)

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Σε 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.

Σύμφωνα με τον Καρατζά (2003), για τη ομοιογένεια και ισοτροπία ενός υδροφορέα προκύπτουν οι παρακάτω ορισμοί:

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

**Σχήμα 1.3 : Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας**  
(Freeze and Cherry, 1979).



### 1.7 Γενική μορφή του νόμου του Darcy

Λόγω του φαινομένου της ανισοτροπίας, στην περίπτωση της εφαρμογής του νόμου του Darcy η ταχύτητα της υπόγειας ροής είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες στις τρεις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Εάν ο άξονας του συστήματος των συντεταγμένων είναι κάθετος στην διεύθυνση των στρωμάτων και οι άλλοι παράλληλοι, τότε:

➤ Στην διεύθυνση  $-x$  :  $q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$

➤ Στην διεύθυνση  $-y$ :  $q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$

➤ Στην διεύθυνση  $-z$ :  $q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$

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

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

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

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

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ**

## 2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή – Η έννοια της υφαλμύρωσης

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού καθώς και η μεγάλη βιομηχανική ανάπτυξη έχουν οδηγήσει στην έντονη και ακαταλόγιστη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, με αποτέλεσμα την εξάντληση και την καταστροφή τους. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα του νερού που υπάρχει γίνεται ακόμα πιο έντονο τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο λόγω της υπεράντλησης των υπόγειων υδάτινων συστημάτων, της υποβάθμισης της ποιότητάς τους σε συνδυασμό με την υπερβολική εκμετάλλευση των επιφανειακών υδάτων για την κάλυψη της έντονης ζήτησης νερού άρδευσης και ύδρευσης.

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπόγειων υδάτων παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της εισροής θαλασσιού νερού στο σύστημα των υδροφορέων. Το γλυκό νερό, επειδή είναι ελαφρότερο και επιπλέει πάνω από το αλμυρό, δημιουργεί αλμυρή σφήνα στον πυθμένα. Η εισροή αυτή μπορεί να είναι μόνιμη ή συνηθέστερα μη μόνιμη. Αποτέλεσμα της διείσδυσης της θάλασσας είναι η υφαλμύρωση των εν λόγω υδροφορέων.

Ο όρος **υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων** αναφέρεται στην συνύπαρξη γλυκού και υφάλμυρου νερού στους υδροφορείς. Πιο συγκεκριμένα η υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς.

Αίτια της διείσδυσης θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς:

#### ➤ Φυσικοί λόγοι

- ◆ Κλιματικές συνθήκες
- ◆ Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας
- ◆ Θαλασσινό νερό που διείσδυσε στους υδροφορείς κατά το παρελθόν
- ◆ Υπολείμματα εξάτμισης νερού σε παλιρροιακές λίμνες, κοιλάδες
- ◆ Νερό από αρδευόμενη γη που καταλήγει σε ρυάκια
- ◆ Αλάτι από δόμους αλατιού, λεπτές στρώσεις αλατιού ή από διασπορά σε γεωλογικούς σχηματισμούς.

➤ **Ανθρωπογενείς παράγοντες**

- ◆ Υπεράντληση των υδροφορέων
- ◆ Λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προέλευσης

Όταν ο ρυθμός άντλησης σε πηγάδια κοντά στην θάλασσα υπερβεί τον ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε το θαλάσσιο νερό εισρέει στους υδροφορείς. Με αυτό τον τρόπο οι υδροφορείς παύουν να αποτελούν πηγή πόσιμου νερού.

Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο και σε διεθνές επίπεδο και αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα σε πολλές παράκτιες περιοχές ανά τον κόσμο. Είναι χαρακτηριστικό ότι το φαινόμενο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο και για αυτό το λόγο η αντιμετώπισή του συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση. Στον Ελλαδικό χώρο, το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι ιδιαίτερα έντονο και έχει επηρεάσει τις νησιωτικές και παράκτιες περιοχές. Η μείωση των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού έχει σαν αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων και την διείσδυση της θάλασσας στους περισσότερους από αυτούς. Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης κατατάσσεται στην κατηγορία των ιδιαίτερα σύνθετων, μη αντιστρεπτών προβλημάτων ρύπανσης των υπόγειων νερών, με έντονες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Με βάση την Οδηγία 2000/60 για το νερό της Ε.Ε., υπάρχει ανάγκη καθιέρωσης διαδικασιών για την ρύθμιση της άντλησης γλυκού ύδατος και για την παρακολούθηση της ποσότητας και της ποιότητας του, δεδομένου ότι η εξασφάλιση καλής ποιότητας των υπογείων υδάτων επιβάλλει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας, λόγω της φυσικής καθυστέρησης στο σχηματισμό και την ανανέωσή τους (Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 2003).

## **2.2 Μεθοδολογία αντιμετώπισης**

Η υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων, όπως και γενικότερα τα θέματα της διαχείρισης υπόγειων υδάτων, αποτελεί διεπιστημονικό αντικείμενο και για την αντιμετώπισή της απαιτείται η συνεργασία πολλών ειδικοτήτων. Για την ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου της διείσδυσης της θάλασσας σε έναν υφάλμυρο υδροφορέα, ιδιαίτερη σημασία έχουν η γνώση της θέσης, των ορίων και των γεωλογικών και

υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του συστήματος υπογείων υδάτων, η σχέση του συστήματος με τα επιφανειακά νερά και γειτονικά οικοσυστήματα, η χημική του σύνθεση και οι πιέσεις και επιπτώσεις λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου, 2003).

### 2.2.1 Μέθοδοι Προσομοίωσης Διεπιφάνειας

Σύμφωνα με το 9<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (2003), δύο είναι οι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων:

- **Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους**, λόγω υδροδυναμικής διασποράς (Pinder and Cooper, Henry). Η διεξόδυση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Θεωρείται ότι υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά (δύο συνιστώσες μιας φάσης) και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή).
- **Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης)**, εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα (Ghyben and Herzberg). Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς την θάλασσα πάνω από αυτήν. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή. Υπό προϋποθέσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή της οριζόντιας ροής.

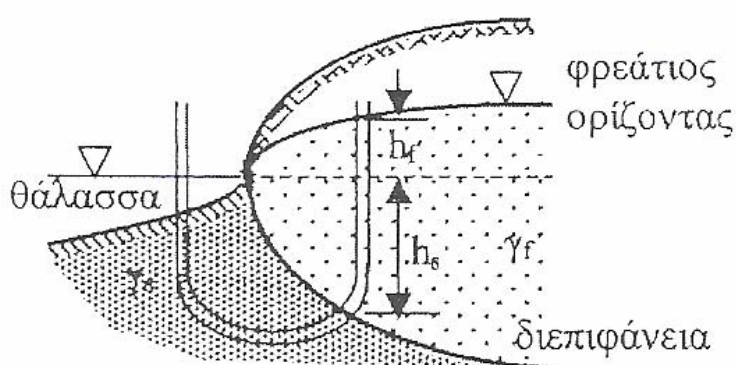
### 2.3 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, η στάθμη του θαλάσσιου νερού δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας αλλά κάτω από αυτό και πιο συγκεκριμένα 40 περίπου φορές την διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή, γνωστή με το όνομα Ghyben and Herzberg, προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού. Η υφάλμυρη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στην διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή του Dupuit. Ορίζοντας  $h_f$  το ύψος γλυκού νερού πάνω από την

στάθμη της θάλασσας και  $h_s$  την θέση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτήν,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_s$ , τα ειδικά βάρη του γλυκού και του αλμυρού νερού αντίστοιχα και εισάγοντας την σταθερά Ghyben and Herzberg  $\delta$ , ισχύει:

$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \equiv \delta h_f \quad (2.1)$$

**Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben-Herzberg (Πρακτικά 9<sup>ο</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 2003)**



Στην πραγματικότητα, η προσέγγιση αυτή δεν απεικονίζει την πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας, δεδομένου ότι:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, ιδιαίτερα στην επιφάνεια διαστάλαξης του γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η προσέγγιση Ghyben and Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα ή αντίστροφα.
- Η προσέγγιση Ghyben and Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση ελεύθερων υδροφορέων την επιφάνεια διήθησης.

Παρ' όλες τις παραπάνω παρατηρήσεις, η εξίσωση αυτή αποδεικνύεται ένα σημαντικό εργαλείο, που επιτρέπει με απλό τρόπο την εύρεση προσεγγιστικά της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού. Εφ' όσον είναι γνωστές οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας ή τα πιεζομετρικά φορτία, μπορεί να εκτιμηθεί το κάτω όριο της ροής και να ελεγχθεί εάν συμπίπτει με το αδιαπέρατο όριο του υδροφορέα ή

εάν υπάρχει διείσδυση της θάλασσας σε αυτόν (Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 2003).

## 2.4 Αναλυτικές σχέσεις

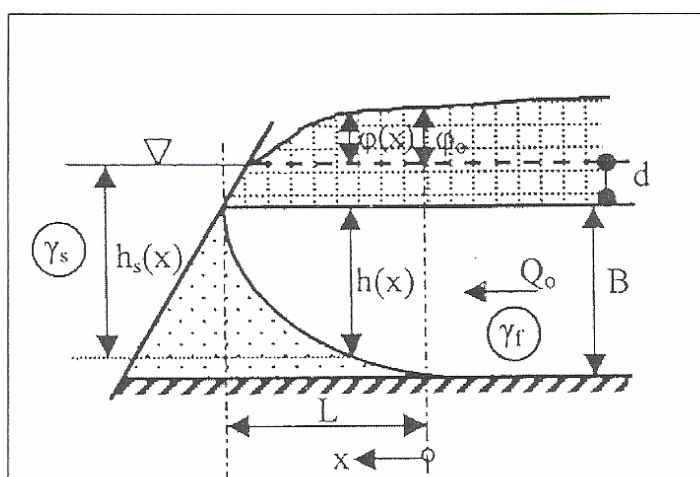
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται απλές αναλυτικές σχέσεις για ακίνητη διεπιφάνεια (μόνιμη ροή) σε κατακόρυφο επίπεδο. Για μόνιμη ροή γλυκού νερού και ακίνητη στρώση θαλάσσιου νερού και ομογενή υδροφορέα καθώς και με την παραδοχή της οριζόντιας ροής, μπορούν να εξαχθούν αναλυτικοί τύποι για την διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού για περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς.

### 2.4.1 Περιορισμένος υδροφορέας

Για τον περιορισμένο υδροφορέα υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$ , πάχους  $B$ , βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας  $d$ , λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του Darcy και την προσέγγιση Ghyben and Herzberg, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις μεταξύ του μήκους της υφάλμυρης σφήνας  $L$ , της παροχής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα  $Q_o$  και του πιεζομετρικού φορτίου  $\phi_o$ . Επίπεδο αναφοράς θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας:

$$Q_o L = \frac{K\phi_o}{2} (\delta\phi_o - 2d) + \frac{Kd^2}{2d} = \frac{K}{2\delta} B^2 \quad (2.2)$$

**Σχήμα 2.2: Σχηματική παράσταση περιορισμένου υδροφορέα (Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 2003)**



### 2.4.2 Ελεύθερος υδροφορέας

Αντίστοιχη ανάλυση γίνεται και για τους ελεύθερους υδροφορείς, όπου λαμβάνοντας υπόψη την κατακόρυφη διήθηση  $N = \text{σταθερό}$  ή  $N = N(x)$  καθώς και τον νόμο του Darcy και την προσέγγιση Ghyben and Herzberg, προκύπτει μετά από ολοκλήρωση η αντίστοιχη σχέση για την μορφή της διεπιφάνειας. Επίπεδο αναφοράς των  $h_f$  και  $h$  θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας:

$$\varphi_o^2 = \frac{2Q_o L + NL^2}{K(1+\delta)} \quad \text{ή}$$

$$Q_o = \frac{KB^2}{2L} - \frac{(1+\delta)}{\delta^2} \cdot \frac{NL}{2}, \quad \varphi_o = \frac{B}{\delta} \quad (2.3)$$

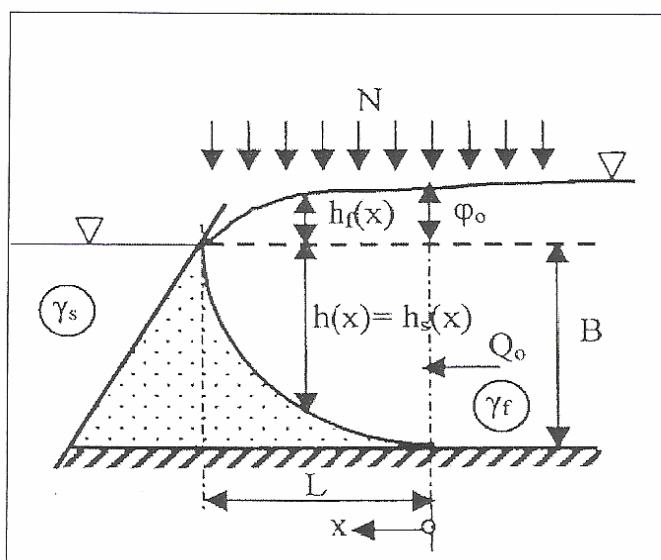
όπου  $Q_o$  : η παροχή του γλυκού νερού στην άκρη της διεπιφάνειας

$K$  : η υδραυλική αγωγιμότητα

$B$  : η απόσταση της βάσης του υδροφορέα από την επιφάνεια της θάλασσας

$\varphi_o$  : το πιεζομετρικό φορτίο στην άκρη του υδροφορέα

**Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση ελεύθερου υδροφορέα (Πρακτικά 9<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 2003)**

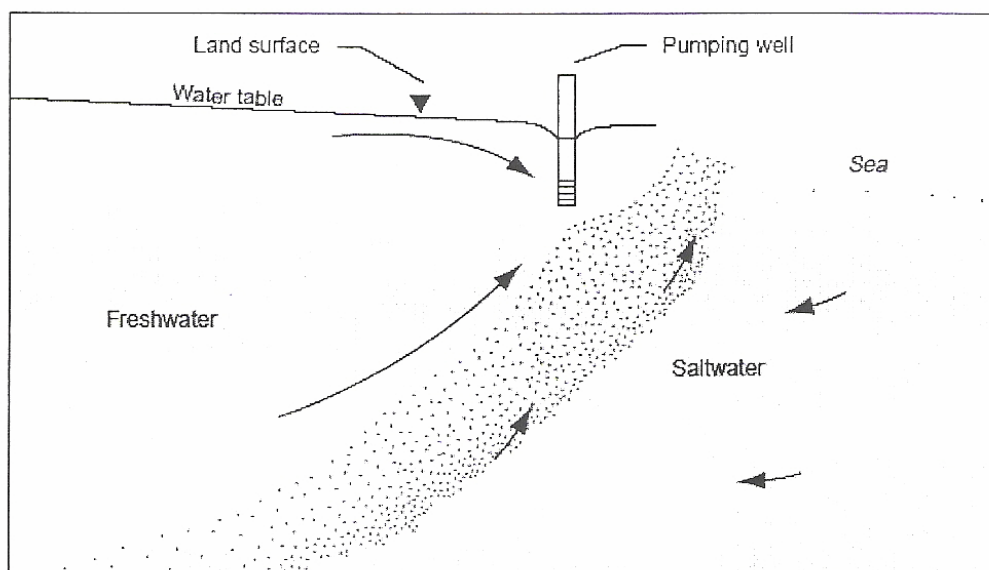


## 2.5 Δομή της διεπιφάνειας

Από μετρήσεις πεδίου προκύπτει ότι η διεπιφάνεια της ζώνης υφαλμύρωσης δεν ανταποκρίνεται στην μαθηματική έννοια της ‘επιφάνειας’, αλλά πρόκειται για μια ζώνη μεταβλητού πάχους από υφάλμυρο νερό. Η ζώνη αυτή είναι αποτέλεσμα διάφορων εξωτερικών επιδράσεων όπως η φύση της φόρτισης και αναφόρτισης του γλυκού νερού, η παλιρροιακή δράση και ο τρόπος άντλησης. Οι επιδράσεις αυτές προκαλούν τη συνεχή μετατόπιση της διαχωριστικής επιφάνειας προς νέα θέση ισορροπίας. Η διάχυση που προκαλείται από κάθε κίνηση οδηγεί σε σχηματισμό μεταβατικής ζώνης βαθμιαίας ανάπτυξης και αλατότητας.

Η διάχυση εξαρτάται από τον συντελεστή διάχυσης του υδροφόρου ορίζοντα και την απόσταση που διασχίζει το υπόγειο νερό. Το πάχος της μεταβατικής ζώνης ανάμιξης σε κάθε θέση εξαρτάται από τον συντελεστή διάχυσης, από τη κατάσταση ή μη ισορροπίας του γλυκού νερού, την περατότητα και την παλίρροια. Καθώς το αλατούχο νερό διαχέεται προς τα πάνω στην μεταβατική ζώνη ανάμιξης λόγω διακυμάνσεων, ένα μέρος κατευθύνεται προς τη θάλασσα λόγω της ροής του γλυκού νερού, πράγμα που δημιουργεί μικρές διαβαθμίσεις στην πυκνότητα και συνεπάγεται ένα αργό δίκτυο ροής προς την ξηρά του αλμυρού νερού.

**Σχήμα 2.4 : Ροή υπογείου νερού και η ζώνη διασποράς σε έναν παράκτιο ομοιογενή υδροφόρο (www.water.usgs.gov)**



## 2.6 Τρόποι ελέγχου της υφαλμύρωσης

Λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης αλατιού που υπάρχει στο θαλασσίνο νερό, ένα μικρό ποσοστό αυτού (2%) εάν αναμιχθεί με γλυκό νερό σε έναν υδροφορέα, τότε είναι δυνατόν τα νερά του να γίνουν υφάλμυρα. Εάν αρχίσει η διείσδυση του θαλασσινού νερού προς τον υδροφορέα τότε το φαινόμενο είναι δυνατόν να διαρκέσει πολλά χρόνια και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολα αναστρέψιμο. Για τον έλεγχο της υφαλμύρωσης έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι (Chester D. Rail, 1989). Ορισμένες από αυτές είναι οι ακόλουθες:

### ➤ Έλεγχος της άντλησης:

Εάν η άντληση από έναν παράκτιο υδροφορέα μειωθεί η μετατοπιστεί η θέση του πηγαδιού, τότε η στάθμη του υδροφορέα είναι δυνατόν να αυξηθεί με αποτέλεσμα να μειωθεί η κίνηση του νερού προς τη θάλασσα και έτσι να περιοριστεί το φαινόμενο της υφαλμύρωσης (Chester D. Rail, 1989).

### ➤ Τεχνητή αναπλήρωση:

Η υφαλμύρωση περιορίζεται με την τεχνητή αναπλήρωση από φυσικά επιφανειακά ύδατα ή επεξεργασμένα ύδατα καθώς και από πηγάδια εμπλουτισμού. Έτσι αυξάνονται τα επίπεδα του υπόγειου υδροφορέα και στην ουσία λειτουργούν σαν ένα φράγμα και εμπλουτίζουν την θαλάσσια εισχώρηση (Chester D. Rail, 1989).

### ➤ Ανάπτυξη υποθαλάσσιων φραγμάτων:

Κατασκευάζοντας ένα αδιαπέραστο υποθαλάσσιο φράγμα κατά μήκος της ακτής είναι δυνατόν το φαινόμενο να προληφθεί ή και ακόμα να περιοριστεί. Ωστόσο με αυτή τη μέθοδο πρέπει να υπολογίζεται και τυχόν διαρροή που οφείλεται στην διαβρωτική επίδραση της θάλασσας ή από κανένα σεισμό (Chester D. Rail, 1989).

### ➤ Συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης του γλυκού νερού:

Η συντήρηση της επιμέρους ανύψωσης του γλυκού νερού στα παράκτια είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς με αυτό τον τρόπο προλαμβάνεται η θαλάσσια διείσδυση. Η συντήρηση αυτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την αποφυγή της άντλησης του υδροφορέα κατά μήκος της ακτής (Chester D. Rail, 1989).

### ➤ Κατασκευή πηγαδιών:

Με αυτή την μέθοδο υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της κίνησης του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με επιφανειακές λεκάνες διήθησης (Chester D. Rail, 1989).

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

#### **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ**

### 3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Αρκετά συχνά οι υδρογεωλόγοι και μηχανικοί καλούνται να μελετήσουν προβλήματα που σχετίζονται με την συμπεριφορά συστημάτων ροής υπογείων υδάτων. Ο καλύτερος δυνατός τρόπος που μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτοί οι επιστήμονες για την επίλυση αυτών των προβλημάτων είναι η χρήση ενός μοντέλου ροής υπογείων υδάτων.

Μοντέλο καλείται οποιοδήποτε εργαλείο που αντιπροσωπεύει την προσέγγιση μιας κατάστασης στο πεδίο. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μοντέλων. Το *φυσικό* μοντέλο (π.χ. εργαστηριακές στήλες άμμου) προσομοιώνει την υπόγεια ροή άμεσα, ενώ το *μαθηματικό* μοντέλο προσομοιώνει την υπόγεια ροή έμμεσα.

Στην περίπτωση των μαθηματικών μοντέλων χρησιμοποιείται μια θεμελιώδης εξίσωση που αντιπροσωπεύει τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα καθώς και άλλες εξισώσεις για την περιγραφή των υδραυλικών υψών ή των παροχών κατά μήκος των ορίων του μοντέλου και αποτελούν τις οριακές συνθήκες. Για προβλήματα που εξαρτώνται από τον χρόνο, οι εξισώσεις που περιγράφουν την αρχική κατάσταση για τα υδραυλικά ύψη του συστήματος είναι αναγκαίες (αρχικές συνθήκες). Τα μαθηματικά μοντέλα επιλύονται είτε με αναλυτικές είτε με αριθμητικές μεθόδους, που απαιτούν την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

#### 3.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις και αριθμητικές μέθοδοι

##### 3.2.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις και απόψεις

Υπάρχουν δύο δυνατοί τρόποι προσέγγισης των συστημάτων υπόγειας ροής σύμφωνα με τους Mary P. Anderson και William W. Woessner, 1992:

- Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint).
- Η προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint).

Η προσέγγιση του υδροφορέα βασίζεται στην ιδέα του περιορισμένου (confined) και ελεύθερου (unconfined) υδροφορέα. Ο υδροφορέας είναι μία μονάδα πορώδους υλικού ικανού να αποθηκεύει και να μεταφέρει σημαντικές ποσότητες νερού στα πηγάδια. Ένας περιορισμένος υδροφορέας καλύπτεται στο πάνω μέρος του από ένα αδιαπέραστο στρώμα (confining bed), μια μονάδα με πορώδες υλικό που επιβραδύνει

την κίνηση του νερού, ενώ ο ελεύθερος υδροφορέας έχει ως ανώτερο όριο τον υδροφόρο ορίζοντα. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση ροής στα πηγάδια άντλησης και είναι η βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις περιλαμβανομένων και αυτών των Theim, Theis και Jacob. Επιπρόσθετα, η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι οριζόντια διαμέσου του υδροφορέα και κάθετη διαμέσου των αδιαπέρατων στρωμάτων. Η ικανότητα του υδροφορέα να μεταφέρει νερό περιγράφεται από την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) ή την μεταβιβασιμότητα (transmissivity). Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή εάν ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και σταθερού πάχους, ενώ στην περίπτωση ενός ελεύθερου υδροφορέα ποικίλλει χωροταξικά και εξαρτάται από το κορεσμένο στρώμα και την ανύψωση του νερού.

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει δισδιάστατη οριζόντια ροή τόσο για περιορισμένους όσο και για ελεύθερους υδροφορείς και τρισδιάστατη ροή στην περίπτωση περιορισμένων υδροφορέων με διαρροή. Τα υδραυλικά ύψη στα αδιαπέρατα στρώματα δεν τυγχάνουν ενδιαφέροντος και γι' αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση, ενώ οι ισοδυναμικές γραμμές χαράζονται μόνο για τον περιορισμένο υδροφορέα.

Μια γενική μορφή της θεμελιώδους μαθηματικής εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (3.1)$$

όπου

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

όπου  $h$  το υδραυλικό ύψος

$T_x, T_y$  οι συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας στους άξονες  $x$  και  $y$

$S$  ο συντελεστής αποθηκευτικότητας

$R$  ένας όρος πηγής/δεξαμενής που είναι θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού

$L$  η διαρροή διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος

$K$  η υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος

$b'$  το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος

$h_{source}$  το υψόμετρο της πηγής

Οι όροι που βρίσκονται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (3.1) αφορούν την οριζόντια ροή διαμέσου ενός περιορισμένου υδροφορέα.

Η εφαρμογή της εξίσωσης (3.1) σε ελεύθερο υδροφορέα ακολουθεί τις παραδοχές Dupuit:

- Οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες.
- Η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας.

Στην προσέγγιση συστήματος ροής δεν είναι απαραίτητη η αναγνώριση των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων, αλλά η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει κάθετη και οριζόντια ροή του συστήματος σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο προφίλ.

Μια γενική μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης είναι:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left( K_x \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left( K_y \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left( K_z \frac{\theta h}{\theta z} \right) = S_s \frac{\theta h}{\theta t} - R^* \quad (3.2)$$

όπου

$K_x, K_y, K_z$  οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας

$S_s$  η ειδική αποθηκευτικότητα

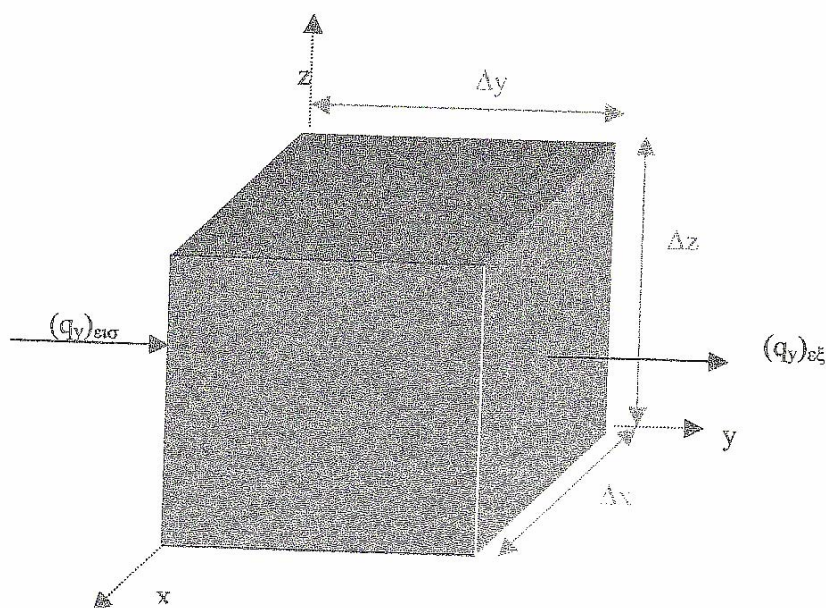
$R^*$  ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου

Η εξίσωση (3.2) εξάγεται συνδυάζοντας μαθηματικά την εξίσωση της ισορροπίας του νερού με τον νόμο του Darcy. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένας κύβος ενός πορώδους υλικού αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να αντιπροσωπεύσει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρός ώστε να μην παρατηρούνται αλλαγές στα υδραυλικά ύψη. Αυτός ο κύβος είναι γνωστός ως αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (σχήμα 3.1). Ο όγκος του κύβου ισοδυναμεί με το γινόμενο  $\Delta x \Delta y \Delta z$  και η ροή του νερού εκφράζεται με τον ρυθμό εκφόρτισης  $q$  όπου  $q$  είναι το διάνυσμα το οποίο

μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα τριών συστατικών με την βοήθεια των μοναδιαίων διανυσμάτων  $i_x, i_y, i_z$  κατά μήκος των αξόνων  $x, y, z$

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (3.3)$$

**Σχήμα 3.1 : Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξισώσεων**



Η εξίσωση της ισορροπίας του νερού ή η συγκέντρωση της μάζας είναι:

$$\text{Εκροή} - \text{Εισροή} = \text{Μεταβολή Αποθηκευτικότητας} \quad (3.4)$$

Θεωρώντας ότι η ροή πραγματοποιείται κατά μήκος του άξονα  $y$ , η επιφάνεια διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή είναι  $\Delta x \Delta z$ , η εισροή ισούται με  $(q_y)_{in}$  και η εκροή με  $(q_y)_{out}$ . Οπότε ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής κατά μήκος του άξονα  $y$  ισούται με:

$$[(q_y)_{out} - (q_y)_{in}] \Delta x \Delta z \quad (3.5)$$

$$\frac{(q_y)_{out} - (q_y)_{in}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3.6)$$

ή αν παραλείψουμε τους όρους IN και OUT, ο ρυθμός ροής στον άξονα  $y$  γίνεται:

$$\frac{\theta q_y}{\theta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3.7)$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να εκφράσουμε τον ρυθμό ροής κατά μήκος των αξόνων x και z. Η ολική αλλαγή του ρυθμού ροής διαμέσου του όγκου ισούται με την μεταβολή της αποθηκευτικότητας και εκφράζεται ως

$$\left( \frac{\theta q_x}{\theta x} + \frac{\theta q_y}{\theta y} + \frac{\theta q_z}{\theta z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Μεταβολή της αποθηκευτικότητας} \quad (3.8)$$

Επίσης εάν εξετάσουμε και την περίπτωση να έχουμε πηγάδι άντλησης ή πηγάδι έκχυσης, ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής αντιπροσωπεύεται από τον όρο  $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$ , όπου  $R^*$  είναι ένας θετικός όρος στην περίπτωση όπου έχουμε πηγάδι έκχυσης και αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου. Το αποτέλεσμα είναι:

$$\left( \frac{\theta q_x}{\theta x} + \frac{\theta q_y}{\theta y} + \frac{\theta q_z}{\theta z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Μεταβολή της αποθηκευτικότητας} \quad (3.9)$$

Οι μεταβολές της αποθηκευτικότητας ορίζονται από την ειδική αποθηκευτικότητα  $S_s$ , η οποία ορίζεται ως ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται ανά μοναδιαία μεταβολή υδραυλικού ύψους και ανά μοναδιαίο όγκο υδροφορέα.

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (3.10)$$

Το  $\Delta V$  είναι θετικό όταν το  $\Delta h$  είναι αρνητικό, δηλαδή με άλλα λόγια απελευθερώνεται νερό από τον υδροφορέα όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται, οπότε ο ρυθμός αλλαγής της αποθηκευτικότητας είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.11)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.10) και (3.11) και διαιρώντας με τον όγκο  $\Delta x \Delta y \Delta z$  καταλήγουμε στην εξίσωση

$$\frac{\theta q_x}{\theta x} + \frac{\theta q_y}{\theta y} + \frac{\theta q_z}{\theta z} = -S_s \frac{\theta h}{\theta t} + R^* \quad (3.12)$$

Ο Νόμος του Darcy χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την σχέση μεταξύ των  $q$  και  $h$ . Στις τρεις διαστάσεις γράφεται με την μορφή

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\theta h}{\theta x} \\ q_y &= -K_y \frac{\theta h}{\theta y} \\ q_z &= -K_z \frac{\theta h}{\theta z} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Στις εξισώσεις (3.1) και (3.2) θεωρήθηκε ότι οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας (άρα και της μεταβιβασιμότητας) είναι παράλληλες με τους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Εάν ωστόσο, λόγω της γεωλογίας της περιοχής, αυτό δεν συμβαίνει, τότε το διάνυσμα των υδραυλικών αγωγιμοτήτων γράφεται με την παρακάτω μορφή:

$$\overline{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

### 3.2.2 Αριθμητικές μέθοδοι

Στην μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αριθμητικές μέθοδοι:

- Οι πεπερασμένες διαφορές
- Τα πεπερασμένα στοιχεία
- Οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Η μέθοδος της οριακής ολοκληρωμένης εξίσωσης
- Τα αναλυτικά στοιχεία

Από αυτές τις μεθόδους οι πιο διαδεδομένες είναι οι δύο πρώτες, *οι πεπερασμένες διαφορές* και *τα πεπερασμένα στοιχεία*. Αντίθετα οι υπόλοιπες σχετίζονται με νέες τεχνικές και δεν είναι συχνά εφαρμόσιμες.

Ένα πρόγραμμα ενός υπολογιστή ή ένας κώδικας επιλύει ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται προσεγγίζοντας τις χωρικές διαφορικές εξισώσεις (θεμελιώδης εξίσωση, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες) που αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Προσεγγιστικές τεχνικές όπως οι πεπερασμένες διαφορές και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, που ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο, το μετατρέπουν σε μια μορφή που μπορεί να επιλυθεί εύκολα με την χρήση υπολογιστή. Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με αυτό τον τρόπο μπορεί να εκφραστεί σαν ένας πίνακας αλγεβρικών εξισώσεων. Η διαδικασία επίλυσης αποτελείται από δύο βήματα:

- Την προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα μαθηματικό μοντέλο και
- Την επίλυση των αποτελεσμάτων με τον πίνακα των αλγεβρικών εξισώσεων.

Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τον χρήστη. Η *μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών* είναι εύκολη τόσο στην κατανόηση όσο και στον προγραμματισμό. Γενικά απαιτούνται λίγα δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος. Από την άλλη, η *μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων* είναι καλύτερη για την προσέγγιση ακανόνιστων σχηματικά ορίων, καθώς είναι ευκολότερη η προσαρμογή των θέσεων των ορίων και του μεγέθους κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Επίσης, τα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα στον χειρισμό εσωτερικών ορίων όπως οι ελαττωματικές ζώνες και μπορούν να προσομοιώσουν σημειακές πηγές, δεξαμενές, επιφάνειες διαρροής και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες καλύτερα από τις πεπερασμένες διαφορές.

Παρόλο που έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, μεταξύ τους υπάρχει μια σημαντική διαφορά. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει την τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, η οποία αποτελεί επίσης το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού που περιτριγυρίζει τον κόμβο. Δεν γίνεται καμία υπόθεση σχετικά με την μορφή της διακύμανσης του υδραυλικού ύψους από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών καθορίζει με ακρίβεια την διακύμανση του υδραυλικού ύψους εντός ενός στοιχείου με χρήση παρεμβολής. Τα

υδραυλικά ύψη υπολογίζονται στους κόμβους για ευκολία, αλλά καθορίζονται με χρήση βασικών συναρτήσεων (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

### **3.3 Εννοιολογικό μοντέλο και κατασκευή του πλέγματος**

#### **3.3.1 Κατασκευή εννοιολογικού μοντέλου**

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί γραφική αναπαράσταση του υπό μελέτη συστήματος υπόγειας ροής. Παρουσιάζεται συνήθως με την μορφή διατομής ή διαγράμματος με κουτιά και καθορίζει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και τον σχεδιασμό του πλέγματος. Η κατασκευή του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η ευκολία στην ανάλυση όσο και η απαιτούμενη πολυπλοκότητα για την σωστή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του συστήματος καθώς και για ακριβείς προβλέψεις του αριθμητικού μοντέλου.

Για την κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου είναι απαραίτητα τρία βήματα:

##### **1. Ο καθορισμός των υδρογραφικών μονάδων**

Γεωλογικές πληροφορίες που περιέχονται σε γεωλογικούς χάρτες συνδυάζονται με δεδομένα της υδρογεωλογίας για να καθοριστούν οι υδρογραφικές μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Κατά την διάρκεια κατασκευή του μοντέλου τα τοπικά συστήματα ροής, οι υδροφορείς και τα αδιαπέραστα στρώματα καθορίζονται έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως βάση των υδρογραφικών μονάδων.

##### **2. Ο καθορισμός του υδατικού μοντέλου**

Οι πηγές του συστήματος καθώς και οι αναμενόμενες κατευθύνσεις ροής και τα σημεία εξόδου πρέπει να αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του μοντέλου. Οι εισροές περιέχουν υπόγεια εναπόθεση από βροχόπτωση, επιφανειακή ροή ή εναπόθεση από επιφανειακά νερά. Οι εκροές περιέχουν εξόδους από ανεξάντλητες πηγές, εναπόθεση σε ρέματα, εξατμισοδιαπνοή και άντληση. Υπόγεια ροή μπορεί να λαμβάνει χώρα τόσο στις εισροές όσο και στις εκροές. Το υδατικό ισοζύγιο όμως θα πρέπει να συγκεντρώνει την έκταση αυτών των ροών και να υπολογίζει τις αλλαγές στη αποθηκευτικότητα του υδροφορέα.

##### **3. Ο καθορισμός του συστήματος της ροής**

Τα υδρογραφικά στοιχεία αποτελούν τη βάση του θεμελιώδους μοντέλου. Οι υδρογραφικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να θεμελιώσουν την κίνηση του υπόγειου νερού του συστήματος ενώ οι πληροφορίες για την βροχόπτωση, την εξάτμιση και την επιφανειακή απορροή όπως επίσης και τα δεδομένα για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία χρησιμοποιούνται περισσότερο για την ανάλυση. Η διάσταση των επιπέδων του νερού χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η γενική διεύθυνση της υπόγειας ροής και του συσχετισμού των υδροφορέων με τα επιφανειακά υδατικά συστήματα. Ο καθορισμός της ροής μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά και μόνο σε φυσικά υδρολογικά δεδομένα. Για να ισχυροποιηθεί όμως το μοντέλο καλό θα ήταν να περιέχει και πληροφορίες από την γεωχημεία όπως η χημεία του νερού, για να εδραιωθεί η κίνηση του, να εκτιμηθεί ο ρυθμός της υπόγειας ροής και να αναγνωριστούν οι πηγές όπως επίσης και το ποσό της ανταλλαγής. Οι χημικές αναλύσεις περιέχουν συγκεντρώσεις των κυριοτέρων κατιόντων ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+2}$ ) και ανιόντων ( $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ) μετρήσεις της θερμοκρασίας, του pH ενώ μπορεί να περιέχει και μετρήσεις για τα βαρέα μέταλλα, ραδιενεργά ισότοπα και οργανικούς ρυπαντές.

### 3.3.2 Σχεδιασμός του πλέγματος

Για την κατασκευή του πλέγματος του αριθμητικού μοντέλου πρέπει να γίνει κατάταξη του μοντέλου όσον αφορά την χωρική του διάταξη. Έτσι υπάρχουν οι παρακάτω κατηγορίες:

- Δισδιάστατα επιφανειακά (aquifer viewpoint)
- Δισδιάστατα profile (flow system viewpoint)
- Ήμι-τριδιάστατα (aquifer viewpoint)
- Τριδιάστατα (flow system viewpoint)

#### Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά είναι κατάλληλα για να μελετήσουν τέσσερις διαφορετικούς τύπους υδροφορέων: τους περιορισμένους υδροφορείς, τους περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή, τους ελεύθερους και τους μεικτούς.

### 1. Περιορισμένοι υδροφορείς

Κατά την προσομοίωση περιορισμένων υδροφορέων, καθορίζεται η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Η μεταβολή στην μεταβιβασιμότητα μπορεί να αντιπροσωπεύει τις αλλαγές στην υδραυλική αγωγιμότητα ή το πάχος του υδροφορέα. Σε ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο η ανισοτροπία στη μεταβιβασιμότητα παρουσιάζεται από την διαφορά της μεταβιβασιμότητας στις κατευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από την βιβλιογραφία, ενώ οι τιμές της μεταβιβασιμότητας και του συντελεστή αποθηκευτικότητας από το τεστ άντλησης (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

### 2. Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

Σε ένα σύστημα περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή, το αδιαπέραστο στρώμα και ο παρακείμενος υδροφορέας που τροφοδοτεί τον περιορισμένο υδροφορέα δεν απεικονίζεται σαφώς στο μοντέλο αλλά εκπροσωπείται από έναν όρο διαρροής (leakance) ο οποίος ισούται με τον λόγο της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας  $K_z$  του αδιαπέραστου στρώματος ως προς το πάχος  $b$  αυτού:

$$leakance = \frac{K_z}{b} \quad (3.15)$$

Η πηγή του νερού σε έναν περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή μπορεί να είναι είτε ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας είτε ένας ελεύθερος είτε ακόμη και επιφανειακά νερά. Το μοντέλο, ανεξάρτητα από το τι είναι η πηγή, υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό με τον χρόνο. Επίσης υποθέτει ότι δεν υπάρχει αποδέσμευση του νερού εντός του αδιαπέραστου στρώματος. Η διαρροή του νερού από το αδιαπέραστο στρώμα πραγματοποιείται σε χρόνο  $t_s$  ο οποίος εξαρτάται από την ειδική αποθηκευτικότητα, την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος του αδιαπέραστου στρώματος (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

### 3. Ελεύθεροι υδροφορείς

Σε αυτούς τους υδροφορείς χρησιμοποιούνται οι παραδοχές του Dupuit οι οποίες εξασφαλίζουν οριζόντια ροή με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν αλλαγές στο υδραυλικό ύψος σε σχέση με το βάθος:

- ✓ Ο υδροφορέας είναι ομογενής και ισότροπος
- ✓ Ο υδροφορέας είναι πρακτικά ασυμπίεστος όπως και το νερό
- ✓ Η επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε ηρεμία, με άλλα λόγια δεν υπάρχει ροή
- ✓ Ο υδροφορέας κατά το χρονικό διάστημα της άντλησης, δεν επανατροφοδοτείται είτε από άμεση κατείσδυση είτε από υπερκείμενο ή υποκείμενο υδροφόρο στρώμα
- ✓ Ισχύει ο Νόμος του Darcy
- ✓ Υπάρχει μόνιμη ροή του νερού και ότι συνεπάγεται αυτό, δηλαδή σταθερή πιεζομετρική επιφάνεια, σταθερή ακτίνα επίδρασης, σταθερές ταχύτητες ροής
- ✓ Υπάρχει συναρμογή της επιφανειακής πτώσης στάθμης με τις εκατέρωθεν επιφάνειες του υπόγειου νερού και ειδικά με την επιφάνεια του νερού μέσα στο πηγάδι
- ✓ Η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας ροής είναι μηδενική ή αμελητέα σε σχέση με την οριζόντια και σαν συνέπεια αυτού σε όλα τα σημεία της κατακόρυφου η ταχύτητα είναι η ίδια

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραδοχές ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μετατρέπεται σε δισδιάστατο ή ακόμη και σε μονοδιάστατο. Το μοντέλο υπολογίζει την στάθμη του υπόγειου νερού για κάθε κόμβο. Η προσομοίωση απαιτεί πίνακες με τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, ενεργού πορώδους και του ύψους από ένα επίπεδο αναφοράς. Τόσο η υδραυλική αγωγιμότητα όσο και το ενεργό πορώδες υπολογίζονται από τεστ άντλησης (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

#### 4. Μεικτοί υδροφορείς

Σε αυτά τα συστήματα υδροφορέα περιέχονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που περιέχονται στις τρεις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

#### **Ημι-τρειςδιάστατα μοντέλα**

Ένα ημι-τρειςδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει μια σειρά από υδροφορείς στους οποίους παρεμβαίνουν αδιαπέραστα στρώματα. Όπως και στα δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα με περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή έτσι και σε ένα ημι-τρειςδιάστατο μοντέλο, τα αδιαπέραστα στρώματα δεν απεικονίζονται σαφώς. Το ίδιο συμβαίνει και με το υδραυλικό ύψος. Η επίδραση των αδιαπέραστων στρωμάτων προσομοιώνεται από έναν όρο διαρροής  $L$  ο οποίος παρουσιάζει την κάθετη ροή ανάμεσα σε δύο υδροφορείς και είναι συνάρτηση της διαρροής (leakance) και της

διαφοράς του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του αδιαπέραστου στρώματος. Όταν υπάρχει διαφορά τάξης μεγέθους μικρότερη από δύο ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέραστου στρώματος και του υδροφορέα, τότε προτιμάται η χρήση του ημι-τρισδιάστατου μοντέλου.

### **Δισδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα**

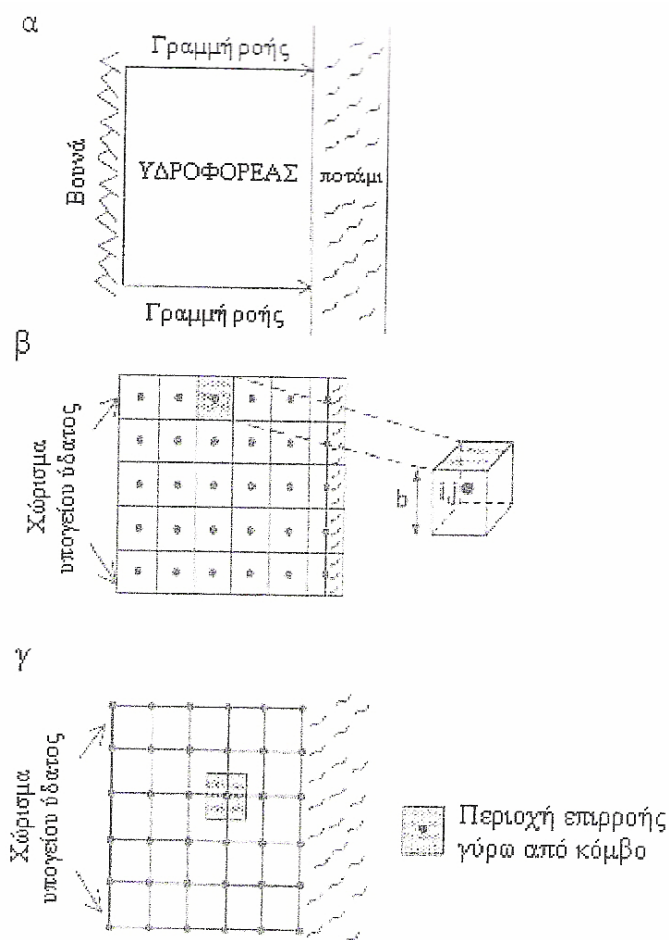
Τα δισδιάστατα profile και τα τρισδιάστατα μοντέλα έχουν ουσιαστικά τα ίδια δεδομένα με ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο με την μόνη διαφορά ότι οι παράμετροι πρέπει να είναι ξεχωριστές για κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα δισδιάστατα profile ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία μοντέλων. Τα δεδομένα όμως είναι παρόμοια με τα δισδιάστατα επιφανειακά και τα τρισδιάστατα.

Αυτή η κατηγορία των μοντέλων χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων όταν η κάθετη κλίση του υδραυλικού ύψους είναι αρκετά μεγάλη. Τόσο οι πεπερασμένες διαφορές όσο και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι αποτελεσματικά για να χρησιμοποιηθούν. Στην περίπτωση όμως όπου έχουμε κίνηση της στάθμης του νερού, τα πεπερασμένα στοιχεία προτιμούνται. Επίσης τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν παροδική απελευθέρωση νερού στα περιορισμένα στρώματα, στα οποία θεωρείται μια τιμή της ειδικής αποθηκευτικότητας.

Για την κατασκευή του πλέγματος το κυριότερο πρόβλημα έγκειται στη συχνότητα των κόμβων σε συνδυασμό με τις πεπερασμένες διαφορές ή τα πεπερασμένα στοιχεία. Το κομβικό πλέγμα θα διευθετήσει τη δομή του μοντέλου, ενώ η επιλογή του κατάλληλου τύπου θα καθορίσει τις γενικές διαστάσεις του πλέγματος. **Τα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών** εμφανίζονται σε δύο τύπους: τα στοιχειο-κεντρικά (block-centered) και τα δικτυο-κεντρικά (mesh-centered). Στα στοιχειο-κεντρικά πλέγματα οι οριακές συνθήκες λαμβάνονται στα άκρα των τετραγώνων ενώ στα δικτυο-κεντρικά οι οριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε κόμβο (Σχήμα 3.2).

Το πιο διαδεδομένο πλέγμα και αυτό που χρησιμοποιείται στα περισσότερα μοντέλα είναι το block-centered. Η επιλογή του μοντέλου αυτού θα καθορίσει για το εάν ένα ή περισσότερα στρώματα απαιτούνται. Εάν ένα μόνο στρώμα χρειάζεται, αυτό θα αντιπροσωπεύει μια απλή υδρογραφική μονάδα. Η χρήση του θεμελιώδους μοντέλου επιτρέπει τον καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν.

**Σχήμα 3.2 : Δισδιάστατα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).**



α. Περιοχή προβλήματος. Οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνονται στη ζώνη των βουνών κατά μήκος των γραμμών ροής. Το ποτάμι διαπερνά πλήρως τον υδροφορέα και μπορεί να αναπαρασταθεί με οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους.

β. Στοιχειο-κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. Οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνονται στις πλευρές των τετραγώνων. Η οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους λόγω του ποταμού λαμβάνεται πάνω στους κόμβους.

γ. Δικτυο-κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. Οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής και σταθερού υδραυλικού ύψους τοποθετούνται ακριβώς πάνω στους κόμβους.

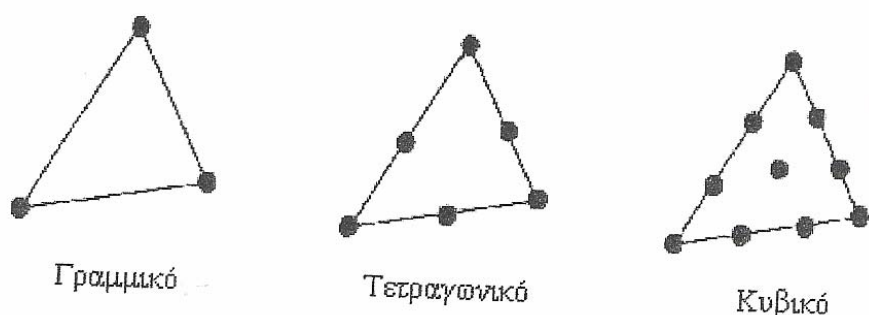
Ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το μέγεθος της απόστασης των κόμβων στην οριζόντια κατεύθυνση όπου είναι συνάρτηση της αναμενόμενης καμπυλότητας του ύψους του νερού ή της ποτενσιομετρικής επιφάνειας. Οι αλλαγές του υδραυλικού ύψους στην κάθετη κατεύθυνση παίζουν σημαντικό ρόλο στην

επιλογή της κάθετης απόστασης των κόμβων. Ένας ακόμη παράγοντας είναι η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του υδροφορέα. Τυπικά τα στρώματα των μοντέλων αντιστοιχούν σε μια υδρογραφική μονάδα. Στην περίπτωση όμως που υπάρχουν σημαντικές κάθετες κλίσεις στο υδραυλικό ύψος, δύο ή και περισσότερα στρώματα μπορούν να αναπαρασταθούν από μια απλή υδρογραφική μονάδα. Γενικά οι αλλαγές στην οριζόντια κατεύθυνση πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερη απόσταση απ' ότι στην κάθετη κατεύθυνση. Τέλος ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει στην επιλογή της απόστασης των κόμβων είναι η έκταση της περιοχής. Προτιμάται ένα πλέγμα με μικρό αριθμό κόμβων, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των δεδομένων και των υπολογισμών για λόγους πρακτικότητας.

Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας δείκτης (i, j, k) που δηλώνει τη γραμμή, τη στήλη και το επίπεδο στο οποίο αυτός βρίσκεται. Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων στις τρεις κατευθύνσεις ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) συνήθως μεταβάλλονται προσφέροντας μεγαλύτερη ευχέρεια, εισάγεται όμως έτσι μεγαλύτερο λάθος στη λύση. Για τον περιορισμό του και για την εξάπλωση του πλέγματος επιβάλλεται η απόσταση μεταξύ των κόμβων να μην αυξάνεται περισσότερο από 1,5 φορές της προηγούμενης απόστασης.

**Τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων** προσφέρουν μεγαλύτερη ευχέρεια στον σχεδιασμό του πλέγματος. Το είδος της παρεμβολικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο καθορίζει εάν αυτό θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό (Σχήμα 3.3).

**Σχήμα 3.3 : Δισδιάστατα τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία** (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).



Τα εισαγόμενα δεδομένα που απαιτούνται είναι περισσότερα απ' ότι σε ένα πλέγμα πεπερασμένων διαφορών και περιλαμβάνουν την αρίθμηση των κόμβων και των στοιχείων, τις συντεταγμένες (x, y, z) κάθε κόμβου και τους κόμβους που σχετίζονται με κάθε στοιχείο. Κάθε στοιχείο αντιμετωπίζεται ξεχωριστά και στη συνέχεια οι

εξισώσεις όλων των στοιχείων συνδυάζονται σε μια γενική εξίσωση. Για την ελαχιστοποίηση των αριθμητικών λαθών απαιτείται ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση κάθε στοιχείου να είναι κοντά στη μονάδα ή γενικά να μην ξεπερνάει το πέντε (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

### 3.3.3 Προσδιορισμός και μεταφορά παραμέτρων στο πλέγμα

Τα δεδομένα που χρειάζονται για το μοντέλο ροής υπογείων υδάτων είναι τόσο φυσικά, αφορούν δηλαδή τη γεωμετρία του συστήματος (π.χ. πάχος και έκταση των υδροστρωματογραφικών μονάδων), όσο και υδρογεωλογικά (π.χ. υδραυλικά ύψη, πυκνότητα ροής, χαρακτηριστικά υδροφορέα). Η εύρεση των στοιχείων αυτών είναι σχετικά δύσκολη και απαιτεί σε πολλές περιπτώσεις εργασία στο πεδίο, ειδικά όταν τα στοιχεία από ήδη υπάρχουσες αναφορές κρίνονται ανεπαρκή.

Στην προσομοίωση ανισοτροπικών μέσων απαιτούνται πληροφορίες για τις τρεις κύριες συνιστώσες του διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ . Η οριζόντια ανισοτροπία μπορεί να αναπαρασταθεί με την αναλογία μεταξύ των  $K_x$  και  $K_y$  ενώ η κάθετη με την αναλογία μεταξύ των  $K_x$  και  $K_z$ .

Ισοτροπικές υδρογεωλογικές μονάδες που εντοπίζονται στο χώρο μελέτης σε πολύ μικρή κλίμακα είναι αρκετά δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Όταν το πάχος του στρώματος του μοντέλου ( $B_{i,j}$ ) είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του ισοτροπικού στρώματος ( $b_{i,j}$ ), μπορεί να υπολογιστεί η υδρολογικά ισοδύναμη οριζόντια και κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος του μοντέλου από τις σχέσεις:

$$(K_x)_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{K_{i,j,k} b_{i,j,k}}{B_{i,j}} \quad (3.16)$$

$$(K_z)_{i,j} = \frac{B_{i,j}}{\sum_{k=1}^m b_{i,j,k} / K_{i,j,k}} \quad (3.17)$$

$$B_{i,j} = \sum_{k=1}^m b_{i,j,k} \quad (3.18)$$

Ο Hearne (1985) συνέστησε την ακόλουθη εξίσωση που αποδίδεται στον Theis και διορθώνει την επίδραση της στρωματοποίησης κεκλιμένων στρωματογραφικών μονάδων και οι οποίες στο μοντέλο προσομοιώνονται ως οριζόντια στρώματα:

$$\frac{K_x}{K_y} = \frac{R}{1 - (1 - R) \cos^2 A} \quad (3.19)$$

όπου

$K_x$ : η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση x

$K_y$ : η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση y

R: ο λόγος της υδραυλικής αγωγιμότητας στην κατεύθυνση x προς την υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση y

A: η γωνία της κλίσης

Η μεταφορά των δεδομένων πεδίου στο πλέγμα απαιτεί την συμβατότητά τους με την κλίμακα του μοντέλου και την εκχώρηση των χαρακτηριστικών των υδροφορέων σε κάθε υδροστρωματογραφική μονάδα του εννοιολογικού μοντέλου. Επίσης κρίνεται απαραίτητη η παρεμβολή των μετρούμενων δεδομένων ούτως ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η χωρική μεταβλητότητα σε όλο το πεδίο ορισμού του προβλήματος. Σε μοντέλο *πεπερασμένων διαφορών* υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, η οποία αποτελεί το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού πεπερασμένων διαφορών. Σε στοιχειο-κεντρικό πλέγμα, οι ιδιότητες του υδροφορέα και οι τάσεις αποδίδονται στο τετράγωνο που περιβάλλει τον κόμβο. Σε μοντέλο *πεπερασμένων στοιχείων* οι ιδιότητες του υδροφορέα αποδίδονται είτε στον κόμβο είτε στο στοιχείο (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

### 3.4 Οριακές συνθήκες

#### 3.4.1 Είδη ορίων

Γενικά τα μαθηματικά μοντέλα περιέχουν τις θεμελιώδεις εξισώσεις, τις αρχικές συνθήκες και τις οριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εξισώσεις που καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο αυτής (ροή) στα όρια της υπό μελέτη περιοχής.

Η διαφορά μεταξύ *αρχικών* συνθηκών και *οριακών* είναι ότι οι πρώτες περιγράφουν την τιμή μιας παραμέτρου σε κάποιο αρχικό χρόνο ίσο με μηδέν ενώ οι οριακές ορίζουν την αλληλεπίδραση της υπό μελέτη περιοχής με το εξωτερικό της περιβάλλον.

Τα όρια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα φυσικά όρια ενός συστήματος υπόγειας ροής, τα οποία οφείλονται σε φυσικές υπόγειες παρουσίες όπως αδιαπέραστα στρώματα βράχου και μεγάλα επιφανειακά υδατικά σώματα.
- Τα υδραυλικά ή υδρογεωλογικά όρια, τα οποία είναι νοητά και προκύπτουν ως αποτέλεσμα υδρογεωλογικών συνθηκών.

Αυτά αναπαριστώνται με τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992):

- ❖ Τις οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> είδους, δηλαδή τις συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους για τις οποίες το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο (Specified head boundaries-Dirichlet conditions).
- ❖ Τις οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους, δηλαδή τις συνθήκες σταθερής ροής για τις οποίες η ροή είναι δεδομένη (Specified flow boundaries-Neumann conditions).
- ❖ Τις οριακές συνθήκες 3<sup>ου</sup> είδους, δηλαδή τις συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος για τις οποίες η ροή διαμέσου του ορίου υπολογίζεται με βάση ένα δεδομένο υδραυλικό ύψος (Head-dependent flow boundaries - Cauchy or mixed conditions).

### 3.4.2 Θέση ορίων

Όταν καθορίζονται τα όρια θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλα τα γνωρίσματα όπως οι εισροές και οι εκροές, έτσι ώστε η μορφή της ροής που θα προκύπτει από το μοντέλο να ταιριάζει με αυτή του πεδίου. Γενικά συνιστάται η χρήση των φυσικών ορίων επειδή είναι σταθερά στοιχεία του συστήματος ροής. Τα φυσικά όρια είναι:

- Αδιαπέραστοι βράχοι ως κατώτερο όριο του συστήματος
- Σημεία όπου υπάρχει διαφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από δύο τάξεις μεγέθους. Σε αυτή την περίπτωση η υδραυλική αγωγιμότητα προκαλεί διάθλαση στις γραμμές της ροής και στα στρώματα με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα η ροή ουσιαστικά θεωρείται οριζόντια ενώ στα στρώματα με μικρότερη είναι κάθετη.
- Επιφανειακοί υδατικοί αποδέκτες οι οποίοι διεισδύουν ολικά σε υπόγειους υδροφορείς και αποτελούν όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους.
- Αδιαπέραστα στρώματα, ελαττωματικές ζώνες και εισροές αλμυρού νερού σε παραθαλάσσιους υδροφορείς αποτελούν ιδανικά όρια μηδενικής ροής.

Εάν τίποτα από τα παραπάνω δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τότε θα πρέπει να επιλεγούν άλλα τα οποία όμως δεν θα επεμβαίνουν στην επίλυση του μοντέλου αλλά ούτε θα διαμορφώνουν τη ροή του συστήματος διότι θα προκύπτει διαφορετική από αυτή που λαμβάνει χώρας στο πεδίο. Τέτοια όρια είναι τα ακόλουθα:

- Απομακρυσμένα όρια. Σε παροδικές προσομοιώσεις τα όρια είναι δυνατόν να είναι τοποθετημένα αυθαίρετα και μακριά από το κέντρο του πλέγματος, με αποτέλεσμα το υδραυλικό ύψος να μην επηρεάζεται από τις πιέσεις που δέχεται το σύστημα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και η ροή γύρω από τα όρια να παραμένει αμετάβλητη. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί η άντληση νερού μέσω πηγαδιών και υπάρχει περιορισμένος χρόνος, καθώς και όταν υπάρχει εισροή νερού από παρακείμενη πηγή όπως ποτάμι.
- Υδραυλικά όρια. Τα όρια αυτά δεν συμπίπτουν με τα τοπικά και χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν μικρότερα προβλήματα. Μπορεί να είναι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, μηδενικής ροής ή συγκεκριμένης οριακής ροής αλλά μοιάζει με τον τύπο της ροής που λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερα προβλήματα και συχνά καλούνται τεχνητά όρια.

Τα υδραυλικά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν σταθερές συνθήκες ροής όταν χρειάζεται να γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά μπορεί να μην είναι αποδεκτά για παροδικά προβλήματα ή για προβλέψιμες προσομοιώσεις με σταθερές συνθήκες και αυτό διότι το μοντέλο υποθέτει οι συνθήκες στα όρια δεν αλλάζουν από τις αρχικές τους τιμές εκτός και αν αλλάξουν από τον χρήστη του μοντέλου. Κάτω από παροδικές συνθήκες στο πεδίο, τα υδραυλικά ύψη κατά μήκος των υδραυλικών ορίων μπορεί να αλλάξουν λόγω των πιέσεων που δέχονται από το σύστημα και επειδή το μοντέλο δεν επιτρέπει αυτή την αλλαγή, το αποτέλεσμα που θα προκύψει στο εσωτερικό του πλέγματος θα είναι λανθασμένο. Σε αυτή την περίπτωση είτε διευρύνονται τα όρια της υπό μελέτη περιοχής είτε επιλέγονται διαφορετικές τιμές για τις οριακές συνθήκες (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

### **3.4.3 Προσομοίωση ορίων**

Σε πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και δικτυο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, οι κόμβοι συμπίπτουν με τα όρια. Σε στοιχειο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, οι οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους

λαμβάνονται στους κόμβους, ενώ οι οριακές συνθήκες ροής λαμβάνονται στις πλευρές των τετραγώνων.

- ✓ Οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> είδους: Στην περίπτωση αυτή η προσομοίωση γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κόμβους των ορίων ίσο με τις τιμές που έχουν μετρηθεί. Εάν το όριο είναι ποτάμι, τότε το υδραυλικό ύψος κατά μήκος του ορίου μεταβάλλεται χωρικά, ενώ εάν είναι λίμνη ή πηγή το όριο χαρακτηρίζεται από σταθερό υδραυλικό ύψος. Σε δισδιάστατες προσομοιώσεις, οι κόμβοι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύουν επιφανειακά υδατικά σώματα που διεισδύουν ολοκληρωτικά στον υδροφορέα ή το κάθετο μέσο υδραυλικό ύψος. Σε τρισδιάστατα μοντέλα, οι κόμβοι αυτοί αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα της στάθμης του νερού ή επιφανειακά υδατικά σώματα. Σημειώνεται ότι τα καθορισμένα όρια υδραυλικού ύψους αναπαριστούν ανεξάντλητες πηγές νερού και ότι στο υπόγειο σύστημα είναι δυνατόν να συμβαίνουν εισροές και εκροές χωρίς να μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος, κάτι που δεν είναι ρεαλιστικό. Φυσικά μπορεί να αλλάζει η τιμή του υδραυλικού ύψους στα όρια καθώς γίνεται η προσομοίωση, αρκεί η καινούρια τιμή να μπορεί να αιτιολογηθεί.
- ✓ Οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους: Περιγράφουν την ροή σε μάζες επιφανειακού νερού, την ροή νερού από πηγές, την υπόγεια ροή και την διαρροή από και προς υπόγεια πετρώματα, η οποία θεωρείται σταθερή και δεδομένη. Τις περισσότερες φορές είναι προτιμότερες οι συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους διότι είναι πιο εύκολες στον υπολογισμό αλλά και στην βαθμονόμηση. Σε μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, τα όρια καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού με συγκεκριμένο ρυθμό άντλησης. Σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης τοποθετεί την ροή ανάμεσα σε δύο κόμβους και το μοντέλο-κώδικας την επανατοποθετεί.
- ✓ Οριακές συνθήκες 3<sup>ου</sup> είδους: Η ροή διαμέσου του ορίου εξαρτάται από την διαφορά μεταξύ της τιμής του υδραυλικού ύψους που τίθεται από τον χρήστη στην μια πλευρά του ορίου και του υδραυλικού ύψους που υπολογίζεται από το μοντέλο στην άλλη πλευρά. Η διαφορά στα μοντέλα πεπερασμένων

διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στο ότι στα μεν πρώτα υπολογίζεται η ροή για κάθε κελί, στα δε δεύτερα για κάθε κόμβο. Η διαρροή από ή προς ένα ποτάμι, λίμνη ή αποθηκευτικό σώμα μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος και ο ρυθμός διαρροής δίνεται από την σχέση:

$$L = \frac{Q_L}{A} = \frac{K'_z}{b'} (h_{source} - h) \quad (3.20)$$

όπου  $Q_L$  η ογκομετρική παροχή,  $A$  η επιφάνεια του κελιού διαμέσου της οποία λαμβάνει χώρα η διαρροή,  $h_{source}$  το υδραυλικό ύψος στην πηγή (ποτάμι ή λίμνη),  $h$  το υδραυλικό ύψος στον ακριβώς από κάτω ή γειτονικό με την πηγή υδροφορέα,  $K'_z$  η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της κοινής επιφάνειας και  $b'$  το πάχος αυτής.

Οι *συνθήκες μηδενικής ροής* λαμβάνουν χώρα όταν η ροή κατά μήκος των ορίων είναι μηδέν, ενώ τα όρια μηδενικής ροής παρουσιάζονται σε αδιαπέραστους βράχους, ελαττωματικές ζώνες, υπόγεια χωρίσματα ή ακόμη σε περιοχές όπου το θαλασσινό νερό συναντιέται με παραθαλάσσιους υδροφορείς. Σε αυτή την περίπτωση τα υπόγεια νερά του υδροφορέα εκφορτίζονται στην θάλασσα διαμέσου μιας ζώνης διασποράς. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτείται ένα μοντέλο που να επιτρέπει την εισαγωγή των αλληλεπιδράσεων που προέρχονται από την διάχυση και την διασπορά του θαλασσινού νερού.

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια μηδενικής ροής προσομοιώνονται με τον μηδενισμό της μεταβιβασιμότητας ή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα με ενεργά κελιά έξω από τα όρια. Στα περισσότερα μοντέλα θεωρείται μηδενική ροή στα όρια και μόνο ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να παρέμβει και να αλλάξει αυτές τις συνθήκες (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ARGUS ONE GIS**

### **ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC**

## 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ARGUS ONE GIS ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

### 4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι μια σύντομη αναφορά στο λογισμικό Argus One Gis καθώς και μια εκτενής περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code).

### 4.2 Σύντομη αναφορά στο λογισμικό Argus One Gis

Το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών, που χρησιμοποιείται για μοντελοποίηση με την χρήση αριθμητικών μεθόδων. Ασχολείται με τα περισσότερα μοντέλα υπογείων υδάτων που υπάρχουν και χρησιμοποιείται από υδρογεωλόγους για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης των διάφορων υδροφορέων. Με άλλα λόγια, το Argus One αποτελεί ένα ιδανικό περιβάλλον για την μοντελοποίηση της ροής υπογείων υδάτων και περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία μοντέλων που χρησιμεύουν για τον σκοπό αυτό.

**Το Argus One περιλαμβάνει τα ακόλουθα μοντέλα:**

- ❖ **Το MODFLOW**, ένα αρθρωτό τρισδιάστατο μοντέλο υπογείων υδάτων που χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και επιτυγχάνει να προσομοιώσει τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών και να εκτιμήσει παραμέτρους.
- ❖ **Το PTC**, ένα προηγμένο τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών που προσομοιώνει την ροή και μεταφορά υπογείων υδάτων.
- ❖ **Το NAPL**, ένα μοντέλο προσομοίωσης της ρύπανσης του εδάφους και των υδροφορέων από οργανικά υγρά, γνωστά ως υγρά μη υδατώδους φάσης.
- ❖ **Το SUTRA**, ένα μοντέλο που προσομοιώνει την κορεσμένη και ακόρεστη ροή, ροή υγρού σταθερής ή μεταβλητής πυκνότητας και μεταφορά διαλυμένων ουσιών και ενέργειας.
- ❖ **Το HST3D**, ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση ρευστών, διαλυμάτων μιας ουσίας και μεταφοράς θερμότητας στις τρεις διαστάσεις και υπό συνθήκες κορεσμού. Επίσης, επιτρέπει την προσομοίωση της προσρόφησης και της αποσύνθεσης.

Άλλα μοντέλα είναι το **FEMWATER**, το **Acunsaf2d**, το **CFEST** και το **FEM3DmeshE-Pie**.

### 4.3 Περιγραφή του μοντέλου PTC

Το μοντέλο PTC πραγματοποιεί την επίλυση των χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την ροή υπογείων υδάτων και την μεταφορά ρύπων. Έχει σχεδιαστεί κατά βάση για τους πρακτικούς υδρολόγους παρά για θεωρητικούς και επικεντρώνεται στις αριθμητικές μεθόδους και στην βιβλιογραφία που αφορά στις πηγές υδάτων ενώ δεν ασχολείται με τις λεπτομέρειες για την ανάπτυξη εξισώσεων και την ανάλυση σφάλματος.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια αναφορά στις **θεμελιώδεις εξισώσεις** καθώς και η επίλυση του **αλγορίθμου του μοντέλου PTC**.

#### Θεμελιώδεις εξισώσεις

Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για την αναπαράσταση της ροής υπογείων υδάτων, με βάση

- Το υδραυλικό ύψος, **h**

$$\frac{\theta}{\theta x} \left( K_{xx} \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left( K_{yy} \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left( K_{zz} \frac{\theta h}{\theta z} \right) - S \frac{\theta h}{\theta t} + Q = 0 \quad (4.1)$$

- Τις συνιστώσες της ταχύτητας ροής των υπογείων υδάτων

$$V_x = -K_{xx} \frac{\theta h}{\theta x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\theta h}{\theta y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\theta h}{\theta z} \quad (4.2)$$

- Την μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από την συγκέντρωση,

$$\begin{aligned} & \frac{\theta}{\theta x} \left[ D_{xx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{xy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{xz} \frac{\theta c}{\theta z} \right] + \frac{\theta}{\theta y} \left[ D_{yx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{yy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{yz} \frac{\theta c}{\theta z} \right] + \\ & + \frac{\theta}{\theta z} \left[ D_{zx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{zy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{zz} \frac{\theta c}{\theta z} \right] - \left[ V_x \frac{\theta c}{\theta x} + V_y \frac{\theta c}{\theta y} + V_z \frac{\theta c}{\theta z} \right] + \\ & + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\theta c}{\theta t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

όπου

**h** το υδραυλικό ύψος

**K<sub>xx</sub>, K<sub>yy</sub>, K<sub>zz</sub>** οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους αντίστοιχους άξονες

**S** η ειδική αποθηκευτικότητα

Οι υπόλοιπες παράμετροι αναφέρονται στα ακόλουθα κεφάλαια.

Οι παραπάνω εξισώσεις απορρέουν από την αρχή διατήρησης μάζας και από τον Νόμο του Darcy. Η διαδικασία για την επίλυση αυτών των εξισώσεων ακολουθεί την εξής σειρά: πρώτα υπολογίζεται το **υδραυλικό ύψος h** από την εξίσωση (4.1), στη συνέχεια υπολογίζονται οι **ταχύτητες του Darcy V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>z</sub>** από τις εξισώσεις (4.2) και τέλος υπολογίζεται η **συγκέντρωση c** από την εξίσωση (4.3) (Babu et al., 1997).

### **Η επίλυση του αλγόριθμου του μοντέλου PTC**

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω για σύνθετα φυσικά συστήματα απαιτεί γενικά την εφαρμογή μαθηματικών μεθόδων. Για συστήματα πεδίου, όπου για το υπολογιστικό μέλος απαιτούνται τρισδιάστατες εξισώσεις, ο φόρτος εργασίας είναι αρκετά μεγάλος. Το μοντέλο **PTC** εφαρμόζει ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για την επίλυση των τρισδιάστατων αυτών εξισώσεων και μειώνει αισθητά το υπολογιστικό μέρος.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει το πεδίο ορισμού σε οριζόντια και παράλληλα επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία για την ακριβή παρουσίαση του ακανόνιστου πεδίου ορισμού. Τα επίπεδα είναι συνδεδεμένα κάθετα με πεπερασμένες διαφορές. Η διαχωριστική διαδικασία εξασφαλίζεται με την μέθοδο της υδρόβιας ένωσης των πεπερασμένων στοιχείων με τις πεπερασμένες διαφορές. Κατά την διάρκεια της επανάληψης μιας χρονικής περιόδου, όλοι οι υπολογισμοί αποτελούνται από δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, όλα τα οριζόντια πεπερασμένα στοιχεία επιλύονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο ενώ στο δεύτερο βήμα, επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα επίπεδα.

## **4.4 Τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων**

### **4.4.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις**

Το μοντέλο **PTC** καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός συστήματος υπογείων υδάτων επιλύοντας για το υδραυλικό ύψος με την χρήση της ακόλουθης εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left( K_{xx} \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left( K_{yy} \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left( K_{zz} \frac{\theta h}{\theta z} \right) - S \frac{\theta h}{\theta t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (4.4)$$

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

- h** το υδραυλικό ύψος [L]
- K<sub>xx</sub>** η υδραυλική αγωγιμότητα στην x οριζόντια διεύθυνση [LT<sup>-1</sup>]
- K<sub>yy</sub>** η υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια διεύθυνση [LT<sup>-1</sup>]
- K<sub>zz</sub>** η υδραυλική αγωγιμότητα στην z κάθετη διεύθυνση [LT<sup>-1</sup>]
- S** ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας [L<sup>-1</sup>]
- Q<sub>i</sub>** ο όρος της πηγής/ καταβύθισης στην τοποθεσία i [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>] (για παράδειγμα πηγάδια, οι θετικές τιμές δηλώνουν άντληση)
- δ** η συνάρτηση Δέλτα
- r** ο αριθμός των σημείων των πηγών-καταβύθισης

Η παραπάνω εξίσωση επιλύεται αριθμητικά με την χρήση του μοντέλου **PTC** με την χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών (Babu et al., 1997)

#### 4.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Το διαχωριστικό σχέδιο που χρησιμοποιεί το μοντέλο **PTC** για να επιλύσει την παραπάνω εξίσωση περιλαμβάνει στρωγγυλοποίηση των όρων που περιέχουν παραγώγους των x και y χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στα οριζόντια επίπεδα. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υποθέτει ότι υπάρχει ένα άπειρο άθροισμα συναρτήσεων που αναπαριστούν με ακρίβεια την λύση των χωρικών μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την ροή υπογείων υδάτων.

Μια πεπερασμένη προσέγγιση σε μορφή σειράς είναι:

$$h(x, y, z, t) \sim \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=0}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (4.5)$$

όπου

$h$  το υδραυλικό ύψος [L],

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

$h_i$  ένας απροσδιόριστος συντελεστής [L],

$w_i$  μια βασική ή παρεμβολική συνάρτηση (αδιάστατη),

$N$  ο αριθμός των κόμβων στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων

Η παραπάνω σειρά προσέγγισης εξασφαλίζει μια ακριβή παρουσίαση καθώς το  $N$  προσεγγίζει το άπειρο. ( το  $\hat{h}$  προσεγγίζει το  $h$ ). Με μια προσεκτική επιλογή της βασικών συναρτήσεων  $w_i$ , οι εκκρεμείς συντελεστές  $h_i$  μετατρέπονται σε τιμές υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες  $(x, y, z)$ . Μια λύση για τον υπολογισμό του συντελεστή με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση ξεχωριστών βημάτων σε συνεχόμενη βάση η οποία είναι μη μηδενική πέρα από μια μικρή υποπεριοχή του συνολικού πεδίου ορισμού. Ενώ υπάρχει η επιλογή πολλών διαφορετικών τύπων βασικών συναρτήσεων, το μοντέλο **PTC** χρησιμοποιεί ξεχωριστές γραμμικές συναρτήσεις ανάμεσα στους παρακείμενους κόμβους των σημείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προέρχεται διαπιστώνοντας ότι ο διαφορικός συντελεστής  $L$  όταν συντελεί στο  $h$  που είναι ίσο με το μηδέν, τότε ο συντελεστής  $L$  της προσεγγιστικής συνάρτησης παρουσιάζει λάθος. Με μαθηματικούς όρους, η εξίσωση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$L(h) = 0 \quad (4.6)$$

ενώ

$$L(\hat{h}) = R \quad (4.7)$$

όπου  $R$  το παραμένον λάθος.

Για την επίλυση της εξίσωσης (4.5) με την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, επιχειρούμε την ελαχιστοποίηση του παραμένοντος λάθους  $\mathbf{R}$ . Αυτό πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη ένα ολοκληρωμένο σύστημα εξισώσεων  $\mathbf{w}_j$ . Εάν εξαναγκάσουμε το παραμένον λάθος  $\mathbf{R}$  να είναι εφικτό για όλες τις πιθανές τιμές του  $\mathbf{w}_j$  τότε, στην πραγματικότητα, το παραμένον λάθος  $\mathbf{R}$  πλησιάζει στο μηδέν. Με αυτό τον τρόπο αποκομίζεται η λύση της εξίσωσης (4.5). Αυτό εκφράζεται μαθηματικά με τον παρακάτω τρόπο:

$$L(\hat{h}) = L(h) \quad \text{όταν } R=0 \quad (4.8)$$

#### 4.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών είναι η ακόλουθη:

$$\mathbf{A}h + \mathbf{B} \frac{\partial h}{\partial t} - \mathbf{v} + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (4.9)$$

Όπου  $\mathbf{A}$  και  $\mathbf{B}$  είναι μαθηματικοί πίνακες με διαστάσεις  $N \times N$  και οι όροι  $h$ ,  $\partial h / \partial t$ ,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{f}$  είναι διανύσματα στήλης με μήκος  $N$ .

Τα στοιχεία  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{f}$  είναι:

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (4.10a)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (4.10b)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (4.10c)$$

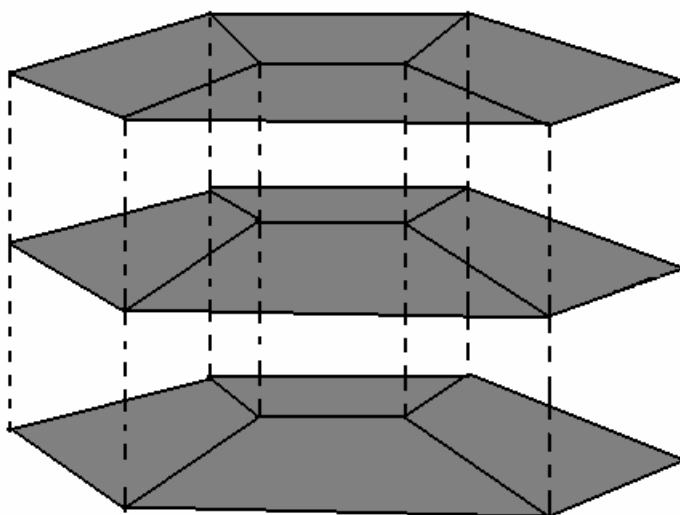
$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[ \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial w_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (4.10d)$$

όπου η  $\mathbf{f}$  περιέχει τις γνωστές οριακές συνθήκες (Babu et al., 1997).

#### 4.4.4 Η κάθετη παράγωγος

Το κεντρικό γνώρισμα του παρόντος κώδικα του μοντέλου **PTC** είναι η χρήση ενός σχήματος κεντρικής διαφοροποίησης για τις χωρικές παραγώγους της εξίσωσης (4.10d) στην διεύθυνση  $z$ . Η κάθετη διακριτοποίηση πραγματοποιείται με την χρήση οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα τα οποία αντικαθίστανται από κόμβους που βρίσκονται ο ένας πάνω από τον άλλο (σχήμα 4.1).

**Σχήμα 4.1 : Σχηματικό διάγραμμα οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων στοιβαγμένων το ένα πάνω στο άλλο, δημιουργώντας την τρισδιάστατη διακριτοποίηση (Babu et al., 1997)**



Αυτό σημαίνει ότι στην κάθετη διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών με σκοπό την προσέγγιση της εξίσωσης (4.10d). Χρησιμοποιώντας τον κάθετο δείκτη  $k$ , όπου  $k=1$  το στρώμα του πυθμένα, αυτή η προσέγγιση σε μορφή διανυσμάτων γράφεται ως εξής:

$$v \cong C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \quad (4.11)$$

όπου το αρμονικό μέσο των ιδιοτήτων των παρακείμενων στρωμάτων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των στοιχείων  $C_k^+$ , ο κάθετος όρος ανάμεσα στο επίπεδο  $k$  και  $k+1$ , και τα στοιχεία  $C_k^-$ , ο κάθετος όρος ανάμεσα στο επίπεδο  $k$  και  $k-1$

$$C_{ij^*,k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \left[ \frac{2}{\Delta z_k} \left[ \Delta z_{k\pm 1} / (K_{zz})_k + \Delta z_k / (K_{zz})_{k\pm 1} \right] \right] w_i w_j dx dy \quad (4.12)$$

όπου  $\Delta z_k$  είναι το πάχος του στρώματος  $k$  στο σημείο της προσέγγισης. Το αρμονικό μέσο δίνει τις πιο ρεαλιστικές ποσότητες στις ετερογενείς καταστάσεις που συναντώνται συνήθως.

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (4.11) στην (4.9) προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για ένα τυπικό στρώμα  $k$ :

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - \left[ C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \right] + f_k = 0 \quad (4.13)$$

όπου το  $h_k$  αναπαριστά το διάνυσμα  $\mathbf{h}$  των υδραυλικών υψών στο στρώμα  $\mathbf{k}$ , όπου  $\mathbf{k} = 1, 2, \dots, \mathbf{M}$ , και  $\mathbf{M}$  είναι το πλήθος των στρωμάτων στην διεύθυνση  $\mathbf{z}$  (Babu et al., 1997).

#### 4.4.5 Η χρονική παράγωγος

Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση οπίσθιας διαφοράς προσέγγισης για την παράγωγο του χρόνου παρέχει την πιο ακριβή λύση σε προβλήματα ροής υπογείων υδάτων για ένα συγκεκριμένο δοσμένο κόστος. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται για την να προσεγγίσει την παράγωγο του χρόνου και τις χωρικές παραγώγους που γράφονται με βάση μια νέα χρονική στιγμή.

Εφαρμόζοντας την παράγωγο του χρόνου στην εξίσωση (4.13), προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για κάθε στρώμα:

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} \left[ h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t \right] - \left[ C_k^t (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \right]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \quad (4.14)$$

## 4.5 Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί τρία είδη οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής. Αυτά τα τρία είδη είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένου υδραυλικού ύψους), οι συνθήκες του Neumann (καθορισμένης ροής) και οι συνθήκες τρίτου τύπου (διαρροή). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενική ροή. Αυτό όμως υπονοεί ένα περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέραστο πυθμένα και αδιαπέραστα στρώματα γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διάφορες εναλλακτικές οριακές συνθήκες σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

### 4.5.1 Οριακές συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους καθορίζονται προσδιορίζοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχούν σε αυτούς τους κόμβους. Το πρόγραμμα αυτόματα δίνει τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Επειδή οι κόμβοι έχουν σταθερό υδραυλικό ύψος παραλείπονται από την μαθηματική εξίσωση του πίνακα και έτσι απομένουν οι  $(N \times M - N_c)$  εξισώσεις με  $(N \times M - N_c)$  αγνώστους, όπου  $N_c$  είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή ροής.

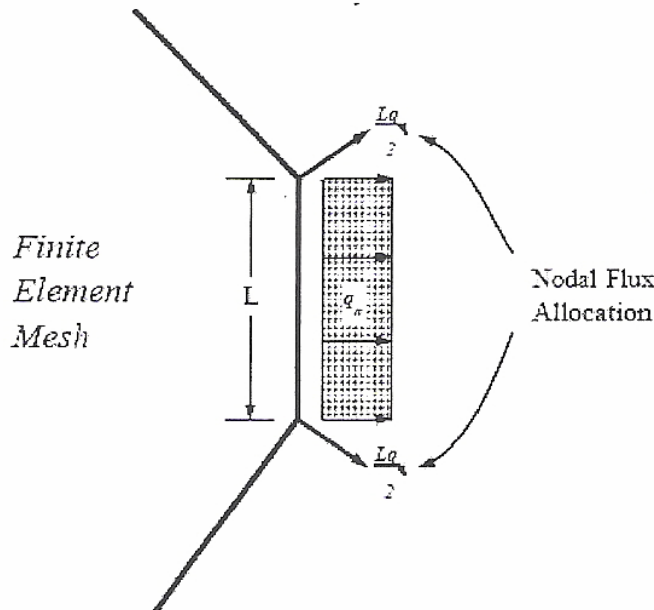
### 4.5.2 Οριακές συνθήκες καθορισμένης ροής

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα πολύ απλό μέσο για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Αυτός ο όρος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$-\int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (4.15)$$

όπου το  $q_n$  είναι η κανονική ροή διαμέσου μιας μοναδικής περιοχής (μήκος x ύψος) του κάθετου ορίου  $\sigma$ . Όταν η κανονική ροή είναι σταθερή κατά μήκος της επιφάνειας ενός στοιχείου με μήκος  $L$ , η ολοκλήρωση της εξίσωσης (4.1) δίνει την κατανομή των κόμβων που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.2).

**Σχήμα 4.2:** Κουμβική κατανομή της ροής  $q$  κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$  (Babu et al., 1997)



#### 4.5.3 Οριακές συνθήκες τρίτου τύπου

Οι οριακές συνθήκες διαρροής προκύπτουν αντικαθιστώντας στην σχέση (4.10c) την τιμή

$$Q = k_L (h'_{j,L} - h'_{j,k}) \quad (4.16)$$

όπου

$h_{j,k}^t$  είναι το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο  $j$  του στρώματος  $k$  την χρονική στιγμή  $t$

$h_{j,L}^t$  είναι το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής (όπως ανύψωση της στάθμης νερού μιας λίμνης)

$k_L$  είναι η αγωγιμότητα της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς απόσταση)

Ο όρος της αγωγιμότητας ολοκληρώνεται ανά επιφάνεια και αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Παρόλα αυτά, με κατάλληλο προσδιορισμό της καθοριζόμενης από τον χρήστη σταθεράς  $k_L$  μπορεί να προσδιοριστεί η διαρροή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

#### 4.6 Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα

Η επιβολή συνθηκών για τον υδροφόρο ορίζοντα ή για τον ελεύθερο υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών για το επίπεδο του νερού στο πάνω στρώμα.

Στο **σχήμα 4.3** αναπαριστάται ένας κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας που υπόκειται σε διήθηση μεγέθους  $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t})$ . Το σταθερό υψόμετρο του ανώτερου ορίου της περιοχής ροής συμβολίζεται με  $\mathbf{z} = \mathbf{z}_{\mathbf{M}+1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t})$  και το ακριβές υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα συμβολίζεται με  $\mathbf{z} = \mathbf{z}_{\mathbf{WT}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t})$ .

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα ( $\mathbf{h}_{\mathbf{M}}$ ) καθορίζει το πάχος του υδροφορέα του ανώτερου στρώματος ( $\mathbf{z}_{\mathbf{WT}} - \mathbf{z}_{\mathbf{M}}$ ).

Σε κάθε κόμβο θα πρέπει να ισχύει

$$(\mathbf{z}_{\mathbf{WT}})_i = (\mathbf{h}_{\mathbf{M}})_i \quad (4.17)$$

Στην παρούσα διαδικασία, υποθέτουμε ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα στο ανώτερο στρώμα ( $k = \mathbf{M}$ ). Έτσι, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει εάν οι τιμές του  $\mathbf{h}_{\mathbf{M}}$  στους κόμβους βρίσκονται μέσα στο ακόλουθο εύρος υψομέτρων

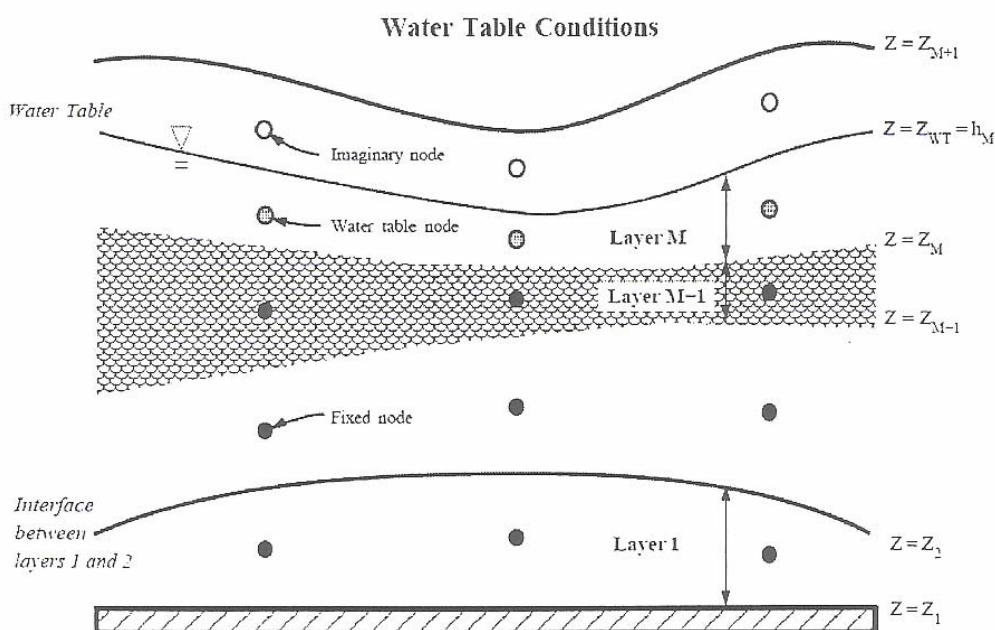
$$\mathbf{z}_{\mathbf{M}} \leq \mathbf{h}_{\mathbf{M}} \leq \mathbf{z}_{\mathbf{M}+1} \quad (4.18)$$

Το μοντέλο **PTC** εμφανίζει ένα μήνυμα στην περίπτωση όπου η παραπάνω συνθήκη παραβιάζεται. Στη συνέχεια, η εκτέλεση αυτή τερματίζεται. Η παραπάνω σχέση πρέπει επίσης να ικανοποιεί και τις οριακές συνθήκες για το υδραυλικό ύψος. Εφόσον το  $\mathbf{z}_{\mathbf{WT}}$  αντιπροσωπεύει το πάχος του ανώτερου στρώματος που εμφανίζεται στα μητρώα των συντελεστών, η εξίσωση που ισχύει για κάθε κόμβο εισάγει μη γραμμικότητα στην λύση των εξισώσεων του συστήματος ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα αντιμετωπίζεται με μια σειρά επαναλήψεων στο δεύτερο βήμα του διαχωριστικού αλγορίθμου.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την μεταβλητή απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διήθηση. Εάν το  $\mathbf{S}_{\mathbf{y}}$  συμβολίζει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα, τότε έχουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (4.19)$$

**Σχήμα 4.3:** Υδροφόρος ορίζοντας και συνθήκες κατακρήμνισης στο πάνω όριο. Οι επιφάνειες δηλώνονται με  $z=z_1, z=z_2$  κ.τ.λ. είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και καθορίζουν τα στρώματα (Babu et al., 1997)



#### 4.7 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων

##### Θεμελιώδεις εξισώσεις

Η εξίσωση μεταφοράς ρύπων είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} & \frac{\theta}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\theta}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\theta}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c^w - c) - \left( V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

οι όροι διασποράς της εξίσωσης αυτής καθορίζονται ως:

$$\begin{aligned}
 D_{xx} &= (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\
 D_{yy} &= (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\
 D_{zz} &= (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2) / V + D_M \\
 D_{yx} &= D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \\
 D_{yz} &= D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V \\
 D_{zx} &= D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

και οι υπόλοιποι όροι:

$D_M$  ο συντελεστής μοριακής διάχυσης που είναι γενικά μικρός [ $L^2/T$ ]

$a_L$  ο συντελεστής διαμήκους διασποράς [ $L$ ]

$a_T$  ο συντελεστής της οριζόντιας εγκάρσιας διασποράς [ $L$ ]

$a_V$  ο συντελεστής της κάθετης εγκάρσιας διασποράς [ $L$ ]

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

$c$  η χημική συγκέντρωση στο σημείο  $(x, y, z)$  την χρονική στιγμή  $t$  [ $M/L^3$ ]

$\theta$  το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο)

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

$Q$  η ισχύς της άντλησης (πηγής /δεξαμενής) [ $1/T$ ]

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

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

$\delta(\cdot)$  η συνάρτηση  $\delta$  του Dirac

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ρευστού με την χρήση αντλίας ( $Q_i \leq 0$ ) υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση του αντλούμενου νερού  $c^w$  στην αντλία ισούται με την συγκέντρωση  $c$  του περιβάλλοντα χώρου. Σε όλες τις αντλίες, ο όρος  $Q(c^w - c)$  είναι ίσο με το μηδέν στην εξίσωση (4.20). Έτσι ο κώδικας διατηρεί τον όρο της εξίσωσης (4.20) που περιέχει το  $Q$  μόνο όταν η αντλία εμπλουτίζει τον υδροφορέα με διάλυμα ( $Q_i \geq 0$ ) που έχει συγκέντρωση  $c^w$  (Babu et al., 1997).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ**

## 5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ

### 5.1 Εισαγωγικά

Ο Δήμος Χερσονήσου βρίσκεται βόρεια του Νομού Ηρακλείου και πιο συγκεκριμένα 25 χλμ. από την πόλη του Ηρακλείου. Λόγω της θέσης του, έχει εύκολη πρόσβαση στο λιμάνι και το αεροδρόμιο του Ηρακλείου καθώς και στον αρχαιολογικό χώρο της Κνωσού. Περιλαμβάνει τα δημοτικά διαμερίσματα Λιμένας Χερσονήσου, Χερσονήσος, Ποταμιές, Αβδού, Γωνιές και Κερά με τους επιμέρους οικισμούς που περιλαμβάνει καθένα από αυτά.

Ο Λιμένας είναι παραθαλάσσιος και αποτελεί την βασική περιοχή όπου αναπτύσσεται η τουριστική δραστηριότητα του Δήμου. Μεγάλο τμήμα της Χερσονήσου είναι παραθαλάσσιο και επίσης παρατηρείται έντονη τουριστική ανάπτυξη. Τα υπόλοιπα διαμερίσματα βρίσκονται στην ενδοχώρα όπου η κύρια ασχολία των κατοίκων είναι η γεωργία.

Γενικότερα μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '60 οι πρωταρχικές απασχολήσεις του πληθυσμού ήταν η γεωργία και η κτηνοτροφία (90-95%), ενώ οι λοιπές δραστηριότητες κάλυπταν το 4-5% (ΥΠ.ΕΣ.Δ..Δ.Α., 2000). Σήμερα παρατηρείται μια ολοκληρωτική αλλαγή των δεδομένων με την συντριπτική πλειοψηφία των κατοίκων να ασχολείται με τον τριτογενή τομέα (10.491 κάτοικοι από τους οποίους 5.727 άνδρες και 4.764 γυναίκες). Η περιοχή της Χερσονήσου αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς προορισμούς της Κρήτης αλλά και της Ελλάδας. Σύμφωνα με στοιχεία που υπάρχουν για το έτος 1999, στην περιοχή λειτουργούν 118 ξενοδοχεία και 19.566 κλίνες κύριων τουριστικών καταλυμάτων που αντιπροσωπεύουν το 17,7% των κλινών της Κρήτης και το 3,3% της Ελλάδας. Με βάση αυτά τα στοιχεία, η σημασία του τουρισμού στην περιοχή τόσο σαν οικονομική δραστηριότητα όσο και σαν φορέας κοινωνικών και περιβαλλοντικών αλλαγών δεν αμφισβητείται. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι δικαιολογημένα η περιοχή της Χερσονήσου θεωρείται μια από τις πιο ανεπτυγμένες τουριστικά περιοχές της Ελλάδας (Γιάννα Φαρσάρη, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο Κρήτης).

## 5.2 Κλιματολογικές συνθήκες

### 5.2.1 Θερμοκρασία – Ηλιοφάνεια – Σχετική Υγρασία – Ηλιακή ακτινοβολία – Μέση Νέφωση

Το κλίμα της Κρήτης είναι εύκρατο μεσογειακό, στους ορεινούς της όγκους όμως χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικό. Ο ετήσιος μέσος όρος θερμοκρασίας είναι 14-15 βαθμούς Κελσίου. Ο χειμώνας, συγκρινόμενος με άλλες περιοχές της Ελλάδας, είναι ιδιαίτερα ήπιος με ψυχρότερους μήνες τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πεδινή Κρήτη και ιδιαίτερα οι νοτιοανατολικές περιοχές είναι από τις θερμότερες του ελλαδικού χώρου. Το καλοκαίρι είναι πολύ ζεστό και ξηρό, ιδιαίτερα στις όχθες του Λιβυκού πελάγους (νότια της Κρήτης). Είναι χαρακτηριστικό ότι η ηλιοφάνεια διαρκεί όλους τους μήνες ενώ οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Λόγω όμως της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων, το θέρος είναι σχετικά δροσερό. Η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται αισθητά από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά στα δυτικά και από την παράκτια ζώνη στην ορεινή. Η ύπαρξη πολλών βουνών στην περιοχή της Κρήτης προκαλεί απότομες αλλαγές του καιρού και έντονους ανέμους στο νησί.

Το κλίμα της Χερσονήσου είναι τυπικά μεσογειακό με βροχερή περίοδο, την περίοδο από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο. Το θέρος είναι θερμό και ξηρό ενώ οι βροχοπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικές κατά την διάρκεια του έτους. Επίσης, η μέση θερμοκρασία στην περιοχή έχει τιμή περίπου 19 βαθμούς Κελσίου, ενώ γενικά η παρουσιάζει σημαντική διακύμανση ανάλογα με την εποχή. Πιο συγκεκριμένα, κατά την χειμερινή περίοδο παρατηρείται πτωτική τάση με τον Ιανουάριο να αποτελεί τον ψυχρότερο μήνα, ενώ κατά την καλοκαιρινή περίοδο η θερμοκρασία αυξάνει αισθητά και τον μήνα του Ιουλίου παρατηρούνται οι υψηλότερες θερμοκρασίες.

Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή της Δίκτης, που είναι και η περιοχή μελέτης, οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην υδρογεωλογική ενότητα της δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από αυτές των άλλων υδρογεωλογικών ενοτήτων τουλάχιστον σε ότι έχει σχέση με την θερμοκρασία, τους ανέμους, την σχετική υγρασία και την ηλιοφάνεια. Όσο για την χιονόπτωση λόγω της διαφοράς του

υψομέτρου και της γεωγραφικής θέσης (ανατολικότερα) στον ορεινό όγκο της Δίκτης παρατηρείται ελάχιστα μικρότερο ποσοστό από αυτό του Ψηλορείτη. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και στο ύψος των ετήσιων βροχοπτώσεων και της δυνητικής εξατμισμού (Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. ΠΑΡ/ΜΑ ΚΡΗΤΗΣ).

**Πίνακας 5.1 : Κλιματολογικά στοιχεία του σταθμού Ηρακλείου 754 (Γεωγραφικό μήκος 25,11/ Γεωγραφικό πλάτος 35,2 – Ύψος σταθμού 38 m) (Ε.Μ.Υ.)**

Μήνας	Ωρες Ηλιοφάνειας	Μέση Θερμοκρασία αέρα	Απόλυτη Μέγιστη θερμοκρασία	Απόλυτη Ελάχιστη Θερμοκρασία	Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία Σε Οριζόντιο Επίπεδο	Διάχυτη Ηλιακή Ακτινοβολία Σε Οριζόντιο επίπεδο
	Hr	°C	°C	°C		
1	108,8	12,2	24,8	0,2	67,33	35,22
2	128,4	12,5	29,2	-0,5	82,54	40,67
3	170,3	13,8	34,8	1,7	124,87	58,28
4	234,5	16,8	36	4,4	161,88	62,74
5	314,3	20,8	39	7	213,96	62,15
6	353,3	24,4	45,7	8,7	230,23	56,20
7	384,7	26,4	41	15	248,99	54,12
8	356,7	26,3	40,7	14	221,15	51,13
9	285,2	23,7	38,5	10,6	174,12	42,92
10	197,2	20,3	36,2	7,9	114,20	44,54
11	161,5	17,1	31,9	1,9	81,54	33,62
12	121,1	13,9	26,7	2	64,60	30,79
<b>Σύνολο</b>	2816				1785,43	572,39

**Πίνακας 5.2 : Κλιματολογικά στοιχεία του σταθμού Ηρακλείου 754 (συνέχεια)**

Μήνας	Βαρομετρική πίεση	Σχετική Υγρασία	Μέση νέφωση	Βροχόπτωση	Ταχύτητα Ανέμου
-------	----------------------	--------------------	----------------	------------	--------------------

	mm Hg	%	8	mm	m/sec
1	1017,1	71	5,3	90,1	3,8
2	1016	69	5,1	67,6	4
3	1014,9	66	4,8	58,2	4
4	1013,3	64	3,7	28,5	3,4
5	1013,6	64	2,9	14,2	2,3
6	1012,6	59	1,4	3,5	3
7	1011	59	0,6	1,0	4
8	1011,4	60	0,7	0,6	4
9	1014,6	63	1,8	17,7	3,4
10	1016,7	67	3,6	64,9	3,2
11	1017,5	70	4,7	59,0	3
12	1016,8	70	5,1	77,9	4

### 5.2.2 Ανεμολογικά στοιχεία

Η μελέτη του ανέμου πραγματοποιείται βάσει των στοιχείων του μετεωρολογικού σταθμού της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας Ηρακλείου που αφορούν την περίοδο 1995-1998. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας με τις ετήσιες συχνότητες έντασης και πνοής του ανέμου στις διάφορες διευθύνσεις:

**Πίνακας 5.3 : Ετήσια συχνότητα έντασης και πνοής ανέμου (%) (Ε.Μ.Υ.)**

BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALM	SUM
0									17.527	17.527
1	0.855	0.537	0.372	0.613	1.468	0.603	0.307	0.646		5.401
2	4.360	2.279	0.9653	2.312	5.149	1.884	1.183	3.725		21.845
3	4.941	1.435	0.603	1.183	2.695	0.865	1.490	9.082		22.294
4	4.229	0.438	0.142	0.657	2.241	0.679	1.326	10.649		20.541
5	1.665	0.142	0.033	0.351	1.589	0.449	0.362	3.571		8.162
6	0.690	0.033	0.011	0.208	0.898	0.208	0.088	1.019		3.155
7	0.164	0.011	0.011	0.066	0.274	0.055	0.022	0.142		0.745
8	0.055	0.000	0.000	0.033	0.110	0.011	0.011	0.044		0.264
9	0.011	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.011		0.044
10	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000		0.022

11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
SUM	16.970	4.875	2.125	5.445	14.626	4.754	4.789	28.885	17.527	100.000

Από επεξεργασία των στοιχείων από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου (Γεωγραφικό μήκος 25,11/ Γεωγραφικό πλάτος 35,2 – Ύψος σταθμού 28 m) προκύπτει ότι:

- Η συχνότητα των ανέμων είναι κυρίως βόρειοι και βορειοδυτικοί με ποσοστά 16.9% και 28.9% αντίστοιχα. Σημαντική είναι και η συχνότητα των νότιων ανέμων με 14.6% και της νηνεμίας με ποσοστό 17.5%.
- Η ένταση των ανέμων είναι κυρίως της τάξης 2, 3, και 4 Beaufour με συνολικό ποσοστό 64.68%. μεγαλύτερη συχνότητα έχουν οι άνεμοι των 3 Beaufour με ποσοστό 22.3%.
- Ακραία καιρικά φαινόμενα με ανέμους της τάξης των 10 Beaufour είναι σπάνια αλλά όταν συμβαίνουν είναι νότιας και νοτιοδυτικής κυρίως διεύθυνσης.

### 5.3 Χλωρίδα-Πανίδα

Στη περιοχή της Χερσονήσου υπάρχουν τα οικοσυστήματα της πεδινής και ημιορεινής ζώνης. Η βλάστηση που επικρατεί είναι αυτοφυής και ιδιαίτερα υποβαθμισμένη. Η ύπαρξη των φυτών και της βλάστησης γενικότερα είναι πρωταρχικής και καθοριστικής σημασίας. Αυτό συμβαίνει διότι τα φυτά είναι αυτότροφοι οργανισμοί, παράγουν οργανική ουσία από ανόργανα στοιχεία και φυσικά αποτελούν την βάση της τροφικής αλυσίδας.

Ιδιαίτερα για την περιοχή ενδιαφέροντος μας, η χλωρίδα της αναπτύσσεται από δέντρα, θάμνους και από ποώδη βλάστηση. Αποτελείται κυρίως από:

- ❖ Φρύγανα
- ❖ Αστιβίδες
- ❖ Αφάνες
- ❖ Θυμάρια
- ❖ Ασπαλάθους
- ❖ Θρύμνα

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η περιοχή παρουσιάζει ένα μωσαϊκό βλάστησης από τα είδη που αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά και από εγκαταλελειμμένα ελαιόδεντρα που καλλιεργούνταν παλαιότερα στην περιοχή καθώς και από αραιές στοιβάδες από ξυλώδη βλάστηση σκληρόφυλλων και αείφυλλων:

- ❖ Σχοίνος
- ❖ Χαρουπιά
- ❖ Πρίνος
- ❖ Ερείκη

Όσο αναφορά για την πανίδα, η άλλοτε πληθυσμιακή ισορροπία των ευρέως διαδεδομένων ειδών πανίδας, σήμερα έχει διαταραχθεί. Οι οικοκλιματικές συνθήκες της Κρήτης είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη της πανίδας, ιδιαίτερα στα αρθρόποδα, τα έντομα, τα αραχνοειδή και τα μαλάκια, όμως λόγω της συνεχούς εκμετάλλευσης των οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο, της έντονης υποβάθμισης της βλάστησης, της παράνομης θήρευσης και της μεγάλης τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής, ο αριθμός των ζώων, ιδιαίτερα τα πτηνά και τα θηλαστικά, είναι περιορισμένος. Πιο συγκεκριμένα, τα κύρια είδη πανίδας είναι:

- ❖ ο λαγός
- ❖ η Κουκουβάγια
- ❖ η ζουρίδα ή το κουνάβι
- ❖ οι σαύρες
- ❖ διάφορα είδη πουλιών

Είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικό ότι δεν υπάρχουν σπάνια ή προστατευόμενα είδη.

## **5.4 Γεωλογία – Υδρογεωλογία**

### **Γενικά**

Ο ορεινός όγκος της Δίκτης ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στο Νομό του Λασιθίου, ενώ στο νομό Ηρακλείου ανήκει το Δυτικό τμήμα.

Δομείται κύρια από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς και είναι ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης μετά τα Λευκά Όρη και τον Ψηλορείτη.

Τον κύριο κορμό του ορεινού όγκου αποτελούν οι Πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας πάνω στην οποία έχουν επωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς, της Τρίπολης, της Πίνδου και των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών.

Το νερό της βροχής που κατεισδύει στους ανθρακικούς σχηματισμούς τροφοδοτεί περιμετρικά αναβλύζουσες πηγές και υπόγειες υδροφορίες στα κράσπεδα του.

Η περιοχή που αναφέρουμε ως Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτης και βρίσκεται στην περιοχή μελέτης, βόρειο τμήμα του Νομού Ηρακλείου, αποτελεί το Βορειοδυτικό τμήμα του ορεινού όγκου. Στην περιοχή αυτή, γεωλογικό υπόβαθρο αποτελούν οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης ενότητας Κρήτης πάνω στην οποία έχουν επωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες (Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης).

Οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της Χερσονήσου χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Στους υδροπερατούς σχηματισμούς στους οποίους ανήκουν τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, οι γύψοι, τα κροκαλοπαγή, οι ψαμμίτες του νεογενούς και τα κροκαλοπαγή, κορήματα του τεταρτογενούς.
2. Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς στους οποίους ανήκουν οι ψυλλίτες χαλαζίτες, ο φλύσχης του προνεογενούς και οι μάργες, άργιλοι του νεογενούς.

Οι υδροπερατοί σχηματισμοί παίζουν καθοριστικό ρόλο στην υδρογεωλογική έρευνα, κυρίως εξαιτίας των υπόγειων υδροφορέων που αναπτύσσονται εντός αυτών. Οι υδατοστεγείς σχηματισμοί με τη σειρά τους παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο ρόλο στην διαμόρφωση, την διακίνηση και την κατανομή τόσο του υπόγειου όσο και του επιφανειακού νερού.

#### **5.4.1 Υδροπερατοί σχηματισμοί**

##### Προνεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή των πετρωμάτων ανήκουν κυρίως οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι και τα ανθρακικά πετρώματα. Οι ορεινοί όγκοι της Δίκτης και του Ψηλορείτη

δομούνται στο μεγαλύτερο τους ποσοστό από ανθρακικά πετρώματα τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό υδροπερατότητας, κυρίως στις ζώνες διαρρήξεων και αποκάρσωσης, όπου τελικοί αποδέκτες του νερού της κατείσδυσης είναι οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Μάλιστα, τα ανθρακικά πετρώματα, λόγω του μεγάλου υψομέτρου που τα χαρακτηρίζει, δέχονται μεγάλες ποσότητες νερού από την βροχή και το χιόνι. Επίσης λόγω της μεγάλης περατότητας που παρουσιάζουν αυτοί οι σχηματισμοί (μέχρι και 50,73% των ετήσιων βροχοπτώσεων) έχει σαν αποτέλεσμα να διαμορφώνονται εντός αυτών υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες με πλούσια αποθέματα νερού, γεγονός που αποδεικνύει η ύπαρξη πολλών πηγών (Ζάρου, πηγές Μαλίων). Επιπλέον από τις υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών πετρωμάτων τροφοδοτούνται με ένα σημαντικό ποσοστό νερού τα υπόγεια και πλευρικά υδροφόρα στρώματα των νεογενών αποθέσεων που έρχονται σε άμεση επαφή, κυρίως στις παρυφές των ορεινών όγκων. Στους ανθρακικούς σχηματισμούς, η ποιότητα του νερού είναι συνήθως καλή. Προβλήματα όμως υπάρχουν στην περίπτωση όπου οι σχηματισμοί αυτοί έρχονται σε επαφή με την θάλασσα και έτσι δημιουργείται το μέτωπο της υφαλμύρωσης. Ένα τέτοιο φαινόμενο παρατηρείται στην περιοχή της Χερσονήσου και των Μαλίων στο τέλος της ξηράς περιόδου, αλλά με τις πρώτες βροχές το ποσοστό σε χλώρια επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα (Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης).

#### Νεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τα κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμος και πετρώματα γύψων. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από μια περατότητα η οποία οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες που δημιουργείται λόγω διάβρωσης ή τεκτονισμού (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, γύψος) ή στο πρωτογενές πορώδες που εξαρτάται από την σύσταση και την κοκκομετρία του πετρώματος (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμος). Η δημιουργία των υπόγειων υδροφορέων εντός αυτών των σχηματισμών εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή κατείσδυσης, από τον όγκο που καταλαμβάνουν και από την δυνατότητα τροφοδοσίας τους με νερό, που γίνεται είτε απευθείας από την βροχή είτε πλευρικά από υδροφόρους προνεογενείς σχηματισμούς με τους οποίους έρχονται σε άμεση επαφή. Σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργούνται αξιόλογοι υπόγειοι υδροφορείς σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή και γύψους. Τα γυψούχα νερά παρόλο που είναι ακατάλληλα για

άρδευση, καλύπτουν σημαντικές αρδευτικές ανάγκες (Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης).

#### Τεταρτογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Συναντώνται κυρίως σε ποτάμιες αποθέσεις, ψαμμίτες άμμου και κορήματα όπου λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους κατατάσσονται στους υδροπερατούς σχηματισμούς. Λόγω του μικρού τους πάχους αναπτύσσεται εντός αυτών ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας. Υπάρχουν όμως και ορισμένες περιπτώσεις όπου έχουν σημαντικό πάχος και έτσι αναπτύσσεται εντός αυτών υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας.

#### **5.4.2 Υδατοστεγείς Σχηματισμοί**

##### Προνεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους σχηματισμούς αυτούς ανήκουν τα πετρώματα της Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς, ο φλύσχης καθώς και οι σχηματισμοί των οφιολίθων-κρυσταλλοσχιτοδών.

Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται ως υδατοστεγείς με εξαίρεση όμως το σαθρό κάλυμμα τους καθώς και κάποιο δευτερογενές πορώδες που δημιουργείται από τεκτονικά αίτια. Τα πετρώματα αυτά λόγω της στεγανότητάς τους, σε συνδυασμό με την τεκτονική της περιοχής έχουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, την διακίνηση του υπόγειου νερού, τον διαχωρισμό της περιοχής σε υδρογεωλογικές ενότητες καθώς και στην διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων σε διάφορα υψόμετρα (Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης).

##### Νεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μάργες και οι άργιλοι, οι οποίοι λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας είναι αδιαπέρατοι. Το χαρακτηριστικό τους αυτό αποκλείει την διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων πρακτικής σημασίας. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν μια αρκετά μεγάλη έκταση, γεγονός που δημιουργεί αρκετά προβλήματα ανεπάρκειας νερού σε πολλές περιοχές. Επίσης η αυξημένη υδατοστεγανότητα αυτών των σχηματισμών δημιουργεί μεγάλη επιφανειακή απορροή στις περιοχές όπου εμφανίζονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες νερού να οδηγούνται στην θάλασσα και έτσι η ποσότητα αυτή μένει ανεκμετάλλευτη (Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης).

### **5.4.3 Διαμόρφωση υπόγειων υδροφοριών και υδρογεωλογικών ενοτήτων της ευρύτερης περιοχής**

Η διαμόρφωση υπόγειων υδροφοριών και υδρογεωλογικών ενοτήτων επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- ❖ Την βροχόπτωση
- ❖ Τον γεωλογικό σχηματισμό ο οποίος είναι περατός στο νερό και το στεγανό υπόβαθρο με κατάλληλη τεκτονική μορφή
- ❖ Το επίπεδο της θάλασσας, με την προϋπόθεση ότι πρόκειται για υπόβαθρο ανθρακικών πετρωμάτων

Με την συνύπαρξη αυτών των προϋποθέσεων, τα νερά της βροχής κατεισδύουν στα πετρώματα και στη συνέχεια συγκεντρώνονται στους πόρους, τα καρστικά και τεκτονικά διάκενα. Με αυτή την διαδικασία διαμορφώνονται οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες, οι υδρογεωλογικές ενότητες καθώς και οι λεκάνες των υδρογεωλογικών ενοτήτων.

Με βάση το γεγονός ότι οι δύο ορεινοί όγκοι του Ψηλορείτη και της Δίκτης είναι οι κύριοι τροφοδότες των υπόγειων υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής, οι υδρογεωλογικές ενότητες που δημιουργούνται είναι οι ακόλουθες:

- ❖ Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη
- ❖ Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη
- ❖ Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων Ορέων
- ❖ Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου

Η περιοχή της Χερσονήσου επηρεάζεται κυρίως από την υδρογεωλογική ενότητα του καρστικού υδροσυστήματος Δίκτης. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει τις γεωλογικές ενότητες και υπόγειες υδροφορίες που τροφοδοτούνται από τον ορεινό όγκο, ανεξάρτητα από το εάν οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανήκουν ή όχι στον βασικό κορμό του.

Ο ορεινός όγκος της Δίκτης ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στον Νομό του Λασιθίου, ενώ στον Νομό Ηρακλείου ανήκει το δυτικό τμήμα. Η κύρια δόμηση του αποτελείται από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς και θεωρείται ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης, μετά από τα Λευκά Όρη και τον Ψηλορείτη. Τον κύριο κορμό του ορεινού όγκου αποτελούν οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας πάνω στην οποία έχουν επωθηθεί

οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς και των οφιολίθων-κρυσταλλοσχιστοδών. Αντίθετα το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελούν οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης ενότητας της Κρήτης πάνω στην οποία έχουν επωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ενότητα των οφιολίθων-κρυσταλλοσχιστοδών δεν εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες από αυτές που επικρατούν στο σύνολο του ορεινού όγκου της Δίκτης. Η περιοχή, λοιπόν, χωρίζεται στις εξής ενότητες:

- Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας της Πίνδου.
- Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Τρίπολης.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή Ανώπολης-Γουρνών και νοτιότερα μέχρι τις κοινότητες Γαλιπέ –Σκοτεινό.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται νότια της Χερσονήσου-Χαρασό-Κόξαρης-Καλού Χωριού.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Χερσονήσου.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί της περιοχής Μαλίων.

Από τους παραπάνω σχηματισμούς, η μελέτη αφορά κυρίως τους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας της Χερσονήσου.

Οι ερευνητικές γεωτρήσεις στην περιοχή που έγιναν σε μια προσπάθεια της κοινότητας για εντοπισμό υπόγειων υδροφοριών για κάλυψη των υδρευτικών αναγκών έδωσαν **υφάλμυρο νερό**. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού της Ζώνης Τρίπολης που έρχονται σε άμεση επαφή με την θάλασσα, καθώς και το ρήγμα στην επαφή των ασβεστόλιθων του Ιουρασικού και ασβεστόλιθων του Κρητιδικού λειτουργούν θετικά για τη είσοδο του θαλάσσιου νερού στα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής (ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ**

### **ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ (ΟΑ)**

## **6. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ (ΟΑ)**

### **6.1 Εισαγωγή-Συνδυασμός προσομοίωσης και βελτιστοποίησης**

Στη δεκαετία του '50, αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης παρουσιάστηκαν σε μία προσπάθεια να αποκομιστούν λύσεις για σημαντικά προβλήματα δεξαμενών πετρελαίου. Αυτή η προσπάθεια επεκτάθηκε αργότερα και σε προβλήματα διαχείρισης κάτω από την επιφάνεια, συσχετιζόμενα με 'ποιότητα' και 'ποσότητα' υπογείων υδάτων. Αυτά τα μοντέλα ζευγαρώνουν και επιλύουν τις βασικές εξισώσεις της υπόγειας ροής, της μεταφοράς μάζας και χημικής αντίδρασης.

Ο κύριος αντικειμενικός σκοπός τέτοιων μοντέλων είναι να 'προβλέπουν' την υπόγεια κίνηση και την μεταφορά του ρυπαντή διαμέσου ενός συστήματος που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια. Σε πολλές περιπτώσεις αυτά τα προβλήματα είναι αρκετά περίπλοκα αλλά και δύσκολα στην μαθηματική τους περιγραφή. Η ακριβής περιγραφή του φυσικού συστήματος, απαραίτητη για την απόκτηση της βέλτιστης πρόβλεψης, απαιτεί ένα μεγάλο όγκο πληροφοριών. Επιπρόσθετα, αναλυτικές λύσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν λόγω ανομοιογενειών, ανισοτήτων και αβεβαιοτήτων του φυσικού συστήματος. Επομένως, η αριθμητική προσομοίωση πρέπει να εφαρμοστεί. Στο παρελθόν, αρκετά αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής και μεταφοράς είχαν παρουσιαστεί, βασισμένα σε θεωρίες πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών (Sutra, Modflow and MD3d, PTC, FEMWATER, etc).

Στη δεκαετία του '70 υπόγεια αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης [Deninger (1970)] συνδυάστηκαν με μεθόδους βελτιστοποίησης και αποτέλεσαν με αυτό τον τρόπο ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπογείων υδάτων. Το κίνητρο για την προσπάθεια συνδυασμού της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης ήταν η επιθυμία να προσδιοριστεί η 'βέλτιστη' λύση (ανάμεσα σε αρκετές εφικτές λύσεις) που μπορούσε να εφαρμοστεί σε ένα πρόβλημα υπόγειας διαχείρισης.

Όπως είχε επισημανθεί από τους Gorelick et al. (1993) τα μοντέλα προσομοίωσης είναι συχνά ανεπαρκή διότι τα προβλήματα της διαχείρισης υδροφορέων δεν περιλαμβάνουν μόνο πρόβλεψη. Μάλλον, περιλαμβάνουν και τα δύο, προσομοίωση για πρόβλεψη και βελτιστοποίηση. Ο ρόλος της βελτιστοποίησης είναι να

προσδιοριστεί η καλύτερη τακτική που μπορεί να εφαρμοστεί για ένα συγκεκριμένο αντικειμενικό σκοπό λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που υπάρχουν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία.

Ο συνδυασμός τεχνικών υπόγειας προσομοίωσης και βελτιστοποίησης μπορεί να θεωρηθεί σαν οργανωμένες μέθοδοι δοκιμής- σφάλματος. Παρόλα αυτά, σε αντίθεση με τις περισσότερες προσεγγίσεις δοκιμής-σφάλματος, ο αντικειμενικός σκοπός, οι περιορισμοί και οι στρατηγικές για την εύρεση λύσης είναι ξεκάθαρα καθορισμένες. Ένα πρόβλημα προσομοίωσης είναι μαθηματικά μορφοποιημένο σαν ένα πρόβλημα που ελαχιστοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση υποτελή σε ένα σύνολο περιορισμών που είναι βασισμένοι σε φυσικούς, οικονομικούς, τεχνικούς και κοινωνικούς περιορισμούς (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000).

## **6.2 Γενικό σχέδιο για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπογείων υδάτων**

Σε προβλήματα διαχείρισης υπογείων υδάτων όπου χρειάζεται ο προσδιορισμός της 'βέλτιστης' λύσης, το βασικό σχέδιο είναι το ακόλουθο:

Ο προσδιορισμός του αριθμού των πηγαδιών που πρέπει να εγκατασταθούν, η τοποθεσία των πηγαδιών καθώς και το ποσό του νερού που πρέπει να αντλείται από κάθε πηγάδι έτσι ώστε όλοι οι περιορισμοί που προκαθορίζονται να ικανοποιούνται.

Πιο συγκεκριμένα οι περιορισμοί αυτοί αντιπροσωπεύουν:

- Την ελάχιστη ποσότητα προμήθειας νερού που απαιτείται για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών της περιοχής ενδιαφέροντος.
- Το όριο του μέγιστου ποσού του νερού που ο υδροφορέας μπορεί να αποφέρει σε καθημερινή βάση. Αυτός ο περιορισμός πηγάζει από το ότι τα επίπεδα του νερού στον υδροφορέα πρέπει να παραμείνει πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο για την εξασφάλιση αξιόλογης υπόγειας ροής.
- Το μέγιστο δυναμικό των σταθμών άντλησης για εξαγωγή νερού που εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων αντλιών.

Φυσικά ολόκληρη η διαδικασία διαχείρισης πρέπει να πραγματοποιείται με το ελάχιστο απαιτούμενο κόστος.

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μορφοποιηθεί ως ακολούθως:

## **Ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους άντλησης**

Υποτελής σε:

- Η ποσότητα του νερού (ολική άντληση) να είναι μεγαλύτερη ή ίση με το ελάχιστο απαιτούμενο ποσό για τις ανάγκες της πόλης.
- Η διαδικασία άντλησης να μην χαμηλώνει το επίπεδο του νερού κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι.
- Οι ρυθμοί άντλησης σε κάθε σταθμό να μην υπερβαίνουν την μέγιστη καθορισμένη τιμή για κάθε αντλία.

Για την μαθηματική μορφοποίηση του προβλήματος λαμβάνουμε υπ' όψιν τα ακόλουθα:

Οι ποικίλες παράμετροι που αφορούν στη μορφοποίηση προκύπτουν από την περιγραφή του προβλήματος που έχει παρουσιαστεί παραπάνω. Τέτοιες είναι οι ρυθμοί άντλησης και το επίπεδο του νερού στον υδροφορέα (υδραυλική πίεση). Αυτές οι παράμετροι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: i) τις παραμέτρους της διαδικασίας λήψης απόφασης, αποκαλούμενες μεταβλητές απόφασης και, ii) τις παραμέτρους που σχετίζονται με το φυσικό σύστημα, αποκαλούμενες μεταβλητές κατάστασης. Οι ρυθμοί άντλησης είναι μεταβλητές απόφασης και οι υδραυλικές πιέσεις είναι μεταβλητές κατάστασης.

Το ερώτημα που τίθεται είναι, πώς να προσεγγίσουμε το πρόβλημα σαν πρόβλημα διαχείρισης υπογείων υδάτων όπου η προσομοίωση συνδυάζεται με την βελτιστοποίηση.

Πρώτα αναπτύσσεται ένας υπόγειος προσομοιωτής. Αυτό απαιτεί τον προσδιορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος και την συλλογή όλων των πληροφοριών που σχετίζονται με τις παραμέτρους του φυσικού συστήματος. Τοπογραφικές, μετεωρολογικές, γεωλογικές πληροφορίες, καθώς και πληροφορίες για τις επιφανειακές συνθήκες πρέπει να συλλεχθούν για την ακριβή περιγραφή του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι πληροφορίες περιλαμβάνουν:

- Πληροφορία συσχετιζόμενη με τις γεωλογικές παραμέτρους όπως είναι το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα, το βάθος του υδροφορέα, αποθηκευτικότητα, κτλ., (παραμέτροι του συστήματος)
- Αρχικές και οριακές συνθήκες
  - Αρχικό επίπεδο του νερού, τοπογραφικές συνθήκες, μετεωρολογικές συνθήκες (π.χ. το βάθος της βροχόπτωσης),
  - Συνθήκες συσχετιζόμενες με την επιφανειακή και υπόγεια αλληλεπίδραση του νερού (υπάρχουσες λίμνες, ποτάμια, μικρότερες λίμνες και δεξαμενές)

Η ανάπτυξη του αριθμητικού προσομοιωτή ακολουθείται από την βαθμονόμηση του μοντέλου για να εξασφαλιστεί ότι το μοντέλο παρέχει μια ακριβή απεικόνιση των υπαρχουσών συνθηκών του πεδίου.

Στη συνέχεια, ο υπόγειος αριθμητικός προσομοιωτής συνδυάζεται με το μοντέλο βελτιστοποίησης. Ο αντικειμενικός στόχος εδώ είναι να επιτευχθεί αμοιβαία ανατροφοδότηση ανάμεσα στο μοντέλο βελτιστοποίησης και τον αριθμητικό προσομοιωτή. Η βελτιστοποίηση συλλέγει της μεταβλητές απόφασης, τις οποίες στη συνέχεια περνάει στον αριθμητικό προσομοιωτή και πραγματοποιεί την αξιολόγηση των περιορισμών. Η βέλτιστη λύση καθορίζει τις αξίες των μεταβλητών απόφασης (ρυθμοί άντλησης) για τις οποίες η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται και όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται.

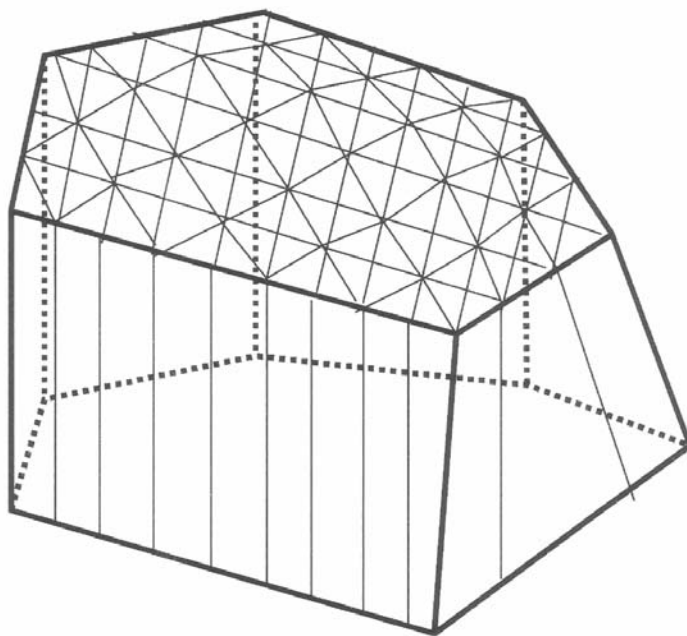
Η απόφαση και οι μεταβλητές κατάστασης καθορίζονται στη συνέχεια. Ο προσομοιωτής χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του φυσικού συστήματος με την χρήση των πεπερασμένων διαφορών ή ενός πεπερασμένου πλέγματος στοιχείων. Ο αριθμητικός προσομοιωτής μπορεί να είναι είτε δισδιάστατος είτε τρισδιάστατος.

Η τοποθεσία των μεταβλητών απόφασης μπορεί να οριστεί σε οποιοδήποτε κόμβο του πλέγματος σύμφωνα με την κρίση του υπεύθυνου. Αρκετοί κόμβοι μπορούν να θεωρηθούν σαν πιθανές τοποθεσίες πηγαδιών άντλησης. Το σύνολο των επιλεγμένων ενδεχόμενων τοποθεσιών πηγαδιών άντλησης συμβολίζεται με  $I = \{1, \dots, n\}$ . Το σύμβολο  $q_i$  απεικονίζει τον ρυθμό άντλησης του κόμβου  $i$  του πλέγματος,  $i \in I$ . Στη συνέχεια, το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης  $\mathbf{q}$  ορίζεται  $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]$ .

Προτείνοντας αρκετές ενδεχόμενες τοποθεσίες πηγαδιών άντλησης, το μοντέλο βελτιστοποίησης θα επιλέξει τις ‘καλύτερες’ τοποθεσίες για ενεργοποίηση, που είναι, εκείνες οι τοποθεσίες όπου η τιμή του ρυθμού άντλησης είναι μεγαλύτερη από το μηδέν.

Σύμφωνα με τους περιορισμούς του προβλήματος, το άθροισμα όλων των  $q_i$  πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από τις ελάχιστες καθημερινές ανάγκες της πόλης σε νερό,  $Q$ . Αυτός είναι ο πρώτος περιορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης.

**Σχήμα 6.1 : Ένα τρισδιάστατο (3-D) πλέγμα (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**



Ο δεύτερος περιορισμός είναι ότι η στάθμη του νερού σε συγκεκριμένες τοποθεσίες πρέπει να παραμείνει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ώστε να αποφευχθεί εκτεταμένη άντληση. Έστω ότι με  $J$  συμβολίζεται το σύνολο των σημείων (κόμβων) όπου οι υδραυλικές πιέσεις θα μελετηθούν. Τότε, σε κάθε ένα από αυτά τα σημεία η τιμή της υδραυλικής πίεσης  $h_j$  πρέπει να παραμείνει μεγαλύτερη ή ίση της προδιαγεγραμμένης τιμής  $h_j^*$ .

Τελικά, υπάρχει ο περιορισμός των ανώτατων ορίων σε κάθε σταθμό άντλησης. Σύμφωνα με αυτό τον περιορισμό, ο ρυθμός άντλησης  $q_i$  σε κάθε τοποθεσία άντλησης

δεν μπορεί να υπερβεί ένα προδιαγεγραμμένο ανώτατο όριο  $q_i^*$ . Η αντικειμενική συνάρτηση είναι το ολικό κόστος άντλησης ανά μονάδα χρόνου και εκφράζεται σαν το άθροισμα των προϊόντων του συντελεστή της μονάδας κόστους  $a_i$  (\$/L<sup>3</sup>) επί τον ρυθμό άντλησης  $q_i$  (L<sup>3</sup>/T) για όλες τις τοποθεσίες των πηγαδιών άντλησης.

Μια επιλεγμένη λύση χαρακτηρίζεται *βέλτιστη* εάν αποφέρει την ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς που έχουν αναφερθεί προηγουμένως. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά ως ακολούθως:

$$\min f(q) = \sum_{i=1}^N a_i q_i$$

**subject to :**

$$\sum_{i=1}^N q_i \geq Q^* \quad i \in I$$

$$h_j \geq h_j^* \quad \forall j \in J$$

$$q_i \leq q_i^* \quad \forall i \in I$$

όπου  $q_i$  = ο ρυθμός άντλησης του κόμβου  $i$

$Q$  = οι ελάχιστες καθημερινές ανάγκες της πόλης σε  
σε νερό

$h_j$  = η τιμή της υδραυλικής πίεσης

$h_j^*$  = η προδιαγεγραμμένη τιμή της υδραυλικής πίεσης

$q_i^*$  = το προδιαγεγραμμένο ανώτατο όριο

Η βελτιστοποίηση και η αριθμητική προσομοίωση συνδυάζονται ως ακολούθως. Το μοντέλο βελτιστοποίησης επιλέγει τον συνδυασμό άντλησης που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση (ολικό κόστος άντλησης). Η πληροφορία περνάει στον αριθμητικό προσομοιωτή και το μοντέλο εκτελείται. Η απόδοση της προσομοίωσης εξαρτάται από τις τιμές των υδραυλικών πιέσεων (μια για κάθε κόμβο). Οι τιμές για τις συγκεκριμένες τοποθεσίες παρατήρησης τοποθετούνται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, με τη σειρά του, αξιολογεί τους περιορισμούς (υδραυλικές πιέσεις και ανώτατα όρια άντλησης) και μια βέλτιστη λύση δηλώνεται εάν φυσικά ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί. Εάν παραβιάζεται κάποιος

από τους περιορισμούς, τότε ο αλγόριθμος συλλέγει ένα νέο συνδυασμό ρυθμών άντλησης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Η ίδια διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση προβλημάτων ποιοτικής διαχείρισης υπόγειου νερού. Σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμητικός προσομοιωτής συνδέει την εξίσωση υπόγειας ροής με την εξίσωση μεταφοράς μάζας του ρυπαντή. Η πρώτη ενέργεια που γίνεται σε προβλήματα ‘ποιοτικής’ διαχείρισης είναι ο προσδιορισμός της τοποθεσίας και της περιμέτρου του ρυπαντή-πλουμίου. Αυτό θα προσδιορίσει τις αρχικές συνθήκες του πεδίου συγκέντρωσης του ρυπαντή στην αρχή της περιόδου αποθεραπείας που απαιτείται από τον προσομοιωτή. Μια τιμή συγκέντρωσης αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο του πλέγματος. Ομοίως με το πρόβλημα ‘ποσοτικής’ διαχείρισης, ορισμένοι κόμβοι λαμβάνονται σαν σημεία παρατήρησης για την συγκέντρωση.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αξιολογεί την συγκέντρωση στα σημεία παρατήρησης  $c_j$ ,  $j \in J$ , και εξασφαλίζει ότι οι τιμές τους παραμένουν κάτω από ένα προδιαγεγραμμένο επίπεδο.

Η μαθηματική μορφοποίηση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\min f(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N a_i q_i$$

**subject to :**

$$\sum_{i=1}^N q_i \geq Q^* \quad i \in I$$

$$c_j \leq c_j^* \quad \forall j \in J$$

$$q_i \leq q_i^* \quad \forall i \in I$$

Σε μερικές περιπτώσεις, είναι πιθανό να υπάρχει ένα πολύπλοκο πρόβλημα διαχείρισης όπου να υποδηλώνονται τόσο οι περιορισμοί της υδραυλικής πίεσης όσο και οι περιορισμοί της συγκέντρωσης.

Μια τέτοια μορφοποίηση είναι η ακόλουθη:

$$\min \mathbf{f}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N a_i q_i$$

subject to :

$$\sum_{i=1}^N q_i \geq Q^* \quad i \in I$$

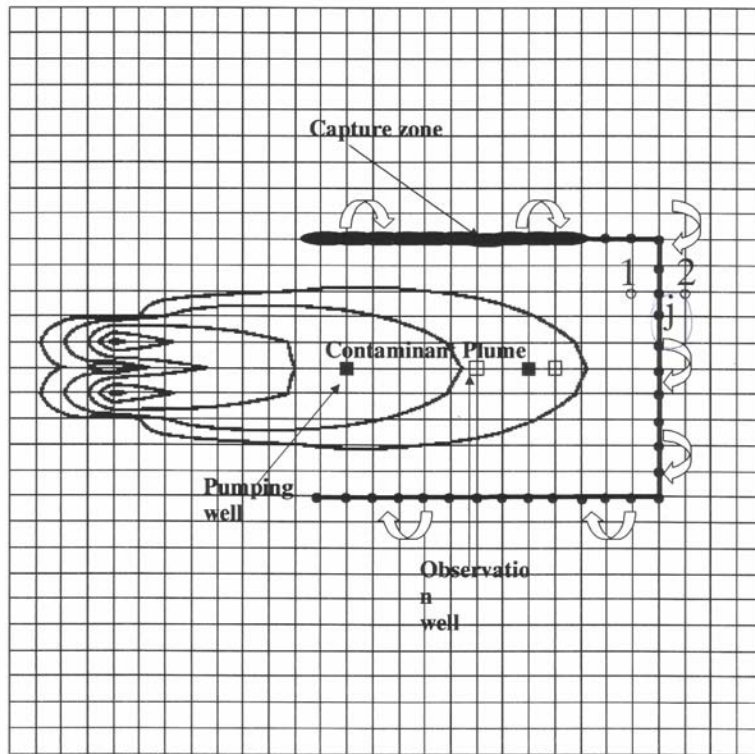
$$c_j \leq c_j^* \quad \forall j \in J$$

$$q_i \leq q_i^* \quad \forall i \in I$$

$$h_k \leq h_k^* \quad \forall k \in K$$

Σε μερικές περιπτώσεις ένα πρόβλημα ‘ποιοτικής’ διαχείρισης υπόγειου νερού προσεγγίζεται σαν ένα ‘πρόβλημα ρυπαντή-πλουμίου’. Σε αυτή την περίπτωση, μια μέθοδος ελέγχου υδραυλικής κλίσης εφαρμόζεται για να αποφευχθεί η κίνηση του ρυπαντή-πλουμίου προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η έννοια αυτού είναι να δημιουργηθεί μια υδραυλική κλίση γύρω από το ρυπαντή-πλούμιο (ζώνη ενδιαφέροντος) και να εξασφαλιστεί η πραγματοποίηση της υπόγειας ροής προς αυτή τη ζώνη (Σχήμα 6.2).

**Σχήμα 6.2 : Η προσέγγιση ελέγχου υδραυλικής κλίσης (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**



Η υπόγεια ροή πρέπει να κατευθύνεται εσωτερικά της γραμμής που καθορίζει την περιοχή ενδιαφέροντος. Οι περιορισμοί επιβάλλονται σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος αυτής της γραμμής. Απαιτείται, σε οποιοδήποτε σημείο  $j$  της γραμμής, η υδραυλική πίεση στην θέση 2 (έξω από την περιοχή ενδιαφέροντος) να είναι μεγαλύτερη από αυτή στην θέση 1 (εσωτερικά της περιοχής ενδιαφέροντος), έτσι ώστε καμία ροή να μην ξεπερνάει την γραμμή προς την κατεύθυνση του ρεύματος.

Το σχέδιο εξυγίανσης περιλαμβάνει αρκετές ενδεχόμενες τοποθεσίες πηγαδιών που μπορεί να είναι είτε πηγάδια άντλησης μέσα στην ζώνη ενδιαφέροντος είτε πηγάδια έγχυσης έξω από την ζώνη ενδιαφέροντος. Ο ρόλος ενός πηγαδιού άντλησης είναι να μειώσει την υδραυλική πίεση με την άντληση. Το αντίθετο συμβαίνει σε ένα πηγάδι έγχυσης.

Η μαθηματική μορφοποίηση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι:

$$\min \quad f(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N a_i q_i$$

**subject to :**

$$\sum_{i=1}^N q_i \geq Q^* \quad i \in I$$

$$h_j^2 - h_j^1 \geq b_j^* \quad \forall j \in J$$

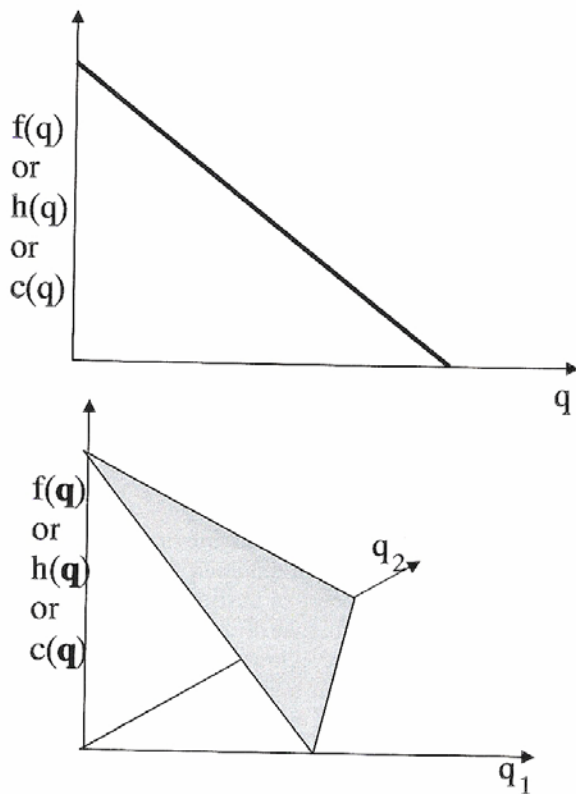
$$q_i \leq q_i^* \quad \forall i \in I$$

όπου  $b_j^*$  αντιπροσωπεύει την προδιαγεγραμμένη διαφορά υδραυλικής πίεσης στην θέση  $j$  (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000).

### 6.3 Τα Μαθηματικά των Προβλημάτων Διαχείρισης Υπογείων Υδάτων

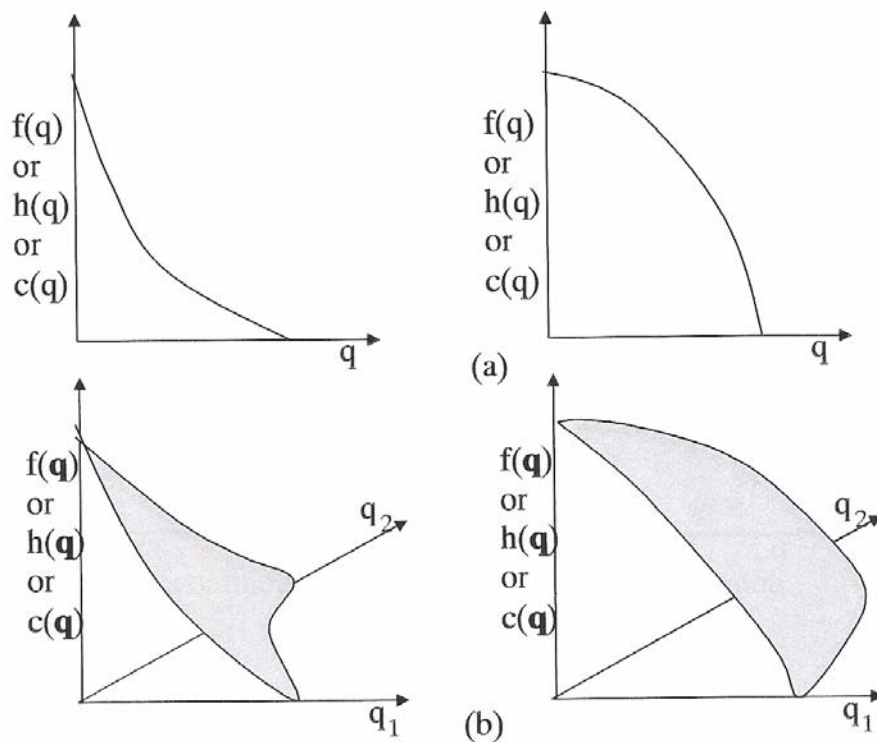
Τα προβλήματα υπόγειας διαχείρισης μπορεί να είναι είτε πολύ απλά είτε πολύ περίπλοκα. Αυτό εξαρτάται από την διατύπωση του προβλήματος. Ένα πρόβλημα υπόγειας διαχείρισης με μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και ένα γραμμικό σύνολο περιορισμών χαρακτηρίζεται ως ένα απλό πρόβλημα και είναι σχετικά εύκολο να επιλυθεί. Προβλήματα όπου οι μεταβλητές απόφασης δεν εμφανίζονται σε καμία εκθετική δύναμη και /ή σε γινόμενο έχουν γραμμική συμπεριφορά. Η γεωμετρική απεικόνιση μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης ή περιορισμού είναι μια ευθεία γραμμή για προβλήματα με μια μεταβλητή απόφασης (μονοδιάστατα προβλήματα, 1-D), ένα επίπεδο για 2-D προβλήματα, ή ένα υπερ-επίπεδο για προβλήματα πολλαπλών διαστάσεων.

**Σχήμα 6.3 : Γραμμική συμπεριφορά συνάρτησης για μονοδιάστατα και δισδιάστατα προβλήματα (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**



Η πιο περίπλοκη μορφή προβλημάτων υπόγειας διαχείρισης εμφανίζεται όταν είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε κάποιος από τους περιορισμούς είναι μη γραμμικός.

**Σχήμα 6.4: Μη γραμμική συμπεριφορά μιας συνάρτησης για μονοδιάστατα (a) και δισδιάστατα (b) προβλήματα (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**

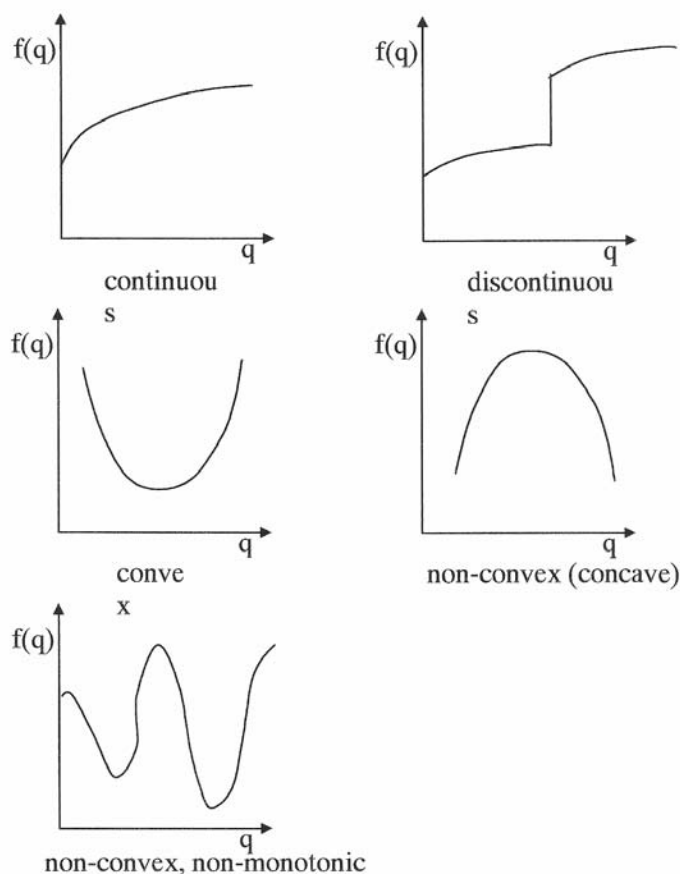


Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, οι περιορισμοί υδραυλικής πίεσης και υδραυλικής κλίσης έχουν γραμμική συμπεριφορά όσον αφορά την κλίμακα άντλησης. Εάν η αντικειμενική συνάρτηση είναι επίσης γραμμική, το πρόβλημα διαχείρισης χαρακτηρίζεται γραμμικό. Τα γραμμικά προβλήματα περιλαμβάνουν μόνο εξισώσεις ροής στην μαθηματική προσομοίωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι για να ακολουθούν οι παραπάνω περιορισμοί γραμμική συμπεριφορά, ο υδροφορέας πρέπει να βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση (καμία αλλαγή με τον χρόνο). Αυτά τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με την χρήση κλασσικών γραμμικών τεχνικών προγραμματισμού (simplex method). Αρκετά πακέτα λογισμικού υπάρχουν για την επίλυση προβλημάτων αυτής της κατηγορίας (Lindo, Minos, Modman).

Προβλήματα υπόγειας διαχείρισης που περιλαμβάνουν περιορισμούς συγκέντρωσης είναι μη γραμμικά προβλήματα (αφού η εξίσωση μεταφοράς μάζας έχει μη γραμμική συμπεριφορά) και είναι γνωστά ως 'προβλήματα ποιοτικής διαχείρισης υπογείων υδάτων'. Σε αυτή την περίπτωση, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε μη γραμμική. Αυτού του είδους τα προβλήματα είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν εξαιτίας της μη γραμμικής συμπεριφοράς. Αρκετές μεθοδολογίες για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων υπόγειας διαχείρισης αναπτύχθηκαν τα

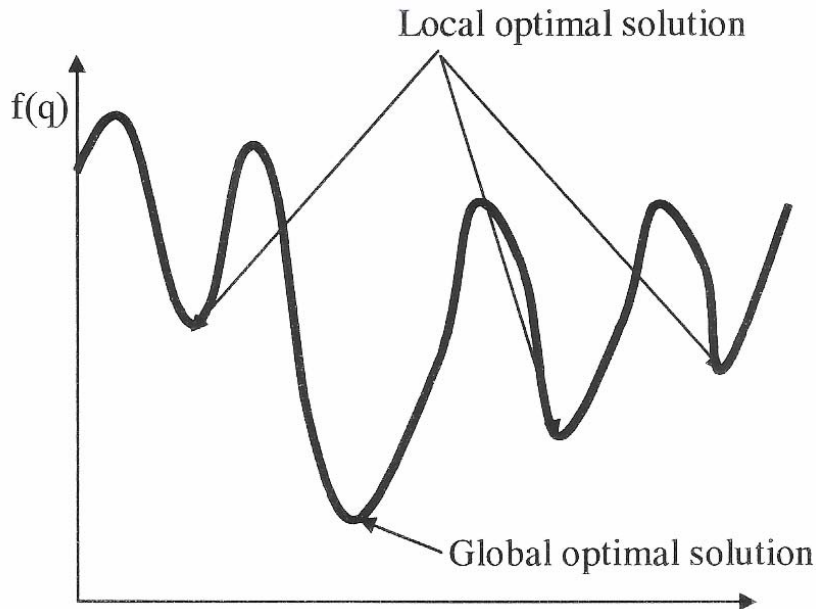
τελευταία χρόνια. Ο βαθμός δυσκολίας στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων υπόγειας διαχείρισης που χρησιμοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης εξαρτάται κυρίως από την συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση, η μαθηματική διατύπωση μπορεί να είναι είτε ελαχιστοποίηση (π.χ. ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους άντλησης) είτε μεγιστοποίηση (π.χ. μεγιστοποίηση της ολικής άντλησης) της συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε μη γραμμική. Μια μη γραμμική συνάρτηση μπορεί να είναι συνεχής ή ασυνεχής, κυρτή ή κοίλη, μονότονη ή μη μονότονη.

**Σχήμα 6.5 : Τυπικές συμπεριφορές μιας αντικειμενικής συνάρτησης (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**



Η πιο περίπλοκη περίπτωση είναι η κοίλη, μη μονότονη συνάρτηση όπου οι περισσότερες από τις τεχνικές βελτιστοποίησης δυσκολεύονται να προσδιορίσουν το 'σφαιρικό μέγιστο' και αντίθετα ολοκληρώνουν την διαδικασία σε ένα τοπικό βέλτιστο.

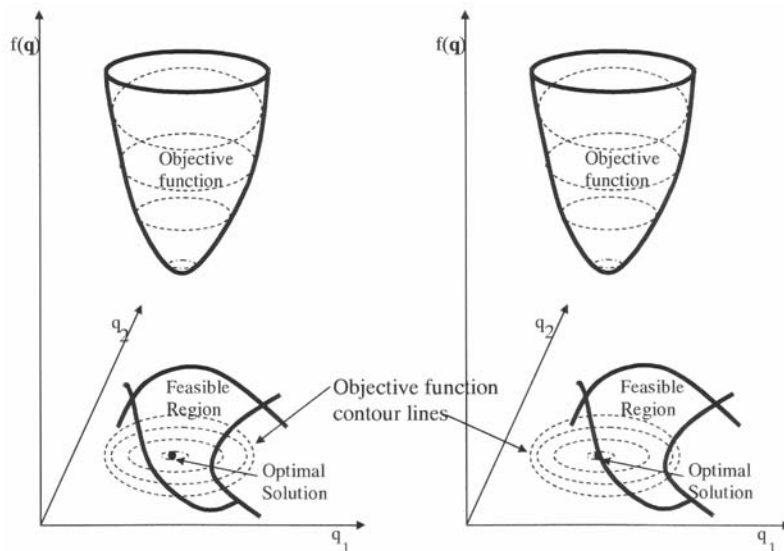
**Σχήμα 6.6 : Αναπαράσταση του τοπικού και σφαιρικού μέγιστου σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**



Οι περιορισμοί της συνάρτησης μπορούν να είναι επίσης γραμμικοί ή μη γραμμικοί, κυρτοί ή κοίλοι.

Στην περίπτωση όπου το πρόβλημα έχει αρκετούς περιορισμούς, η εφικτή περιοχή ορίζεται ως η διασταύρωση όλων των περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση αναφέρεται στην εφικτή περιοχή και ορίζεται από το σύνολο των περιορισμών. Η βέλτιστη λύση πρέπει να βρίσκεται είτε μέσα στην εφικτή περιοχή είτε κατά μήκος της περιμέτρου αυτής της περιοχής (Σχήμα 6.7) (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000).

**Σχήμα 6.7 : Γεωμετρική απεικόνιση της αντικειμενικής συνάρτησης, της εφικτής περιοχής και της βέλτιστης λύσης για ένα δισδιάστατο πρόβλημα ελαχιστοποίησης (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**



#### 6.4 Εισαγωγή στην Μέθοδο Εξωτερικής Προσέγγισης (The Outer Approximation Method)

Τα προβλήματα ποσοτικής διαχείρισης υπογείων υδάτων μπορούν να μορφοποιηθούν μαθηματικά και να επιλυθούν σαν ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας κοίλης συνάρτησης υποτελούς σε ένα συμπαγές σύνολο περιορισμών (κυρτών ή μη-κυρτών). Το θέμα αυτό κεντρίζει το ενδιαφέρον των μαθηματικών για αρκετούς λόγους. Πρώτον, είναι ένα πρόβλημα σφαιρικής βελτιστοποίησης που δεν επιλύεται με κλασσικές μεθόδους τοπικής βελτιστοποίησης. Δεύτερον, πολλά πρακτικά προβλήματα μπορούν να μορφοποιηθούν σε προβλήματα κοίλου προγραμματισμού. Τρίτον, ο κοίλος προγραμματισμός αποτελεί ένα είδος γέφυρας ανάμεσα σε μη-γραμμικό και ακέραιο προγραμματισμό. Τέλος, τα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού μπορούν συχνά να αναχθούν σε προβλήματα κοίλου προγραμματισμού (Karatzas and Pinder, Water Resources Research, April 1996).

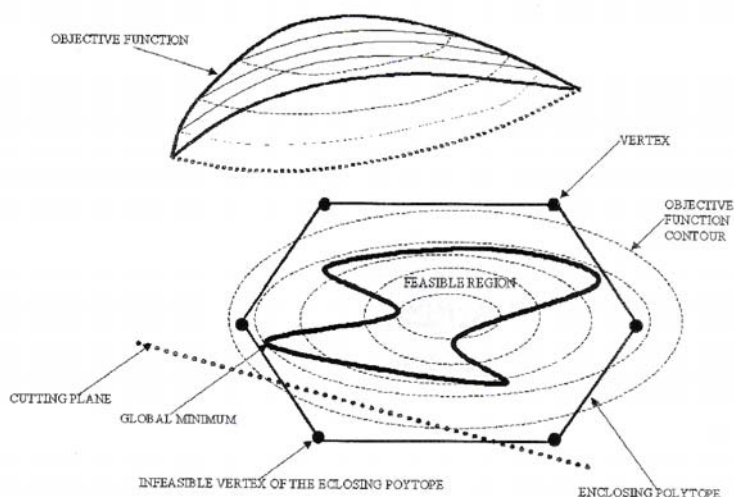
Στις μεθόδους κοίλης ελαχιστοποίησης ανήκει και η μέθοδος που εφαρμόζεται σε αυτή την μελέτη, η **Μέθοδος Εξωτερικής Προσέγγισης** όπως παρουσιάζεται από τους Karatzas και Pinder (1993 και 1996). Η μέθοδος αυτή επιλύει μια βασική δυσκολία που εμφανίζεται σε προβλήματα ελαχιστοποίησης μιας κοίλης συνάρτησης υποτελούς σε ένα γραμμικό ή μη-γραμμικό σύνολο περιορισμών. Η δυσκολία έγκειται στο ότι το τοπικό ελάχιστο που προσδιορίζεται από τους αλγορίθμους κλασσικής ελαχιστοποίησης μπορεί να μην είναι σφαιρικό.

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος αποτελεί μια σφαιρική τεχνική ελαχιστοποίησης που χρησιμοποιεί μια προσέγγιση επιπέδου τομής για τον καθορισμό της βέλτιστης λύσης.

Ο αλγόριθμος αρχίζει καθορίζοντας ένα πολύτοπο που εγκλείει την εφικτή περιοχή, η οποία καθορίζεται από ένα σύνολο κορυφών. Η εφικτή περιοχή ορίζεται ως ο χώρος όπου όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται.

Η αντικειμενική συνάρτηση, η συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση, διατυπώνεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω σαν μια κοίλη συνάρτηση. Βασιζόμενοι στα χαρακτηριστικά των κοίλων συναρτήσεων, όπου το ελάχιστο βρίσκεται πάντα σε ένα από τα πιο εξωτερικά σημεία της εφικτής περιοχής, ο αλγόριθμος καθορίζει την κορυφή του εγκλεισμένου πολυτόπου που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Στη συνέχεια, εξετάζει εάν η επιλεγμένη κορυφή είναι εφικτή. Εάν όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται, δηλώνει αυτή την κορυφή σαν την βέλτιστη λύση. Ειδάλλως, ένα επίπεδο τομής παρουσιάζεται που εξαλείφει αυτή την κορυφή και τα περιβάλλοντά της και δημιουργεί ένα νέο εγκλεισμένο πολύτοπο που είναι μια καλύτερη προσέγγιση της εφικτής περιοχής και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ο στόχος αυτής της διαδικασίας δεν είναι ο προσδιορισμός της καλύτερης προσέγγισης της εφικτής περιοχής αλλά αντίθετα είναι ο προσδιορισμός του έσχατου σημείου της εφικτής περιοχής χωρίς την εξάλειψη οποιουδήποτε τμήματος της.

**Σχήμα 6.8 : Αντίληψη της Μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης (George P. Karatzas, Introduction to Groundwater Optimal Design, 2000)**



## 6.5 Ανάλυση της Μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης

Σε προβλήματα διαχείρισης υπογείων υδάτων η εφικτή περιοχή αποτελεί πάντα ένα κυρτό σύνολο για προβλήματα ποιοτικής διαχείρισης νερού σε σταθερές συνθήκες. Σε

μια τέτοια περίπτωση όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικοί και συνεπώς κυρτοί, αφού κάθε γραμμική συνάρτηση ικανοποιεί τον ορισμό της κυρτής συνάρτησης.

Αντίθετα, σε προβλήματα ποσοτικής διαχείρισης νερού με περιορισμούς συγκέντρωσης που καθορίζονται από την μη-γραμμική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς μάζας είναι πιθανό ορισμένοι από τους περιορισμούς να αποτελούν κυρτές συναρτήσεις και κάποιοι άλλοι μη-κυρτές (κοίλεις). Σε αυτές τις περιπτώσεις εάν έστω και ένας από τους περιορισμούς που καθορίζει την εφικτή περιοχή δεν είναι κυρτός, τότε η εφικτή περιοχή ορίζεται ως ένα μη-κυρτό σύνολο.

Η διαδικασία που ακολουθείται και στις δύο περιπτώσεις για την επίλυση των προβλημάτων με την χρήση της Μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης είναι η ίδια. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά στον καθορισμό του επιπέδου τομής. Η μη-κυρτότητα της περιοχής ορισμού απαιτεί μια ιδιαίτερη προσέγγιση για να εξασφαλιστεί ότι η εισαγωγή του επιπέδου τομής δεν θα αποκλείσει κανένα μέρος της κοίλης εφικτής περιοχής. Επίσης από θεωρητική άποψη, η ελαχιστοποίηση μιας κοίλης συνάρτησης υποτελούς σε ένα κυρτό συμπαγές σύνολο περιορισμών χρήζει μεγαλύτερου ενδιαφέροντος από την αντίστοιχη περίπτωση με κοίλους περιορισμούς και αυτό συμβαίνει διότι η κυρτότητα προκύπτει στα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης (Karatzas and Pinder, Water Resources Research, April 1996).

## **6.6 Μεθοδολογία της Μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης**

### **6.6.1 Εισαγωγικά**

Η μέθοδος αυτή επωφελείται της βασικής ιδιότητας κάθε κοίλης συνάρτησης  $f$ , που είναι, ότι το ελάχιστο της συνάρτησης υποτελούς σε συμπαγές σύνολο περιορισμών  $D$  βρίσκεται πάντα σε ένα τουλάχιστον έσχατο σημείο του συνόλου. Η εφικτή περιοχή  $D$  (σύνολο περιορισμών) προσεγγίζεται από ένα απλούστερο σύνολο  $D_1$  (χαλαρό σύνολο) που περιλαμβάνει το  $D$ , και η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται μέσα στο χαλαρό σύνολο ορισμένο από την τετράγωνη περιοχή (Σχήμα 1a). Εάν η λύση αυτού του απλούστερου προβλήματος βρίσκεται στην περιοχή  $D$ , δηλαδή ικανοποιούνται όλοι οι αρχικοί περιορισμοί, τότε αυτό είναι ένα σφαιρικό βέλτιστο. Αλλιώς, ένα κατάλληλο υπερεπίπεδο τομής εισάγεται, τέτοιο ώστε ένα τμήμα του συνόλου  $D_1$  να αποκόπτεται και ένα νέο χαλαρό σύνολο  $D_2$  να προκύπτει, το οποίο όμως να περιλαμβάνει το  $D$  (Σχήμα 6.1b). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά μέχρι επιτευχθεί μια λύση στο  $D$ .

Με γεωμετρικούς όρους, οποιοδήποτε χαλαρό σύνολο  $D_k$  σε ένα χώρο  $n$  διαστάσεων ορίζεται ως ένα πολύτοπο και εφόσον το  $D_k$  περιλαμβάνει το  $D$ , το  $D_k$  μπορεί να οριστεί ως ένα εγκλειόμενο πολύτοπο. Ένα υπερεπίπεδο είναι ένα 'επίπεδο' γεωμετρικό σχήμα σε ένα χώρο  $n$  διαστάσεων αναλογικά της γραμμής σε ένα δισδιάστατο χώρο και του επιπέδου σε ένα τρισδιάστατο χώρο.

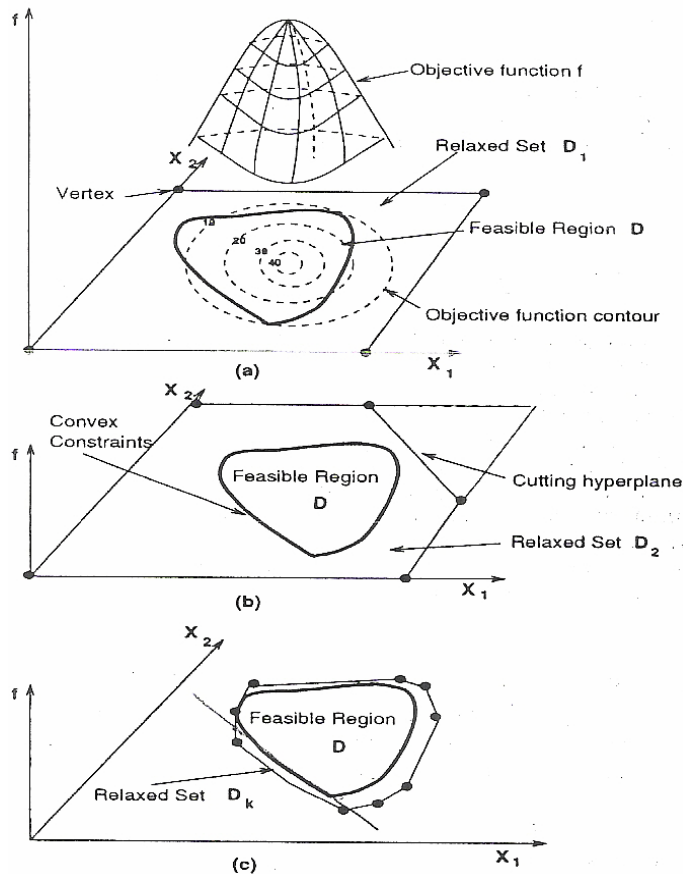
Σε γραμμικά προβλήματα με περιορισμούς το υπερεπίπεδο τομής καθορίζεται ως ένας από τους αρχικούς επιβάλλοντες περιορισμούς. Σε μη γραμμικά προβλήματα το υπερεπίπεδο τομής αποτελεί την γραμμικοποιημένη μορφή ενός από τους αρχικούς μη γραμμικούς περιορισμούς. Η διαδικασία της γραμμικοποίησης θα αναπτυχθεί στη συνέχεια με την περιγραφή του αλγορίθμου.

Η μορφοποίηση αυτής της προσέγγισης εξαρτάται από την γεωμετρία του κλειστού συνόλου  $D$  (εφικτή περιοχή), που καθορίζεται από ένα σύνολο  $m$  περιορισμών και έχει την μορφή:

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Εάν όλοι οι περιορισμοί είναι κυρτές συναρτήσεις, τότε η εφικτή περιοχή  $D$  ορίζεται ως ένα κλειστό κυρτό σύνολο. Ένα σύνολο  $D$  είναι κυρτό αν και μόνο αν  $\alpha, \beta \in D$  και  $0 \leq \lambda \leq 1$  τέτοιο ώστε  $\lambda\alpha + (1 - \lambda)\beta \in D$  [Grünbaum, 1967]. Το κλειστό σύνολο  $D$  χάνει την κυρτότητά του και πιθανότατα την συνεκτικότητά του εάν ένας ή περισσότεροι περιορισμοί είναι κοίλες συναρτήσεις (Karatzas and Pinder, Water Resources Research, October 1993).

**Σχήμα 6.9 : Η αντίληψη της Μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης: (α) χαλαρό σύνολο  $D_1$ , (b) χαλαρό σύνολο  $D_2$ , (c) χαλαρό σύνολο  $D_k$  (Karatzas and Pinder, Water Resources Research, October 1993)**



### 6.6.2 Ο αλγόριθμος της μεθόδου

Η περιγραφή του αλγορίθμου βασίζεται στην μελέτη του Thieu et al. [1983]. Το πρόβλημα P ορίζεται

**Minimize  $f(x)$**                       έτσι ώστε  $x \in D, x \geq 0$

όπου  $f : R^n \rightarrow R$  είναι μια πραγματική κοίλη συνάρτηση ορισμένη στο  $R^n$  και το  $D$  είναι ένα κλειστό κυρτό υποσύνολο του  $R^n$ .

Θεωρείται ότι η συνάρτηση  $f$  είναι συνεχής και το κλειστό υποσύνολο  $D$  ορίζεται από ένα σύνολο  $m$  περιορισμών με την μορφή

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

όπου  $g_i$  είναι συνεχείς πραγματικές κυρτές συναρτήσεις.

### Βήμα 1<sup>ο</sup>

Ο καθορισμός του εγκλειόμενου πολυτόπου  $D_1$  είναι το αρχικό βήμα του αλγορίθμου. Ένας τρόπος για να οριστεί το εγκλειόμενο πολύτοπο είναι ο καθορισμός των κορυφών του. Ένα σημείο  $x$  του εγκλειόμενου πολυτόπου σε ένα χώρο  $n$  διαστάσεων μπορεί να θεωρηθεί ως κορυφή εάν τουλάχιστον  $n$  περιορισμοί προκύπτουν, με την μορφή ισότητας, σε αυτό το σημείο.

Σε ένα πρόβλημα κοίλης ελαχιστοποίησης  $n$  παραμέτρων ( $n$  διαστάσεων) και  $m$  περιορισμών, το εγκλειόμενο πολύτοπο  $D_1$  καθορίζεται ως ακολούθως:

$$M = \max \left\{ \sum_{j=1}^n x_j : x \in D \right\} \quad (6.1)$$

που είναι ένα πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού και μπορεί να επιλυθεί εύκολα με οποιοδήποτε από τους αλγορίθμους κλασσικού κυρτού προγραμματισμού. Έτσι

$$D_1 = \left\{ x : x_j \geq 0, j = 1, \dots, n; \sum_{j=1}^n x_j \leq M \right\} \quad (6.2)$$

και οι κορυφές είναι  $v^0 = 0$ ,  $v^j = Me^j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , όπου  $e^j$  είναι η  $j$  μονάδα διανύσματος του  $R^n$ .

Στην περίπτωση που υπάρχει ένα ανώτερο όριο για το  $x$ , τότε το  $D_1$  ορίζεται ως

$$D_1 = \{x : 0 \leq x_j \leq x_j^{up}, j = 1, \dots, n\} \quad (6.3)$$

και οι κορυφές είναι όλοι οι  $2^n$  πιθανοί συνδυασμοί του 0 και του  $x_j^{up}$  [Horst and Tuy, 1990].

### Βήμα 2<sup>ο</sup>

Στο τέλος του αρχικού βήματος έχει δημιουργηθεί ένα εγκλειόμενο πολύτοπο  $D_k$  που ορίζεται από ένα σύνολο κορυφών  $V_k$ . Τότε  $x^k$  είναι η κορυφή που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση  $f$ , τότε

$$x^k = \{f(x) : x \in V_k\} \quad (6.4)$$

Σε περιπτώσεις που υπάρχουν αρκετοί υπονήφιοι τότε ένας από αυτού επιλέγεται αυθαίρετα. Εάν το  $x^k$  ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς  $g_i(x), \dots, g_i(x^k) \leq 0$  για κάθε  $i = 1, \dots, m$ , τότε  $x^k \in D$  και αποτελεί μια βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος (P).

### Βήμα 3<sup>ο</sup>

Αλλιώς, καθορίζεται ο πιο θετικός περιορισμός  $g_{\max}^k(x)$  τέτοιος ώστε

$$g_{\max}^k(x) = \max\{g_i(x^k)\}, \quad i = 1, \dots, m. \quad (6.5)$$

### Βήμα 4<sup>ο</sup>

Για προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς

$$h^k(x) = g_{\max}^k(x) \quad (6.6)$$

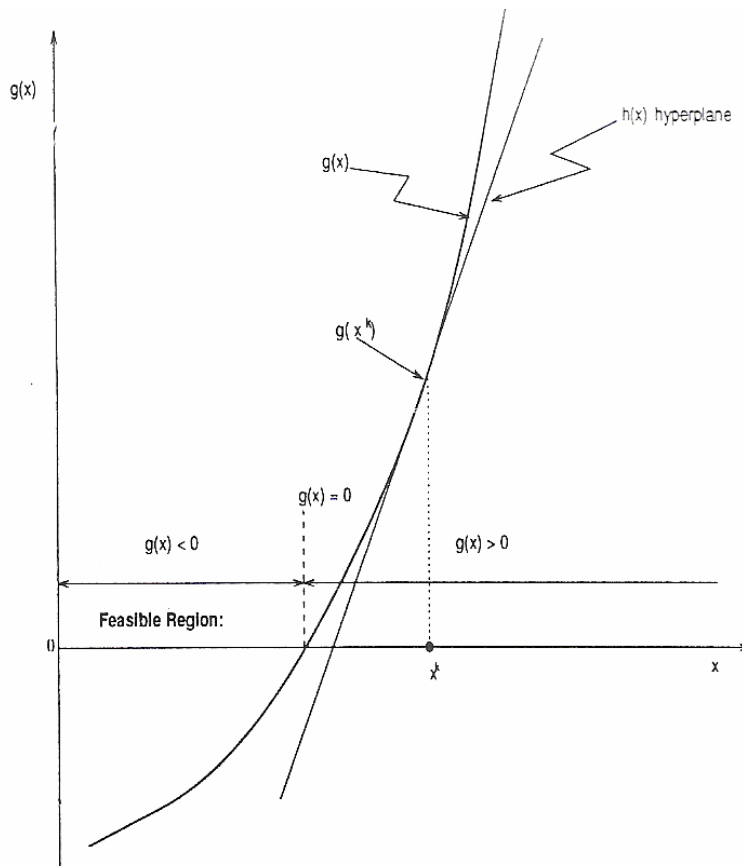
αυτός είναι ο περιορισμός που θα παίξει τον ρόλο του υπερεπίπεδου τομής για το εγκλειόμενο πολύτοπο  $D_k$  και δημιουργεί ένα εγκλειόμενο πολύτοπο  $D_{k+1}$ .

Για προβλήματα με μη γραμμικούς περιορισμούς

$$h^k(x) = \frac{\theta g_{\max}^k(x^k)}{\theta x} (x - x^k) + g_{\max}^k(x^k) \quad (6.7)$$

που είναι η ‘γραμμικοποιημένη’ μορφή του  $g_{\max}^k(x^k)$ . Εφόσον  $g_{\max}^k(x)$  είναι μια κυρτή συνάρτηση και  $h^k(x)$  εξ’ ορισμού είναι ένα εφαπτόμενο υπερεπίπεδο του  $g_{\max}^k(x)$  στο σημείο  $g_{\max}^k(x^k)$ , το  $h^k(x)$  θα είναι ένα υπερεπίπεδο τομής του εγκλειόμενου πολύτοπου  $D_k$  πάντα τοποθετημένο ανάμεσα στην κορυφή  $x^k$  και στον μη γραμμικό περιορισμό  $g_{\max}^k(x)$ . Αυτό εξασφαλίζει ότι το  $h^k(x)$  ούτε θα κόβει αλλά ούτε και θα τέμνει την εφικτή περιοχή  $D$ . Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η παραπάνω ιδέα για ένα μονοδιάστατο πρόβλημα. Το υπερεπίπεδο  $h(x)$  (σε αυτή την περίπτωση μια γραμμή) είναι ένα εφαπτόμενο υπερεπίπεδο της συνάρτησης  $g(x)$  στο σημείο  $x^k$ , και το εφαπτόμενο υπερεπίπεδο σε μια συνάρτηση  $g(x)$  ποτέ δεν τέμνει την συνάρτηση.

**Σχήμα 6.10 : Η αντίληψη του υπερεπίπεδου τομής σε μια διάσταση (Karatzas and Pinder, Water Resources Research, October 1993)**



### Βήμα 5<sup>ο</sup>

Η εισαγωγή του υπερεπίπεδου τομής  $h^k(x)$  μέσα στο πολύτοπο  $D_k$  χωρίζει το  $D_k$  σε δύο περιοχές: (1)  $\{x : h^k(x) > 0\}$  και (2)  $\{x : h^k(x) \leq 0\}$ . Το νέο εγκλειόμενο πολύτοπο  $D_{k+1}$  ορίζεται ως

$$D_{k+1} = D_k \cap \{x : h^k(x) \leq 0\} \quad (6.8)$$

### 6.6.3 Μαθηματική μορφοποίηση του προβλήματος ελαχιστοποίησης κοίλης συνάρτησης

Το πρόβλημα μορφοποιείται μαθηματικά ως εξής:

$$\min \sum_{i=1}^n a_i^+ q_i^+ + a_i^- q_i^- + a_i^0 (1 - e^{-bq_i^+}) + a_i^0 (1 - e^{-bq_i^-})$$

έτσι ώστε

$$c_j(q) \leq c_j^* \quad j \in J$$

$$0 \leq q_i^+ \leq q_i^{+up}$$

$$0 \leq q_i^- \leq q_i^{-up}$$

$$q_i = q_i^+ - q_i^-$$

όπου

- n αριθμός των ενδεχόμενων πηγαδιών
- $a_i^+$  μονάδα κόστους για έγχυση στο πηγάδι i
- $a_i^-$  μονάδα κόστους για άντληση στο πηγάδι i
- $a_i^0$  κόστος εγκατάστασης του πηγαδιού i
- $q_i^+$  ρυθμός έγχυσης στο πηγάδι i
- $q_i^-$  ρυθμός άντλησης στο πηγάδι i
- b συντελεστής κλίμακας
- $c_{j(q)}$  συγκέντρωση στον κόμβο j στο τέλος της περιόδου εξυγίανσης
- $c_j^*$  ανώτατο όριο του  $c_j$
- $q_i^{+up}$  καθορισμένο ανώτατο όριο για έγχυση στην θέση i
- $q_i^{-up}$  καθορισμένο ανώτατο όριο για άντληση στην θέση i
- q διάνυσμα των ρυθμών άντλησης των πηγαδιών
- $q_i$  το I στοιχείο του διανύσματος ρυθμού άντλησης q
- I σύνολο των σημείων που αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των πηγαδιών
- J σύνολο των σημείων που αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των πηγαδιών παρατήρησης

(Karatzas and Pinder, Water Resources Research, April 1996).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

### **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ** **ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC** **(ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ)**

## 7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC (ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ)

### 7.1 Εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο PTC

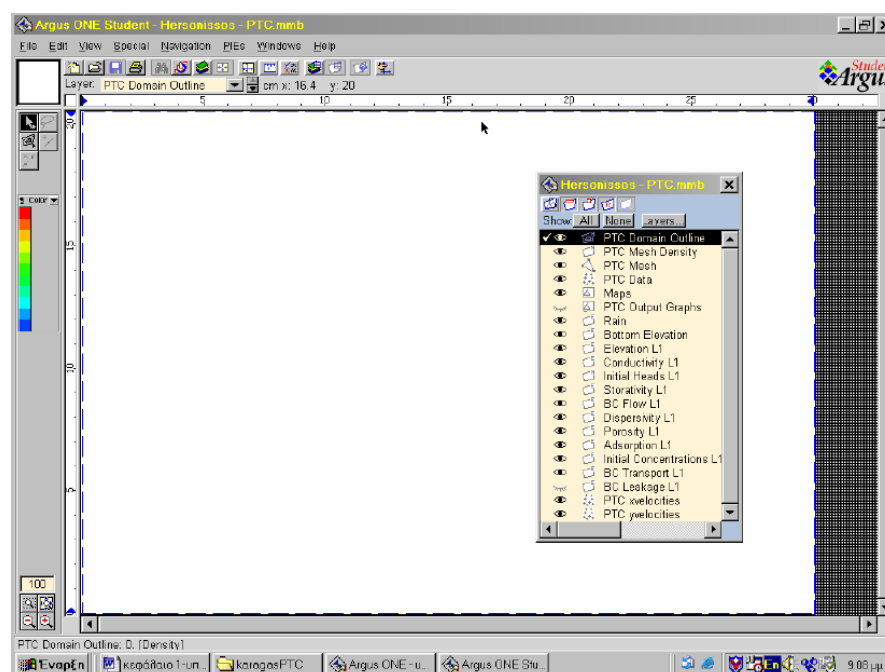
Για τον προσδιορισμό της ζώνης υφαλμύρωσης της Χερσονήσου με την χρήση του μοντέλου PTC είναι απαραίτητος ο καθορισμός και η εισαγωγή κάποιων στοιχείων. Με αυτό τον τρόπο γίνεται προσομοίωση της περιοχής καθώς και του υδροφορέα που υπάρχει στην περιοχή αυτή.

Από τα πρώτα στοιχεία που καθορίζονται στο μοντέλο είναι το είδος των πεπερασμένων στοιχείων από τα οποία αποτελείται το δίκτυο (σε αυτή την περίπτωση είναι τριγωνικά) και η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα (ελεύθερος υδροφορέας). Η προσομοίωση πραγματοποιείται για δύο χρονικές περιόδους (καλοκαίρι-χειμώνα) και η υπό μελέτη περιοχή αποτελείται από ένα στρώμα (layer).

Επίσης εισάγονται στοιχεία τα οποία αφορούν τα υψόμετρα της περιοχής (elevations), τις υδραυλικές αγωγιμότητες (conductivities), τις αρχικές συνθήκες (initial conditions), τις οριακές συνθήκες (boundary conditions) καθώς και την εισαγωγή πηγαδιών (wells) με τους ρυθμούς άντλησης.

Στις ακόλουθες υποενότητες περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την λειτουργία του μοντέλου και την απόκτηση των αποτελεσμάτων.

**Σχήμα 7.1 : Εικόνα του μοντέλου PTC στο περιβάλλον του Argus - One**



### 7.1.1 Χάρτης

Αρχικά γίνεται εισαγωγή του χάρτη της περιοχής (**τοπογραφικός χάρτης**) με κλίμακα 1:50.000, ο οποίος περιέχει στοιχεία για τα πηγάδια που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή. Η περιοχή της μελέτης μας αφορά το ακρωτήριο της Χερσονήσου, τον λιμένα Χερσονήσου κατά μήκος της ακτής του καθώς και τους οικισμούς Πισκοπιανό, Κουτουλουφάρη και επεκτείνεται νότια μέχρι το Καλό Χωριό. Αφού εισαχθεί ο χάρτης της περιοχής στο μοντέλο, σχεδιάζεται το περίγραμμα της περιοχής μελέτης και καθορίζεται η πυκνότητα των τριγώνων του δικτύου. Προκειμένου όμως το μοντέλο να δώσει αποτελέσματα, ο αριθμός των τριγώνων δεν πρέπει να ξεπερνά το 2000, αριθμός ο οποίος έχει καθοριστεί από το λογισμικό του Argus One για τη συγκεκριμένη έκδοση. Απαραίτητος είναι και ο καθορισμός της κλίμακας.

Τα στοιχεία που υπάρχουν για τα πηγάδια της περιοχής αυτής, τόσο ιδιωτικά όσο και δημοτικά, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

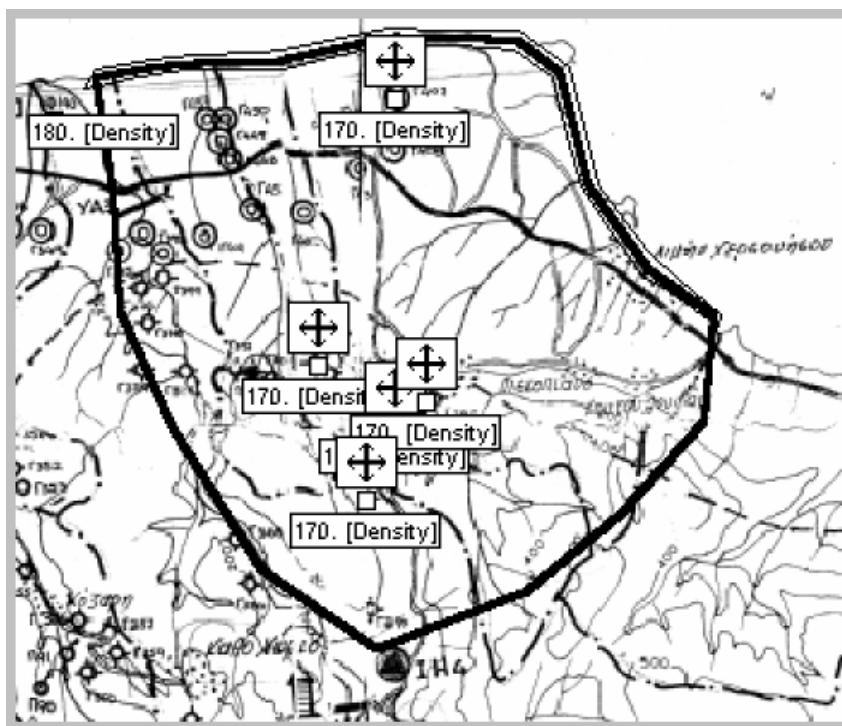
**Πίνακας 7.1 : Στοιχεία για τα πηγάδια της περιοχής (ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης)**

A/A	Αρ. Πρ.	Βάθος m	Παροχή m <sup>3</sup> /hr	Ιδιοκτήτης
1	Γ386	105	8	Δήμος
2	Γ387	148	35	Δήμος
3	Γ388	170	35	Ιδιώτης
4	Γ389	180	2	Δήμος
5	Γ390	112	10	Ιδιώτης
6	Γ392	180	15	Ιδιώτης
7	Γ393	148	35	Δήμος
8	Γ396	170	20	Ιδιώτης
9	Γ397	140	30	Ιδιώτης
10	Γ399	60	30	Ιδιώτης
11	Γ401	80	40	Ιδιώτης
12	Γ402	80	40	Ιδιώτης
13	Γ403	65	25	Δήμος
14	Γ404	40	30	Ιδιώτης
15	Γ406	25	60	Ιδιώτης
16	Γ407	25	40	Ιδιώτης

17	Γ408	-	15	Ιδιώτης
18	Γ448	25	20	Ιδιώτης
19	Γ449	26	20	Ιδιώτης
20	Γ450	26	20	Ιδιώτης
21	Γ452	100	20	Ιδιώτης

Επειδή ο αριθμός των πηγαδιών είναι μεγάλος και στόχος μας είναι η καλύτερη δυνατή μοντελοποίηση, έγινε μια ομαδοποίηση αυτών και από το σύνολο των 21 πηγαδιών τελικά εισήχθησαν 5 εκ των οποίων 1 ομαδοποιημένο ιδιωτικό και 4 δημοτικά (Στεφανόπουλος Κυριάκος, Διπλωματική Εργασία, Οκτώβριος 2004).

**Σχήμα 7.2 : Ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης και τα πηγάδια**



Από τον **υδρογεωλογικό χάρτη** παίρνουμε πληροφορίες για την γεωλογία και τα υδρολογικά πετρώματα της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, τα πετρώματα που υπάρχουν στην περιοχή είναι ως επί το πλείστον ασβεστόλιθοι οι οποίοι παρουσιάζονται στον χάρτη με πράσινο χρώμα. Στο κέντρο της περιοχής υπάρχουν βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι που παρουσιάζονται με αχνό πορτοκαλί χρώμα, μέσα στους οποίους υπάρχουν φακοί από μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους με έντονο κίτρινο. Ανατολικά υπάρχουν ιλυούχες άργιλοι και καλά

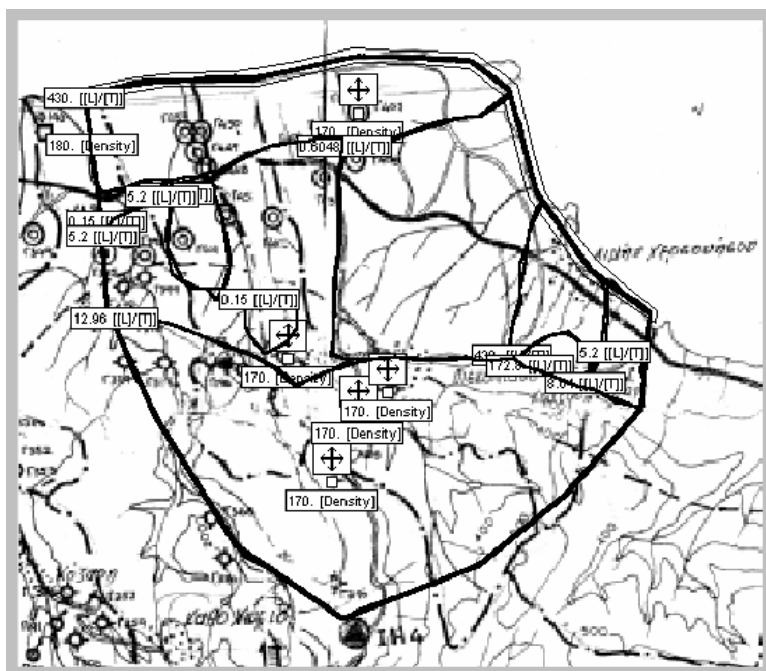
διαβαθμισμένες άμμοι (ελαφρύ κίτρινο), ενώ κατά μήκος της ακτής υπάρχουν άμμοι ακτών και χαλαρά αργιλοαμμώδη (άσπρο με γαλάζιο). Η γνώση των πετρωμάτων της περιοχής είναι αναγκαία διότι σε κάθε ένα αντιστοιχεί και μια διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας. Με βάση την βιβλιογραφία τυπικές τιμές αγωγιμότητας για τα παραπάνω πετρώματα είναι οι ακόλουθες:

**Πίνακας 7.2 : Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας**

Πετρώματα	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/d)
Ασβεστόλιθοι-Δομολίτες	12.96
Βιοκλαστικοί λατυτοπαγείς ασβεστόλιθοι	5.2
Μάργες-Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	0.15
Αργίλος	0.6048
Άμμος-θαλάσσιες αποθέσεις	430
Λατύπες ανθρακικής σύνθεσης	172.8

Η υδραυλική αγωγιμότητα ορίζεται και στις τρεις διευθύνσεις. Έχει την ίδια τιμή στην διεύθυνση x και y, ενώ διαφοροποιείται στην διεύθυνση z (κάθετη στο επίπεδο του χαρτιού), όπου ισούται με το 10% των αντίστοιχων αγωγιμοτήτων της x και y διεύθυνσης.

**Σχήμα 7.3 : Ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής χωρισμένος σε περιοχές με βάση τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας**

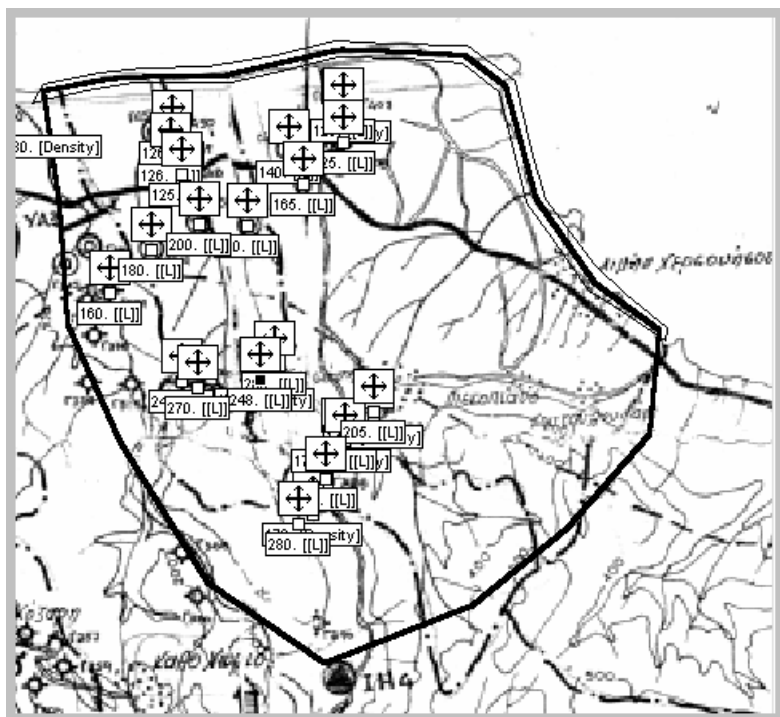


### 7.1.2 Υψόμετρα (Elevation) –Αρχικές συνθήκες (Initial Heads)

Με βάση τον τοπογραφικό χάρτη εισήχθησαν στο μοντέλο τα πηγάδια της περιοχής καθώς και τα υψόμετά τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο απόλυτο υψόμετρο του κάθε πηγαδιού προστέθηκαν 100 μέτρα επιπλέον διότι το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Στη διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε η μέθοδος της παρεμβολής (interpolation method) έτσι ώστε να μπορέσει το μοντέλο να κάνει μια όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση του ανάγλυφου της περιοχής. Η εισαγωγή πηγαδιών αντικατέστησε την εισαγωγή ισοϋψών για λόγους μεγαλύτερης ακρίβειας.

Το μοντέλο για την προσομοίωση της περιοχής χρειάζεται και την εισαγωγή κάποιων αρχικών συνθηκών (αρχικό υδραυλικό ύψος). Η τιμή που του δόθηκε είναι τα 100 μέτρα.

**Σχήμα 7.4 :** Ο τοπογραφικός χάρτης με τα πηγάδια της περιοχής και τα αντίστοιχα υψόμετά τους



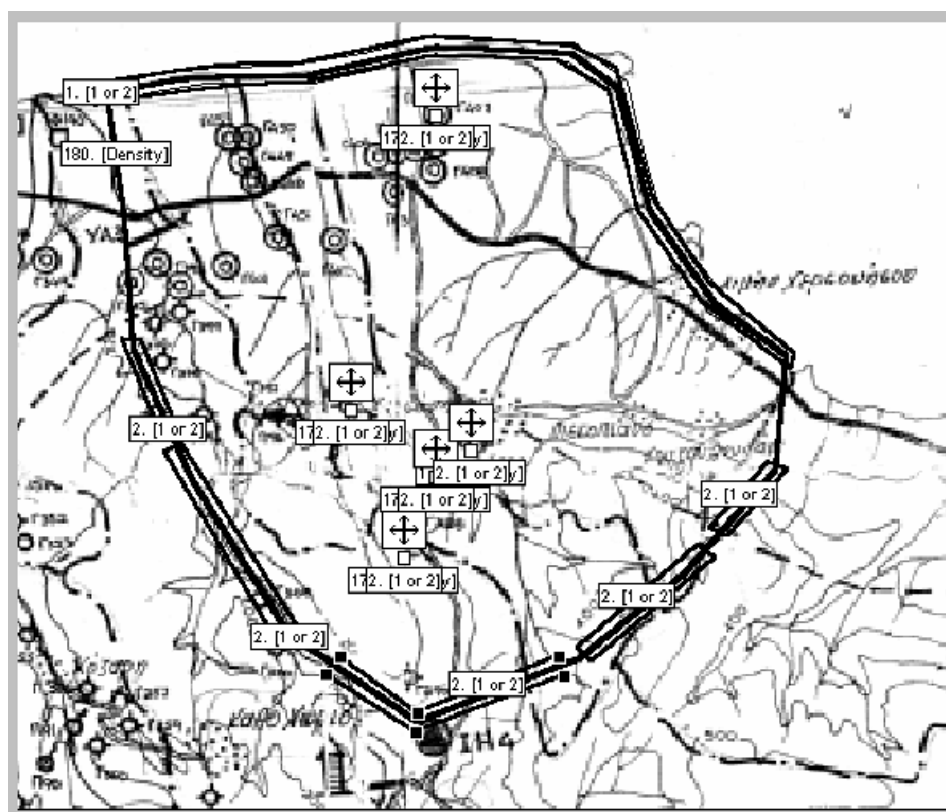
### 7.1.3 Οριακές συνθήκες (Boundary conditions)

Οριακή συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους θεωρείται η παράκτια γραμμή όπου το υδραυλικό ύψος είναι ίσο με 100. Δηλαδή στο επίπεδο της θάλασσας ο υδροφορέας έχει βάθος 100 μέτρα.

Από τον ασβεστόλιθο λόγω του γεγονότος ότι είναι υδροπερατός, λαμβάνει χώρα εισροή νερού από τον υπόγειο υδροφόρο προς την περιοχή μελέτης. Γι' αυτό το λόγο στα πετρώματα αυτά έχουν εισαχθεί οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους με σταθερές τιμές ανά μονάδα χρόνου. Οι τιμές αυτές έχουν προσαρμοστεί ανάλογα με την χρονική περίοδο. Τον χειμώνα αναμένεται μεγαλύτερη εισροή νερού εξαιτίας της μεγαλύτερης βροχόπτωσης, του λιώσιμου των χιονιών από τα βουνά και των μικρότερων τιμών άντλησης, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες οι τιμές αυτές έχουν μειωθεί κατά 20-50%.

Οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους θεωρούνται και τα πηγάδια άντλησης της περιοχής (σταθερή παροχή άντλησης). Οι παροχές βέβαια έχουν προσαρμοστεί ανάλογα με την περίοδο προσομοίωσης (καλοκαιρινή – χειμερινή). Επειδή η περιοχή είναι αποκλειστικά τουριστική οι κάτοικοι το καλοκαίρι υπερδιπλασιάζονται και έτσι οι ανάγκες για νερό είναι πολύ μεγαλύτερες. Το χειμώνα όμως όπου οι ανάγκες για νερό είναι πολύ λιγότερες, οι παροχές άντλησης έχουν μειωθεί στο 30% από αυτές της καλοκαιρινής περιόδου.

**Σχήμα 7.5 : Ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης και τις οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> είδους**



#### 7.1.4 Βροχοπτώσεις

Σύμφωνα με στοιχεία του Μετεωρολογικού σταθμού του Ηρακλείου προκύπτει ότι το ετήσιο ύψος βροχής στην περιοχή μελέτης υπολογίζεται στα 483.2 mm βροχής.

Η περίοδος των βροχοπτώσεων είναι κυρίως τους χειμερινούς μήνες, από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάρτιο. Αντίθετα η καλοκαιρινή περίοδος, από τον Απρίλιο μέχρι τον Σεπτέμβριο, είναι ως επί το πλείστον ξηρή.

Η βροχόπτωση επηρεάζει άμεσα την ροή των υπογείων υδάτων καθώς από τον κύκλο του νερού φαίνεται ότι ένα σημαντικό μέρος του νερού της βροχόπτωσης καταλήγει στους υδροφορείς με την διεργασία της διήθησης. Έτσι στο μοντέλο PTC εισάγεται ένας επιπλέον όρος που αντιπροσωπεύει την βροχόπτωση. Ο όρος αυτός δεν εισάγεται και για τις δύο περιόδους προσομοίωσης, αλλά μόνο για την χειμερινή όπου το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο.

Από την υδρολογική μελέτη του βόρειου νομού Ηρακλείου λαμβάνουμε τα παρακάτω στοιχεία:

- ❖ Το ποσοστό του όγκου της βροχόπτωσης που διηθείται είναι 11% για αδιαπέραστους σχηματισμούς και 23% για διαπερατούς.
- ❖ Από την συνολική έκταση που καταλαμβάνει η περιοχή μελέτης (17.729.185 m<sup>2</sup>), το 77.77% καταλαμβάνουν οι υδροπερατοί σχηματισμοί (13.788.415 m<sup>2</sup>) και το υπόλοιπο 22.23% οι αδιαπέραστοι (3.941.070 m<sup>2</sup>). Πρέπει να αναφερθεί ότι από το τμήμα των υδροπερατών αφαιρείται ένα ποσοστό που είναι κατοικήσιμο και όπου ουσιαστικά η διήθηση είναι μηδενική. Έτσι απομένει το 46.7% (10.637.511 m<sup>2</sup>).

Με βάση τα παραπάνω η διήθηση είναι:

- ❖ Για τους υδροπερατούς σχηματισμούς

$$\text{Διήθηση} = 46.7\% \times 23\% \times 483.2\text{mm} = 51.9\text{mm/yr}$$

- ❖ Για τους αδιαπέραστους σχηματισμούς

$$\text{Διήθηση} = 22.23\% \times 11\% \times 483.2\text{mm} = 11.81\text{mm/yr}$$

Άρα η συνολική διήθηση είναι  $51.9 + 11.81 = 63.71 \text{ mm/yr}$ . Επειδή η χειμερινή περίοδος αποτελείται από 180 μέρες, ο όρος που εισάγεται στο μοντέλο για την βροχόπτωση (rain) και αφορά μόνο την χειμερινή περίοδο είναι 0.000354 m/d (Στεφανόπουλος Κυριάκος, Διπλωματική Εργασία, Οκτώβριος 2004).

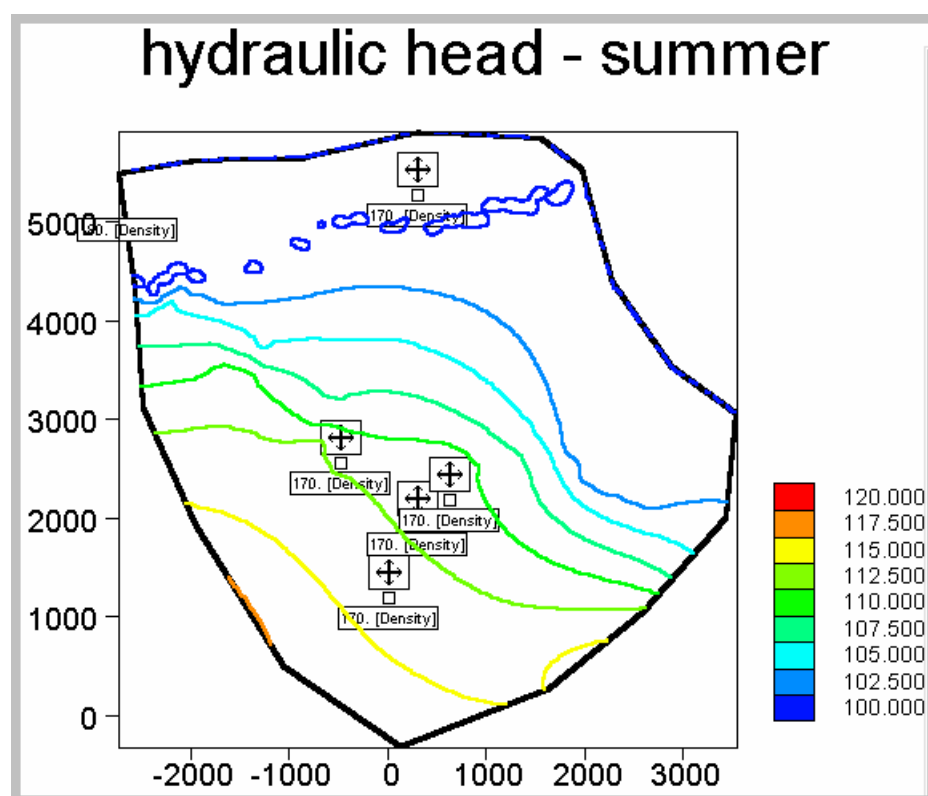
### 7.1.5 Υπόλοιπα στοιχεία

Εκτός των στοιχείων που αναφέρθηκαν, στο μοντέλο πρέπει να εισαχθούν τιμές και για την αποθηκευτικότητα, τη διασπορά και το πορώδες. Οι τιμές αυτές είναι οι προκαθορισμένες από το ίδιο το μοντέλο.

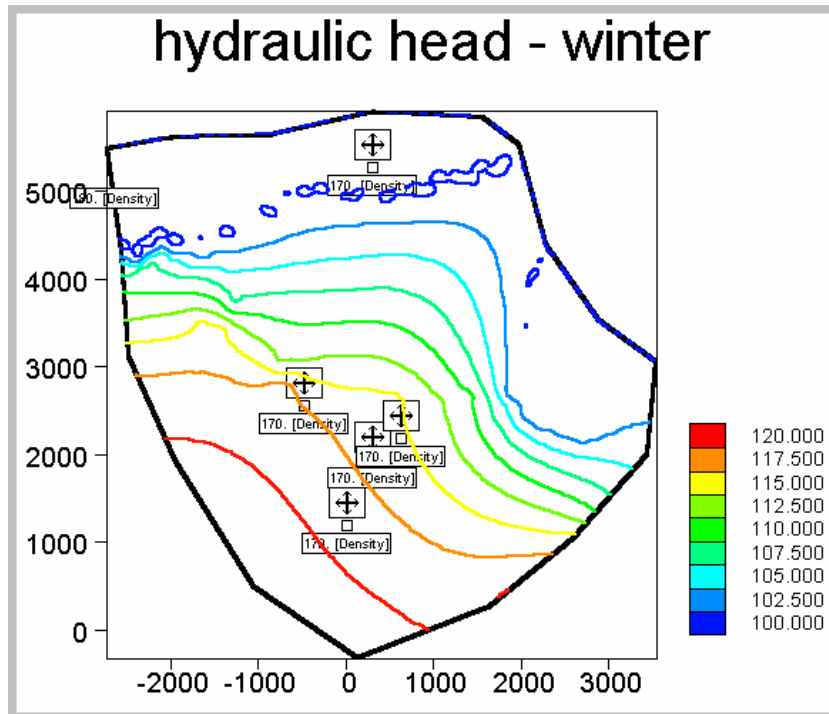
## 7.2 Αποτελέσματα του μοντέλου PTC – Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα

Μετά από την εισαγωγή όλων των παραπάνω στοιχείων στο μοντέλο PTC γίνεται η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα μετά το πέρας της καλοκαιρινής και της χειμερινής περιόδου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα:

**Σχήμα 7.6 : Προσομοίωση της κατάστασης του υδροφορέα μετά το τέλος της θερινής περιόδου (διάγραμμα του υδραυλικού ύψους)**

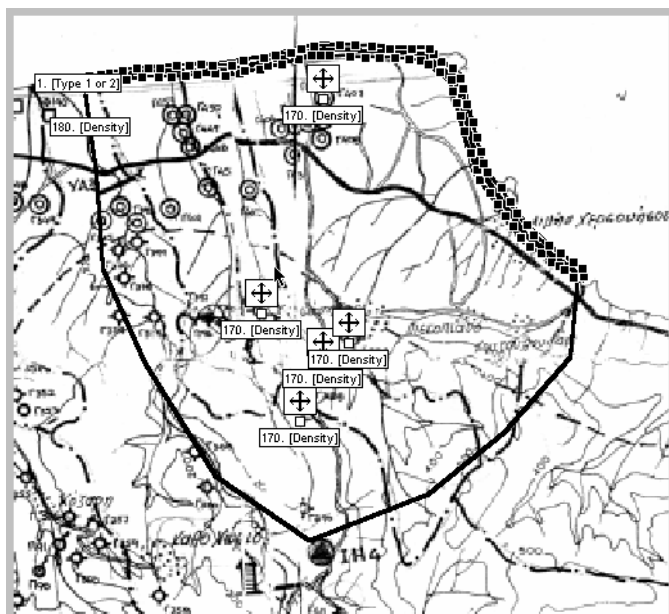


**Σχήμα 7.7 : Προσομοίωση της κατάστασης του υδροφορέα μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου (διάγραμμα του υδραυλικού ύψους)**

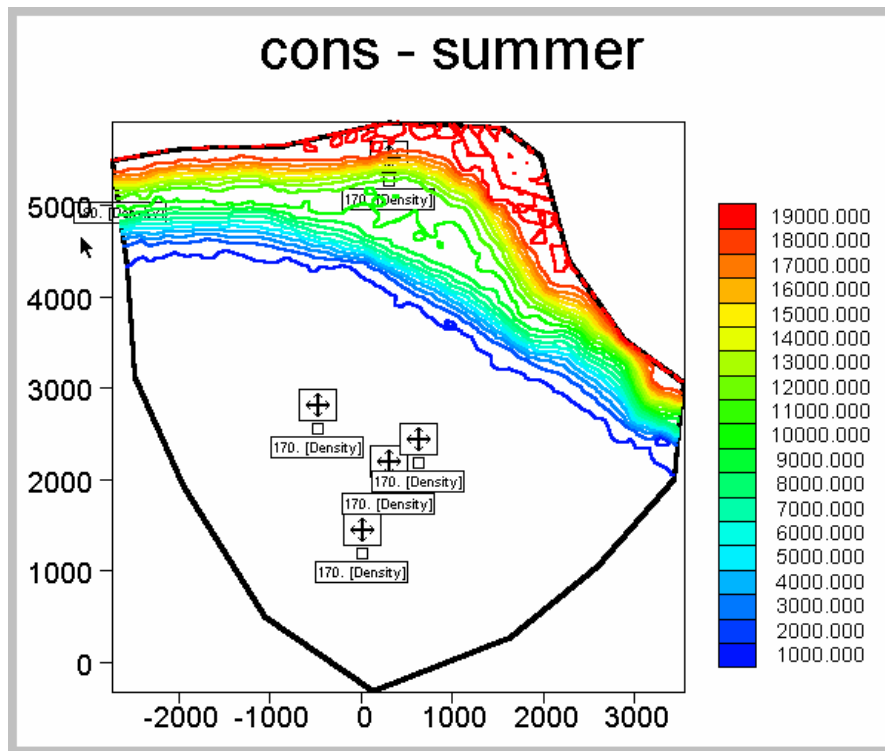


Για να μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της υπάρχουσας κατάστασης του υδροφορέα, μαζί με τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω, στο μοντέλο εισήχθηκε και μια ζώνη χλωριώντων (υφάλμυρο νερό) κατά μήκος της ακτής. Η τιμή της συγκέντρωσης των χλωριώντων είναι τα 19000 ppm (οριακή συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους). Έτσι το μοντέλο δίνει και τα διαγράμματα της συγκέντρωσης των χλωριώντων:

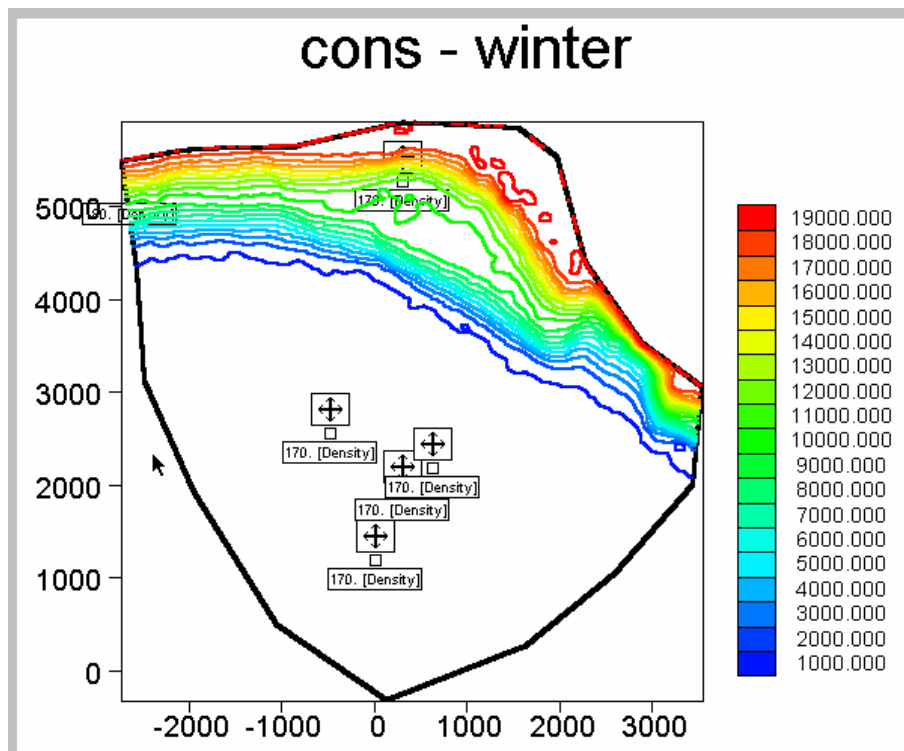
**Σχήμα 7.8 : Εικόνα της ζώνης των χλωριώντων κατά μήκος της ακτής (οριακή συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους)**



Σχήμα 7.9 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης των χλωριώντων μετά το τέλος της θερινής περιόδου

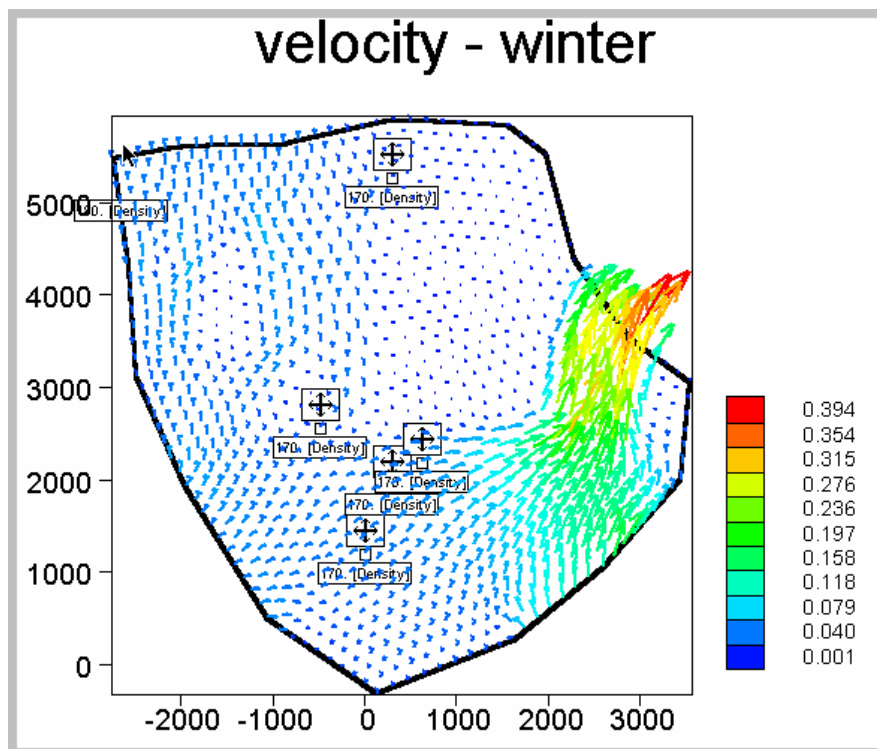
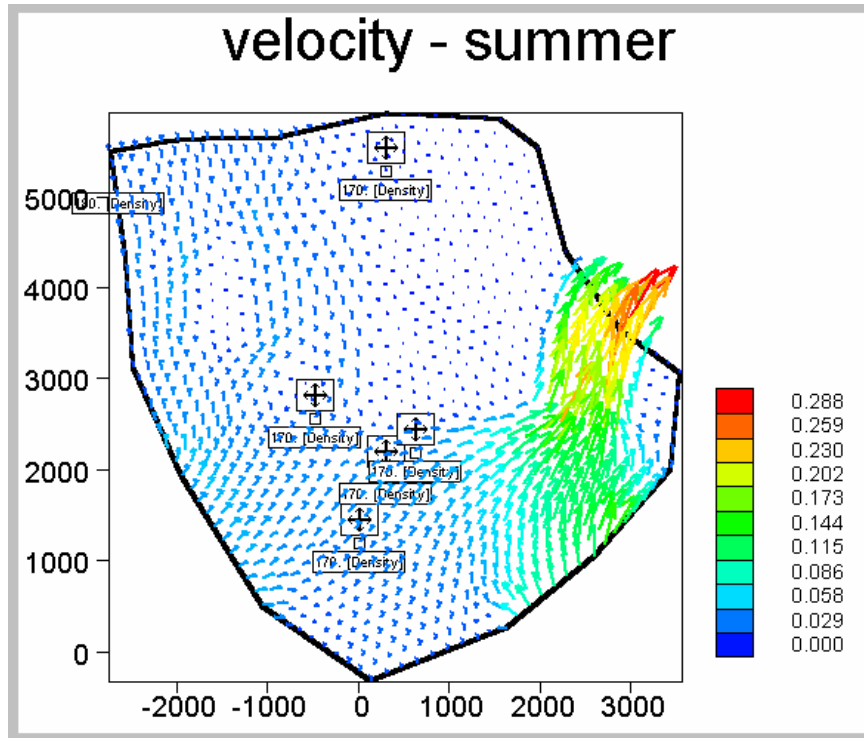


Σχήμα 7.10 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης των χλωριώντων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου



Επίσης το μοντέλο μας δίνει και τα διαγράμματα των ταχυτήτων του νερού για κάθε περίοδο:

**Σχήμα 7.11 :** Προσομοίωση της κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της θερινής και χειμερινής περιόδου. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε m/d



### 7.3 Σχόλια – Παρατηρήσεις

Μελετώντας το διάγραμμα της συγκέντρωσης των χλωριώντων (υφάλμυρο νερό) για την καλοκαιρινή περίοδο είναι εμφανές ότι το μέτωπο της υφαλμύρωσης έχει εισχωρήσει στην περιοχή της Χερσονήσου και ορισμένα από τα πηγάδια βρίσκονται εντός της ζώνης αυτής. Επίσης από το διάγραμμα του υδραυλικού ύψους παρατηρείται ότι τα επίπεδα του υδραυλικού ύψους είναι χαμηλά, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην υπεράντληση (αυξημένες ανάγκες) και στην έλλειψη βροχόπτωσης.

Την χειμερινή περίοδο η κατάσταση είναι αρκετά διαφορετική. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους έχουν αυξηθεί λόγω περισσότερων εισροών, της βροχόπτωσης αλλά και μικρότερων τιμών άντλησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μέτωπο της υφαλμύρωσης να μετακινείται προς την ακτή. Η μετακίνηση αυτή είναι σημαντική, όμως αρκετά από τα πηγάδια συνεχίζουν να αντλούν υφάλμυρο νερό.

Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση που επικρατεί το καλοκαίρι είναι σαφώς δυσμενέστερη της αντίστοιχης κατάστασης τον χειμώνα. Αυτό οφείλεται κυρίως στις αυξημένες ανάγκες που παρουσιάζονται κατά την καλοκαιρινή περίοδο (μεγάλη τουριστική κίνηση), όπου τα πηγάδια αντλούν με πολύ μεγάλους ρυθμούς. Αντίθετα τον χειμώνα όπου η κίνηση μειώνεται στο 30%, τα πηγάδια αντλούν με μικρότερους ρυθμούς και έτσι το φαινόμενο της υφαλμύρωσης περιορίζεται.

Μελετώντας τα διαγράμματα των ταχυτήτων του νερού, διαπιστώνεται αρχικά ότι οι ταχύτητες την χειμερινή περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της καλοκαιρινής περιόδου. Επίσης είναι εμφανές ότι στις περιοχές όπου τα πετρώματα έχουν χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα (μάργες – μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι) η ταχύτητα του νερού είναι μικρή (μικρό διάνυσμα) και έτσι η κυκλοφορία του νερού πραγματοποιείται με δυσκολία. Αντίθετα σε περιοχές με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα (άμμος – θαλάσσιες αποθέσεις – λατύπες ανθρακικής σύνθεσης) οι ταχύτητες είναι μεγάλες (μεγάλο διάνυσμα), το νερό κινείται γρήγορα και διοχετεύεται στην θάλασσα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**

### **ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ**

### **ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΑ**

## 8. ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΑ

### 8.1 Εισαγωγή

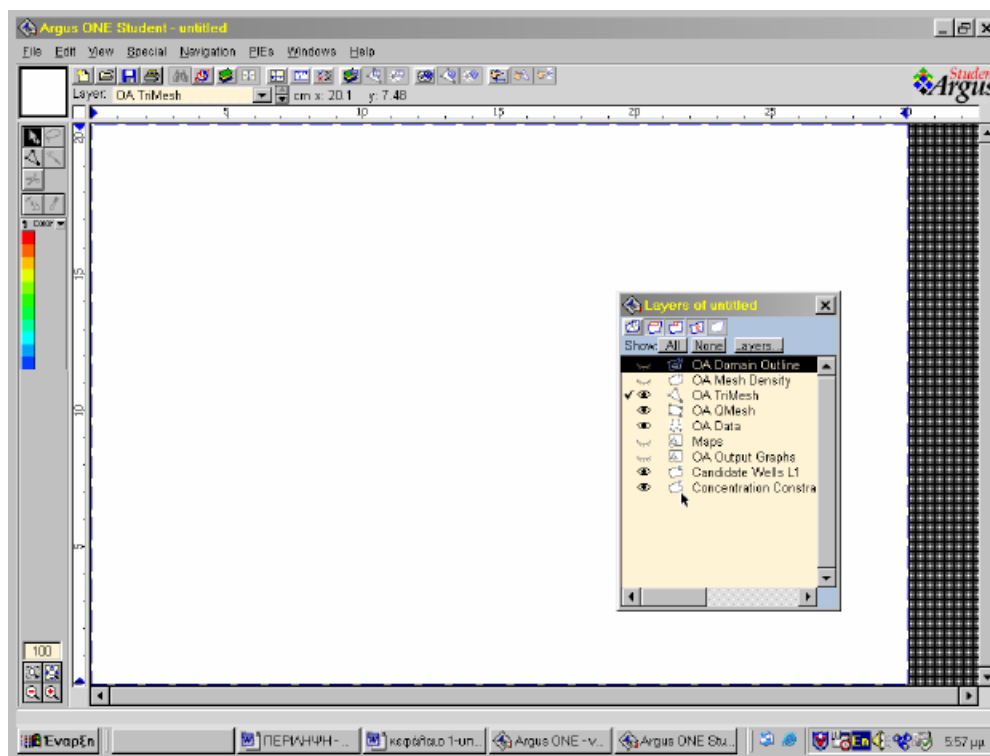
Βάσει των αποτελεσμάτων που έδωσε το μοντέλο προσομοίωσης PTC το μέτωπο της υφαλμύρωσης στον δήμο της Χερσονήσου, κυρίως κατά την καλοκαιρινή περίοδο, είναι ιδιαίτερα εξαπλωμένο. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού. Περισσότερο επιθυμητή θα ήταν η εξάλειψή του, μια ιδεατή κατάσταση καθότι η υφαλμύρωση είναι ένα φαινόμενο μη αναστρέψιμο.

Με την εφαρμογή της μεθόδου Εξωτερικής Προσέγγισης είναι δυνατή η εύρεση της βέλτιστης δυνατής εφαρμόσιμης λύσης.

### 8.2 Εισαγωγή στοιχείων στο μοντέλο ΟΑ

Το μοντέλο ΟΑ βρίσκεται στο περιβάλλον του Argus One Gis μαζί με το μοντέλο PTC. Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα, παρατηρείται ότι η εφαρμογή του δεύτερου απαιτεί την εισαγωγή περισσότερων στοιχείων σε σχέση με το πρώτο. Αυτό συμβαίνει διότι στο μοντέλο ΟΑ τα στοιχεία εισάγονται αυτόματα από το PTC.

Σχήμα 8.1 : Εικόνα του ΟΑ στο περιβάλλον του Argus One Gis



Το μοντέλο εφαρμόζεται για χρονικό διάστημα έξι μηνών και βασίζεται στα στοιχεία που προέκυψαν στο τέλος της χειμερινής περιόδου. Η επιλογή αυτής της περιόδου δεν είναι τυχαία διότι κατά την περίοδο αυτή οι διαθέσιμες ποσότητες νερού είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με την καλοκαιρινή περίοδο λόγω μειωμένου τουρισμού (περιορισμένες αρδευτικές ανάγκες), περισσότερων εισροών αλλά και της βροχόπτωσης και έτσι υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα εμπλουτισμού του υδροφορέα.

Μόνο δυο κατηγορίες δεδομένων εισάγονται σε αυτό το μοντέλο. Η μια κατηγορία είναι τα πιθανά πηγάδια τα οποία μπορεί να είναι είτε πηγάδια εμπλουτισμού είτε άντλησης (Candidate Wells L1) και η άλλη κατηγορία είναι τα πηγάδια παρατήρησης (Concentrations Constraints L1). Η επιλογή τόσο του είδους και του αριθμού όσο και των τιμών των παροχών και συγκεντρώσεων δεν είναι δεδομένη και είναι καθαρά προσωπική επιλογή. Βέβαια από άποψη κόστους υπάρχει ένας περιορισμός στην επιλογή του αριθμού των πηγαδιών εμπλουτισμού, κάτι που δεν συμβαίνει με τα πηγάδια παρατήρησης (μεγάλος αριθμός). Κάνοντας αρκετές δοκιμές επιτυγχάνεται και επιλέγεται η καλύτερη δυνατή λύση. Στην ακόλουθη ενότητα παρουσιάζονται τα τέσσερα σενάρια που εφαρμόστηκαν στον υδροφορέα της περιοχής της Χερσονήσου καθώς και τα αποτελέσματά τους.

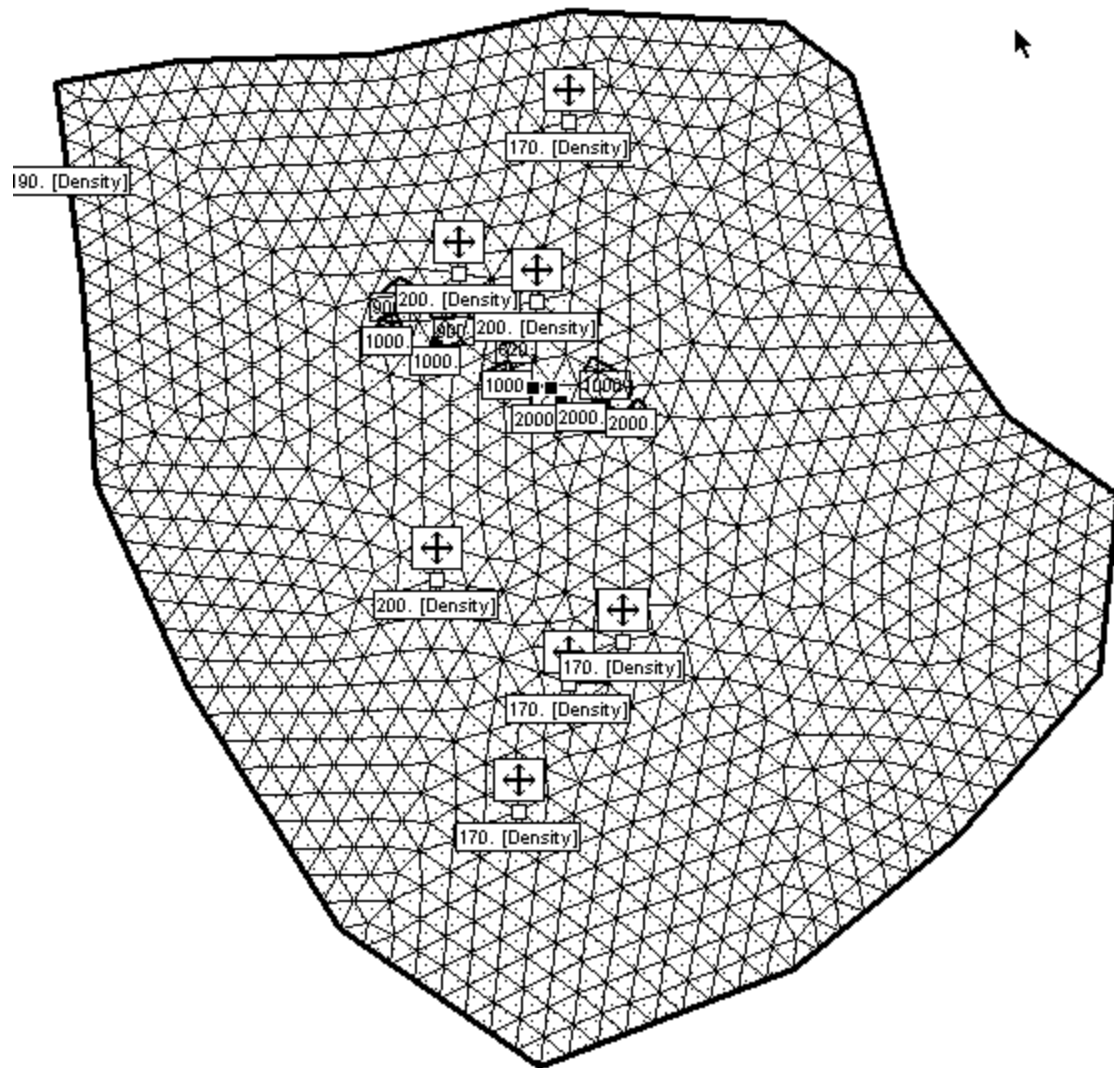
### **8.3 Σενάρια - Αποτελέσματα**

Μετά από πολλές δοκιμές για την εύρεση της βέλτιστης λύσης με την χρήση του μοντέλου ΟΑ, προέκυψαν τα ακόλουθα τέσσερα σενάρια:

#### **✓ 1<sup>ο</sup> σενάριο**

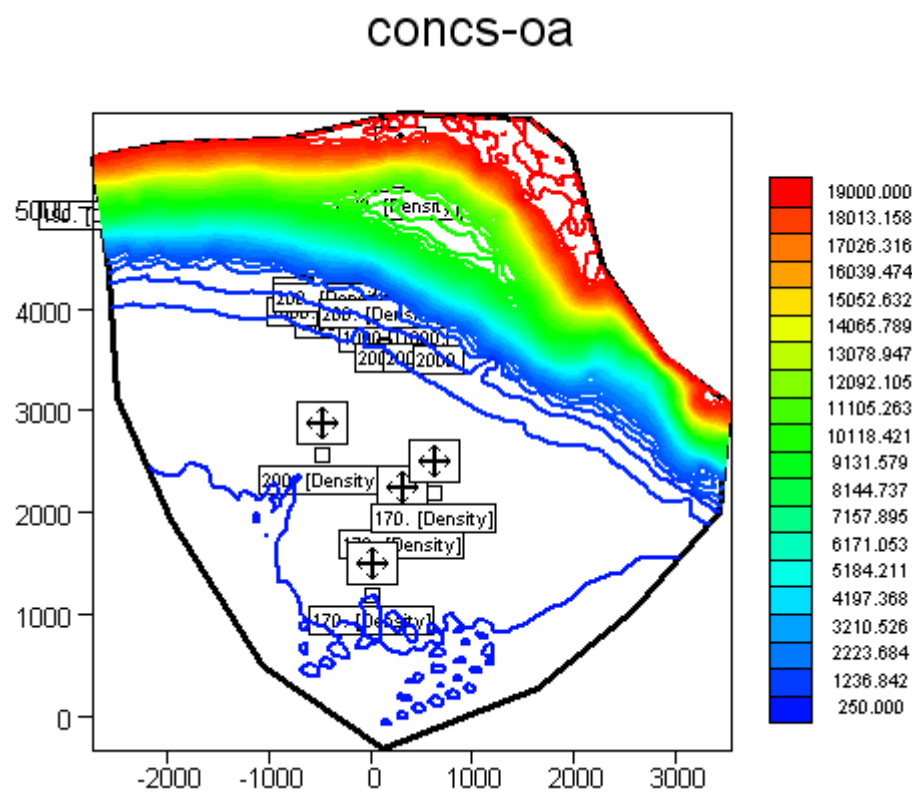
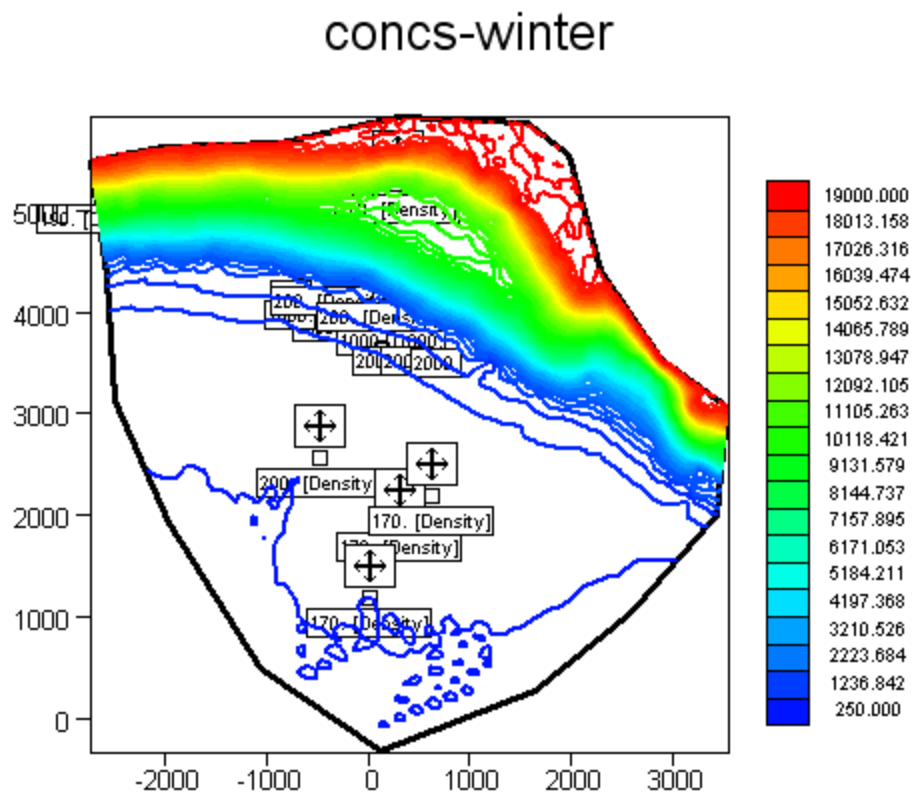
Στο πρώτο σενάριο έχουν επιλεγεί και τοποθετηθεί έξι πηγάδια εμπλουτισμού με ανώτερο όριο παροχής τα 2000 m<sup>3</sup>/day σε τρία από αυτά και τα 1000 m<sup>3</sup>/day στα άλλα τρία. Τα πηγάδια παρατήρησης είναι τέσσερα και έχουν ανώτερο όριο συγκέντρωσης 900, 900, 820 και 1000 ppm αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά φαίνονται πιο συγκεκριμένα στο σχήμα που ακολουθεί.

Σχήμα 8.2 : Αναπαράσταση του 1<sup>ου</sup> σεναρίου



Μετά από αυτή την δοκιμή, τα αποτελέσματα που έδωσε το μοντέλο ΟΑ φαίνονται στις διαφορές που παρουσιάζουν τα διαγράμματα των συγκεντρώσεων των χλωριώντων:

Σχήμα 8.3 : Διαγράμματα της συγκέντρωσης των χλωριδίων του 1<sup>ου</sup> σεναρίου πριν και μετά τον εμπλουτισμό



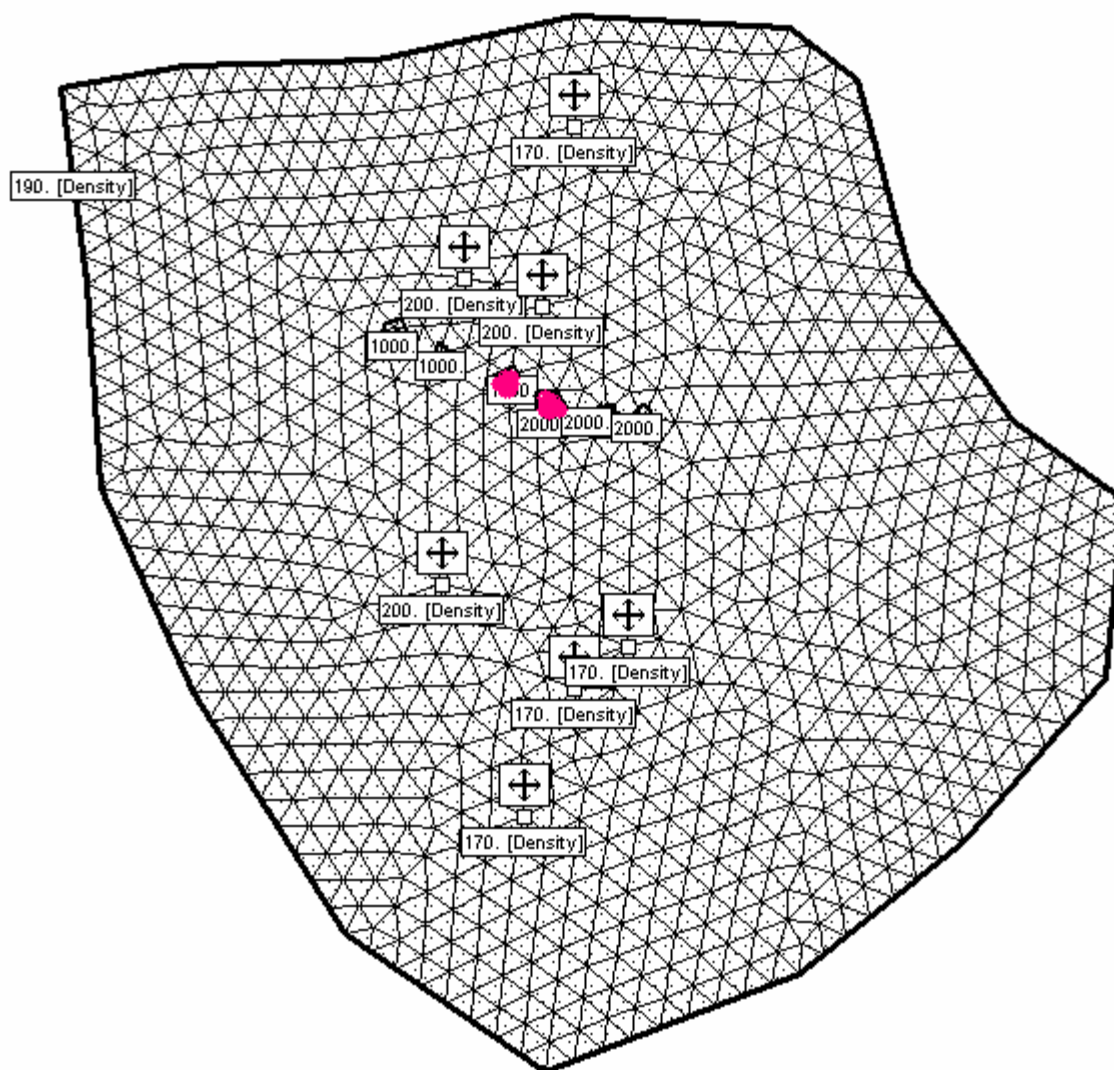
Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι τα ακόλουθα:

**Σχήμα 8.4 :** Η λύση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του 1<sup>ου</sup> σεναρίου

```
step=          1          7
step=          2         12
step=          3         20
step=          4         31
optimal solution was found
x(          1)= 0.0000000000000000E+000
x(          2)= 0.0000000000000000E+000
x(          3)= 1000.000000000000
x(          4)= 499.999949970516
x(          5)= 0.0000000000000000E+000
x(          6)= 0.0000000000000000E+000
objective value = 380000.0
```

δηλαδή ο αλγόριθμος της ΟΑ ενεργοποίησε μόνο τα δύο από τα έξι πηγάδια εμπλουτισμού, με τιμές παροχής 1000 και 499.9 m<sup>3</sup>/day (σχήμα 8.5) και τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (κόστος) τα 380000 €.

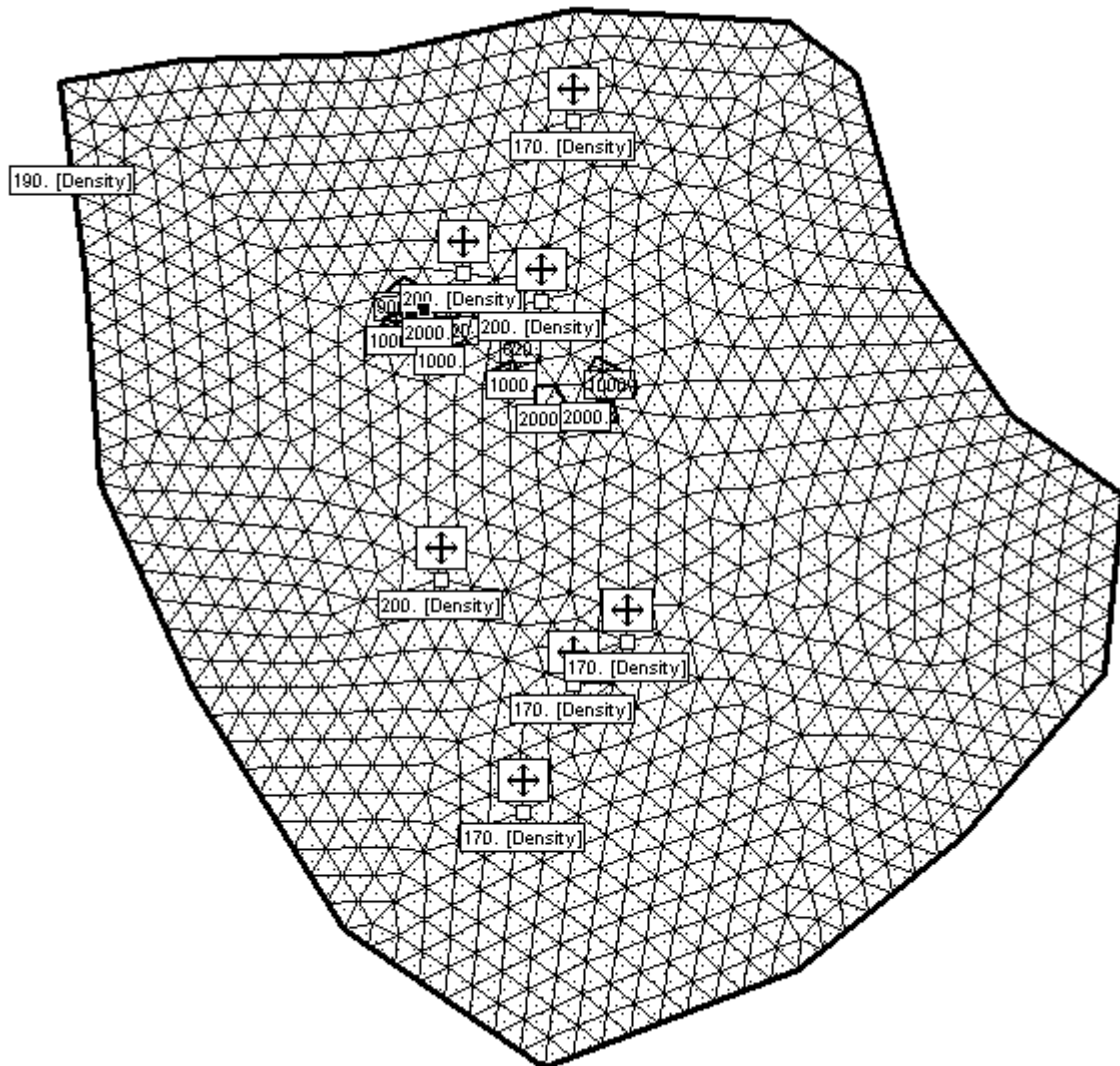
**Σχήμα 8.5 :** Εικόνα των πηγαδιών εμπλουτισμού που ενεργοποίησε το μοντέλο



### ✓ 2<sup>ο</sup> σενάριο

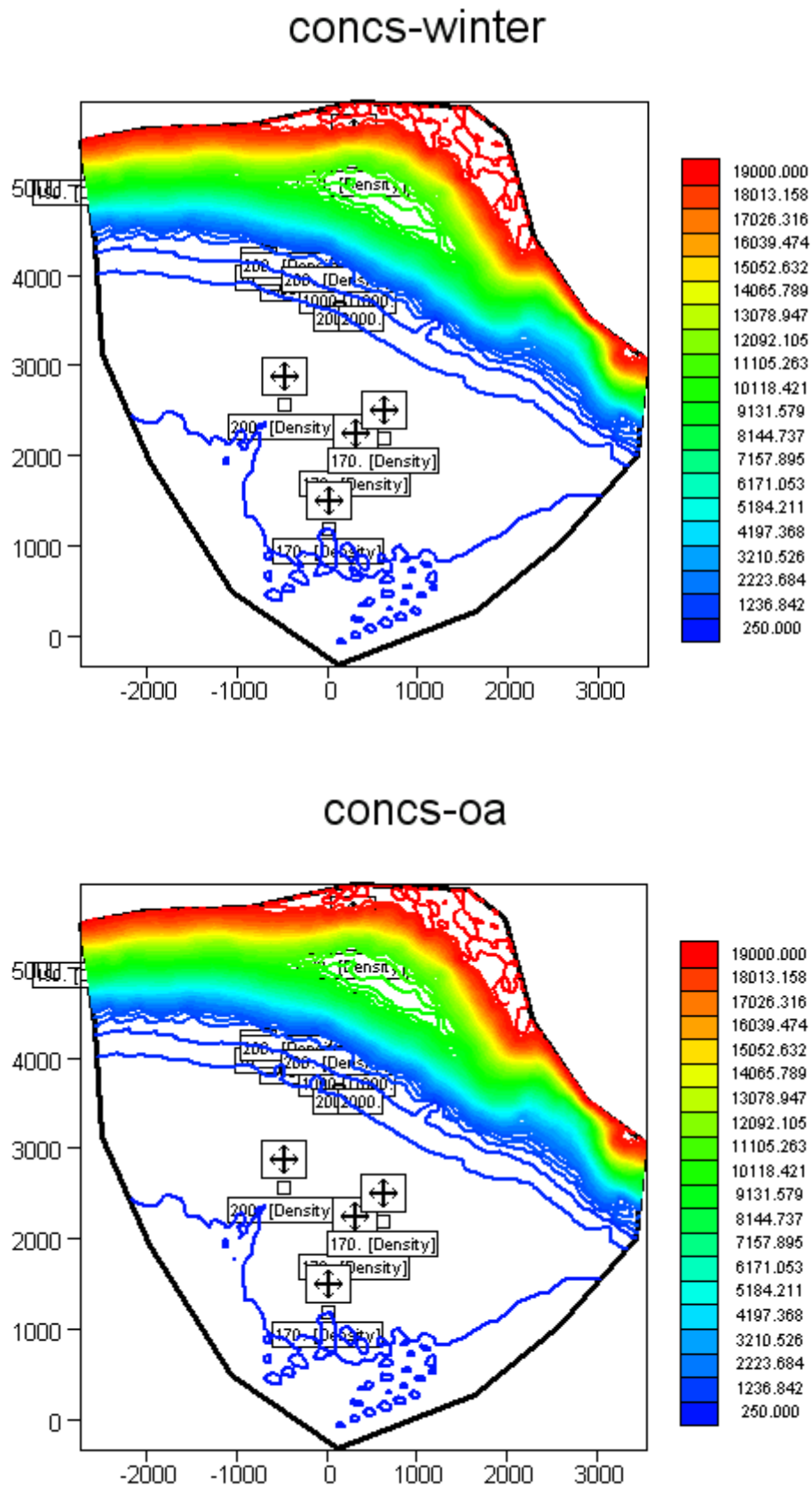
Στο 2<sup>ο</sup> σενάριο έχουν τοποθετηθεί πάλι πηγάδια εμπλουτισμού με ανώτερο όριο παροχής 1000 και 2000 m<sup>3</sup>/day και με διαφορετική διάταξη. Επίσης οι περιορισμοί συγκέντρωσης στην περιοχή αυτή έγιναν πιο σκληροί προκειμένου να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα.

**Σχήμα 8.6 : Αναπαράσταση του 2<sup>ου</sup> σεναρίου**



Τα διαγράμματα των συγκεντρώσεων των χλωριώντων είναι τα ακόλουθα:

Σχήμα 8.7 : Τα διαγράμματα των συγκεντρώσεων των χλωριόντων του 2<sup>ου</sup> σεναρίου



Τα αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> σεναρίου είναι:

**Σχήμα 8.8 :** Η λύση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του 2<sup>ου</sup> σεναρίου

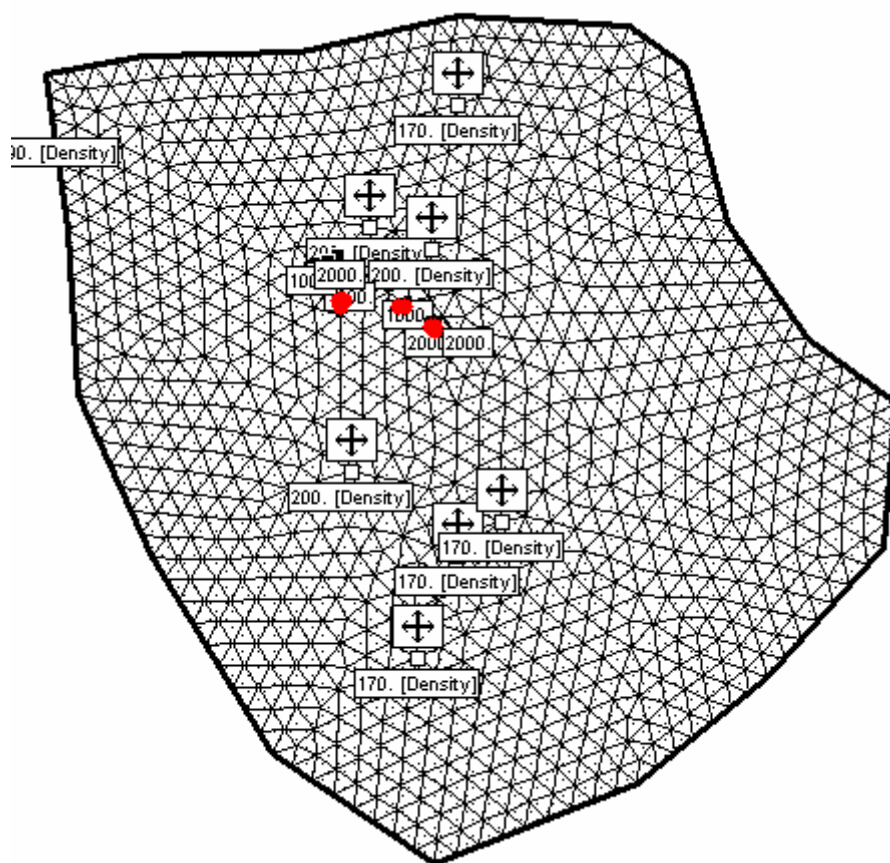
```

step=      1      7
step=      2     12
step=      3     20
step=      4     31
step=      5     43
step=      6     60
step=      7     84
step=      8    103
step=      9    119
step=     10    130
step=     11    144
step=     12    171
step=     13    165
step=     14    193
step=     15    225
Optimal solution was found
x(      1)= 0.000000000000000E+000
x(      2)= 0.000000000000000E+000
x(      3)= 1000.000000000000
x(      4)= 981.476110439790
x(      5)= 120.128428790533
x(      6)= 0.000000000000000E+000
objective value = 564064.2

```

δηλαδή ο αλγόριθμος του μοντέλου ενεργοποίησε τρία πηγάδια εμπλουτισμού με τιμές παροχής 1000, 981.476 και 120.128 m<sup>3</sup>/day (σχήμα 8.8) και τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 564064.2 €.

**Σχήμα 8.9 :** Εικόνα των πηγαδιών εμπλουτισμού που ενεργοποίησε το μοντέλο



### ✓ 3<sup>ο</sup> σενάριο – 4<sup>ο</sup> σενάριο

Προκειμένου να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα δημιουργήθηκαν ακόμα δύο σενάρια τα οποία είναι ακριβώς ίδια (ίδια πηγάδια εμπλουτισμού, ίδια πηγάδια παρατήρησης) με τα προηγούμενα. Η μόνη διαφορά είναι ότι σε αυτά προστέθηκαν δύο πηγάδια άντλησης που δεν υπήρχαν και τα οποία δεν αποτελούν μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης. Τα πηγάδια αυτά αντλούν συνέχεια 500 m<sup>3</sup>/day. Ο ρόλος τους είναι να αντλούν ένα μέρος του νερού που κινείται και έτσι να διευκολύνουν τα πηγάδια εμπλουτισμού.

Στην περίπτωση του 3<sup>ου</sup> σεναρίου που είναι ίδιο με το 1<sup>ο</sup>, η άντληση δεν επηρέασε καθόλου τον υδροφορέα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ακριβώς τα ίδια.

Στο περίπτωση του 4<sup>ου</sup> σεναρίου, η λύση είναι η ακόλουθη:

#### Σχήμα 8.10 : Η λύση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του 4<sup>ου</sup> σεναρίου

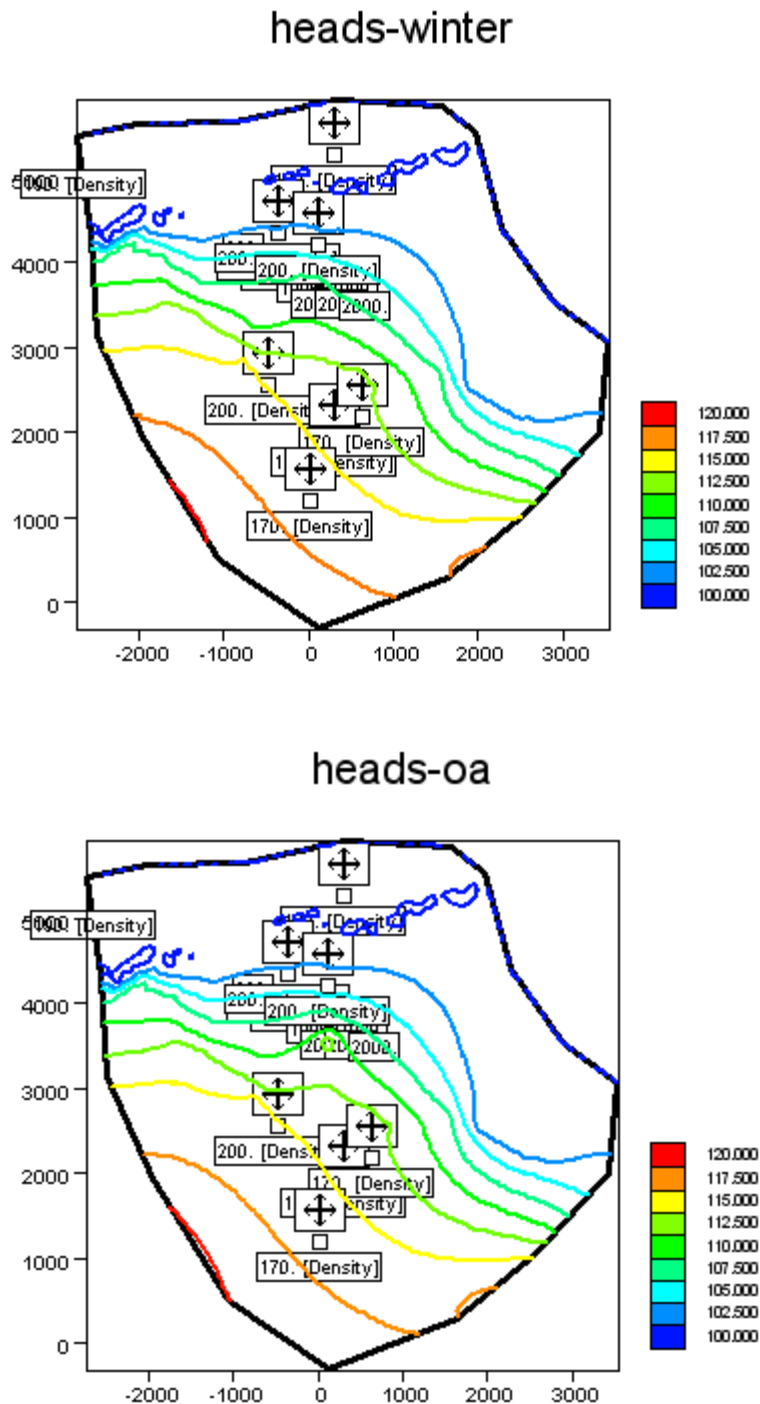
```
step=          1          7
step=          2         12
step=          3         20
step=          4         31
step=          5         43
step=          6         60
step=          7         84
step=          8        103
step=          9        119
step=         10        130
step=         11        144
step=         12        171
step=         13        165
step=         14        193
Optimal solution was found
x(          1)= 0.0000000000000000E+000
x(          2)= 0.0000000000000000E+000
x(          3)= 1000.000000000000
x(          4)= 994.303145629993
x(          5)= 68.8202880297188
x(          6)= 0.0000000000000000E+000
objective value = 562524.9
```

Όμοια με το 2<sup>ο</sup> σενάριο, το μοντέλο ενεργοποίησε τα ίδια πηγάδια, με μόνη διαφορά την αλλαγή των τιμών της παροχής, 994.303 και 68.820 m<sup>3</sup>/day στο τέταρτο και πέμπτο πηγάδια αντίστοιχα.

Μετά την αναλυτική παρουσίαση της εξέλιξης της συγκέντρωσης των χλωριώντων μέσω των αναλυτικών διαγραμμάτων, είναι αναγκαίο να παρουσιαστούν και τα διαγράμματα των υδραυλικών υψών. Σε όλα τα σενάρια εφαρμόστηκε εμπλουτισμός με αποτέλεσμα τα υδραυλικά ύψη να αυξηθούν ως ένα βαθμό σε όλες τις

περιπτώσεις. Ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα των υδραυλικών υψών που αντιστοιχεί στο 1<sup>ο</sup> σενάριο είναι τι ακόλουθο:

**Σχήμα 8.11 : Τα διαγράμματα των υδραυλικών υψών του 1<sup>ου</sup> σεναρίου**



#### 8.4 Σχόλια - Παρατηρήσεις

Αρχικά θα πρέπει να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που έδωσαν τα τέσσερα σενάρια που εφαρμόστηκαν. Μελετώντας, λοιπόν, τα διαγράμματα των χλωριώντων του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> σεναρίου, είναι εμφανές ότι το δεύτερο σενάριο ήταν περισσότερο αποτελεσματικό από το πρώτο δεδομένου ότι ενεργοποιήθηκαν τρία πηγάδια έναντι δύο. Είναι λογικό, λοιπόν, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (κόστος) λόγω εγκατάστασης ενός ακόμα πηγαδιού να είναι μεγαλύτερη.

Στην περίπτωση του 4<sup>ου</sup> σεναρίου όπου τοποθετήθηκαν στον υδροφορέα και δύο πηγάδια άντλησης, ενεργοποιήθηκαν τα ίδια πηγάδια με αυτά του 2<sup>ου</sup> σεναρίου με λίγο μειωμένες τιμές παροχής καθότι βοηθήθηκαν από τα πηγάδια άντλησης. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των τεσσάρων σεναρίων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Σενάρια	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Κόστος
1 <sup>ο</sup>	0	0	1000	499.998	0	0	380000.0
2 <sup>ο</sup>	0	0	1000	981.476	120.128	0	564064.2
3 <sup>ο</sup>	0	0	1000	499.998	0	0	380000.0
4 <sup>ο</sup>	0	0	1000	994.303	68.82	0	562524.9

Παρατηρώντας τον πίνακα είναι εμφανές ότι και στα τέσσερα σενάρια ενεργοποιούνται τα ίδια σχεδόν πηγάδια, γεγονός που δικαιολογεί τις μικρές διαφορές που έχουν οι τιμές του κόστους.

Στη συνέχεια σχολιάζοντας τα αποτελέσματα συνολικά είναι γεγονός ότι οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν δεν ήταν ιδιαίτερα έντονες και καθοριστικές. Στο σημείο όμως αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι το χρονικό διάστημα για το οποίο εφαρμόστηκε το μοντέλο είναι πολύ μικρό (έξι μήνες) για να μπορέσει να δώσει μια λύση για την αντιμετώπιση ενός φαινομένου τέτοιας έκτασης.

Σε αυτά τα αποτελέσματα συνέβαλε καθοριστικά και η γεωλογία της περιοχής. Πρόκειται για μια περιοχή που αποτελείται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, βιοκλαστικούς λατυποπαγείς ασβεστόλιθους, άργιλο, πετρώματα με χαμηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που εμποδίζουν την αναχαίτιση του μετώπου της υφαλμύρωσης.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τους παραπάνω ανασταλτικούς παράγοντες, τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση του μοντέλου ΟΑ μπορούν να χαρακτηριστούν ικανοποιητικά και είναι αποδεκτά προκειμένου να εμποδίσουν την περαιτέρω εξάπλωση του φαινομένου της υφαλμύρωσης αλλά και να συμβάλλουν κατά ένα μικρό βαθμό στον περιορισμό του φαινομένου.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Καρατζάς Γ., Σημειώσεις μαθήματος Ροής Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2003

Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003

Στεφανόπουλος Κυριάκος, Διπλωματική εργασία: Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου – Ηρακλείου Κρήτης με Χρήση Προσομοίωσης και Μετρήσεων Πεδίου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Οκτώβριος 2004

Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου. Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης

Φαρσάρη Γιάννα, Πουλίκος Πραστάκος, Δείκτες, ένα εργαλείο για την αειφόρο τουριστική ανάπτυξη. Πιλοτική εφαρμογή στον Δήμο της Χερσονήσου Κρήτης. Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο Κρήτης

Anderson, M.P., W.W. Woessner, Applied Groundwater Modeling: Simulation of flow and adjective transport, Academic Press, 1992

Chester D. Rail, Groundwater Contamination, Technomic Publishing Company, 1989

D.K. Babu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport by Three – Dimensional Groundwater Flows, 1997

George P. Karatzas, Course Notes, Introduction to Groundwater Optimal Design, Dept. of Environmental Engineering, Technical University of Crete, 2000

R. Allan Freeze and John A. Cherry, Groundwater, Prentice Hall Inc, 1979

## ΑΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ INTERNET

[www.water.usgs.gov](http://www.water.usgs.gov)

[www.emy.gr](http://www.emy.gr)

[www.google.com](http://www.google.com)

## ΑΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

George P. Karatzas and George F. Pinder, Groundwater Management Using Numerical Simulation and The Outer Approximation Method for Global Optimization, Water Resources Research, Vol. 29, Pages 3371 - 3378, October 1993

George P. Karatzas and George F. Pinder, The solution of groundwater quality management problems with a non – convex feasible region using a cutting plane optimization technique, Water Resources Research, Vol. 32, Pages 1091 – 1100, April 1996